

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

Tutorial and application guide for high-voltage fuses

Guide explicatif et d'application pour les fusibles à haute tension





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available on-line and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Liens utiles:

Recherche de publications CEI - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

Tutorial and application guide for high-voltage fuses

Guide explicatif et d'application pour les fusibles à haute tension

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XF

ICS 29.120.50

ISBN 978-2-83220-811-3

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.
--

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
0.1 Aims and objectives of this technical report	7
0.2 How to use this technical report.....	7
0.2.1 General	7
0.2.2 Fuse tutorial	7
0.2.3 Application information	7
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Terms, definitions and abbreviations	10
3.1 Terms and definitions	10
3.2 Abbreviations	10
4 Tutorial section.....	10
4.1 A simple introduction to fuses.....	10
4.1.1 General	10
4.1.2 Fuse classifications and terms.....	13
4.1.3 Basic principles of fuse operation	15
4.1.4 Advantages of fuse protection	15
4.1.5 Advantages of current-limiting fuses	16
4.1.6 Types of high voltage fuses	17
4.1.7 Application of fuse types.....	20
4.2 Current-limiting fuses	20
4.2.1 Construction and operation of current-limiting fuses	20
4.2.2 Classification of current-limiting fuses.....	24
4.2.3 Ratings of current-limiting fuses	25
4.2.4 Characteristics of current-limiting fuses	26
4.3 Expulsion fuses	29
4.3.1 General operating principles.....	29
4.3.2 Construction and operation of expulsion fuses.....	30
4.3.3 Classification of expulsion fuses	36
4.3.4 Ratings of expulsion fuses.....	36
4.3.5 Characteristics of expulsion fuses	37
4.4 Other related protective devices	38
4.4.1 General	38
4.4.2 Electronically activated devices	38
4.4.3 Additional types of non-current limiting fuse	40
4.5 Fuse-bases (fuse-mounts or fuse supports).....	41
4.5.1 General	41
4.5.2 Insulation properties	41
4.5.3 Current rating	42
5 Application section	43
5.1 General application information	43
5.1.1 Service considerations	43
5.1.2 Current rating selection	52
5.1.3 Selection of the rated voltage of the fuse.....	52
5.1.4 Coordination between fuses, and between fuses and other protective devices.....	55

5.1.5	Current rating and breaking capacity considerations for fuses in parallel	64
5.1.6	Voltage considerations of fuses in series	65
5.1.7	Fuse recovery voltage withstand.....	66
5.1.8	Partial discharge.....	66
5.2	Typical applications	66
5.2.1	Protection of cables and overhead lines	66
5.2.2	Distribution transformer applications.....	71
5.2.3	Motor-circuit applications.....	86
5.2.4	Capacitor protection applications.....	90
5.2.5	Voltage transformer applications.....	104
5.2.6	Wind power generation applications	105
5.2.7	Current-limiting fuses used in conjunction with mechanical switching devices.....	108
5.3	Installation, operation, maintenance and replacement considerations	111
5.3.1	General	111
5.3.2	Installation guidelines	112
5.3.3	Operation guidelines.....	113
5.3.4	Maintenance considerations	114
5.3.5	Replacement considerations.....	116
5.4	Recycling	118
Annex A (informative) Practical guidelines for thermal de-rating of current-limiting fuses.....		119
Bibliography.....		126
Figure 1 – Fuse pre-arcing time-current characteristic curve		11
Figure 2 – High current interruption by current-limiting fuse and expulsion fuse		13
Figure 3 – Comparison of operating Joule integral (I^2t) versus prospective current for current-limiting fuses and non-current-limiting fuses		17
Figure 4 – Cut-away drawing of typical current-limiting fuse-link of the "DIN" dimensioned type.....		21
Figure 5 – Current ranges for which different fuse classifications are intended.....		24
Figure 6 – Typical cut-off characteristics		27
Figure 7 – Distribution fuse-cutout construction		31
Figure 8 – Types of expulsion fuse		34
Figure 9 – Class B expulsion fuse		35
Figure 10 – Schematic of a commutating type of current-limiter		39
Figure 11 – Schematic of pyrotechnically assisted fuse.....		40
Figure 12 – Description of the terms "up-stream" and "down-stream" fuses.....		56
Figure 13 – Current-limiting fuse/Current-limiting fuse coordination example		58
Figure 14 – Current-limiting fuse/Current-limiting fuse TCC curve example		59
Figure 15 – Current-limiting fuse/Expulsion fuse example		60
Figure 16 – Current limiting fuse/Expulsion fuse TCC curve example.....		60
Figure 17 – Expulsion fuse/Current-limiting fuse example		61
Figure 18 – Expulsion fuse/Current-limiting fuse TCC curve example.....		62
Figure 19 – Reach example		69
Figure 20 – Characteristics relating to the protection of the HV/LV transformer circuit		76

Figure 21 – An example of matched melt coordination	81
Figure 22 – An example of time-current crossover coordination	84
Figure 23 – Fuse "no-damage" margin	85
Figure 24 – Characteristics relating to the protection of a motor circuit	90
Figure 25 – An example of capacitor case rupture curve characteristics.....	102
Figure A.1 – Derating curves for some allowed temperature limits	122
Figure A.2 – Practical example: dimensions.....	123
Figure A.3 – Extract from IEC 60890.....	124
Figure A.4 – Practical example of application.....	125
Table 1 – Common types of current-limiting fuse.....	18
Table 2 – Common types of expulsion fuse	19
Table 3 – Types of non-current-limiting fuse	19
Table 4 – Fuse-related devices	19
Table A.1 – Contact Temperature limits extracted from Table 6 of IEC 60282-1:2009	122

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

TUTORIAL AND APPLICATION GUIDE FOR HIGH-VOLTAGE FUSES

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 62655, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 32A: High-Voltage Fuses, of IEC technical committee 32: Fuses

The text of this technical report is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
32A/296/DTR	32A/301/RVC

Full information on the voting for the approval of this technical report can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

Significant portions of this technical report were excerpted and reprinted with permission from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, (IEEE) from C37.48.1-2012, "IEEE Guide for Operation, Classification, Application, and Coordination of Current-Limiting Fuses with Rated Voltages 1-38kV", Copyright 2002 IEEE, all rights reserved, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854.

Acknowledgments:

The Working Group thanks the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, (IEEE) for permission to reproduce information from its global Standards IEEE C37.48.1-2012. All such extracts are copyright of IEEE, Piscataway, New Jersey. All rights reserved. Further information on the IEEE is available from www.standards.ieee.org. IEEE has no responsibility for the placement and context in which the extracts and contents are reproduced by the authors, nor is IEEE in any way responsible for the other content or accuracy therein.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

0.1 Aims and objectives of this technical report

- a) To help prospective users and protection engineers understand the basics of high-voltage (>1 000 V a.c.) fuse technology and applications involving high-voltage (HV) fuses;
- b) to illustrate the particular and unique advantages of fuse protection for most service applications;
- c) to minimise possible misapplications of fuses which could lead to problems in the field;
- d) to list and describe the many types of fuse in use today, and the international standards that apply to them, including fuse types not specifically included in IEC or other recognized standards.

This technical report gathers information previously published in IEC and other publications, as well as new material. Duplicate information presently in these publications is therefore likely to be eliminated during their future revision.

0.2 How to use this technical report

0.2.1 General

If read from start to finish, this technical report will provide an in-depth study of HV fuses and their applications. It is essentially a tutorial covering all common (and some not so common) types of fuses and most fuse applications. However, it is assumed that few users will read the technical report in this way, but rather read the appropriate sections covering fuses and applications for which they require information. Based on this assumption, there is therefore some inevitable duplication of information. To assist the user in making best use of the document, a description of the content and relevance of each clause follows.

0.2.2 Fuse tutorial

After clauses on scope, references and definitions, Clause 4 contains primarily "tutorial" style information. The clause starts with a simple introduction to fuses, first with an explanation of how fuses work followed by information on basic fuse classifications and common fuse terms. Subclause 4.1.4 continues with lists of advantages gained by using fuses and then 4.1.6 provides a listing of basic fuse types for which application information will be given later. An in-depth look at the most common types of fuses is given in 4.2, current-limiting fuses and 4.3 expulsion fuses. The high level of detail given in 4.2 and 4.3, including information describing construction, operation, classification and published ratings and characteristics, may be necessary in order to understand the application information that follows in Clause 5. For completeness, 4.4 gives an overview of less common types of fuse (or fuse related) devices that may require additional testing to that covered in existing standards, and for which no further application information is provided. Subclause 4.5 covers fuse mountings.

0.2.3 Application information

Application information appears in Clause 5 and Annex A, and is split into four sections.

- a) Subclause 5.1: this covers information common to nearly all applications.
- b) Subclause 5.2: this contains information on specific applications.
- c) Subclause 5.3: this covers installation, operation, maintenance, and replacement of fuses.
- d) Annex A: this reproduces the current-limiting fuse temperature de-rating information previously published in IEC 60282-1:2009.

If a knowledgeable user requires application information on a specific subject in 5.2 (e.g. motor circuit fuses), it is possible that only the relevant subclause needs to be read – however in most cases additional information from 5.1 will be required for satisfactory fuse selection. It should be emphasized that the information contained in this report is intended to supplement

information supplied by the manufacturer of a fuse and not replace it. If there is any doubt or conflict of information, the fuse manufacturer should be consulted.

TUTORIAL AND APPLICATION GUIDE FOR HIGH-VOLTAGE FUSES

1 Scope

This technical report provides information for understanding the construction, operation and application of high-voltage fuses in general. Current-limiting, expulsion, electronic, and other, non-current-limiting, fuses rated above 1 kV a.c. are all covered, as are North American, European and other application practices. As a technical report, this document contains no requirement and is informative only.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60038, *IEC standard voltages*

IEC 60071-1, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-7, *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*

IEC 60076-12, *Power transformers – Part 12: Loading guide for dry-type power transformers*

IEC 60282-1:2009, *High-voltage fuses – Part 1: Current-limiting fuses*

IEC 60282-2:2008, *High-voltage fuses – Part 2: Expulsion fuses*

IEC 60549, *High-voltage fuses for the external protection of shunt power capacitors*

IEC 60644, *Specification for high-voltage fuse-links for motor circuit applications*

IEC/TR 60890:1987, *A method of temperature-rise assessment by extrapolation for partially type-tested assemblies (PTTA) of low-voltage switchgear and controlgear*

IEC 60909-0, *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents*

IEC 62271-100:2012, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating current circuit-breakers*

IEC 62271-102, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches*

IEC 62271-103, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 103: Switches for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV*

IEC 62271-105:2012, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 105: Alternating current switch-fuse combinations for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV*

IEC 62271-106, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 106: Alternating current contactors, contactor-based controllers and motor-starters*

IEC 62271-107, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 107: Alternating current fused circuit-switchers for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV*

3 Terms, definitions and abbreviations

3.1 Terms and definitions

For the purpose of this document, the terms and definitions contained in IEC 60282-1:2009 and IEC 60282-2:2008 apply.

3.2 Abbreviations

The following abbreviations are used in this document:

A^2s – Amperes-squared-seconds, also $A^2 \times s$, the unit of Joule integral (I^2t , see 4.2.4.4)

CL – Current-limiting

CLF – Current-limiting fuse

FEP – Fuse enclosure package

HV – High-voltage

I_{encl} – de-rated current (of a fuse in an enclosure)

I_r – Rated current (of a fuse)

u_c – TRV peak voltage in kV

t_3 – Time in microseconds to voltage u_c

I_1, I_2, I_3 – Prospective current in test Duty 1, Test Duty 2, and Test Duty 3 of IEC 60282-1, respectively

MAT – Maximum application temperature

TCC¹ – Time-current characteristic

TRV – Transient recovery voltage

4 Tutorial section

4.1 A simple introduction to fuses

4.1.1 General

Fuses have been in use since the very beginnings of electrical power distribution. While the true inventor of the fuse is not known, pioneers of electrical distribution soon incorporated them as "weak points" in their circuits to prevent overheating of wiring, due to excessive

¹ Footnote 1 applies only to the French version.

current, and to prevent damage to fragile lamps from fluctuations in voltage. Fuses rapidly developed into devices able to sense a current higher than normal and quickly interrupt (break) that current, all in a self-contained easily replaceable unit. Although the variety and complexity of fuses has grown to the point where user's guides, such as this one, are necessary, fuses still provide the highest degree of protection for the lowest initial cost.

The simplest definition of a "fuse" is that it is a device that carries current through a conductive part called the fuse element that, when the fuse is subjected to an excessive current, melts due to self-heating and initiates the interruption of the current. All conventional fuses interrupt current after some arcing across breaks in the element produced by the melting process. The melting time of a fuse is therefore also termed the "pre-arcing" time. A characteristic of fuses is that, because current interruption is initiated by a melting process, there are almost no "mechanical" aspects involved in their arc initiation. Fuses therefore have a very inverse time-current relationship (higher currents giving shorter pre-arcing times) as illustrated in Figure 1. This enables extremely short pre-arcing times at high currents, virtually without limit. It is this apparently simple phenomenon that is primarily responsible for the universal success fuses have enjoyed for a very long time.

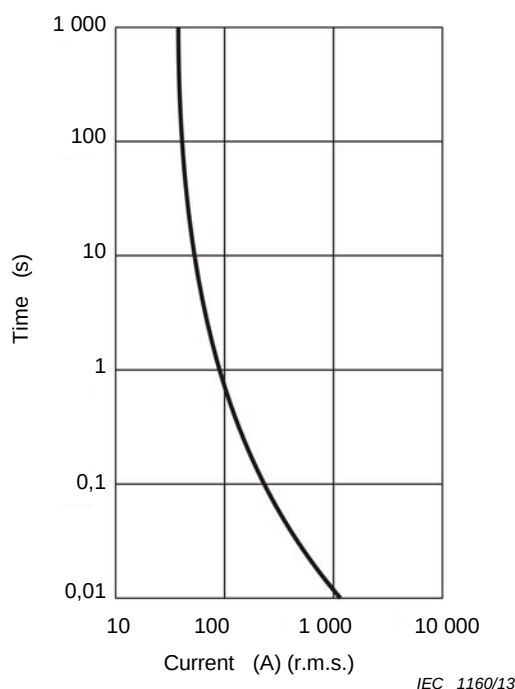


Figure 1 – Fuse pre-arcing time-current characteristic curve

In general, high-voltage fuses (defined as fuses rated above 1 000 V a.c.) are physically larger and generally more complex than low voltage fuses due to their need to operate at much higher voltages. HV fuses may perform one or both of two primary functions. The first function is to respond to moderately excessive currents, typically termed "overload" currents. In this case, the rated current of the fuse (the current it is designed to be capable of carrying indefinitely without deterioration) is exceeded by a relatively modest amount (typically less than 10 times). Such currents can be caused by too much load being connected to a circuit, or by a fault that by-passes only part of the load. It should be noted that not all types of fuses are designed to have the ability to operate successfully if melted by a very low overcurrent as some types are intended only for operation at high currents (see 4.1.2.1). If melted by a low current, such fuses may arc until a series device interrupts, possibly resulting in physical damage to the fuse and its surroundings. However, some fuses of this type can quickly initiate another device to interrupt such current, containing the arcing without damage until the second device interrupts.

The second function, which virtually all fuses are designed to perform, is to respond to overcurrents that are much higher, and that are usually termed "short-circuit" currents. In this case substantially all of the load is by-passed by a major fault and the available current (which, when not limited by a protective device, is termed the "prospective current") can be very high. However different types of fuse vary widely in exactly how high a current they can interrupt, and this may be a significant factor in choosing a fuse type for a particular application. The ways in which fuses respond to high and low overcurrents, as well as the ways in which they actually interrupt the current, causes HV fuses to be classified in various ways.

The first main classification is into "current-limiting" and "non-current-limiting" types (although because almost all commonly used non-current-limiting fuses are expulsion fuses, "expulsion fuse" is usually the term used in preference to "non-current-limiting"). "Current-limiting" (CL) describes a class of fuses defined by the behaviour that occurs when the current is so high that the fuse element melts before the first peak of the fault current (that is in less than a few ms). Upon melting, this type of fuse introduces resistance into the circuit so rapidly that the current stops rising and instead is forced quickly to zero (before a natural current zero would occur). Because the maximum prospective peak current is not reached, the fuse limits the current in magnitude as well as duration hence the "current-limiting" name. The current-limiting action is shown in Figure 2a. Note that during operation, the current-limiting fuse introduces a "spike" of overvoltage (the fuse switching voltage) into the system during the current-limiting action as shown in Figure 2a.

An expulsion fuse, melting under the same circumstances, introduces only a small resistance into the circuit, so the current continues to virtually the same peak as would occur if the fuse had not melted. An expulsion action (that is where gas is generated by the arc and expelled along with ionized material) produces a physical gap such that, at a natural current zero, the arc does not reignite and the current is interrupted. This type of fuse therefore limits the duration of a fault but not its magnitude. This action is illustrated in Figure 2b. For an explanation of TRV see 4.2.1.2).

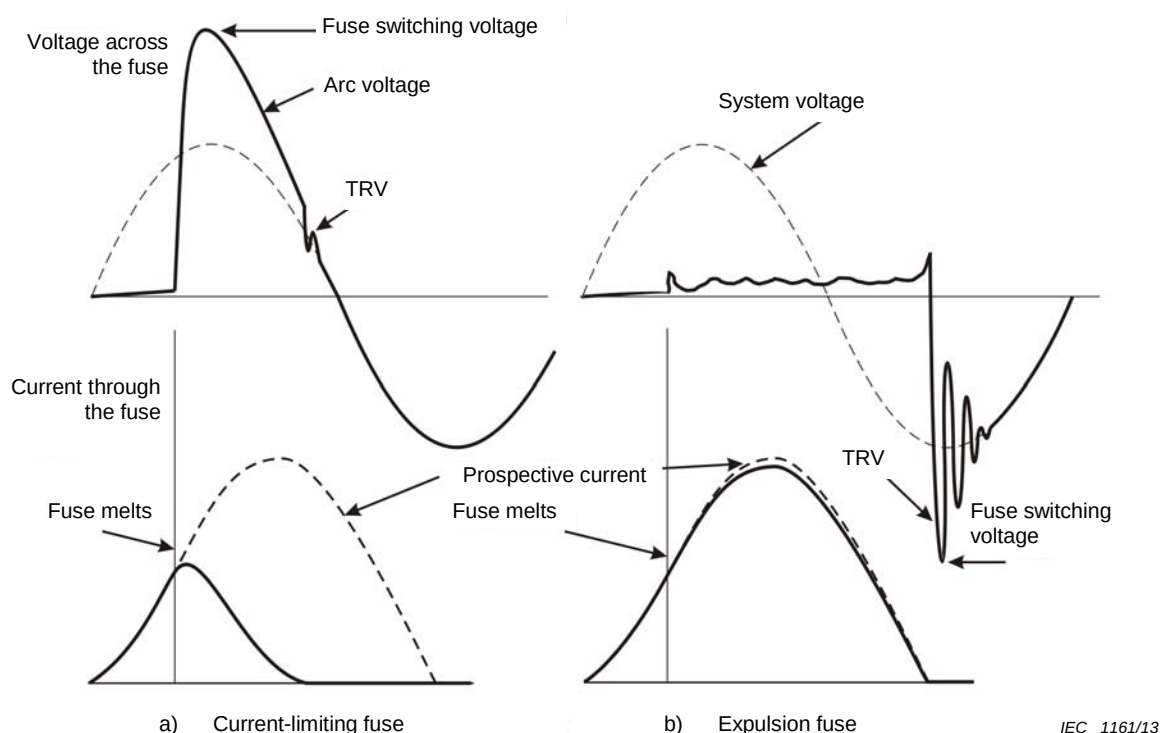


Figure 2 – High current interruption by current-limiting fuse and expulsion fuse ²

4.1.2 Fuse classifications and terms

4.1.2.1 Current-limiting fuse classifications

The ability of different types of CL fuse to interrupt currents lower than those that produce a current-limiting action result in different classes of CL fuse. Some CL fuses are designed to interrupt only high currents (i.e. their primary function is to provide a current-limiting action). They therefore have a limited low current interrupting ability and are termed "Back-Up" fuses. They are usually used in conjunction with another device in series; such devices include switches (most commonly tripped by a striker in a "switch-fuse combination", see 5.2.7.2), contactors, circuit breakers or another fuse having a lower current interrupting ability. It may be considered that they are "backing up" this other device and in addition to the important current-limiting function, also usually provide increased interrupting capability. This is because the series device frequently has a limited interrupting capability while Back-Up fuses can normally interrupt very high currents i.e. they have a very high "rated maximum breaking current".

High-voltage fuses having the ability to interrupt low values of overcurrent as well as high short-circuit currents are classed as either "General-Purpose" or "Full-Range" types. The term "General-Purpose" (which has historical origins, being used before Full-Range fuses were introduced) does not mean that the fuse can be used for any sort of application but merely that the fuse is designed to clear low values of fault/overload current. Testing is performed by the fuse manufacturer to show that fuse-links classed as General-Purpose can clear currents down to a value that causes melting of the fuse element in 1 h or more. This means that General-Purpose fuses can be used with overload currents that will cause them to melt in times of up to one hour, but no longer. The term "Full-Range" is used for the Class of fuse

² IEEE Std C37.48.1 -2012, "IEEE Guide for Operation, Classification, Application, and Coordination of Current-Limiting Fuses with Rated Voltages 1-38kV" - Reprinted with permission from IEEE, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997 USA, Copyright 2002, by IEEE.

designed to clear even lower values of fault/overload current; in fact any continuous current that causes the fuse element to melt must be interrupted by such a fuse. Full-Range fuses are often used in enclosures, sometimes with the enclosure at elevated temperatures; both factors can reduce the lowest current that causes them to melt, and Full-Range fuse test methods reflect this.

4.1.2.2 Current-limiting fuse terminology

There now follows an explanation of common terminology relating to fuses used in fuse standards and in this report. A fuse is defined as all the parts that form a complete device, which is everything needed to connect it into a circuit. After operation, at least some of a fuse must be replaced to return the protection to "as new" condition. The part that is replaced after operation is called the "fuse-link", and is the part that performs the active function of current carrying and interruption. In some usage (IEEE standards for example) fuse-link refers only to the replaceable part of a distribution fuse-cutout (see 4.3.2.1.1). Current-limiting fuse-links are often termed "cartridge fuses". This is because they are almost always cylindrical in shape and contain the fuse element surrounded by an arc absorbing filler, usually quartz sand.

A complete CL fuse may employ a fuse-base (sometimes called a fuse support or fuse-mount). This base usually consists of clips and spade terminals, which are in turn mounted on insulators. They are used with a fuse-link having ferrules that fit in the clips. Cables or bus-bars attach to the terminals. This type of fuse is still extensively in use, normally in "live-front" gear (that is equipment that would have live conductors accessible if the access doors can be opened with the equipment live). Alternatively, fuse-links may be found installed in canisters (that is relatively tight fitting enclosures) or be moulded into rubber or epoxy for use with cables in submersible/dead-front installations ("dead-front" meaning that no live conductors are exposed). They are also used under oil, either in quite elaborate fuse-holders (for ease of replacement) or in simple cradles inside transformers when they do not have to be replaced by the user (see 5.2.2.6.4).

In some cases the fuse-link is also the fuse, that is it may include all of the components necessary for connection into a circuit, e.g. if the fuse-link has tags or spade/eyebolt terminals. An example of this method of mounting is an external CL fuse that may be hung from an overhead line or mounted on a distribution fuse-cutout or transformer insulator (in which case the cutout or insulator substitutes for the "fuse base").

4.1.2.3 Expulsion fuse classifications and terminology

Expulsion fuses are divided into two classes Class A and Class B (in some parts of the world called "Distribution Class" and "Power Class"). The majority of Class A fuses are of a specific fuse type called "distribution fuse-cutouts". They are characterized by a fuse base that holds a fuse-carrier. The fuse carrier is lined with arc quenching material and holds a fuse-link. The link initiates the arcing and the fuse-carrier provides for arc elongation and most of the expulsion gas produced at high currents. After the expulsion operation, the carrier hangs open giving indication and isolation. Only the fuse-link, comprising a fuse element attached to a flexible cable (tail) and surrounded by a small arc-quenching tube, has to be replaced. Because they are so common, they are often referred to simply as a "cutout" or a "fuse-cutout" and except where otherwise specified, the word "cutout" or "fuse-cutout" used in this document refers to this type of Class A distribution fuse-cutout. There are also designs, called open-link cutouts, that use no fuse-carrier, but rather the fuse-link contains all the parts necessary to connect to the fuse-base. They have quite low maximum breaking currents. There is a third type of Class A expulsion fuse, common in some countries. It is termed an enclosed fuse-cutout. This has all of the live parts enclosed in a housing (usually made of porcelain). They may be of a drop-out design but commonly are not. Additional types of Class A expulsion fuses include those intended for capacitor applications, and those that surround the fuse element with a liquid.

Class B fuses (sometimes termed "Power Fuses") are designed for circuits having lower power factor and higher Transient Recovery Voltage (TRV, see 4.2.1.2) values than Class A,

and the fuses normally have higher maximum breaking currents. The fuse-link tends to be more elaborate than that of a distribution fuse-cutout and may constitute most, if not all, of the fuse carrier. Some designs use a renewable fuse-link that, after operation, may be restored by means of installing a refill unit (containing an element and arc-quenching material). Unlike distribution fuse-cutouts, not all Class B expulsion fuses drop to an open position after operation.

4.1.3 Basic principles of fuse operation

The following basic principles of fuse operation are common to all types of fuse, both current-limiting and non-current-limiting varieties.

In its passive or current-carrying mode, a fuse must be capable of carrying load current and permissible cyclic or transient overloads without deterioration essentially indefinitely (with a service life often measured in decades, see 5.1.1.7). When load current is passing through the fuse, its element temperature rises but as heat is dissipated to its surroundings, the temperature stabilises at some value below that at which the element material and connections to the power system would deteriorate. Under these conditions, the heat lost through conduction, convection and radiation exactly balances the heat generated by the current flowing through the fuse resistance.

In its active or fault-interrupting mode, more heat is generated in the fuse element than can be dissipated before its melting temperature is reached. The relationship between current and melting time is described with a time-current characteristic (TCC) curve. An example of a fuse pre-arcing TCC curve is shown in Figure 1. For most fuses, the pre-arcing current becomes asymptotic to the time axis at very long times, and is termed the "minimum fusing current". Standards specify the time to which curves must be drawn, depending on the type of fuse. Not all curves are drawn to a time that shows the minimum fusing current, and not all fuses are capable of interrupting this current (see 4.1.2.1).

Upon melting, a current interrupting (breaking) process occurs that is different according to whether the fuse in question is of the current-limiting or non-current-limiting type. The interrupting process will therefore be described for each type of fuse in the appropriate section of the report.

After the interrupting process, fuses must be capable of withstanding normal system voltage. To assist with this phase of operation, some fuses drop open, providing a visual and physical "gap". This is relatively common with expulsion type fuses, but much less common with current-limiting types.

4.1.4 Advantages of fuse protection

While fuses and other forms of protective device (such as circuit-breakers) all have their own advantages and disadvantages for a given application, fuses do have some unique benefits:

- a) because their operation is initiated by the melting of an element, there is no theoretical limit on how fast they can initiate the interruption process (the faster heat is generated in a fuse element the faster it melts). Generally there are no moving parts that require separation before the interrupting process can be initiated;
- b) rapid operation of fuses under short-circuit fault conditions minimises voltage dips on the system and ensures more effective protection of lines and equipment;
- c) fuses cannot be re-set when blown, thus the user is encouraged to identify and correct the fault condition before re-energising the circuit;
- d) fuses have no, or very few, moving parts that could become damaged by dust, oil or corrosion;
- e) fuse replacement after operation ensures protection is restored to its original state of integrity after circuit interruption unlike mechanical switching devices;

- f) use of fuses usually gives the most economic solution for a high degree of system protection;
- g) specific types of fuse are available for almost every service application.

4.1.5 Advantages of current-limiting fuses

4.1.5.1 General

In addition to the advantages detailed in 4.1.4, fuses of the current-limiting type offer additional important advantages:

- a) limitation of current and energy let-through into the location of the fault ensures maximum protection and minimises the risks of possible fire damage, explosion, or injury to persons;
- b) very high maximum breaking current ensures such fuses can always be employed on a given system even where the system is later modified to give a higher prospective fault level and hence there is no need to incur capital cost in installation of new more expensive protection equipment;
- c) silent operation with no emission of gas, flame or arcing products;
- d) compact size and much lower comparable cost than alternative forms of protection;
- e) ability to reduce the size of cables due to reduced short-circuit stresses;
- f) by reducing the I^2t (see 4.2.4.4 for an explanation of I^2t) flowing due to a fault, thermal stresses on all equipment in the fault circuit are reduced;
- g) since the peak current is reduced, the electro-dynamic forces, resulting from the magnetic fields surrounding the conductors of transformers and other equipment in the fault circuit, are reduced;
- h) because a current-limiting fuse reduces both the peak current and forces the current to zero before the natural current zero of the circuit, the fuse has a specific maximum operating (clearing) I^2t . Since upstream protective devices (see 5.1.4.1) require a minimum I^2t to initiate the interrupting process, it is possible to coordinate the devices to ensure that a failure at one point in a system will not cause operation of an up-stream device, thereby reducing the extent of the overall outage and helping to maintain service reliability.

4.1.5.2 Transformer protection

The most common application of high-voltage current-limiting fuses is for transformer protection. The use of such fuses for the primary-side protection of distribution transformers provides significant advantages due to their current-limiting action. Under most short-circuit conditions, they are able to interrupt fault currents within a few milliseconds after fault initiation. Hence, the prospective peak of the fault current will not be reached and the resulting let-through current and energy will be significantly reduced. This feature, that cannot be achieved by any other relay/switching device combination, makes current-limiting fuses particularly suited for distribution transformer protection since they are able to prevent or minimize any major consequences of internal transformer faults.

Figure 3 illustrates the operating I^2t versus prospective current for a non current-limiting fuse, which interrupts after one fully asymmetrical loop of current, and a current-limiting fuse. In principle, the lowest current rating of current-limiting fuse that meets the coordination requirements of 5.2.2 should be chosen. This is because a smaller fuse-link of a given design will generally have a lower operating I^2t . In the case of a low impedance internal transformer fault that produces a current-limiting action by the fuse-link, the I^2t limitation significantly reduces the likelihood of a disruptive failure, particularly with oil-filled transformers.

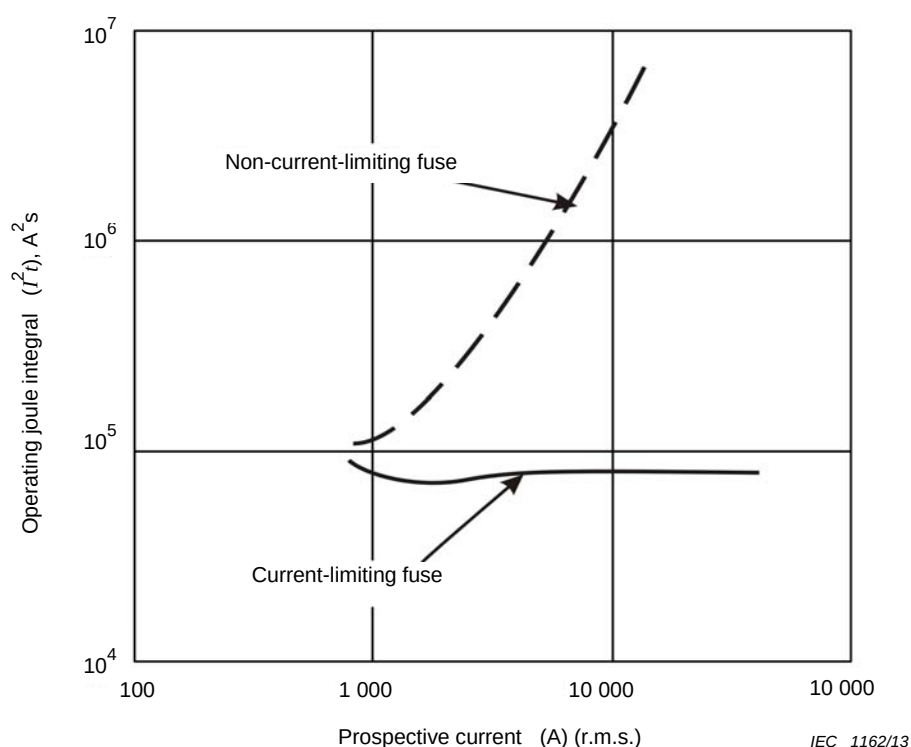


Figure 3 – Comparison of operating Joule integral (I^2t) versus prospective current for current-limiting fuses and non-current-limiting fuses

Experience has shown that the I^2t associated with a current-limiting fuse interruption is often an order of magnitude less than that causing a disruptive transformer failure, hence the effectiveness of current-limiting fuses in reducing the likelihood of such serious incidents.

It should be noted that the disparity in protection ability is even greater when the non-current-limiting device is a circuit breaker, due to the time delay introduced by the processes necessary to achieve current interruption. These are: the time needed for relay/current sensing, the time needed for the circuit-breaker contacts to open, and the time needed for the current to be extinguished. Therefore, in addition to the first loop I^2t , shown in Figure 3, I^2t from additional loops of current, that flow until the fault is interrupted, must be added. This has the effect of shifting the "non-current-limiting fuse" curve in Figure 3 upwards, typically increasing I^2t by a factor of approximately 2,5 times that shown.

Current-limiting fuses are available for the protection of distribution transformers up to approximately 5 MVA. For larger transformers with rated currents up to several thousand amperes, commutating current limiting devices (see 4.4.2.1 for a description) with high rated current can be applied. They are operated by an electronic sensing and triggering unit, which can be adapted to the required protection function. The electronics need to be able to distinguish between the fault current and the inrush current of the transformer.

4.1.6 Types of high voltage fuses

4.1.6.1 General

High voltage fuses of one type or another are available to meet almost every application for protection of high voltage circuits or equipment. It may be said that such fuses usually provide the simplest and most economical solution. There follows a listing of the most common types of fuse and fuse-related devices, that receive coverage in this report. They are grouped under four headings: current-limiting fuses, expulsion fuses, non-current-limiting fuses (that are not expulsion fuses), and fuse-related devices (devices that incorporate fuses into their operation, or are mounted in fuse-bases). A brief description is added for each device and places in the

report where they are addressed can be found in the index. It is believed that some types of device listed are obsolete and/or either not being currently manufactured, or manufactured in very low quantities. Such devices are followed by the word "obsolete". They are covered (if somewhat briefly) in this document because examples may still be found in service, and because they may require replacement by more modern devices.

4.1.6.2 Current-limiting fuses

When this type of fuse melts with a current high enough to cause it to melt before the first natural peak (the threshold current for a particular fuse), it introduces a sufficient resistance into the circuit that the current is quickly reduced to zero. They are enclosed fuses, normally filled with quartz sand, and the higher the fault current above the threshold current, the greater is the percentage reduction in let-through current peak and energy. Table 1 lists the most common types, covered by this report:

Table 1 – Common types of current-limiting fuse

	Type of CL fuse	Brief description
1	Full-Range	Fuses intended to interrupt all currents that cause the fuse to melt, up to the rated maximum breaking current of the fuse.
2	General-Purpose	Fuses intended to interrupt all currents from a low value, equal to a current that causes the fuse to melt in one hour, up to the rated maximum breaking current of the fuse.
3	Back-Up	Fuses intended to interrupt currents from their rated minimum breaking current, up to their rated maximum breaking current.
4	Types 1 – 3 using an indicator or striker	Indicators provide indication of fuse operation; strikers operate on fuse element melting (or at high temperature) typically causing a pin to emerge from the fuse, and trip associated switching equipment.
5	Motor circuit applications ("motor-starter fuses")	Fuses used in circuits that supply motors, and that are subjected to repeated starting surges higher than their rated current.
6	Voltage transformer fuse	Fuses used in the HV circuits of voltage transformers (and typically having very low current ratings).
7	Capacitor fuse	Fuses used to protect capacitors and that are required to interrupt capacitive currents.
8	Types 1 – 7 for use indoors, outdoors or immersed in an insulating liquid	Outdoor fuses may have special dielectric requirements compared to indoor fuses and also requirements for UV protection and/or moisture ingress. Fuses immersed in a liquid have special sealing requirements to avoid liquid ingress.
9	Exothermically assisted triggered fuse (obsolete)	A Full-Range type fuse that used exothermic material to provide multiple element breaks at low currents.

4.1.6.3 Expulsion fuses

These are fuses that work through an expulsion action. After the fuse element melts, an arc is formed, during which ionised material is expelled from a housing with the assistance of gas generated as a result of the arc interacting with components of the fuse. This enables the "gap" so produced to withstand circuit recovery voltage at a current zero. They do not significantly reduce the magnitude of a fault current, only its duration, and so are also called "non-current-limiting" fuses. Table 2 lists the most common types covered by this report.

Table 2 – Common types of expulsion fuse

	Type of Expulsion fuse	Brief description
1	Distribution fuse-cutout (Class A expulsion fuse) (open cutout)	A class "A" expulsion fuse that uses a replaceable fuse-link in a fuse carrier, which drops open after interruption. Used outdoors.
2	Enclosed fuse-cutout	An expulsion fuse in which live parts are enclosed. They may or may not be of a type that drops open after operation. Used outdoors.
3	Open-link cutout	A cutout that does not use a fuse carrier but a special type of fuse-link attached to spring loaded arms. Used outdoors.
4	Boric-acid power fuse (Class B expulsion fuse)	A class "B" expulsion fuse that uses boric acid to generate expulsion gasses. May or may not be of a type that drops open. Indoor versions are available.
5	Liquid-submerged expulsion fuse	Fuse-link immersed in a dielectric liquid with the element in contact with the liquid.
6	Liquid fuse (Liquid filled fuse)	Sealed fuse containing a dielectric liquid. Used outdoors.
7	Capacitor fuses	Fuses used to protect capacitors and that are required to interrupt capacitive currents.
8	Distribution oil fuse cutout (obsolete)	Small oil filled tank containing rotating switch device that includes a fuse-link.

4.1.6.4 Non-current-limiting fuses (non-expulsion type fuses)

Like expulsion fuses they produce little resistance during arcing and rely on achieving a "gap" having dielectric conditions such that when the arc is extinguished at a natural current zero, it is not re-established and current flow ceases. Types of non-current-limiting fuses mentioned in this report are listed in Table 3.

Table 3 – Types of non-current-limiting fuse

	Type of non-current-limiting fuse	Brief description
1	Horn gap fuse (Arcing-horn fuse)	Fuse that uses a wire between two arcing horns
2	SF ₆ fuse (obsolete – see 4.4.3.2)	Fuse uses a short element between two electrodes, in a small, sealed, enclosure with SF ₆ gas.
3	Vacuum fuse (obsolete – see 4.4.3.3)	Fuse uses a short element between two electrodes, in a small, sealed, enclosure with vacuum.

4.1.6.5 Fuse related devices

These devices use fuses as part of their operation or employ fuse bases as part of their construction. Common types referenced in this report are listed in Table 4.

Table 4 – Fuse-related devices

	Type of fuse-related device	Brief description
1	Commutating current-limiting devices with integral fuses	Device incorporates low resistance conductor, capable of very quickly transferring current to a parallel current-limiting fuse upon a signal supplied by a separate sensing device.
2	Electronic automatic sectionalising link (ASL)	A device, mounted in a distribution fuse-cutout base that can sense fault current and drop open, providing isolation during the "off" time of a recloser or similar device.
3	Disconnecting cutout	A distribution fuse-cutout base fitted with a solid blade in place of the fuse carrier.

4.1.7 Application of fuse types

Some applications commonly use just one type of fuse (for example motor circuit applications almost always use current-limiting fuses). However in other applications, more than one type of fuse is often found. This may be either as alternatives (e.g. an expulsion fuse or a current-limiting fuse) or a combination of fuses (for example a distribution fuse-cutout in series with a current-limiting back-up fuse). Combination fuses are available in which a current-limiting fuse is attached to an expulsion fuse (for example for capacitor applications). Particular advantages and disadvantages of different fuse types drive the selection process. While this report will compare and contrast different fuse types, it is not the intention to suggest any one fuse type is "better" or "worse" than another, but rather that some fuse types are better suited for certain applications than others depending on the desired protection requirements and the budget available.

4.2 Current-limiting fuses

4.2.1 Construction and operation of current-limiting fuses

4.2.1.1 General

In its passive or current carrying role the fuse must carry load current and permitted cyclic or other transient overloads for an indefinite time without deterioration (see 4.2.4.7 and 5.1.1.7). In its active or overload/fault current interrupting role, the fuse must disconnect the circuit, either relatively slowly, based on its pre-determined pre-arcing or operating time-current-characteristics, or very quickly with high fault currents, absorbing perhaps many kilojoules of resultant arc energy within itself and limiting the energy passed into the protected faulty circuit as much as possible.

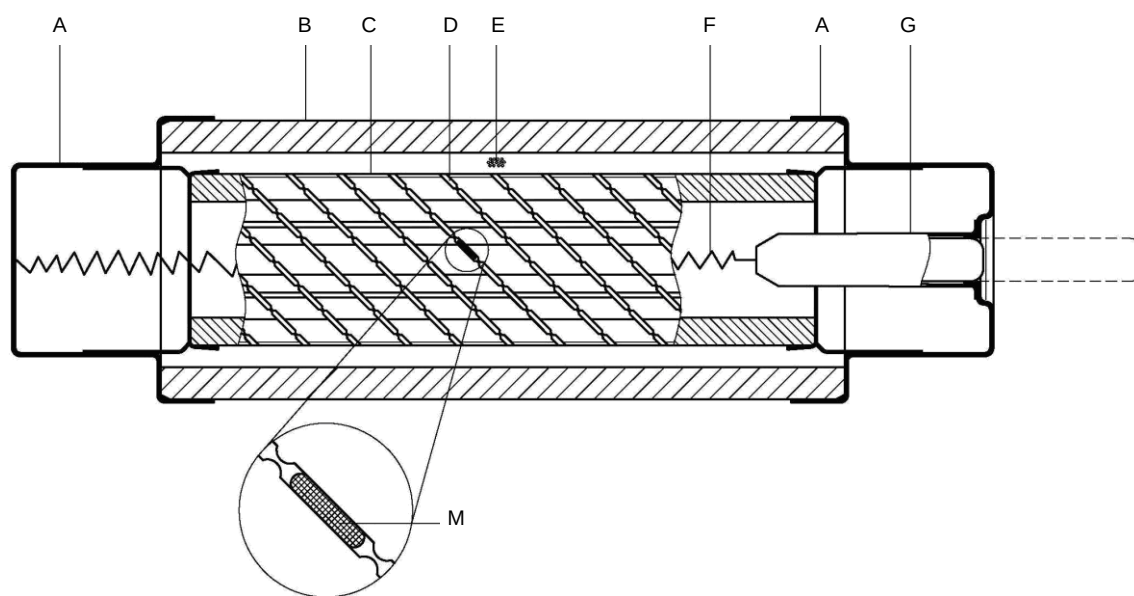
Figure 4 shows the construction of a typical back-up fuse-link having "DIN" dimensions. While other types of current-limiting fuse will show differences in construction, this figure illustrates the primary characteristics of such fuses. An insulating tube (the fuse body) of ceramic or organic resin/glass fibre material encloses parallel fusible current carrying fuse elements. These are connected at each end to metal caps, normally copper or brass, which seal the body and act as the electrical connections to the fuse. The body and caps are required to have the attributes of a pressure vessel, capable of withstanding the combination of high pressure and very high temperature that occurs at the instant of fuse operation. If the fuse is designed for use outdoors or under oil (or another dielectric liquid or gas such as synthetic or seed based oil, or SF₆), special additional sealing will usually be included to prevent ingress of moisture or fluid. For outdoor use, the manufacturer will use a material selection or special coating to prevent damage from weather and solar radiation over time.

The fuse elements are surrounded by granular insulating material, almost always compacted quartz sand of high purity and closely controlled grain size. The fuse shown, like many ratings, requires a fuse element length greater than the body length and so the fuse elements are wound in a spiral pattern around an inert former or "core", often, from its shape, known as a "star core". Other designs of fuse require fuse elements only of similar length to the body, and so are mounted parallel to the body (notably motor circuit fuses) as with low-voltage fuses. Low current ratings may often have only one fuse element while high current ratings will usually have many parallel fuse elements.

The fuse elements are the heart of the fuse, and are manufactured to a high degree of precision, normally from pure silver or copper wire or strip. The length of the fuse elements is proportional to the voltage rating of the fuse while the total cross-section and number of parallel fuse elements determine the current rating. The shape of the fuse elements together with their spacing and configuration determine many of the electrical characteristics of the fuse-link. They have a strong influence on the shape of the time-current characteristics, the degree of current limitation, and the peak overvoltage during high current operation (termed switching voltage or peak arc voltage – see 4.2.4.5).

Where fitted, strikers (often used to trip an auxiliary device) or indicating devices (to show that the fuse has operated), are wired in parallel with the fuse element system. During fuse

operation, when the main fuse elements are melted, the current transfers into the striker circuit, before quickly switching back to the main elements. Depending on the design, the current will either ignite a small pyrotechnic charge to expel the pin (typically British Standard type fuses or fuses that require a striker of type "heavy") or else melt a small latch wire (typically DIN-type fuses) to release a coil spring that expels the striker pin. In some designs, the latch is made thermally sensitive so that the striker will be released and trip the associated switchgear once the fuse has reached a given temperature, irrespective as to whether the fuse itself has actually operated. In the case where an indicating device rather than a striker is used, a relatively weak spring loaded indicator device may operate in a similar manner to a striker, or it may use a non-conducting filament, released by heat from the fuse arcing.



IEC 1163/13

Key

- A end cap (fuse-link contact)
- B body
- C former (core)
- D fuse element
- E granular filler
- F striker/indicator wire
- G striker or indicator
- M low temperature overlay ("M effect")

Figure 4 – Cut-away drawing of typical current-limiting fuse-link of the "DIN" dimensioned type

Fuses may be designed as simple ferrule fuses to fit into suitably shaped contact clips or they may be fitted with terminal tags for bolting onto bus-bars, etc. Some, intended for outdoor use, incorporate eye bolts for attaching cables or studs for mounting in eye-bolt terminals.

The high voltage current-limiting fuse has two distinct modes of interrupting fault currents, which will be described in 4.2.1.2 and 4.2.1.3. For a theoretical treatment of fuse interrupting phenomenon, see "Electric Fuses" by Wright and Newbery [2]³.

³ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

4.2.1.2 Operation under high-fault current conditions

At high fault currents (say more than ten to twenty times load current), all elements in a fuse-link reach melting temperature virtually simultaneously in only a few milliseconds or less. They break up along their length into multiple small series arcs. Strip fuse elements will usually include a pattern of holes or notches along their length to limit the number of these separate arcs, providing control over switching voltages (see also 4.2.4.5). Wire fuse elements also break up into multiple series arcs, due to complex thermal/magnetic forces. Since, for wires, the number of arcs tends to be very high, high switching voltages can result so wire fuse elements are normally used only for relatively low current ratings (see 4.2.4.5). The arcing, in effect, introduces a high resistance into the circuit and causes the current to be driven down long before the peak of the prospective fault current is reached (known as the cut-off effect). This is illustrated in Figure 2a. The arcs elongate, further increasing resistance. When the current has been driven down to a low value, the arcs are extinguished almost simultaneously within the first loop of fault current. Because the forced current zero occurs close to the circuit voltage zero, current-limiting fuses are much less sensitive to TRV than expulsion fuses, see Figure 2a) (TRV – Transient Recovery Voltage – is the brief transient oscillatory voltage that appears across an opened circuit, in this case across the fuse, after current interruption, and is due to damped current oscillation in the circuit inductance and intrinsic parallel capacitance).

Since both the peak value of the fault current and its duration are greatly reduced as compared with the operation of a non-current-limiting device, the energy released into the location of the fault or into the circuit being protected is very greatly reduced. The rapidity with which the fuse operates results in the appearance of a transient over-voltage in the circuit – the switching voltage. This is due to the collapse of the field associated with the circuit inductance and is more pronounced in circuits of low power factor. This switching voltage, appearing across the fuse, may be appreciably higher than the system voltage and should be allowed for when designing equipment clearances and creepage, and selecting lightning arresters.

The energy of the arcs within the fuse is dissipated in the formation of nodules of fulgurite from the sand filler surrounding the fuse elements. Fulgurite is the term used by fuse engineers to denote the mixture of sintered and fused sand grains together with globules of metal from the melted fuse elements. The amount of fulgurite produced during fuse operation is directly related to the quantity of arc energy absorbed by the fuse. Approximately 0,5 g of fulgurite are produced per kilo-joule of arc energy. Small increases in system voltage (above the rated voltage for the given fuse) cause a large increase in the arc energy and hence in the quantity of fulgurite produced. The fuse envelope has a definite upper-limit to the mass of hot fulgurite it can accommodate. Thus, in general, current-limiting fuses can only correctly interrupt short-circuit currents at system voltages not in excess of the fuse rated voltage.

4.2.1.3 Operation under low-fault current conditions

4.2.1.3.1 Temperature considerations

In the case of low faults currents, say up to around five times the fuse rated current, the fuse elements reach melting temperature gradually over a period of many seconds or minutes (or for Full-Range fuses, even hours). The melting temperature of silver is approximately 960 °C, that of copper, approximately 1 080 °C. If the melting time of a fuse is more than a few seconds (or for some types a few minutes), and the fuse as a whole had to reach such a high temperature during operation, damage to the fuse itself or its associated equipment could result. Various means are therefore employed to overcome this problem. Some fuse designs include a spot of low-melting alloy on the fuse element, known as M effect (after its discoverer Prof. Metcalf) as shown in Figure 4. If a typical tin alloy is used for the M-effect, at about 230 °C the alloy melts and the base fuse element material diffuses into it. This causes the fuse element to melt open at a lower temperature than its normal melting temperature, and initiate the process of current interruption. Where M-effect is not employed, other techniques that have been used include the incorporation of a low melting point section in series with a fuse element (common in some types of Full-Range fuse), the formation of a hot spot on the fuse element by creating a long narrow neck in the strip, or by enclosing part of the fuse

element in thermal insulating material. The object, again, is to ensure that fuse element melting occurs without the strip as a whole having to reach an excessively high temperature.

An alternative solution, employed where the fuse is mounted in a striker-tripped switching device, is to use a thermal striker which is designed to operate and trip the associated switching device, when the temperature of the fuse reaches a pre-determined value. . In this particular case it is the switching device, and not the fuse, which performs the current interruption.

4.2.1.3.2 Low current interruption

In the case of low fault currents or overloads, with fuses having more than one fuse element, the parallel fuse elements do not melt and arc simultaneously, as with high fault currents, but instead melt randomly in turn, usually at one location on each element, until the last one melts. For fuses that employ fuse elements having a plain strip with restrictions, and that operate at more than a few thousand volts, more than one series break is necessary to interrupt current. The last fuse element to melt must therefore see sufficient current to achieve multiple melting during the arcing that then occurs. This arcing causes each of the remaining parallel fuse elements to re-strike and create multiple series arcs that, in turn, are extinguished when another element re-strikes. This process continues until all fuse elements have arced sufficiently to be able to withstand recovery voltage (including any TRV present).

Therefore, for many types of high voltage fuse, should the fault current be lower than a certain critical value (about 3 to 10 times rated current according to the particular design of fuse), the current density in each fuse element during arcing may be too low to initiate multiple series breaks in each element. The result is the formation of long single arcs that re-strike after each current zero, burning back and possibly causing eventual fuse failure. This type of fuse therefore has a defined "minimum breaking current" below which satisfactory circuit clearance cannot be assured.

Such fuses are termed Back-Up fuses (see 4.2.2 "classification") and are intended for use in applications where a) low fault levels are deemed very unlikely, b) where the fuse is used in conjunction with other protective devices which handle low level fault conditions or c) in the common application where the fuse is used in striker-tripped switchgear. In this latter case, under low fault conditions, the fuse striker pin is ejected immediately on the commencement of arcing within the fuse. The pin trips the switch in series with the fuse, thereby disconnecting the fuse from the fault current before it has time to overheat, so that satisfactory current interruption at all fault levels is assured. Back-Up fuses that are intended for use in series with other protective devices (expulsion fuses for example) may only have a rated minimum breaking current corresponding to a pre-arcing time of few seconds or less. In this case, the series device is coordinated with the Back-Up fuse's current rating and pre-arcing time-current characteristic so that the fuse cannot get hot enough on overloads to be damaged.

Fuses having built-in ability to handle low fault currents are also available. They are termed General-Purpose or Full-Range fuses (see 4.2.2 "classification"). In one version, an improved very low minimum breaking current capability is obtained by use of a large number of parallel fuse elements, each of small cross-section so that each fuse element when arcing on its own, has a high enough current density to break up into full multiple arcing and clear the fault current. In other cases, gas-evolving materials are used to increase the effectiveness of series arcs and improve low current interrupting ability. In another popular version, each current-limiting fuse element is connected in series with a fuse element working on the expulsion principle (see under expulsion fuses). In this arrangement, the expulsion fuse elements handle any low-level faults. For higher fault levels, the current-limiting fuse elements take over to clear the short circuit fault current. Fuses using this principle (sometimes called "dual-element" fuses) will have been tested using special tests, I_t , specified in IEC 60282-1:2009. This checks operation in the cross-over region from the current-limiting fuse element to the low-current fuse element. General-Purpose and Full-Range fuses can usually be employed as sole protection for all fault levels without the need of associated equipment to handle the lower fault currents.

4.2.2 Classification of current-limiting fuses

The classification of such fuses is related to their ability to interrupt low level fault currents as explained in 4.2.1.3).

Back-Up Class: this type of fuse must be capable of interrupting all levels of fault current from the rated maximum breaking current, usually many kiloamperes, down to the fuse rated minimum breaking current, typically 3 to 10 times fuse rated current. Such fuses are intended mainly for short-circuit protection. The fuse is not expected to clear lower levels of fault current unaided.

General-Purpose Class: This type of fuse must be capable of interrupting all fault currents from the rated maximum breaking current, down to those that cause fuse operation in one hour. For certain applications, such fuses are suitable for use as sole protection where they can provide some degree of overcurrent protection as well as short-circuit protection.

Full-Range Class. This type of fuse may have no definite value of minimum breaking current. While there are different test requirements for fuses intended to operate in a surrounding temperature either above or below 40 °C, the intent is that a Full-Range fuse is able to operate correctly for all values of continuous current that cause melting of the fuse elements up to its rated maximum breaking current. It is therefore particularly suitable for applications where use in a small enclosure causes considerable de-rating and hence the possibility of operation near to fuse rated current (see 5.1.4.2.7).

Figure 5 illustrates the current ranges over which the different classifications of fuse are intended to be used, and for which they are tested. In the Figure, I_{ACC} represents the maximum continuous current permitted by the application (see 5.1.1.1.3). In an enclosure it may be I_{encl} , (see Annex A) while in free air it will likely be I_r . The shaded portions represent currents above the allowable continuous current for which the fuse may be damaged and/or melt but fail to interrupt.

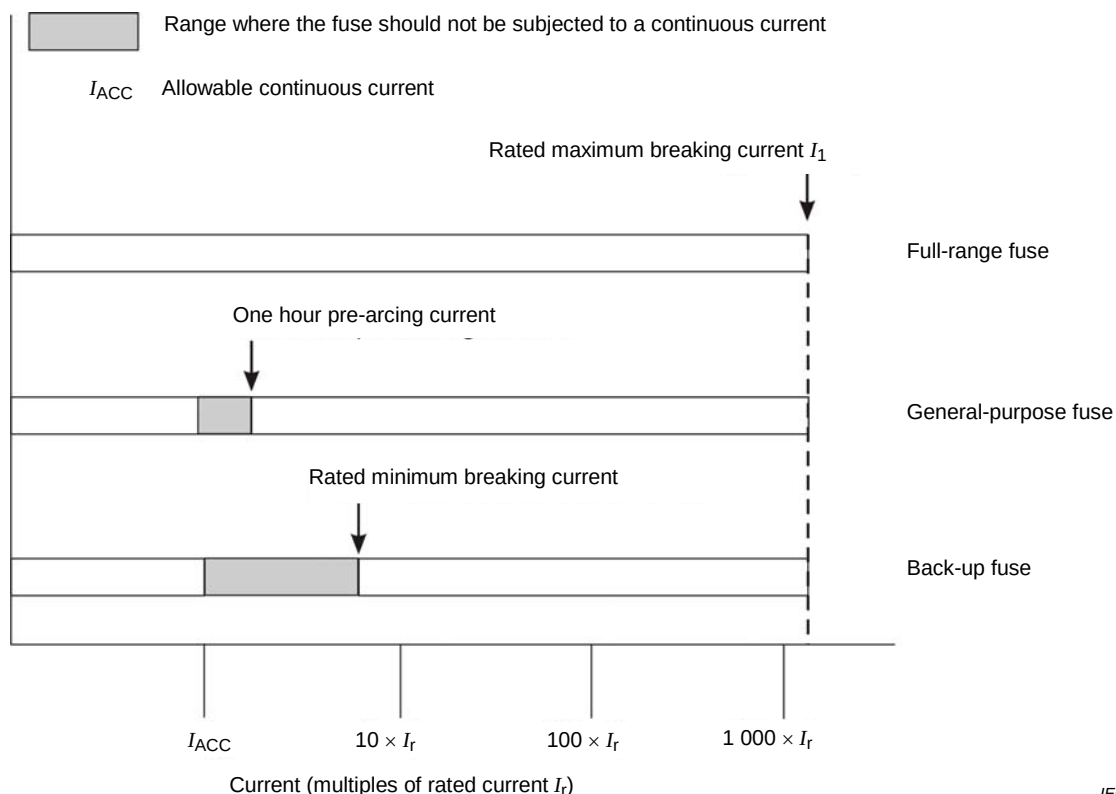


Figure 5 – Current ranges for which different fuse classifications are intended

4.2.3 Ratings of current-limiting fuses

4.2.3.1 Rated voltage

As explained in 4.2.1.2, current-limiting fuses are very voltage-sensitive. Hence, such a fuse must never be exposed to a recovery voltage even slightly higher than that used for testing. The recovery voltage that a fuse experiences in service depends not only on the system voltage but, in the case of three-phase circuits, also on the earthing of the system. Two aspects of an application must therefore be considered regarding fuse rated voltage. The first is that the rated voltage of a fuse must be at least equal to the "highest voltage of a system" (see IEC 60038) (i.e. maximum system voltage) not to the nominal system voltage (see also 5.1.3). Fuse voltage ratings therefore equate to "highest voltage for equipment" in IEC 60038. The second aspect is that unless the fuse is being used in a solidly earthed neutral three-phase system, an additional margin may be necessary. This is discussed in detail in 5.1.3.3. For example a fuse rated at 12 kV would be intended for use in a 10 or 11 kV system with solidly earthed neutral, but not in a single phase or resonant earthed system of the same nominal voltage.

Without special testing, fuses should not be connected in series in order to obtain an increased voltage rating since, due to manufacturing tolerances, one fuse of the series pair would probably operate before the other and so have more than its design voltage impressed upon it (see 5.1.6). It is permissible to use fuses of a given voltage rating in systems of lower voltage. The criterion here is that the spike of switching voltage during fuse operation should not exceed the insulation level of the system. A rule of thumb is that it is usually acceptable to use fuses down to about one half of their voltage rating.

4.2.3.2 Rated current

The current rating is determined largely by formalised temperature-rise tests in the design laboratory. Continuous load current should not normally exceed fuse rated current if deterioration of the fuse elements or other fuse components is to be avoided. However, in practice, high voltage fuses are generally run at load currents well below their rating for reasons connected with withstand against transient surge currents and de-rating due to use in thermally restrictive enclosures. To obtain higher rated currents, manufacturers often use parallel bodies permanently bonded together. Such fuses will be assigned an appropriate rated current by the manufacturer. Another way of providing an increased rated current is for the user to parallel individual fuses. The manufacturer should be consulted before this is done (see 5.1.5).

4.2.3.3 Rated maximum breaking current (rated maximum interrupting current)

Current-limiting fuses are usually tested at values of rated maximum breaking current (typically 25 kA to 50 kA) well above practical system fault levels. Manufacturers will not normally seek to find the highest current their fuses can interrupt, due to the high cost of such testing and/or test station limitations. However, a fuse should not be used at a higher prospective fault current than its rated maximum breaking current without consulting the manufacturer.

4.2.3.4 Rated minimum breaking current (rated minimum interrupting current)

It may not generally be realised that, unlike other circuit-breaking devices, current-limiting high voltage fuses of the Back-Up type (see 4.2.1.3)) do have a definite lower limit to the current that can be interrupted without external damage to itself or associated equipment. This rated value must be stated by the fuse manufacturer and has to be based on appropriate interrupting tests. It may be noted that the minimum breaking current value has no direct connection with the minimum fusing (melting) current of a fuse. The latter equates to the long-time end of the fuse time-current minimum pre-arcing curve (see 4.1.3) and may be typically 1,3 to 2 times fuse rated current, while rated minimum breaking currents are typically 3 to 10 times rated current.

4.2.3.5 Rated frequency

Within limits, this is not a critical parameter. A fuse tested at 50 Hz will be entirely suitable for use at 60 Hz. Also, in general, a current-limiting fuse tested at 60 Hz will be suitable for use at 50 Hz (unlike expulsion fuses see 4.3.4.4). While a fuse tested at 50 Hz or 60 Hz may be suitable for higher frequencies, no guidance can be given here, and the fuse manufacturer should be consulted for such applications. At lower frequencies than 50 Hz, more careful consideration may be needed since the longer half-loop time results in higher energy release in the fuse. Some de-rating in terms of voltage is usually necessary. In the extreme case of DC applications, the increase in arc energy can be so pronounced that a substantial voltage de-rating may be needed, and again the manufacturer should be consulted. Note that d.c. applications are not in the scope of IEC 60282-1:2009 or IEEE C37.41 [6]. For information on d.c. traction fuses see IEC 60077-5.

4.2.4 Characteristics of current-limiting fuses

4.2.4.1 General

The characteristics of a fuse, as published by the manufacturer, determine its suitability for use in a given application and enable comparisons to be made between fuses of different types so as to allow an optimum choice to be made.

4.2.4.2 Time-current characteristics

The most useful of the fuse characteristics, time-current characteristics enable co-ordination to be worked out between fuses and other protective devices on a given system. Manufacturers publish such data for all types and ratings of their products. Unless otherwise specified, the curves are drawn for an ambient temperature of 20 °C. For most fuses, the curve is valid for a range of temperatures. However depending on the type of fuse and the application, curves or correction factors valid for other temperatures may be produced. IEC 60282-1:2009 requires that Time-Current Characteristic (TCC) curves be drawn on a log-log scale and show the relationship between the virtual pre-arcing time and the prospective current. They may use mean or minimum values for current. European practice is to use mean values of current with a suitable tolerance to allow for manufacturing variance stated. They do not include the time during which actual arcing takes place. For very short melting times of less than 0,1 second the melting time could vary widely depending on the phase instant of the fault. Therefore, it is common to use "virtual time" rather than real time for the lower end of the curves. Virtual time is given by the joule-integral (I^2t) divided by the square of the prospective current r.m.s. value.

In North American practice, instead of a mean pre-arcing curve, a minimum pre-arcing curve is normally published (allowing for minimum manufacturing tolerances) together with a maximum operating (clearing) curve (including maximum manufacturing tolerances) which does include arcing time. Symmetrical currents are used to produce the pre-arcing curve to avoid the variability of asymmetry and "real" time, not virtual time, is normally used.

NOTE In practice the difference between a curve drawn with symmetrical current and a curve drawn using virtual time is small for most fuse designs. Therefore, time-current characteristic curves using either of these techniques can generally be used for coordination between fuses, and between fuses and other devices, down to approximately 0,01 s. Coordination at shorter time uses I^2t (see 4.2.4.4).

Time-current curves are developed with the fuse cold, i.e. off-load. In practice, preheating of the fuse, caused by the presence of load current causes operation to be slightly faster than shown on the published curves.

The value of the rated minimum breaking current for a Back-Up fuse is indicated by the point at which its TCC curve changes from a full line to a dotted line (see Figure 20).

Coordination between fuses and other devices (see 5.1 and 5.2) frequently require the use of minimum and maximum TCC curves (both pre-arcing TCC and operating [total clearing] TCC). If a nominal curve is published it must be shifted by the appropriate manufacturing tolerance

(in terms of current). Pre-arcing TCC curve tolerances vary depending on the type of fuse; however fuses tested to IEC 60282-1:2009 are required to have a tolerance not to exceed $\pm 20\%$ for nominal curves and $+ 50\%$ for minimum to maximum curves. Modern fuses tend to have lower tolerances, more typically $\pm 10\%$. This is similar to the North American practice, which is not to exceed $+ 20\%$ from the minimum to the maximum curve.

4.2.4.3 Cut-off characteristics

These curves show the highest maximum instantaneous values of current a given fuse will let pass under fault conditions for varying values of prospective fault current. The characteristics are of use in enabling checks to be made on the degree of protection afforded by the fuse to cables bus-bars, switch contacts, etc. However, since the operation of the fuse is extremely rapid, while damage to associated equipment is a function of time as well as instantaneous current, such checks err on the conservative side. Figure 6 shows a set of cut-off characteristic curves for a "family" of fuses. Each fuse has a curve consisting of two parts (normally drawn as two straight lines). The line to the left is common to all fuses and represents the maximum peak current of a fully asymmetrical prospective current (having a peak current of approximately 2,5 times the r.m.s. current at a typical power factor for 50 Hz and a ratio of 2,6 for 60 Hz). The second part of the curve (at a shallower angle) represents the current limitation produced by the CL fuse. The "knee" where the two curves join, represents the lowest current for which a particular fuse can achieve some current limitation.

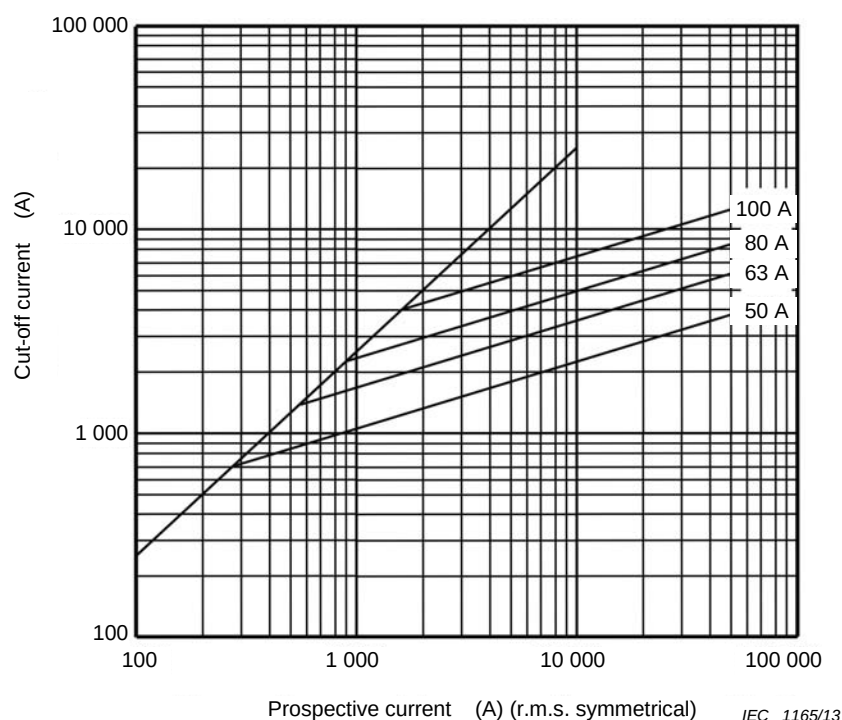


Figure 6 – Typical cut-off characteristics

4.2.4.4 Joule-integral (I^2t) characteristics

Joule-integral, or more commonly " I^2t " (which is more correctly $\int i^2 dt$) is an indication of the energy allowed through the fuse into the protected circuit under fault conditions. The energy released into a failure that results in an arc is the product of I^2t and the arc impedance. Because, for a given fuse, over a reasonable range of currents, I^2t tends to a somewhat constant value it is a helpful concept for co-ordination between the fuse and other protective devices in the zone of short operating times where the time of arcing becomes a significant factor. A manufacturer is required to publish two values "minimum pre-arcing (melting) I^2t " which represents the smallest I^2t to melt the fuse (at the maximum breaking current and with minimum manufacturing tolerances) and "maximum operating I^2t ", the highest I^2t likely to be

experienced in service at any current that causes a current-limiting action. It can occur at any current up to the rated maximum breaking current of the fuse, depending on the fuse design. Operating I^2t is the sum of pre-arcing I^2t and arcing I^2t (arcing I^2t being that which "flows" during the time when the fuse is arcing). In some literature, other terms that have been used for maximum operating I^2t include "maximum clearing I^2t ", "total I^2t value", maximum total I^2t , and "maximum let-through I^2t ". The presentation of I^2t values may be in simple tabular or diagrammatic form (for example, histograms) or may employ graphical presentation with prospective current as abscissa and I^2t as ordinate, both scales being logarithmic.

The value of operating I^2t is affected by circuit conditions such as power factor and in particular by the applied voltage. In service, the values of operating I^2t will usually be less than those indicated in the published data, which are based upon the most severe test conditions.

4.2.4.5 Switching voltage (peak overvoltage, peak arc voltage) characteristics

The short-duration spike of overvoltage produced during the operation of a fuse at high fault currents is made up of two components, one due to the instantaneous value of the supply voltage, the other due to the rate of change of current in the circuit inductance as the current is abruptly reduced to zero. The value of the switching or "peak arc" voltage is thus dependant on both supply voltage AND prospective fault current and power factor. Limiting values of switching voltage are set by all relevant fuse standards and are generally kept below these values by fuse manufacturers.

The significance of any fuse design exceeding the proscribed limits would be in terms of possible external insulation breakdown or even flashover during fuse operation and arrester failure (see 5.1.4.4).

Since switching voltage falls, to some extent, with supply voltage, it is often possible to use a fuse of given voltage rating in a system having a lower voltage without exceeding the specified switching limits for a fuse at that voltage, or incurring any danger of insulation breakdown. The manufacturer should be able to provide guidance as to the switching voltage reduction with reduced supply voltage.

Small rating fuses, which often use wire fuse elements, tend to produce higher switching voltages, but of a very short duration. Due to this short duration, fuse standards permit higher values to be developed with low current ratings (less than or equal to 12 A or 3,15 A depending on the voltage series used for testing). Voltages produced by wire elements are less affected by a reduction in system voltage than strip elements.

4.2.4.6 Power dissipation

A high voltage fuse produces an appreciable amount of heat in service. Example, a 100 A 12 kV fuse may generate 100 watts or more when carrying its rated current. This heat has to be effectively dissipated into the surroundings if the fuse is not to deteriorate. In the case of totally-enclosed switchgear, the heat produced by the fuse may be a serious limiting factor on the current rating of the equipment protected.

Fortunately, it is unusual for high voltage fuses to be run at their full rated current because of other factors such as transient current withstand, e.g. transformer inrush or motor starts. Manufacturers normally supply data on power dissipation ("watts loss") at rated current. In general, fuses of lowest power dissipation are to be preferred. Such fuses will require less derating when used in enclosed environments and will waste less energy.

The method of measuring power loss in a high voltage fuse, for most practical purposes, is to multiply the volt-drop across the fuse by the current through the fuse (see Annex A).

4.2.4.7 Cyclic and transient load withstand

Fuses are required to withstand permissible transient pulses of overcurrent such as those due to transformer magnetising inrush, capacitor charging current, or the starting current of motor loads. Withstand has to be proved during design by extensive tests, from which graphs, tables or formulae are derived to enable the user to choose a fuse which will withstand the value, duration, and frequency of repetition of expected surge currents. It should be noted that if a transient current exceeds these acceptable limits, one or more fuse elements may be locally damaged. This can result in a fuse having its characteristics changed such that it could melt at a current that it is not capable of interrupting. The use of larger current rating fuses can relieve this concern, but it must be borne in mind that the protection provided by the fuse may then be reduced.

4.2.4.8 Fuse striker characteristics

In many applications, the striker has the important task of initiating operation of associated switching devices permitting the use of Back-Up fuses with low fault current conditions and providing three-phase interruption with a single fuse striker operation (see 5.2.7). Therefore, the fuse striker is available in several versions. Medium type spring-operated strikers, have a travel of at least 20 mm and an energy output of 0,5 J or greater. Graphs of striker characteristics are usually available showing the striker force, in Newtons, versus the length of striker travel. Spring driven striker pins have a continuing force that is proportional to the travel and spring rate of the spring.

Pyrotechnically operated strikers (heavy type) that utilise a small explosive charge to eject the striker pin have a minimum travel of 10 mm and energy output greater than one joule. Since this type of striker is a ballistic device (kicked rather than pushed as with a spring operated type) it is not possible to provide meaningful force/travel characteristic, but it is possible to measure the energy provided by the striker, allowing comparison with the energy needed to trip a device, such as a switch, that is to be initiated by the fuse.

4.3 Expulsion fuses

4.3.1 General operating principles

There are many types of expulsion fuse, but their primary characteristic is that they are vented devices in which, after their fuse element melts and arcs, the expulsion effect of the gases produced by the interaction of the arc with other parts of the fuse results in the current interruption in the circuit. Another common characteristic is that they are essentially non-current-limiting. They are characterized by a relatively low arc voltage and so do not significantly reduce the value of the first peak of a fault current. They also, therefore, extinguish current at a natural current zero, when the proper dielectric conditions have been established. This is illustrated in Figure 2b). Therefore, anything that increases the magnitude of the first major loop of an asymmetrical fault current makes interruption harder. Since the magnitude of this first major loop is a function of available fault current, the power factor (or X/R ratio) of the system, and the degree of asymmetry of the current, these fuse types are sensitive to low power factor (high X/R ratio) fault circuits (more so than are current-limiting fuses).

In addition to being sensitive to power factor, expulsion and other types of non-current-limiting fuses are sensitive to TRV (see 4.2.1.2 for an explanation of TRV). They do not significantly change the phase of the current relative to the circuit voltage, so at low power factor values the normal current zero occurs near the time of a system voltage crest. Upon reaching a current zero, they must be capable of dielectric recovery at a rate, and to a magnitude, greater than the TRV characteristic of the system. The TRV typically involves an overshoot of up to twice the power frequency voltage. If the recovery conditions are not met at the first current zero after melting, the device will conduct additional loops of current until interruption is achieved. At high currents, that produce melting in one or two cycles, this must occur in only a few loops or the fuse will not be able to interrupt. While, unlike current-limiting fuses (see 4.2.1.2), expulsion fuses are not particularly sensitive to the system voltage during a loop of arcing, they are very sensitive to the recovery voltage after a current zero. Therefore,

like current-limiting fuses, they should never be used at a voltage higher than their rated voltage (see 5.1.3.2).

Because of their typical applications, expulsion and other types of non-current-limiting fuses have been designed to interrupt any current from the overload current at which the fuse element melts up to their maximum fault rating. This, as has been seen, is not necessarily true for all types of current-limiting fuses.

In common with all fuses, expulsion fuse elements have a defined melting characteristic. However, because their fuse elements are relatively short, and the interrupting process relatively independent of the fuse element size and construction, it is possible for a single expulsion fuse to be available with many different pre-arcing time-current characteristics. Thus, for example, a distribution fuse-cutout may accept, and be compatible with, a number of fuse-links that have different curve shapes (see 4.3.5) but the same current rating.

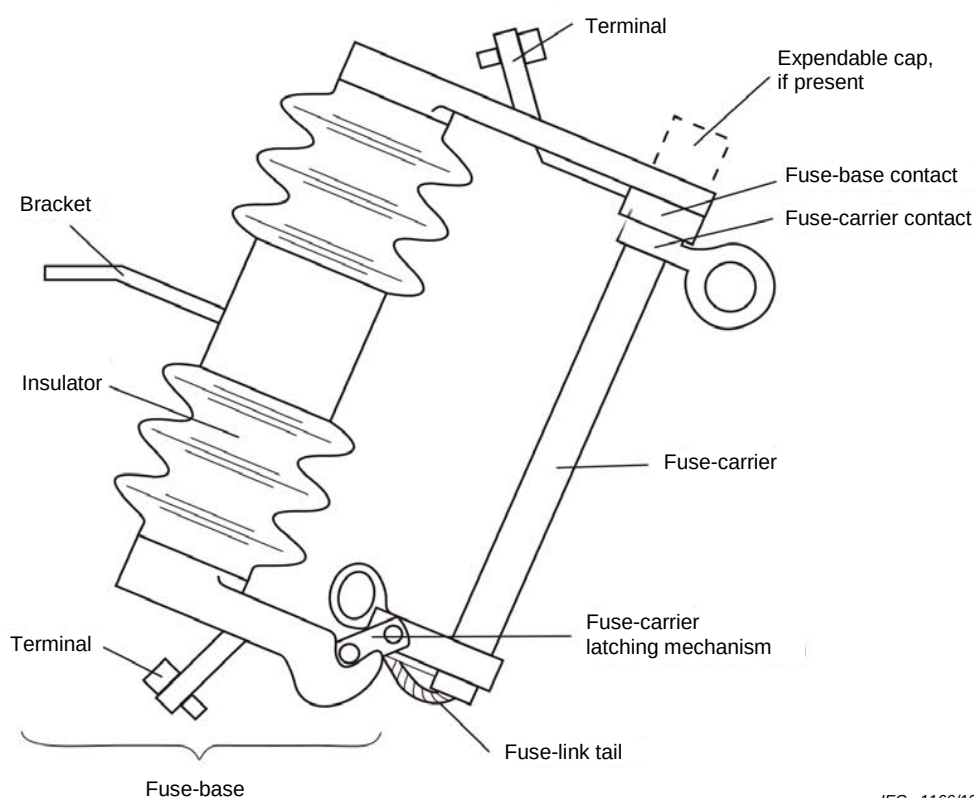
IEC standards recognize two classes of expulsion fuse Class A and B (see 4.3.3), which are similar to fuses recognized by other standards around the world. In theory, all types of non-current-limiting device can be tested to IEC 60282-2:2008, even if it would result in a very low rated maximum breaking current being assigned to them. However some common types of expulsion fuse are used where power factor and TRV values are less severe than called for in IEC standards, and so they may be tested to less onerous conditions either specified in a recognized standard (e.g. open-link cutouts in IEEE Std C37.41 [6]) or to no recognized standard. As they are similar to, or commonly used with, other types of fuse that are covered by standards, the most common types will be described in this document.

4.3.2 Construction and operation of expulsion fuses

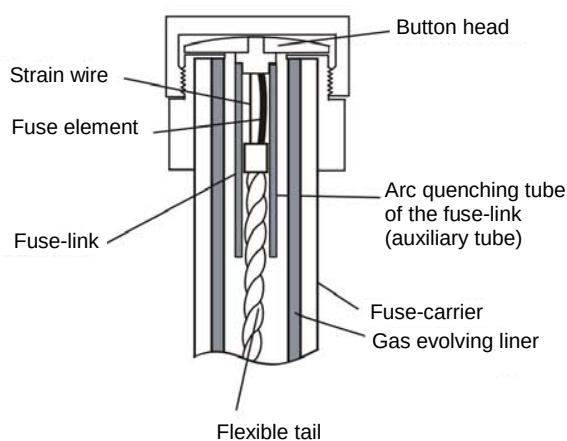
4.3.2.1 Class "A" expulsion fuses

4.3.2.1.1 Distribution fuse-cutouts

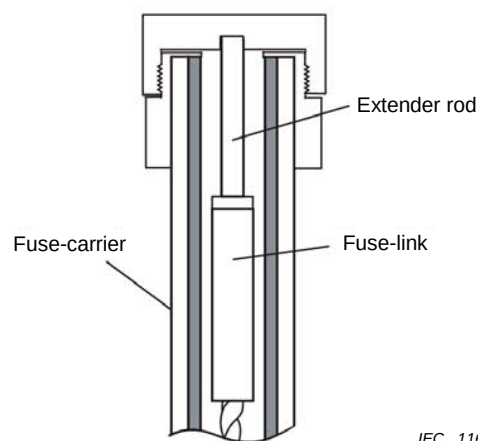
The most common type of "Class A" expulsion fuses are termed distribution fuse-cutouts. Indeed, in most countries, they are the most widely used type of outdoor fuse. Figure 7a shows the components of a typical distribution fuse-cutout. The fuse-base (support) consists of an insulator, traditionally made of ceramic, but increasingly of "non-ceramic" (i.e. polymer-based) material. A bracket, in its middle, supports it on a cross-arm, attached to a power pole. Terminals and contacts at the top and bottom are attached to the circuit and make electrical contact with a pivoted fuse-carrier. The fuse-carrier includes a tube lined with gas-evolving material, which contains the fuse element, typically mounted in a replaceable fuse-link.



7a) Distribution fuse-cutout components



7b) Typical fuse-link arrangement



7c) Fuse-carrier with extender rod

Figure 7 – Distribution fuse-cutout construction

Figure 7b) shows a typical fuse-link construction, mounted in a carrier, in which a small gas-evolving tube (termed arc quenching tube or auxiliary tube) surrounds the fuse element. The fuse element in this type of fuse is normally quite short (e.g. 30 mm) and is attached to a contact at the top of the fuse-link, and a flexible cable ("tail" or "leader") at the bottom. A strain wire in parallel with the fuse element permits the link to be mounted under mechanical tension. The flexible cable is attached to a contact at the bottom of the fuse-carrier, holding in place a latching mechanism that releases when the fuse element melts, enabling the fuse-carrier to swing open after current interruption. This provides an isolating distance (making it

a "drop-out" fuse) and also visual indication of fuse operation. The current rating and melting characteristics of the fuse are governed mainly by the design of the replaceable link.

When the fuse element (and strain wire) melt in response to an overcurrent, the resulting arc is only moderately confined and burns in the fuse carrier bore of gas evolving ("arc-quenching") material. This material was traditionally made of fibre, but now tends to be made from a polymer material. When the fuse element melts with a low current, the arc burns only in the auxiliary tube, while at higher currents, this tube bursts and the fuse-carrier lining supplies the expulsion gasses. The liner is ablated by the arc and will give off gases, such as hydrogen and various hydrocarbons. This protects the tube wall from excessive erosion, while the arc burns stably with temperatures in the centre as high as 20 000 °C. These gases expel the metal vapour and the flexible tail out of the fuse tube. The movement of the flexible tail increases the arc length to that of the fuse carrier and is very beneficial to the dielectric recovery that occurs at a natural current zero. The gas produced is proportional to the heat released by the arc energy. The gas flow effectively cools and deionises the arc gap at current zero and allows the gap to withstand the TRV. This results in interruption of current flow in the circuit. Expulsion fuses, under some conditions, expel solid materials at high velocities upon fault current interruption. This should be considered in the mounting location of the device.

Some designs employ an expendable cap (Figure 7a)) at the top of the tube. At high fault currents it opens to relieve pressure and allow expulsion gasses to escape from both ends of the tube. Expulsion fuses that expel gas during operation from both ends of the carrier tube are known as "double venting types". This is one of the techniques that have been used to achieve higher rated maximum breaking currents for cutouts. An older design of distribution fuse-cutout uses a fuse-carrier permanently open at both ends.

Another technique that has been used to increase the maximum breaking current of a cutout is termed an extender rod or arc shortening rod. This is a conductive rod attached to the top contact of the fuse-carrier and the top of the fuse-link. Its effect is to move the fuse element further down the fuse-carrier, so that arcing commences closer to the open end of the tube. This reduces the pressure in the fuse holder. The technique is illustrated in Figure 7c). Making the fuse-carrier tube stronger, e.g. by using a filament wound glass epoxy construction, also assists in achieving a higher breaking current. Manufacturers will therefore often have several models of fuse-carrier, each having a different rated maximum breaking current suitable for different locations in a power system. An advantage of "single-venting" types is that there is no emission of ionised gas in an upward direction which could impinge on adjacent overhead lines.

4.3.2.1.2 Open-Link Cutouts

Open-link cutouts (see Figure 8a)) do not employ a fuse carrier, but rather suspend an open-link fuse-link between fuse clips. The fuse-link contains all the parts for extinguishing the arc. The clips include a spring action to tension the fuse-link. They operate in a similar manner to distribution fuse-cutouts described in 4.3.2.1.1, but typically have a relatively low interrupting capability, and are often used in conjunction with a Back-Up current-limiting fuse. Their use is declining. Despite being defined in IEC 60282-2:2008, they are not normally available tested to this standard but rather to a lighter duty (e.g. that specified for open-link cutouts in IEEE C37.41 [6]).

4.3.2.1.3 Enclosed fuse-cutouts

An enclosed cutout (see Figure 8b)) is similar to a distribution fuse-cutout, but has all of the live parts enclosed in a housing (usually made of porcelain). A hinged "door" supports the fuse-carrier. They may be of a drop-out design but commonly are not, this feature often being selectable by the user. They operate in a similar manner to distribution fuse-cutouts described in 4.3.2.1.1.

4.3.2.1.4 Capacitor fuses

A common type of capacitor expulsion fuse uses a fuse carrier mounted to a bus bar. A spring "arm" attached to a capacitor insulator connects to the fuse-link flexible tail, keeping it in tension. Operating principles are similar to those described in 4.3.2.1.1.

4.3.2.1.5 Liquid-submerged expulsion fuses

These are expulsion fuses in which arc extinction is effected by having the melting fuse elements immersed in an arc quenching liquid. They are very common in many parts of the world, mounted submerged in an insulating liquid (traditionally oil) in transformers or switchgear. They employ a strong, small diameter, tube with a fuse element suspended between terminals at each end. The tube is open to, and filled with, the surrounding liquid. Various names have been used for these fuses, including "cartridge" and "weak-link" fuses, but they are referred to as "liquid-submerged expulsion fuses" in IEEE Std C37.41 [6]. They operate on a similar principle to distribution fuse-cutouts (described in 4.3.2.1.1), except that insulating liquid (usually oil) is used as the dielectric medium. After the fuse element melts, the resulting arc heats, vaporizes, and dissociates the liquid. The gas and arc products vent from one or both ends of the fuse into a bulk tank containing the fuse and, typically, other components under the liquid. The deionising effect of the gas permits current flow to cease when appropriate dielectric conditions are met at a natural current zero. In many cases, the gas produced from the liquid is sufficient to complete the interruption process. At higher currents, the fuse tube wall also supplies gas to facilitate the interruption process. They have a very limited maximum breaking current.

A variation of this type of fuse positions the fuse-link in a fuse-carrier at the end of a draw-out rod, suspended in a supporting housing containing electrical contacts, as shown in Figure 8C. The assembly is mounted at an angle, so that the fuse-link is submerged while the top of the draw-out rod is above the liquid. After operation the fuse-carrier can be withdrawn from the liquid, and the fuse-link replaced. This type of fuse is commonly known as a "bayonet fuse".

Liquid-submerged expulsion fuses may be used alone for light duty applications, or in conjunction with current-limiting fuses where circuit conditions are more severe. Therefore, many types have been tested to conditions less onerous than the "Class A" requirements of IEC 60282-2. IEEE Std C37.41 [6] recognizes specific testing requirements for this type of fuse when used in switchgear applications, where they are referred to as "liquid-submerged expulsion fuses". While test conditions are similar to Class A fuses in IEC 60282-2, fewer test series are required due to their generally limited maximum breaking current.

4.3.2.1.6 Liquid fuses

Another type of non-current-limiting fuse that surrounds the fuse element with liquid are called "liquid fuses" or sometimes "liquid power fuses" and are for outdoor use only. They usually consists of a glass tube sealed with ferrules at each end. The tube is filled with an arc extinguishing liquid, usually tetrachloroethylene and/or trichloroethylene. A short fuse element, usually a wire or notched strip, is connected to one end of the fuse. The fuse element is held in tension by a spring. A flexible lead connects the fuse element to the lower ferrule. These fuses operate in a similar manner to liquid-immersed expulsion fuses described in 4.3.2.1.5, except that no ablative tube is present to assist the interruption process at higher currents. However, when the fuse element melts, the spring draws the arc through the liquid increasing its length. To relieve the tube of excessive pressure, the fuse is fitted with a diaphragm at the upper end, which is ejected for all but the most modest of faults. They have a very limited maximum breaking current, and are tending to be replaced by more modern types of fuse.

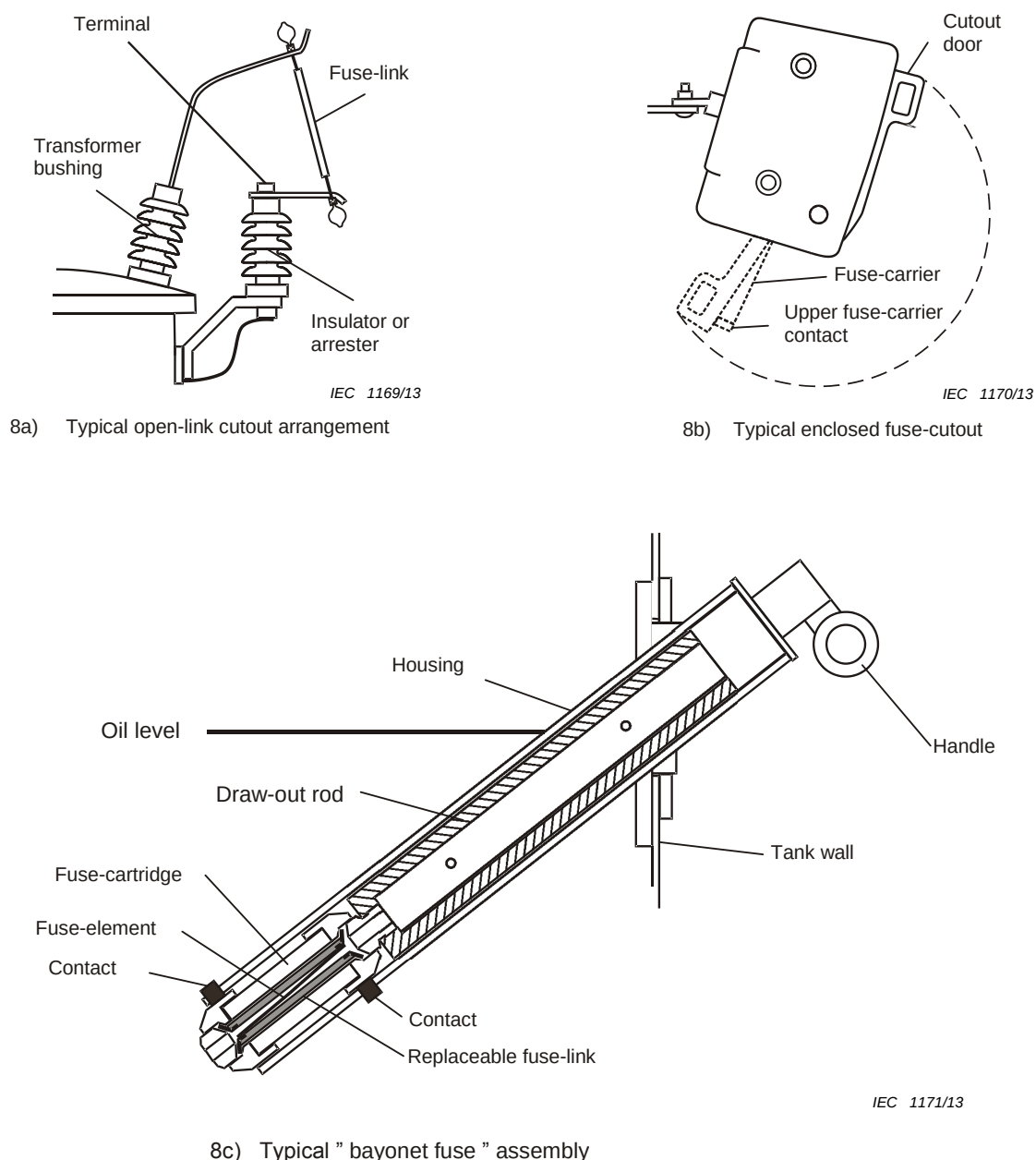


Figure 8 – Types of expulsion fuse

4.3.2.2 Class "B" expulsion fuses

These are commonly known as power-class expulsion fuses or boric-acid power fuses. The most common type, shown in Figure 9a), are expulsion fuses in which arc interruption is effected by use of a boric acid liner to the fuse-carrier tube. This gives them a higher interrupting capability, under more onerous circuit conditions, than Class A expulsion fuses. In addition, since water vapour is the primary gas produced during the interruption process, some power-class expulsion fuses can be provided with an exhaust-control device to condense the water vapour and virtually eliminate the effect of these gases. This allows their use indoors and in enclosures, in addition to outdoors. Some exhaust control devices do not require a reduction in the fuse's interrupting rating.

While in external appearance, Class B expulsion fuses can be similar to distribution fuse-cutouts described in 4.3.2.1.1, they employ a more complex internal structure, as shown in the simplified cutaway view of a typical fuse-carrier in Figure 9b). This includes a main bore

for high-current interruption and, in some designs (not shown), a smaller, parallel, bore for low current interruption. They employ a rather short fuse element. Typically, the lower end of this fuse element is fixed within the carrier while the other end is connected to an arcing rod that is attached to a compressed spring. A strain wire usually parallels the fuse element to hold the arcing rod in place. When the fuse element melts (immediately followed by the strain wire), the arcing rod draws the arc through the boric acid block. This increases the arc length and length of boric acid exposed to the arc. Gasses produced by the arc are primarily water vapour, which cools the arc and produces a deionising effect. This effect is such that, at a natural current zero, the dielectric withstand of the arc gap is sufficient to withstand any transient and power frequency recovery voltage.

Boric-acid fuses typically use a replaceable refill unit, which contains the fuse element and associated parts necessary to restore a fuse to its original condition after an operation. Class B fuses can be drop-out fuses, like distribution fuse-cutouts, or remain in the fuse clips after operation like most current-limiting fuses.

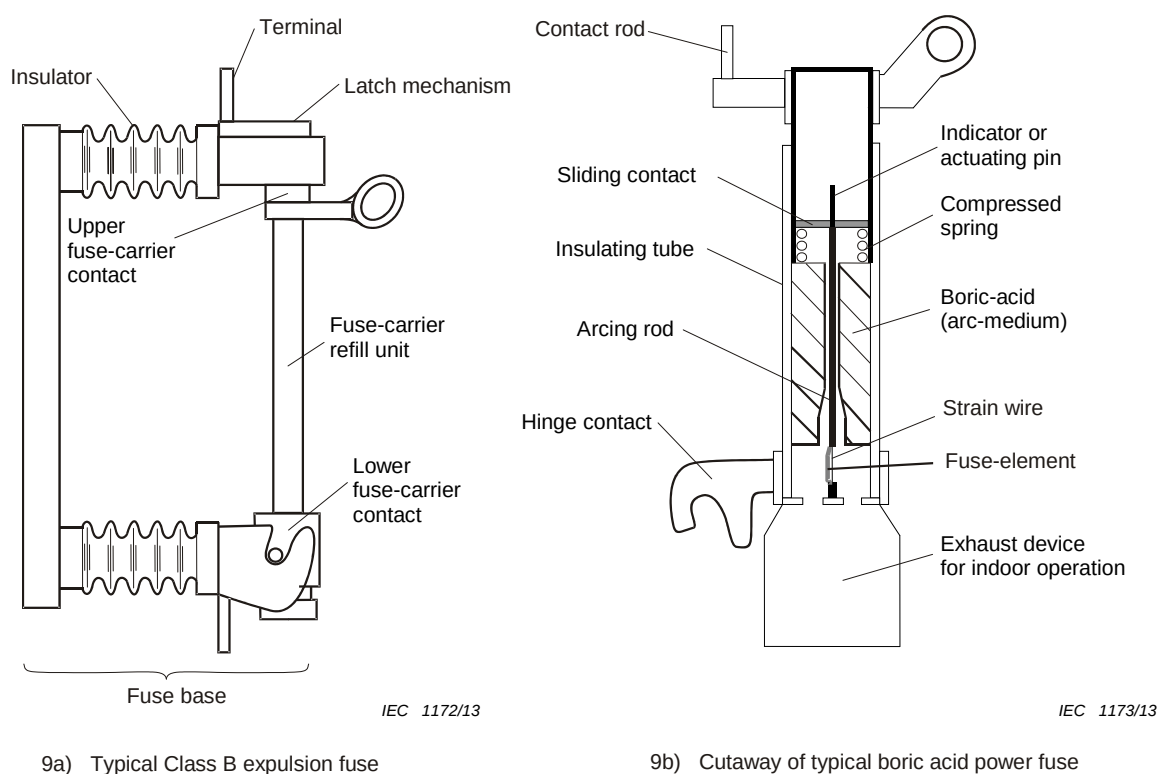


Figure 9 – Class B expulsion fuse

4.3.2.3 Application considerations

A consideration in the application of expulsion fuses is the criteria that the gases expelled are properly directed, and that the noise and pressure created is acceptable. Manufacturers' recommendations for the use of expulsion type fuses should be followed.

Distribution fuse-cutouts, or other types of fuses fitted with removable fuse-links, fuse-holders, or fuse carriers, have no inherent load-break ability when manually opened unless they are fitted, or used, with load-break means. There are three common ways to effect load breaking with such devices. The first is to use a separate load-break device, mounted on the switch-stick used to open the fuse. In this case no modification to the fuse is needed. The second way is to have a load-break mechanism, mounted to the fuse-base. Upon opening the fuse, the load current is initially carried by the separate device, which then effects the current

interruption, often by a spring-loaded contact and gas evolving materials. A third way is to use a link-break mechanism. In this case, the fuse-link of the cutout is broken by a mechanical means, and current interruption is achieved through the usual fuse arc interruption process. It should be noted that some fuse-links use a coiled silver fuse element that may be too long to be broken by this means. Where, as is common, no such load breaking means is employed, then even for very light loads, it cannot be guaranteed that the cutout, when opened, will clear the circuit without damage. In this case the line should be disconnected, upstream of the device, before manual operation.

4.3.3 Classification of expulsion fuses

When selecting the Class and type of fuse that should be used at a particular location, factors such as power being supplied, dielectric properties of the equipment being protected, X/R ratios, fault currents available, and transient recovery voltage (TRV) severity require consideration. As a general guide the following may be considered.

- Class A (termed "Distribution Class" in IEEE standards)

These fuses are generally applicable for the protection of small transformers and small capacitor banks used for power-factor correction or voltage control, located on power distribution systems of open-line type or cable type, and remotely placed from major substations. They are also applicable as protective devices at sectionalising points on such systems. TRV conditions are described by TRV test parameters, having lower values of u_c and longer values of t_3 than those for Class B fuses. They are generally used in single-phase applications, but are suitable for use in three phase applications where the high capabilities of the Class B (power) fuse are not required and other application requirements are met.

- Class B (termed "Power Class" in IEEE standards)

These fuses are generally applicable to protect similar equipment as Class A fuses but in closer proximity to a major supplying substation and feeder circuits leaving such substations. TRV conditions are more severe than those for Class A fuse applications, and therefore have more severe TRV test parameters specified. They are more likely to be used in three-phase applications and in substations, cabinets or vaults where a large amount of electrical power is being supplied to a distribution system or some facility that requires large quantities of energy. They are generally used in that part of a system where high dielectric properties are required for all equipment. Alternatively, they may be used in single-phase applications in an area where distribution fuses would normally be used, but where severe faults, high X/R, or severe TRV is anticipated.

4.3.4 Ratings of expulsion fuses

4.3.4.1 Rated current

The rated current of an expulsion fuse is equal to the rated current of the fuse-link or refill-unit used. The rated current assigned to a fuse-link is the maximum current that a new fuse-link will carry continuously, without exceeding specified temperatures and temperature rises, when mounted on a fuse-base and, if applicable, within a fuse-carrier specified by the manufacturer, at ambient temperature of not more than 40 °C or as specified by the manufacturer. At surrounding temperatures higher than the specified temperature, surrounding temperature adjustment factors are usually available from the manufacturer (see 5.1.1.3).

4.3.4.2 Rated Voltage

System voltages vary greatly; however, one of the standard fuse voltages should be suitable. In all cases a rated fuse voltage equal to or higher than the maximum voltage impressed across the fuse during its operation should be chosen. In general it can be stated that a fuse rated voltage must be higher than the maximum system voltage measured phase-to-phase (line-to-line), in the case of three-phase circuits, and phase-to-neutral (line-to-neutral), in the case of single-phase circuits. However, in certain locations, operating experience has led to the use of fuses having a rated voltage at least equal to the phase-to-neutral voltage in certain three phase applications (generally those having a solidly earthed neutral). It must be

recognized, however, that special conditions, and assumptions, must be valid to permit this, and additional testing by the fuse manufacturer may be required. In some cases fuses are tested with the intention that they will only be used in three-phase circuits. When such devices are used in single-phase circuits, special fuse voltage selection considerations apply (see 5.1.3.2).

In general, expulsion fuses can be used at any voltage lower than their rated voltage without adverse consequences.

4.3.4.3 Rated maximum breaking current (rated maximum interrupting current)

The rated maximum breaking current assigned to a fuse and a fuse-carrier is the maximum breaking current (in amperes r.m.s. symmetrical) specified when tested in accordance with the appropriate standard (test duty 1 or I_1). It is the highest current that the fuse has been demonstrated to be capable of interrupting under specified conditions of frequency, a.c. current component, TRV, power frequency recovery voltage and power factor (or X/R).

The specified power factors are generally more severe than those experienced on actual power systems. For the rare cases where the system power factor is less than that specified in the testing of the fuse, reduction of the interrupting rating may be necessary. The fuse manufacturer should be consulted.

In many applications, the available fault current is within the maximum breaking current of a single expulsion fuse. In some applications, particularly where Class A fuses are being used, the available fault current may be higher than the maximum breaking current of a single fuse. In this case it is quite common to add a current-limiting fuse in series to interrupt currents higher than the expulsion fuse's rated maximum breaking current. The expulsion fuse is then used for clearing the low fault currents below the Back-Up fuse's minimum breaking current. Coordination of these two devices is covered in 5.1.4.2.4 and 5.2.2.4.

Since Class B fuses are often used for three phase applications, some manufacturers provide equivalent three-phase interrupting ratings so they may be compared with other types of circuit interrupters that are rated for three-phase capability.

4.3.4.4 Rated frequency

Standardized values of rated frequency are 50 Hz, 50/60 Hz and 60 Hz. Tests are performed at a frequency between 48 Hz and 52 Hz for fuses rated 50 Hz and 50/60 Hz, and between 58 Hz and 62 Hz for fuses rated 60 Hz. They may be used in circuits having a frequency between 48 Hz and 62 Hz for fuses rated 50 Hz and 50/60 Hz, and between 58 Hz and 62 Hz for fuses rated 60 Hz. Expulsion fuses are therefore suitable for use at higher frequencies than they are rated, but not lower frequencies. This is because expulsion fuses are sensitive to the I^2t flowing before a current zero is reached. The I^2t of the first loop of a fully asymmetrical current waveform, having the same r.m.s. symmetrical current value, is 20 % higher for 50 Hz than for 60 Hz.

4.3.5 Characteristics of expulsion fuses

Expulsion fuse manufacturers supply two fuse operating characteristics. They are the fuse's pre-arcing (melting) Time-Current Characteristic (TCC) curve and the operating (total clearing) TCC curve.

For coordination studies (see 5.1 and 5.2) a minimum pre-arcing curve is normally required. If only a nominal curve is available the minimum curve may usually be taken as 10 % less than the nominal curve (in terms of current) although for some fuse element types, a tolerance of 5 % is achieved. Consult the manufacturer for details. The operating time-current characteristic curve represents the maximum pre-arcing curve (nominal curve plus maximum tolerances) plus the arcing time of the fuse. This curve also is required to conduct coordination studies.

In addition to designating a current rating for a fuse and fuse-link, manufacturers designate individual time-current characteristic shapes with a letter code. While some of these letter codes are specific to one or more manufacturers, there are two types of fuse-link that are designated as "type T" or "type K", according to their compliance with specific pre-arcing time-current characteristics. These characteristics are specified in standards (e.g. IEC 60282-2:2008 and IEEE C37.42 [7]) in the form of "gates". These gates are designated at 0,1 s, 10 s, and 300 s or 600 s (depending on current rating). At each designated time, a maximum and minimum current is specified for each current rating. To comply with a "K" or "T" rating the pre-arcing time-current characteristic curve must lie between the maximum and minimum values.

Such designation may assist in allowing interchangeability between alternative manufacturer's fuse-links for use in distribution fuse-cutouts. However, as noted in IEC 60282-2:2008 in the definition for interchangeability of fuse-links, the protective and interrupting performance provided by the combination of the selected fuse-link and the selected fuse-carrier can only be assured by performance test on the specific combination.

The difference in the pre-arcing time-current characteristics of K and T links lies at the shorter melting times. The longest time "gates" (600 s for link size over 100 A and 300 s for 100 A and below) are the same for K and T links. However, if K and T links are compared at a shorter pre-arcing time, the T link requires a higher current to produce melting. T links are therefore said to be "slower" and thus have a better surge resistance for the same longer-time pre-arcing characteristic. T links are therefore often used for capacitor applications. Where the higher surge protection is not needed, the "faster" K links are often used to give, for example, closer transformer protection. Speed, or speed ratio, is defined as the ratio between a current from the fuse's minimum pre-arcing TCC (normally at 0,1 s) to the current at 300 s (or 600 s). Thus for a 100 A K fuse-link, the ratio is 7,6 while for a 100 T fuse it is 13,1. The 100 A T link therefore requires approximately 72 % more current to cause melting in 0,1 s than a 100 A K link.

4.4 Other related protective devices

4.4.1 General

While all fuses can, in theory, be tested to IEC standards (or other standards derived from them, such as IEEE C37.41 [6]), there are devices that are fuse-like or fuse-related but that may not be adequately tested if only the tests presently specified are performed on them. Such devices, and the additional necessary testing, may not be specifically recognized in standards for several reasons, including being the product of a single manufacturer, or being produced in quantities that are insufficient to warrant the development of a standard. In fact, it is believed that several of devices referred to in 4.4 are no longer being manufactured – however a brief description will be given here for completeness and because they may still be in service (and may require replacement by more modern devices). However, because they are not fully addressed in standards, little application information will be presented, and the manufacturer of such a device should be consulted for application information.

The devices to be discussed fall into two broad categories, electronically activated devices and non-current-limiting devices.

4.4.2 Electronically activated devices

4.4.2.1 Fuses and fuse-like devices

One variety of current-limiting device is commonly referred to as commutating current-limiters, triggered current-limiters, or electronically actuated fuses. When this report was published, they were the subject of an IEC PWI (Preliminary Work Item) "Commutating current limiting devices, with integral fuses, for high current rating applications". These devices carry the current through a very low impedance, path compared to the typical fuse element. The result is a higher rated current than traditional current-limiting fuses may achieve. Compared to conventional fuses, such devices are relatively complex and expensive, but have applications where very large current ratings are required along with some degree of current limitation.

Thus, larger sized transformers can be protected than would be possible with conventional current-limiting fuses. A schematic of this type of fuse is shown in Figure 10. Upon occurrence of a fault, this main current path is opened (for example by a pyrotechnic charge) and the fault current is commutated to a parallel current-limiting fuse, before the first peak. The shunt fuse, of traditional current-limiting design, interrupts the circuit. During the time the parallel fuse melts, arcs and interrupts the circuit, the parallel high current path must develop a dielectric withstand level to be able to withstand the arc voltage generated by the fuse. These devices typically employ electronic sensing to initiate a means of achieving high-speed switching of the main conductor. The electronics may also be used to selectively initiate interruption in a non-current-limiting fashion.

Another non-commutating fuse design that uses augmentation of the normal element melting process to achieve low current interruption is shown in Figure 11. The fuse element has an overcurrent sensor (the black dot) that produces the fuse's TCC. A number of pyrotechnic chemical charges are located at strategic points along the fuse element. These charges are fired by passing current through them at the desired time. Under normal conditions, this circuit is isolated by a spark gap. When the main element opens, the fuse's arc voltage breaks down the gap, and fires the charges, cutting the element to create sufficient series arcs that are required to interrupt low currents. This type of fuse can also be triggered by an auxiliary control module in a similar way to a commutating fuse. It is thought that this type of fuse is no longer being manufactured.

One national standard that defines an "electronically actuated fuse" (but provides no guidance as to its testing) is the National Electrical Code (NEC) (NFPA 70-1999 [11]) of the USA. It defines an overcurrent device that generally consist of a control module, that provides current sensing, electronically derived TCCs, and energy to control tripping, and an interrupting module that interrupts current when an overcurrent occurs. Electronically-actuated fuses may or may not operate in a current-limiting fashion, depending on the type of control selected.

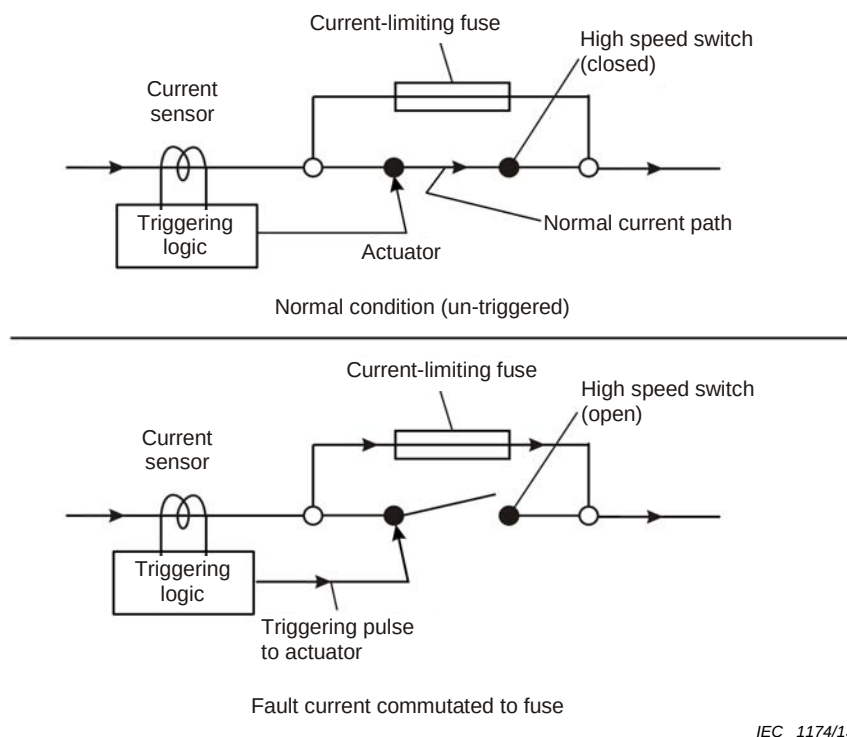


Figure 10 – Schematic of a commutating type of current-limiter

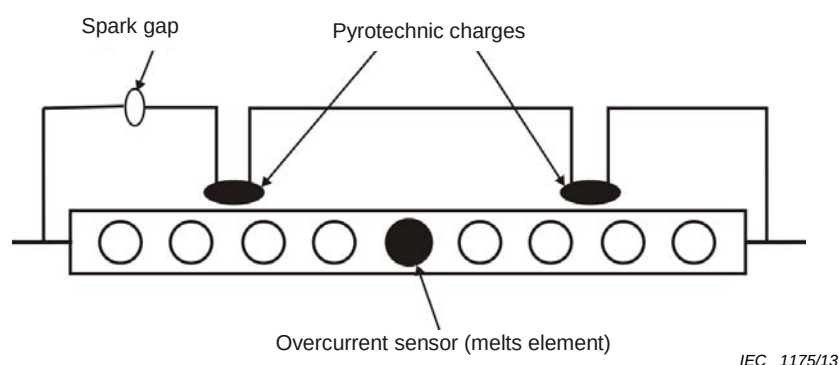


Figure 11 – Schematic of pyrotechnically assisted fuse

4.4.2.2 Automatic sectionalising links

Electronic automatic sectionalising links (ASLs) are designed to fit in place of the normal carrier tube of an expulsion fuse. The links contain a solid-state electronic circuit that is able to distinguish between transient no-damage faults and genuine permanent faults. In the event of the latter, the link disengages and drops down to provide isolating distance and visual indication. The link has no interrupting ability but operates during the dead time provided by the up-stream switching device (normally a recloser). While not in any sense a "fuse" they are included here because they utilize the fuse-base of a distribution fuse-cutout. Another "non-fuse" device that utilizes such a fuse-base is a "disconnecting cutout" (see IEEE C37.41 [6]) in which the fuse carrier is replaced by a solid blade. This is used for circuit switching (normally when used with an appropriate external switching device) and isolation.

4.4.3 Additional types of non-current limiting fuse

4.4.3.1 Horn gap fuses

Horn gap fuses are very simple devices in which two curved or angled metal strips are mounted on insulators and connected by a fuse wire (fuse element). The wire may be open to the air, or be enclosed in a glass tube for environmental protection. Each strip is connected to the circuit so that under overload conditions the fuse element melts and produces an arc. The natural interaction of the arc and the magnetic field produced by the current propels the arc up the "horns", elongating the arc. When the arc is long enough, it is extinguished at a natural current zero. Since quite long high-current arcs are relatively stable, these devices have a very low maximum breaking current. Although not generally tested to IEC or IEEE standards, because of their low cost they are widely used in developing countries.

4.4.3.2 SF₆ fuses

SF₆ fuses employ a tube filled with sulphur hexafluoride gas dielectric, axial contacts joined by the fuse element. SF₆ fuses have circuit interrupting capabilities similar to those of expulsion fuses. It is believed that this type of fuse is no longer being manufactured.

4.4.3.3 Vacuum fuses

Vacuum fuses typically have a very short fusible element attached to two opposing arc rotating plates that are mounted inside of a vacuum bottle. Vacuum fuses have circuit interrupting capabilities similar to those of expulsion fuses. It is believed that this type of fuse is no longer being manufactured.

4.4.3.4 Distribution oil fuse cutouts

Distribution oil fuse cutouts are devices that operate in a manner similar to liquid-submerged expulsion fuses. The oil fuse cutout typically contains a fuse carrier (tube) mounted on a

rotating structure with contacts on each end, so that it may be used as a load breaking switch as well as a protective device. The contacts, fuse carrier, and fuse element are under oil in a vessel capable of withstanding very substantial pressures. Upon melting of the element, its ends are blown out of the carrier by a jet of vaporized oil. Hydrogen gas evolved by the dissociated oil cools the arc zone and causes rapid deionisation of the gases in the arc zone, which results in interruption of the circuit at a current zero. The carrier may also provide ablative effects to assist in the interruption process. It should be noted that these devices, while still possibly in service, are considered obsolete in some areas. While formerly recognized in IEEE standards, for example, references to testing these devices have been eliminated from current standards.

4.5 Fuse-bases (fuse-mounts or fuse supports)

4.5.1 General

A fuse-base, also called a fuse-mount or a fuse support, includes all of the parts required to hold a replaceable fuse-link or fuse-carrier together with insulators and terminals. The fuse base provides the dielectric properties of a fuse. It should be noted that some types of fuse-links are supplied for mounting by the user, as for example some liquid-submerged expulsion and current-limiting fuse-links and some external current-limiting fuse-links mounted on bushings, distribution fuse-cutouts, or attached directly to overhead distribution conductors. When only the fuse-link is provided, because a fuse-link has no inherent dielectric properties, the manufacturer can perform no dielectric testing of a fuse-link alone.

Fuses should be installed in accordance with the manufacturer's instructions. For multipole arrangements of fuses, when the distance between poles is not fixed by the construction, the poles should be mounted with clearances not less than those specified by the fuse and/or equipment manufacturer.

4.5.2 Insulation properties

The insulation properties of fuses are based on those of the fuse-base (fuse-mount or fuse support). The rated insulation level of a fuse-base is the voltage values (both power frequency and impulse) that characterize the insulation of the fuse-base with regard to its capability of withstanding dielectric stresses. IEC 60282-1 and IEC 60282-2 recognize groups of preferred voltages, series I based on common European voltages and series II based on common North American voltages.

Two levels of dielectric withstand are recognised for a fuse-base according to European practice (see Table 4 of IEC 60282-1 and IEC 60282-2). They are for voltage series I, and are termed "List 1" (lower values) and "List 2" (higher values). They relate to different severities of application and corresponding different values of test voltage for the dielectric tests. The choice between List 1 (lower values) and List 2 (higher values) should be made by considering the degree of exposure to lightning and switching overvoltage, the type of system neutral earthing, and the type of overvoltage limiting device (see IEC 60071-1).

Equipment designed to List 1 is suitable for installations such as the following:

- a) in systems and industrial installations not connected to overhead lines:
 - 1) where the system neutral is earthed, either solidly, or through an impedance which is low compared with that for an arc-suppression coil. Surge protective devices, such as diverters, are generally not required;
 - 2) where the system neutral is earthed through an arc-suppression coil, and adequate overvoltage protection is provided in special systems, for example an extensive cable network, where surge diverters capable of discharging the cable capacitance may be required;
- b) in systems and industrial installations connected to overhead lines through transformers where cables or additional capacitors of at least 0,05 μF per phase are connected

between the transformer lower voltage terminals and earth, on the transformer side of the fuses and as close as possible to the transformer terminals. This covers the cases:

- 1) where the system neutral is earthed either solidly or through an impedance which is low compared with that of an arc-suppression coil. Overvoltage protection by means of surge diverters may be desirable;
 - 2) where the system neutral is earthed through an arc suppression coil, and where adequate overvoltage protection by surge diverters is provided;
- c) in systems and industrial installations connected directly to overhead lines:
- 1) where the system neutral is earthed solidly or through an impedance which is low compared with that of an arc-suppression coil, and where adequate overvoltage protection by spark gaps or surge diverters is provided, depending on the probability of overvoltage amplitude and frequency of occurrence;
 - 2) where the system neutral is earthed through an arc-suppression coil and where adequate overvoltage protection by surge diverters is provided.

In all other cases, or where a very high degree of security is required, equipment designed to List 2 should be used.

NOTE In case of application of rated lightning impulse withstand voltages of List 1, an agreement between manufacturer and user may be necessary concerning the maximum switching voltages specified.

The table of specified values for voltage Series II fuses does not have higher and lower rated lightning impulse values for each voltage. It does, however, differentiate between Class A and Class B expulsion fuses. Class A fuses (typically distribution fuse-cutouts) having comparable voltages to Series I have lightning impulse voltages slightly higher than the "List 1" values for voltages to 15 kV, and similar values to the List 2 at higher voltages. Class B expulsion fuses, and current-limiting fuses, have values slightly higher than List 2 values for indoor and outdoor fuses of all voltages.

Tables in the test standards specify withstand values "across the isolating distance". These values are valid only for fuse-bases where the clearance between open contacts is designed to meet the dielectric requirements specified for disconnectors (see IEC 62271-102).

Rated insulation levels may also be selected from values higher than those corresponding to the rated voltage of the fuse or fuse-base.

The manufacturer will state whether the fuse is suitable for indoor and/or outdoor service.

In selecting the rated voltage of the fuse-base, it is equal to "highest voltage for equipment" (IEC 60038) and should be selected from the rated voltage tables given in IEC 60282-1 and IEC 60282-2 (i.e. it should not be less than the highest phase-to-phase service voltage of the multiphase or single-phase system). It should be noted that successful completion of the dielectric withstand tests does not insure that fuses providing an isolating distance, when open, will always flash over to earth instead of across the isolating distance.

4.5.3 Current rating

The rated current of a fuse-base is a current that a new clean fuse-base will carry continuously, without exceeding specified temperatures and temperature rises, when equipped with a fuse-link, or fuse-carrier and a fuse-link of the same current rating designed to be used in the particular fuse-base. The fuse-base is connected to the circuit with certain specified conductor sizes and lengths, and is at an ambient temperature of not more than 40 °C.

The preferred values of the rated current of the fuse-base are 50 – 100 – 200 – 315 – 400 and 630 A for expulsion fuses, and 10 – 25 – 63 – 100 – 200 – 400 – 630 and 1 000 A for current-limiting fuses.

5 Application section

5.1 General application information

5.1.1 Service considerations

5.1.1.1 Temperature

5.1.1.1.1 General

Fuses complying with the IEC standards are designed to be used under the following conditions:

a) general conditions, all types of high voltage fuses:

Equipment conforming to the relevant standards are rated for use at altitude that does not exceed 1 000 m, and the frequency of the power system is 50 or 60 Hz;

b) current-limiting fuses:

- the maximum ambient air temperature is 40 °C and its mean measured over a period of 24 h does not exceed 35 °C;
- fuse-links intended for use at surrounding temperatures above 40 °C (caused either by ambient temperatures above 40 °C or by use in an enclosure) have additional requirements, see 5.1.1.1.2;
- the minimum ambient air temperature is –25 °C.

c) expulsion fuses:

- the maximum ambient air temperature is 40 °C and its mean measured over a period of 24 h does not exceed 35 °C;
- as expulsion fuses often are applied under outdoor conditions, it is furthermore required that the solar radiation does not exceed 1 kW/m²;
- for indoor application of expulsion fuses the preferred values of minimum ambient temperature are –5 °C, –15 °C and –25 °C;
- for outdoor applications the preferred minimum values are –10 °C, –25 °C, –30 °C and –40 °C.

5.1.1.1.2 Application temperature

International standards recognize that fuses can be designed and tested as being suitable for two sets of usual service conditions. The difference between the conditions lies in the value of the Maximum Application Temperature (MAT) assigned to the fuse by its manufacturer.

- a) If it is not intended that a fuse be applied under conditions where the temperature of the medium in direct contact with the fuse exceeds 40 °C, the usual service conditions listed in 5.1.1.1.1 apply. Interrupting (breaking) tests are performed at the temperature conditions prevailing at the site of the testing (within the service conditions of the fuse). This covers outdoor applications in most of the world, and use in large enclosures where there is a relatively free circulation around the fuse (for example in a vault).
- b) If the manufacturer rates a fuse as being suitable for use in a higher surrounding temperature than 40 °C, the second set of conditions apply, with the acceptable surrounding temperature now being from –25 °C/–40 °C to the Maximum Application Temperature (MAT) specified by the manufacturer. Fuses suitable for this second set of conditions are subject to the same testing as fuses of the first category, together with additional interrupting current tests, performed at the fuse's MAT (with some exceptions for expulsion fuses).

Because surrounding temperatures above 40 °C typically occur if the fuse is mounted in an enclosure of some sort, this latter testing is often called "fuses in enclosures testing". If the fuse is in a relatively close fitting container, or if the container significantly changes the heat flow from the fuse, testing of the "fuse enclosure package" (FEP), that is the combination of fuse and enclosure, is normally necessary. Testing the FEP may be required even if the MAT

of the FEP were not higher than 40 °C if, inside the FEP, the fuse itself is subjected to immediately surrounding temperatures above 40 °C, temperatures different than it would be subjected to in open air or liquid.

Obviously, the higher the surrounding temperature, the greater will be its effect on a fuse and its characteristics. See Annex A for advice on derating of current-limiting fuses in high surrounding temperatures.

It should be noted that in IEC usage, "ambient temperature" is the outside temperature and so is the temperature outside any enclosure. In other standards ambient temperature is used for the temperature of the fluid (liquid or gas) in contact with the fuse itself. Since ambient comes from the Latin "to go around" either interpretation is legitimate, but the difference can lead to confusion. In this report "surrounding temperature" is therefore frequently used to designate the temperature of the fluid that cools the fuse. A method to assess the temperature of the air inside an enclosure is presented in IEC/TR 60890 and Annex A.

5.1.1.1.3 Temperature influence on rated current (rated continuous current) and allowable continuous current

The rated current of a fuse (current assigned to a fuse-link or a fuse base) is the maximum current that the fuse can carry under normal service conditions without exceeding the maximum temperatures specified in the relevant fuse standard and without risk of long-term deterioration of the fuse elements. This latter point is of importance since, to ensure against such deterioration, many fuse designs will be assigned current ratings well below that which would result in the fuse reaching the limit of temperature allowed in the standard (in fact some designs of Full-Range fuses are intended to melt with overload currents that do not cause the fuse contacts to reach the maximum permitted temperatures). Therefore, for a given temperature of the cooling medium surrounding a fuse, a particular fuse design may be able to continuously carry a higher current, or only a lower current, than its assigned rated current. The current that a fuse can carry continuously, at a particular surrounding temperature, without deterioration and without exceeding the specified temperatures, is defined as its "allowable continuous current". When manufacturers assign such ratings to their fuses, the information is usually in the form of de-rating (re-rating) factors applied to the fuse's rated current, or presented as a table of current ratings related to temperature.

5.1.1.1.4 Temperature influence on time-current characteristics

The Time-Current Characteristic (TCC) curve of a fuse is determined at an ambient temperature between 15 and 30 °C, and drawn for 20 °C. If the temperature of the medium that surrounds the fuse differs from this, a shift in the TCC may occur, with higher temperatures causing the fuse to melt faster for a given current. The degree of change to a fuse's TCC is a function of the individual fuse design, and is different for different types of fuse. Ambient/surrounding temperature adjustment factors are usually available from the manufacturer.

The most significant area of concern is usually change to the long time melting characteristics of fuses, since this may change the way a fuse is affected by an overload.

5.1.1.2 Current-limiting fuses in enclosures

5.1.1.2.1 General

Many applications require the use of current-limiting fuses in enclosures where the fuse and the associated contacts may be subjected to air temperatures above 40 °C. Other applications may require the fuse to be immersed in a liquid such as transformer oil that may attain quite high temperatures. Current-limiting fuses intended for such service should comply with the applicable design tests specified in accordance with IEC 60282-1 and/or IEEE Std C37.41 [6] (ANSI), IEEE Std C37.46 [8] and IEEE Std C37.47 [9] (ANSI).

When current-limiting fuses are applied in enclosures of any type, the performance characteristics of the total system should be evaluated, as detailed in the following subclauses. Suitability for a specific application of the fuse-link in an enclosure is the responsibility of the supplier of the fuse enclosure package (FEP) and the user is recommended to follow the instructions of the FEP manufacturer.

5.1.1.2.2 Types of fuse enclosure packages

Fuse Enclosure Package (FEP) types covered by this clause are:

- type 1CL: A fuse mounted in a large enclosure with relatively free air circulation within the enclosure (e.g. a fuse mounted in a live-front pad mounted transformer or in a vault). The relevant fuse Maximum Application Temperature (MAT) is based on the temperature of the air that is cooling the fuse. It may be noted that, if a fuse were mounted outdoors but in an ambient temperature above 40 °C, conditions on the fuse would be the same;
- type 2CL: A fuse mounted in a fuse canister (fuse-container). This is a relatively small enclosure, defined as one supporting the fuse and restricting the air, gas or liquid flow surrounding the fuse (e.g. a fuse inside a canister in a transformer or a vault). However, the fluid flow (gas, liquid, or a combination of the two) that cools the outside surface of the canister has relatively free circulation. The relevant fuse MAT is based on the temperature of the fluid that is cooling the canister. Fuses tested for use in air no hotter than 40 °C, that are encapsulated with solid insulation (e.g. rubber or epoxy) can be considered to be this type of FEP when so encapsulated. In this case the relevant fuse MAT is based on the temperature of the fluid that is cooling the encapsulated fuse;
- type 3CL: A fuse directly immersed in liquid and mounted in an enclosure with relatively free liquid circulation around the fuse (e.g., an oil-immersed fuse in a transformer or switchgear enclosure). The relevant MAT is based on the temperature of the liquid in contact with the fuse.

Canister applications of current-limiting fuses

Drywell canisters (FEP type 2CL) are utilized to provide access to a current-limiting fuse in a transformer or switchgear housing and permit replacement in the event of a fuse operation. Typically, the drywell canister may be surrounded by air, SF₆, or oil, although oil, or an oil substitute, is the most common. The fuses used are typically standard indoor Full-Range current-limiting types. Another common use of canisters is in switch-fuse combinations. In this case the fuses are fitted with strikers, and Back-Up fuses are usually employed. Canister applications may have an impact on a current-limiting fuse's current carrying rating. Not only must heat be transferred from the current-limiting fuse to air in the container, but the heat must also be transferred from the container to its surrounding medium. Fuses used in drywell applications need to be rated for such applications and the current carrying rating may be different than for non-drywell applications. For example, the long-time melting current may be a de-rated value compared to that where the fuse is applied with free air movement. A particularly severe application is where fuse drywells are placed in the top oil of a loaded transformer, which often reaches 105 °C and perhaps as high as 135 °C under overload conditions.

Current-limiting fuses for liquid-immersed applications

Uses used for this application must be designed with the appropriate sealing system for use under-oil or in other liquids (FEP type 3CL) since if liquid enters the fuse, improper fuse operation or a failure of the fuse to clear the fault current and interrupt the circuit may result.

Current-limiting fuses designed for direct liquid immersion have excellent heat transfer means by the liquid. Thus, the long-time melt current may be higher than with the same fuse in air, at the same ambient temperature. As such it may be possible for the fuse manufacturer to assign a higher ampere rating to fuses for use in an liquid-immersed design than in a drywell or in-air design. However, this may only be the case where the liquid is at, or relatively close to, ambient temperature; i.e. where there is no other significant heat source, apart from the fuse itself, within the liquid enclosure. If instead, the fuse is applied inside a transformer, the liquid temperature may reach much higher temperatures than normal ambient temperature,

which must be considered when determining fuse suitability. Therefore the fuse manufacturer must be consulted when applying such fuses.

IEC 60282-1 contains testing requirements to demonstrate the liquid-tightness of fuse-links used in situations where the fuse was the primary source of heat in the enclosure (e.g. switchgear). Liquid-tightness testing for applications where significant heating comes from other equipment in the enclosure (e.g. transformers) is included in IEEE Std C37.41 [6]. It is anticipated that such testing will be included in IEC 60282-1 in the immediate future. The fuse-link manufacturer should be consulted for information as to the suitability of fuse-links for such applications.

The use of current-limiting fuses near adjacent heat sources

Adjacent heat sources may raise the temperature of the fuse to an unacceptable level that may affect the fuse rating. The manufacturer should be consulted for advice under such conditions. Furthermore, the design of the current-limiting fuse may differ between manufacturers so that the advice from one manufacturer may not be applicable to a replacement product from another manufacturer.

The use of current-limiting fuses where there is restricted air flow/cooling

Restricted air flow (FEP type 2CL) will reduce the ability of the environment to act as a sink for the heat produced by the current flowing through the current-limiting fuse over a long period of time. Since the fuse cannot dissipate heat as effectively, a de-rating of the continuous current-carrying rating may result.

The use of current-limiting fuses in vaults or underground sub-station

Current-limiting fuses in vaults (FEP type 1CL) should be rated for the highest surrounding temperature anticipated in the vault. If the vault also contains other heat producing devices, such as transformers, then increased ventilation may be required. The size of the vault may also influence the air circulation within the vault. A small enclosed vault may trap excess heat and reduce the heat transfer from the fuse, which, as a result, may need to be de-rated.

The use of current-limiting fuses in outdoor enclosures

Vented outdoor enclosures (FEP type 1CL) will be affected by solar heating and therefore, it may be necessary to de-rate any current-limiting fuses used in the enclosure. Non-vented or poorly vented outdoor enclosures may also require a further de-rating of the fuse. Consult the manufacturer. Also, note that replacement fuses from another manufacturer may have a different de-rating factor (see 5.1.1.1.3) due to a different design.

5.1.1.2.3 Clearances and spacing in enclosures

The use of adequate insulating barriers may permit reduced separations when verified by proper tests. It should be remembered that standards permit voltages across the fuse (during fault interruption) of slightly more than three times system voltage, thus a fuse rated at 12 kV could produce up to 38 kV phase-to-phase or phase-to-earth while very low current ratings (see Table 8 of IEC 60282-1:2009) are allowed even higher values.

5.1.1.2.4 Maximum application temperature

The FEP application should take into consideration any higher fuse operating temperatures caused by its confinement or by elevated surrounding temperatures. The supplier of the FEP specifies the Maximum Application Temperature (MAT), in degrees Celsius, preferably selected from the R20 series of preferred numbers (typically 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, or 140). It is the maximum ambient temperature at which a device is suitable for use without causing any deterioration that would inhibit the ability of the fuse to interrupt the circuit. In addition to the usual testing, a fuse has to demonstrate successful current interruption in an enclosure, or with conditions equivalent to an enclosure, with the surrounding temperature equal to the MAT.

(The R20 series is comprised of the numbers 1; 1,12; 1,25; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00; 2,24; 2,50; 2,80; 3,15; 3,55; 4,00; 4,50; 5,00; 5,60; 6,30; 7,10; 8,00; 9,00 and their multiples of 10).

5.1.1.2.5 Rated current and allowable continuous current for an FEP

Fuses used in an FEP may not be able to carry their rated current (nameplate rating or rating marked on the fuse) without deterioration or without exceeding the maximum temperatures specified in the standard. This would also be the case for a fuse not in an enclosure, but subject to a surrounding temperature over 40 °C. The current a fuse can carry continuously under these different circumstances, without exceeding the specified temperatures, is defined as its allowable continuous current. This current is linked to a specific ambient temperature. Such a value, when the fuse is a part of an FEP, should be available from the FEP manufacturer, or often the fuse manufacturer. Information would normally be provided in the form of de-rating (re-rating) factors applied to the fuse's rated current, and would allow for the effect of enclosure and/or ambient temperature. Alternatively, a table of current ratings related to temperature may be supplied.

5.1.1.2.6 Fuses having a Maximum Application Temperature (MAT)

Some fuses are assigned a very high MAT (for example fuses intended to be used in transformers) and the fuse will only experience such temperatures in equipment experiencing severe overload or failure conditions. Testing at the MAT shows that the fuse can still interrupt under these conditions. In some cases, therefore, the MAT assigned to a fuse may be higher than the maximum contact temperatures permitted (see Table A.1). In this case, the fuse cannot be assigned an allowable continuous current at its MAT, only at a lower temperature where they would be expected to operate continuously.

If a fuse is required, and able, to operate under conditions that produce higher component temperatures than those specified in IEC 60282-1, this application should be by agreement between the manufacturer and user.

5.1.1.2.7 Time-current characteristics

The modification of the thermal environment for the fuse due to it being in an enclosure will cause some shift of the fuse TCC towards the left (lower current). Whether this is significant will depend primarily on the fuse construction (fuse element material and design). For example, fuse elements that melt at high temperatures (over 900 °C) generally have non-significant shift, while fuse elements that melt at lower temperatures will have a more significant shift. While, for some designs, there is an effect on the whole TCC curve, shifts at the long time melting region are usually of the most concern due to possible nuisance operation. Details of the resulting effect on the TCC because of a particular enclosure should be available from the FEP manufacturer. It is normally in the form of multiplying factors applied to the fuse's TCC.

It may be noted that use of the general rule of thumb coordinating factor, that is maximum clearing time of the load side protective device should not exceed 75 % of the minimum melt time of the source side device, generally provides sufficient allowance for TCC shift in the 0,01 s to 1 000 s region. However, for General-Purpose and Full-Range fuses, this rule may be insufficient for times longer than 1 000 s. Consult the manufacturer for specific adjustment information.

A second de-rating factor may be published by the FEP supplier. This factor gives the percentage reduction of the melting current at long pre-arcing times as related to the temperature of the gaseous or liquid dielectric surrounding the FEP compared to the standard 20 °C (25 °C for fuses tested to IEEE C37.41 [6]).

5.1.1.2.8 Fuse selection, rated current

When a fuse is to be used at an ambient temperature over 40 °C, or in an FEP, it is important to assess the effect of the environment on the fuse. The actual maximum application

temperature should be compared to the fuse's MAT and the effect on current rating and TCC are relevant. It is important that conditions are not such as to cause deterioration of the fuse and associated components; an example of such a condition would be overloading Back-Up and General-Purpose current limiting fuses. It is also very important to ensure that changes in the fuse's TCC do not result in a fuse being called upon to interrupt a current for which it is not designed and tested. Attention should therefore be given to fuse coordination under all anticipated ambient temperature conditions.

Change to the pre-arcing TCC due to enclosure and elevated ambient temperature is usually of significance to General-Purpose and Full-Range current-limiting fuses, while the change in TCC is usually much less significant for Back-Up fuses. Therefore, Back-Up-type current-limiting fuses that are coordinated with other fuses (or overload sensing devices) intended to operate at low overload currents require no TCC de-rating factors. However, care should still be taken to ensure that Back-Up fuses used at high temperatures are not subject to overloading and possible deterioration.

5.1.1.3 Expulsion fuses in enclosures

5.1.1.3.1 General

Additional testing requirements for expulsion fuses in enclosures are not presently covered by IEC standards, and so requirements are by agreement between the manufacturer and user. However, IEEE Std C37.41 [6] may be used as a basis for such testing since it contains requirements for expulsion fuses in enclosures testing (and the normal test requirements for expulsion fuses are almost the same as requirements in IEC 60282-2). Therefore application advice in 5.1.1.3 applies specifically to fuses tested to IEEE Std C37.41 [6], and may not necessarily be appropriate for fuses that have not been so tested. In IEEE standards the preferred term for a close fitting enclosure that restricts fuse cooling is "fuse-container" rather than "canister". For CL fuses the most commonly used container is a canister (a dry-well canister or insulated canister) but not for expulsion fuses so the term fuse-container is used in 5.1.1.3)

When expulsion fuses are applied in enclosures of any type, the performance characteristics of the total system should be evaluated.

The fuse, fuse-container (if present), and the enclosure produce a system with interacting effects. Each component may be supplied by a different manufacturer. Data should be available from the component manufacturers to permit proper application. Suitability of a specific application of a fuse inside a fuse-container ("fuse and fuse-container" or F/C) should be the responsibility of the manufacturer of the F/C. Suitability of a specific application of a fuse or F/C in an enclosure should be the responsibility of the switchgear manufacturer. Proper application of the switchgear, based on the recommendations of the switchgear manufacturer, should be the responsibility of the user.

5.1.1.3.2 Types of fuse enclosure packages

Fuse-enclosure packages (FEP) using expulsion type indoor Class B (power Class) fuses covered by this clause are:

- type 1E: A fuse mounted in an enclosure with relatively free air circulation within the enclosure (e.g., an expulsion fuse mounted in an enclosure or vault);
- type 2E: A fuse mounted in a fuse-container with restricted air flow surrounding the fuse, but with relatively free air circulation within the enclosure on the outside of the container (e.g., an expulsion fuse in an enclosure with insulating barriers that form a container that restricts the air flow);
- type 3E: A fuse directly immersed in liquid and mounted in an enclosure with relatively free liquid circulating around the fuse (e.g., an expulsion fuse in a switchgear enclosure).

It should be noted that testing requirements in IEEE C37.41 [6] for liquid immersed expulsion fuses are only intended for fuses used in switchgear (not directly associated with transformers).

5.1.1.3.3 Clearances and spacing

Expulsion fuses generate high-pressure gases that are expelled during the interruption process. These gases should not be directed in a manner which reduces the dielectric withstand between phases and from phases to ground to a level that will result in dielectric breakdown.

Three-Phase assemblies should be capable of withstanding the transient and power-frequency recovery voltages associated with the simultaneous operation of fuses in all three phases.

Clearances between fuses of adjacent phases and from each fuse to ground should be sufficient to maintain adequate dielectric withstand at all times. Manufacturer's recommendations for proper clearances and spacing should be followed.

The use of adequate insulating barriers may permit reduced separations when verified by appropriate insulation tests.

5.1.1.3.4 Maximum Application Temperature (MAT)

Expulsion fuses used in enclosures or containers are assigned a Maximum Application Temperature (MAT), in degrees C, preferably selected from the R20 series of preferred numbers (typically 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, or 140). It is the maximum surrounding temperature at which a device is suitable for use without causing any deterioration that would inhibit its ability to interrupt the circuit. In addition to the usual testing, a fuse has to demonstrate successful current interruption in the enclosure with the surrounding temperature equal to the normal test ambient temperature, if the assigned MAT is 55 °C or less, and at the MAT if it is higher than 55 °C. It should be noted that, in IEEE standards, the term "rated maximum application temperature" (RMAT) is used instead of "maximum application temperature" (MAT).

5.1.1.3.5 Reduction of allowable continuous current capability

An application that subjects the fuse to high surrounding temperatures may result in a reduction of the allowable continuous current that the fuse or fuse and fuse container (F/C) is capable of carrying, since the capabilities are usually related to a lower ambient temperature.

Allowable continuous current is the designated value of current that the fuse is capable of carrying in a specified surrounding temperature without exceeding the maximum total temperature limits permitted by the device design.

The manufacturer of the fuse or F/C should provide the allowable continuous current for each fuse applied. Usually, these capabilities are available based upon a 25 °C ± 5 °C reference ambient. Factors normally published by the fuse manufacturer give the percent reduction of the allowable continuous current capability for surrounding temperatures above 25 °C.

An additional factor will be needed if a fuse normally intended to be used alone is placed in a close-fitting container, thus producing a F/C. This factor adjusts for the condition that the temperature of air surrounding the fuse inside the container will be higher than the temperature of the air surrounding the F/C.

5.1.1.3.6 Time-current characteristics

When an expulsion fuse is used in an enclosure or container, an increase in surrounding temperature can cause a change in the fuse's melting time-current characteristics. Information

on the resulting effect on the TCC because of a particular enclosure should be available from the enclosure manufacturer. Care should be taken if the change in characteristics affects coordination with other devices in a system. In the case of liquid submerged expulsion fuses, some designs are significantly more sensitive to liquid temperature than are others and so it is difficult to generalize. Consult the manufacturer for information on the effect of temperature on the TCC of the expulsion fuse.

5.1.1.3.7 Operating forces for expulsion fuses in enclosures

The manufacturer of the fuse or F/C should be consulted for the direction and magnitude of the force exerted by the assembly when it operates at its maximum interrupting rating. This is to ensure that the strength of the mounting arrangement is adequate.

5.1.1.4 Altitude

For altitudes above 1 000 m (3 300 ft) correction factors for current-limiting fuses can be found in 2.1 of IEC 60282-1:2009 and for expulsion fuses in 3.1 of IEC 60282-2:2008.

5.1.1.5 Indoor/outdoor/liquid submersible

Before any fuse is used, consideration should be given to the physical environment of the application and an appropriate fuse should be chosen. Improper selection and application of a fuse can result in damage to the fuse and associated equipment.

Fuses designed for indoor applications may not be suitable for outdoor applications and should not be so applied unless approved for such use by the manufacturer. Indoor fuses may not be suitable for application in enclosures in which the outdoor air circulates freely into the enclosure. Circulating fog, moisture, and condensation under adverse weather or other application conditions, such as dust and particle accumulation on insulating surfaces, may degrade the dielectric withstand capability of the device and its supporting structures.

Fuses for outdoor use must be of a design that can resist deterioration of the tube due to weathering, ultraviolet, and ozone, and should be capable of withstanding system recovery voltage for a period of time sufficient for locating and correcting the over-current problem that caused the fuse to operate. Fuses designed for outdoor use will usually be suitable for indoor applications also, unless the fuses emit ionized gases during the interrupting process. Outdoor fuses of non-ceramic construction may be longer than indoor types and/or utilize special weather resistant coatings since they are exposed to contaminants that may accumulate on the body of the fuse.

Some guidelines for estimation of acceptable limits for pollution and humidity may be found for current-limiting fuses in 2.1 of IEC 60282-1:2009 and for expulsion fuses in 3.1 of IEC 60282-2:2008.

5.1.1.6 Shock and vibration

If the fuse-link during normal installation and service conditions is subject to severe mechanical stresses, for example, shocks, vibration, etc., acting in one or several directions, it should be verified by consultation with the fuse manufacturer that the fuse-link can withstand these stresses without damage or deterioration. In addition, care must be taken that the means for electrical contact with the fuse-link does not deteriorate (e.g. spring pressure). Practical tests to prove the mechanical withstand of the fuse-links and contacts may be carried out by agreement between the user and the manufacturer of the fuses and the switchgear. For switch fuse combinations, see IEC 62271-105.

5.1.1.7 Fuse anticipated lifetime

As fuses normally operate without any moving mechanical parts, except for an eventual striker or indicator system operation, the experience is that under normal standard service conditions typical lifetimes of several decades are common.

Possible (outside the standard conditions) causes for lifetime reduction could be the influence of corona discharges (see 5.2.5.5) from the fuse element (especially smaller ratings), or, for expulsion fuses, influence from corrosive atmospheres that could degrade the fuse elements or outside barrel etc. Sustained overcurrents, higher than the rated current or allowable continuous current (see 5.1.1.1.3) of a fuse could also result in lifetime reduction.

Degrading of the outside barrel may, to a large extent, depend on the material employed.

5.1.1.8 Storage

For recommendations concerning storage of fuses see 5.3.5.2.

5.1.1.9 Noise and exhaust

Expulsion fuses may produce intense short-term noise levels during fault interruption. The height, location, and exhaust control of expulsion fuses should be such as to minimize the noise level at any location normally occupied by personnel. Some Class B expulsion fuses can be provided with an exhaust-control device to virtually eliminate the noise produced during an interruption.

Current limiting fuses complying with referenced standards are inert devices during normal service. It is also a requirement that no significant external emission takes place. Therefore, they are regarded as environmentally acceptable devices in service and operation.

5.1.1.10 Special service conditions/requirements

The majority of fuses presently manufactured conform to the usual service conditions. Fuses can be designed for other service conditions and still conform to the relevant standard, providing they are designed and tested with those other conditions considered in the design and testing process.

By agreement between the manufacturer and the user, HV fuses may be used under conditions different from the normal service conditions as defined in the relevant standard. For any special service condition, the manufacturer should be consulted.

Some national standards include additional requirements, including classifications related to special conditions of fuse applications, some of these are:

- spark production tests (AS 1033 [1] for expulsion fuses used in areas prone to bush/grass fires);
- mechanical robustness of fuse-links (IEEE C37.41 [6]);
- measurement of the resistance of fuse-links;
- verification of mechanical forces to open and to close drop-out (expulsion) fuses after mechanical operations;
- radio influence tests/partial discharge tests (IEEE C37.41 [6]).

The following is a listing of some of the conditions that fuses have in the past been designed to accommodate:

- a) altitudes in excess of 1 000 m;
- b) power system frequencies other than 50 or 60 Hz;
- c) ambient temperatures less than –30 °C;
- d) exposure to damaging fumes or vapours, excessive or abrasive dust, explosive mixtures of dust or gases, steam, salt spray, excessive moisture, or dripping water;
- e) exposure to abnormal vibration, shocks, or tilting;
- f) exposure to abnormal transportation or storage conditions;

- g) abnormal space limitations;
- h) abnormal operating duty, frequency of operation, difficulty of maintenance, etc.

Environmental effects on ratings of fuses

The user should recognize that some organic insulating materials may degrade under exposure to ultraviolet radiation and/or ozone. Both are present in outdoor applications, and protection needs to be provided for by the manufacturer and considered by the user in this application. In addition, fuses used outdoors are exposed to contaminants, pollutants, rain, snow, fog, smog, and other conditions (e.g., very high temperatures from direct sunlight or freezing conditions). All of these can affect the fuse's ability to interrupt a circuit and withstand voltage. The manufacturer designs the fuse so that it can withstand these conditions and ensures that it has an adequate sealing system. Only fuses specifically designed for outdoor use should be applied outdoors. If there is doubt concerning the suitability of a fuse for outdoor use, the fuse manufacturer should be consulted.

Use of current-limiting fuses in hazardous environments/conditions

Current-limiting fuses typically do not emit ionized gases from the arc extinguishing process and may be suitable for use where combustible gas may be present in the area surrounding the fuse. The manufacturer should be consulted for all such applications. Without the emission of ionized gases, mounting locations are less restrictive. Caution may still need to be exercised to ensure that disconnecting the fuse does not result in a small arc that could ignite combustible gases. In like manner, operation of indicators or striker pins could result in small external arcs that may pose a problem in some applications.

5.1.2 Current rating selection

Selecting the appropriate current rating of fuse involves not only considering its current carrying capability relative to the requirements of the application, but also the shape of its time-current characteristic relative to various application specific requirements. It should also be noted that different fuse designs that have the same current rating will generally have somewhat different TCC curves because, in general, there is no standardization of TCC. The specific selection of fuse current ratings is therefore covered in Clause 10 in the appropriate individual application sections. Selecting the correct current rating/TCC shape is particularly important in the case of current-limiting fuses because mis-coordination can result in problems for the fuse (e.g. see 5.1.4.2.1).

In the case of currents higher than rated current (i.e. faults, overloads, and surges) different types of fuse will respond in different ways. Most types of fuse will have levels and durations of current to which they should not be subjected. For example, General-Purpose type current-limiting fuses should not normally be subjected to sustained currents higher than their rated current but lower than the current that causes melting in one hour. Because some fault/overload conditions can damage the fuse elements or other vital components of fuses, leaving them unable to interrupt correctly or vulnerable to melting at currents they cannot interrupt, an extensive system of coordination rules exists. These rules are intended to prevent the type of damage mentioned in this paragraph, and are discussed extensively in this document, particularly in 5.2.

5.1.3 Selection of the rated voltage of the fuse

5.1.3.1 General

Fuses are single-phase devices, responding only to the current that actually flows through them. Almost all testing requirements are therefore based on a single fuse interrupting current in a single-phase circuit. While fuses are widely used in single-phase circuits many fuse applications are in three-phase circuits. The majority of IEC testing requirements therefore assume that fuses will normally be used in certain types of three-phase circuit. Because the same assumptions cannot be used for all circuits, and because not all countries' versions of IEC fuse standards make the same assumptions, a simple description of fuse voltage selection is not possible. Subclause 5.1.3 therefore describes recognised rules for choosing the rated voltage of a fuse for various common applications, when fuses have been tested to

the minimum requirements of relevant IEC standards. However, other practices, that may vary somewhat from IEC practice, are also covered briefly, for informational purposes. As always, the user should defer to the fuse manufacturer for further information. One reason for this is that the standards permit a manufacturer to test at conditions more severe than those specified, and so their application guidelines may vary from those given here.

Selecting the correct fuse rated voltage for an application is of great importance. As explained in 4.2.1.2 and 4.3.1, all fuses are very sensitive to applied voltage during fault interruption. A fuse which interrupts perfectly well with the correct value of applied voltage may fail to interrupt at a somewhat higher value.

When system voltage is considered, it is the maximum system voltage that must be used when selecting the rated voltage of the fuse, not nominal system voltage. IEC (and IEEE) fuse standards do not specify interrupting test voltages higher than the voltage assigned to the fuse, its "rated voltage". While test voltages have a tolerance of $-0\% +5\%$, and the manufacturer may permit the maximum tolerance to be exceeded, it is not permitted to assume that the actual tests have been performed with a tolerance above $+0\%$. System voltage variations must therefore be within the recovery voltage capability of the chosen fuse.

The voltage rating of fuses used to protect shunt capacitors is covered in 5.2.4.

5.1.3.2 Expulsion fuses

Testing in accordance with IEC 60282-2:2008 requires that interrupting current type tests are performed at a voltage equal to the rated voltage of the fuse. Therefore, a fuse that has a rated voltage (rated maximum voltage) equal to, or higher than, the maximum system voltage that the fuse may encounter during its interrupting duty should be used. In a three-phase system, the fuse rated voltage should therefore be equal to or greater than the maximum phase-to-phase (line-to-line) voltage, and in a single-phase system the fuse rated voltage should be equal to or greater than the maximum single phase voltage.

The rated voltage of expulsion fuses may exceed the system voltage by any desired amount, as these non-current-limiting fuses do not generate any significant over-voltages during interruption. While over voltages are present across the fuse during the interrupting process, these are primarily due to the inherent circuit TRV; therefore the voltage rating of the fuse does not have a significant effect on the magnitude of the switching voltage.

While the most commonly used testing method requires fuses to be tested at rated maximum interrupting current (Test Duty 1 or I_1) and rated voltage U_r , if a fuse is to be used only in three phase circuits IEC 60282-2:2008 permits an alternative testing method to be used. It should be pointed out, however, that in practice this has an effect on very few applications. This alternative method allows Test Duty 1 to be performed as two separate tests. The first is at 100 % rated voltage but only 87 % of I_1 and the second test is at 100 % I_1 but only 87 % U_r . This assumes that the first fuse to clear under conditions of a three-phase unearthened fault will only see a voltage of 87 % of the phase-to-phase voltage (phase-neutral voltage multiplied by a first phase to clear factor of 1,5), but at the full three-phase prospective current. The second fuse to clear a three-phase unearthened fault (or the first fuse to clear a phase-to-phase fault) will see full phase-to-phase voltage, but at a reduced fault current of 87 % of the normal three-phase prospective current. Fuses tested in this manner may be used in a single phase circuit providing that:

- the single-phase circuit voltage is not higher than 87 % of the rated voltage of the fuse, or
- the single-phase circuit prospective fault-current is not higher than 87 % of the rated maximum breaking capacity of the fuse.

In the case of North American practice (IEEE standards) the alternative testing method is the "preferred" test method, although only for Class B, "power-class" expulsion fuses (and for power-class current-limiting fuses). In practice, the two tests are normally combined (the "preferred" IEC method), since this results in less testing for the manufacturer.

Not recognized in IEC standards, but common in many parts of the world, are "slant-voltage-rated" distribution fuse-cutouts (e.g. 15/27 kV). These are cutouts intended primarily for use on three-phase star connected systems with solid earthing (effectively grounded wye systems). IEEE Standard C37.41 [6] includes special testing for these devices. The principle is that a single cutout is tested with full line-to-line voltage at lower currents (below approximately 25 % of I_1), and at line-to-earth voltage at higher currents. An additional test requirement is that two cutouts in series must interrupt I_1 at line-to-line voltage. This test simulates the situation of a line-to-line fault not involving earth, with a cutout in each line performing the interruption. Certain assumptions regarding system conditions are needed for this application, and rules for voltage rating selection with circuits other than solidly earthed neutral systems are required. The manufacturer should therefore be consulted for advice on fuse voltage selection.

Cutouts having a rated voltage equal or greater than the system phase-to-neutral voltage are also used in some solidly earthed neutral systems where multiphase faults not involving earth cannot occur, or are unlikely. Again the manufacturer should be consulted, since additional protection techniques may be needed for such applications.

5.1.3.3 Current-limiting fuses

Testing in accordance with IEC 60282-1:2009 assumes that current-limiting fuses will be used in three-phase circuits. Consequently it requires that interrupting current type tests, where the fuse is in its current-limiting mode, are performed at a voltage equal to 87 % of the rated voltage of the fuse-link. The value of 87 % represents the recovery voltage across the first fuse to clear with an unearthed three-phase fault. It is assumed that the remaining two fuse-links will then share the line-to-line recovery voltage (and the interruption duty), and thus each will be exposed to less than 87 % of the line-to-line voltage. In the case of a line-to-line fault, not involving earth, again two fuses will share the duty when the fuse-links are in their current-limiting mode (see 5.1.6).

In a three-phase solidly earthed neutral system or low impedance or low resistance-earthed neutral system, the rated voltage of the fuse-link should be at least equal to the highest line-to-line voltage.

In a single-phase application, the rated voltage of the fuse-link should be at least equal to 115 % of the highest single-phase circuit voltage.

Because fuses are tested in a single phase circuit, the requirements of IEC 60282-1:2009 mean that when they are used on a three phase circuit, the power-frequency recovery voltage is not higher than the values specified for the breaking current tests (which, in the case of Test Duty 1 and Test Duty 2, are less than the rated voltage of the fuse). It should therefore be noted that a special condition occurs if fuses are used on a three-phase isolated neutral system or a resonant earthed system. Because a double earth fault can occur, with one fault on the supply side and one fault on the load side of a fuse on another phase, the rated voltage of the fuse-link should be at least equal to 115 % of the highest line-to-line voltage of the system e.g. for a maximum system voltage up to 20,88 kV, a 24 kV fuse may be used. A fuse having a rated voltage less than 115 % of the highest line-to-line voltage of the system may be used provided that all breaking current tests have been performed at a value at least equal to the highest line-to-line value (for example, the most conservative approach is if fuses have been tested with I_1 and I_2 currents having a recovery voltage equal to the fuse rated voltage). In this case, the manufacturer should be consulted for further information as to the suitability of fuses for this application.

It may be noted that IEC fuse standards that have been modified for use in some countries (e.g. IEEE Std C37.41 [6]), particularly where single-phase applications are common, require that the interrupting tests of some types of current-limiting fuse-links to be at 100 % of the rated voltage of the fuse. For such fuses the requirements in 5.1.3.3 for selecting a fuse-link having a rated voltage of at least 115 % of the highest system voltage is replaced by a requirement that the rated voltage be at least 100 %. Other testing requirements may take account of the reduced prospective current that occurs with a line-to line fault versus a three-

phase fault (see 5.1.3.2 for a discussion of the testing requirements for expulsion fuses in IEC 60282-2 that permits the use of this method of testing). The manufacturer's literature should be consulted for clarification.

A current-limiting fuse generates a high switching (peak arc) voltage during interruption in order to achieve current limitation. It is therefore advisable to select a fuse voltage rating not more than twice that of the system voltage, in order to limit the stress on the system insulation (see 4.2.3.1 and 4.2.4.5). For information on the switching voltage produced by a specific fuse and voltage combination, consult the manufacturer.

The possibility of interruption by current-limiting fuses of capacitive currents in the case of single phase-to-earth faults should also be considered. If fuse-links are used in such a network system, without having striker tripping of the associated switch, tests may be carried out by agreement between manufacturer and user, in accordance with the appropriate test conditions of IEC 62271-103 (switches 1 to 52 kV). The test currents should be agreed upon in relation to the fuse-link to be tested and the values of the currents in the healthy and faulty phases during earth fault.

In some countries, fuse-links having a rated voltage less than the phase-to-phase voltage are used to protect transformers that have an earthed star connection on both the high voltage and low voltage sides. Typically, these fuse-links are tested at a voltage equal to or greater than the phase-to-neutral voltage. Advantages of this method of protection include the use of physically smaller fuses and reduced switching voltages. However, the use of this technique requires that certain assumptions, concerning the types of possible faults and percentage of transformer earthed load, apply to this application. The manufacturer of the fuse-link should be consulted for more information. In many cases, these fuse-links are Back-Up fuses and are used in conjunction with another fault interrupting device in series. The series device is generally required to have a voltage rating equal to or greater than the phase-to-phase voltage. When the two devices are used together, the combination must be capable of interrupting and withstanding system recovery voltage. This may require some specific assumptions, requirements, and testing to assure proper coordination between the two devices. Therefore the manufactures of the fuse(s) should be consulted.

Care should be exercised when selecting fuses for applications in multi-phase circuits if the assumption has been made that, under fault conditions, two fuses will be effectively in series and will share the line-to-line voltage. For two fuses to share the voltage, they must arc simultaneously. Consequently, fuses in all phases should be of the same fuse rating, the same model and/or type of fuse, and be from the same manufacturer; consult the manufacturer for more information.

5.1.4 Coordination between fuses, and between fuses and other protective devices

5.1.4.1 General

For the fuses on an electric system to operate properly and provide the desired system protection, consideration of voltage, continuous current and interrupting ratings is not sufficient to select the proper fuse for a particular application. One must also ensure that the fuse being selected will operate correctly relative to the other series connected protective devices that are used in the system.

A discussion on the procedures necessary to achieve this with all possible series devices is beyond the scope of fuse standards. However the most common applications will be discussed here. For coordination information not covered in this report, consult the manufacturers of the fuses and/or devices that are connected in series.

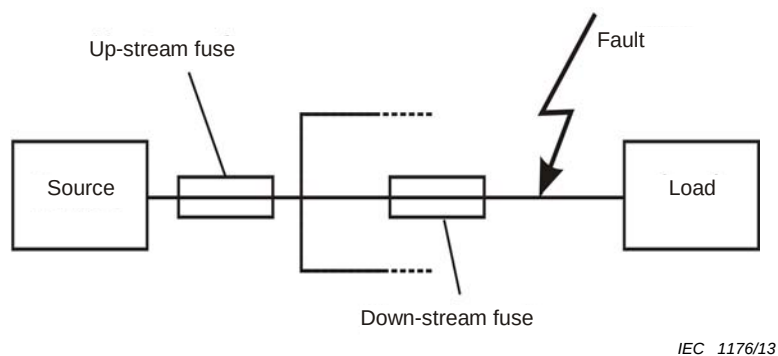
When the series devices are two fuses, the procedure by which coordination is accomplished is called fuse-to-fuse coordination. The coordination information in this subclause applies to conventional fuses that use a current responsive fuse element for detecting and melting when a particular current and time occurs.

Two fuse characteristics are primarily used to select fuses that coordinate with one another, the Time-Current Characteristics (TCC) of a fuse and its I^2t characteristics. The primary method is to compare TCC curves for the pre-arcing (melting) and operating (clearing) characteristics of the fuses involved (see 4.2.4.2 and 4.3.5 for a discussion on the relationship between manufacturing tolerances and minimum, nominal, and maximum curves). The minimum pre-arcing time-current characteristic curve shows the minimum time, expressed in seconds, required to melt the fuse-element(s) and initiate arcing for a particular value of symmetrical power-frequency current. The operating TCC curve (total clearing TCC curve) shows the maximum time, expressed in seconds, to complete current interruption at a particular value of symmetrical current. Both curves take into account variations resulting from manufacturing tolerances and represent performance under specific conditions. If nominal curves are published, they must be shifted to take account of the manufacturer's tolerances.

For all types of fuses, both the minimum pre-arcing curves and operating curves are plotted on log-log scales with a lower time limit of 0,01 s. The upper limit of time depends on the type of fuse. As current increases, the melting time of a fuse decreases, and the actual pre-arcing time of a fuse can vary if the current is not symmetrical. However, the pre-arcing (melting) I^2t decreases towards a fixed value, which is a function of the fuse-element material and geometry. Therefore, I^2t (which varies much less with current asymmetry) is often used to assist with coordination. Also at high currents and very short pre-arcing times, the operating I^2t of current-limiting fuses (see 4.2.4.4) may be used in determining coordination with other devices.

For fuses that are not current-limiting, clearing cannot occur until a natural current zero occurs. For long melting times this may require several cycles of arcing, while at short melting times, it cannot occur before the first current zero. Time-current curves are generated using symmetrical currents because, with asymmetrical currents, each fuse would have an infinite number of curves depending on the current initiation closing angle and circuit power factor. However, for coordination purposes at high currents, the longest time that a fuse might take to clear is one asymmetrical loop, no matter how high the current. This value is approximately 0,013/0,016 s (0,8 of a cycle) for typical test power factor and 60/50 Hz. Consequently the operating time-current characteristic curve of a non-current-limiting fuse is drawn down to a time of approximately 0,013/0,016 s, at which time it becomes a horizontal line giving a constant clearing time for all higher currents. As a result, the operating curve of a non-current-limiting fuse will always cross the minimum pre-arcing curve of any larger fuse when these devices are compared for coordination purposes, resulting in special coordination considerations that will be discussed later.

When coordinating fuses (or fuses and other devices) in a system it is generally desired that the down-stream fuse (the fuse closest to the load) melts and then clears the circuit before the up-stream fuse (the fuse closest to the source) melts.



IEC 1176/13

Figure 12 – Description of the terms "up-stream" and "down-stream" fuses

This method isolates the faulted portion of the circuit with a minimum of disruption to the remainder of the circuit.

NOTE In the following subclauses the terms "up-stream" and "down-stream" follow the preceding description as illustrated in Figure 12. In some literature the up-stream fuse is called the "protected" device, since the down-stream ("protecting") fuse operates and "protects" it from operating or from being damaged.

5.1.4.2 Fuse-to- fuse coordination procedures

5.1.4.2.1 General

Properly coordinating fuses in the area above 0,01 s is basically a matter of keeping the pre-arcing curve of the up-stream fuse above and to the right of the operating curve of the down-stream fuse within the range of fault current available at the down-stream fuse. To allow for variables such as preloading and ambient temperature variations the manufacturer may be consulted. In the absence of manufacturer's data, one of the following commonly used techniques may be used. A value of 75 % of the pre-arcing time of the up-stream fuse is generally used to make allowances for operating variables such as, preheating of the fuse element by the load current, normal variations in ambient temperature and preventing damage to the element of the up-stream fuse. To use this 75 % method, align the 4-second line of the up-stream fuse pre-arcing curve with the 3-second line of the down-stream fuse operating curve. Another method is to allow a 10 % safety-margin in current for any value of time.

In addition to limiting the area affected by a fault, coordination often seeks to minimize the risk of a correctly operating fuse exposing a series connected fuse to damage from that fault. In this sense, "damage" is where the partial, but not full, melting of a fuse's element(s) occurs, which then changes its operating characteristics. Such a change might result in the damaged fuse melting at some later time, with a current that otherwise might not cause it to melt. If the fuse then interrupts correctly, it is classed as a "nuisance" operation. However, particularly in the case of current-limiting fuses, the fuse may be unable to interrupt the current (e.g. it may be a current below the minimum breaking current of a Back-Up fuse) leading to a failure. For this reason appropriate "safety-margins" are incorporated into the standard coordination procedures.

For Back-Up current-limiting fuses, currents that are less than the rated minimum breaking current, but will still melt the fuse element(s), are often shown as a dashed or broken line on the pre-arcing TCC curve. Currents less than the minimum current the fuse can interrupt are usually not shown on the operating curve since the fuse cannot reliably interrupt those currents, but they may be shown as a broken line on a maximum operating curve, when they represent the maximum pre-arcing TCC curve.

Other information provided by the fuse manufacturer, and needed for correct coordination in some cases, includes the rated maximum breaking current (rated maximum breaking capacity or rated maximum interrupting current) of the fuse. This rating should not be exceeded. Other characteristics such as minimum pre-arcing I^2t , maximum operating I^2t , and peak let-through current versus prospective current charts are also published and generally available.

5.1.4.2.2 Expulsion fuse to expulsion fuse

The down-stream fuse must clear the maximum fault current at its location before the up-stream fuse is damaged. To prevent damage to the up-stream fuse, the operating time of the down-stream fuse should be less than 75 % of the minimum pre-arcing time of the up-stream fuse for all current up to the maximum fault current where the down-stream fuse is located.

5.1.4.2.3 Current-limiting fuse to current-limiting fuse

As with expulsion fuse to expulsion fuse coordination, the down-stream fuse must clear the maximum fault current at its location before the upstream fuse is damaged. To prevent damage to the up-stream fuse, the operating time of the down-stream fuse should be less than 75 % of the minimum pre-arcing time of the upstream fuse for all current up to the maximum prospective current where the downstream fuse is located.

With higher fault currents, current-limiting fuses are capable of interrupting in less than 0,01 s, which is the shortest time shown on fuse TCC curves. If the TCC curves of the two

fuses do not intersect above the 0,01 s line and the prospective current at the downstream fuse is of sufficient magnitude, i.e., to the right of where the up-stream fuse melt curve crosses the 0,01 s line, coordination in the current-limiting range must be confirmed. For this coordination, 75 % of the minimum pre-arcing I^2t for the upstream fuse should be greater than the operating (clearing) I^2t of the down-stream fuse. This is referred to as " I^2t coordination". The manufacturer's values for minimum pre-arcing (melt) I^2t and maximum operating (clearing) I^2t of current-limiting fuses should be published and readily available.

An example of current-limiting fuse/current-limiting fuse coordination is as follows: check the coordination between a 125 A Full-Range current-limiting fuse (CLF) and a 63 A General-Purpose CLF at point "A" as shown in Figure 13. Also, verify that the 125 A CLF will be able to operate correctly with faults between it and the 63 A fuse (i.e. in its zone of protection). This consideration is discussed in detail in 5.2.1.5 under the term "Reach".

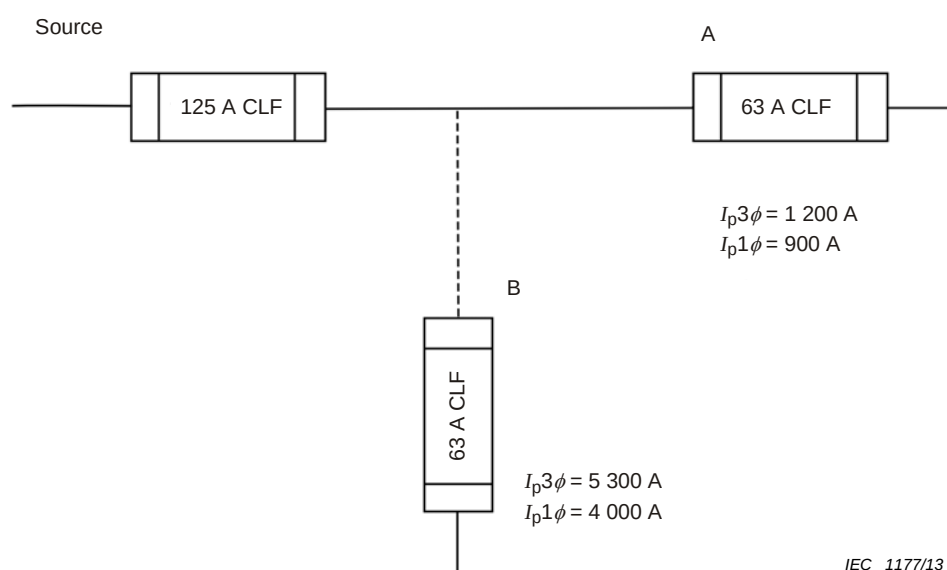


Figure 13 – Current-limiting fuse/Current-limiting fuse coordination example

The TCC curves for this combination are illustrated in Figure 14. Before comparing the fuse TCC curves, verify that the 125 A CLF has adequate reach (can operate with a fault at point "A"). At point "A", the phase to earth prospective current I_p is 900 A (assuming a bolted fault, that is a fault having no impedance). A Full-Range current-limiting fuse, can interrupt any current that causes it to melt, so it will operate with a current corresponding to the top of its published minimum pre-arcing TCC curve. However a fault persisting for hours would not be desirable so a utility will likely pick a shorter time for which they would like fuse operation. If a time of 300 s is chosen as a desirable maximum, the 300 s current for the 125 A fuse is 300 A. Since the phase-to-earth fault current at the 63 A fuse is 900 A, the fuse will melt in less than 300 s. However, another consideration is the fact that actual fault currents will be somewhat less than the calculated value, as a result of fault impedance. In this example, the current could be one third less (a "reach margin" of 3, see 5.2.1.5) and still operate the fuse in less than 300 s.

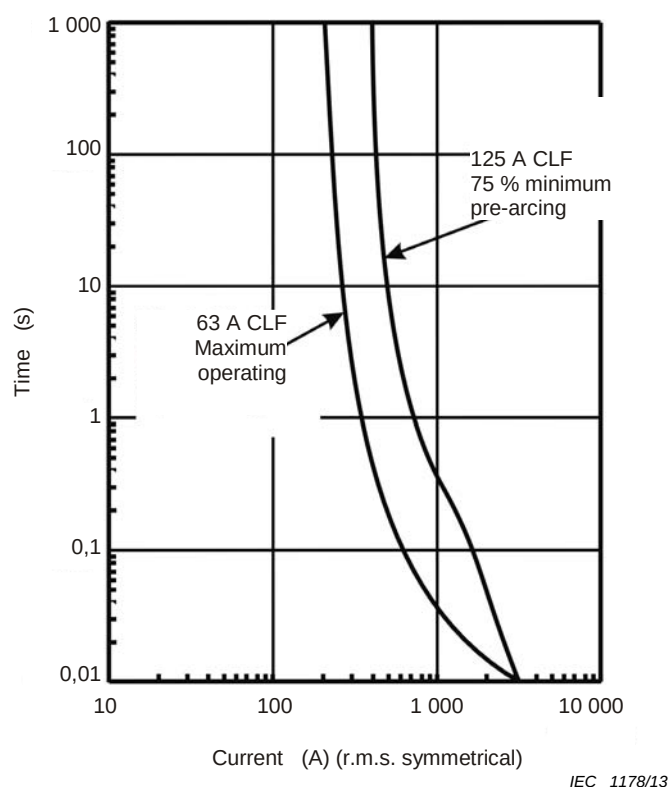


Figure 14 – Current-limiting fuse/Current-limiting fuse TCC curve example

To check TCC curve coordination between the 125 A and 63 A fuse, draw the 75 % minimum pre-arcing curve for the 125 A CLF and the maximum operating curve for the 63 A CLF. Note that the curves intersect at approximately 3 100 A, and at a time below 0,01 s. Therefore, since the maximum prospective current at the 63 A CLF does not exceed 3 100 A, time coordination exists. Because the prospective current is less than the point at which the 125 A TCC curve crosses the 0,01 s line, I^2t coordination does not need to be checked.

Had the prospective fault current at the 63 A fuse been higher, 4 000 A for example (position B in Figure 13), then I^2t coordination would have to be checked. The maximum operating I^2t for the 63 A fuse is 100 000 A²s, while the minimum pre-arcing I^2t for the 125 A fuse is 100 800 A²s. In this case, I^2t coordination at 4 000 A would not be achieved (100 000 A²s > 0,75 × 101 000 A²s = 75 750 A²s). If a 160 A fuse could be used instead of the 125 A fuse (with a pre-arcing I^2t of 136 000 A²s) then this would be acceptable (100 000 A²s < 0,75 × 136 000 A²s = 102 000 A²s). Reach would still be acceptable because although the 300 s current would be higher (at 350 A) the prospective fault current is also higher. Coordination of the larger 160 A fuse with up-stream protection would also need to be checked.

5.1.4.2.4 Current-limiting fuse to expulsion fuse coordination

In this coordination, the current-limiting fuse is the up-stream device. Therefore, the maximum operating TCC curve of the expulsion (down-stream) fuse should be compared with the adjusted (reduced to 75 % in time) minimum pre-arcing TCC curve of the current-limiting (up-stream) fuse. As explained in 5.1.4.1, the operating TCC curve of the expulsion fuse becomes horizontal at a time of 0,8 of a cycle, so the curve will always cross the pre-arcing curve of the current-limiting fuse. Therefore, this fuse arrangement can only achieve coordination up to a certain current level, where the two curves cross.

An example of current-limiting fuse/expulsion fuse coordination is as follows: check coordination between a 100 A Full-Range current-limiting fuse and a 40 A expulsion fuse-link

as shown in Figure 15. Also, verify that the 100 A current-limiting fuse has adequate "reach" (see 5.2.1.5 and 5.1.4.2.3) for its zone of protection. The TCC curves for this combination are illustrated in Figure 16.

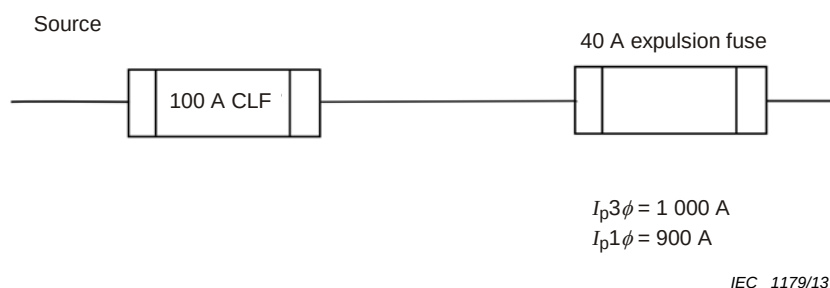
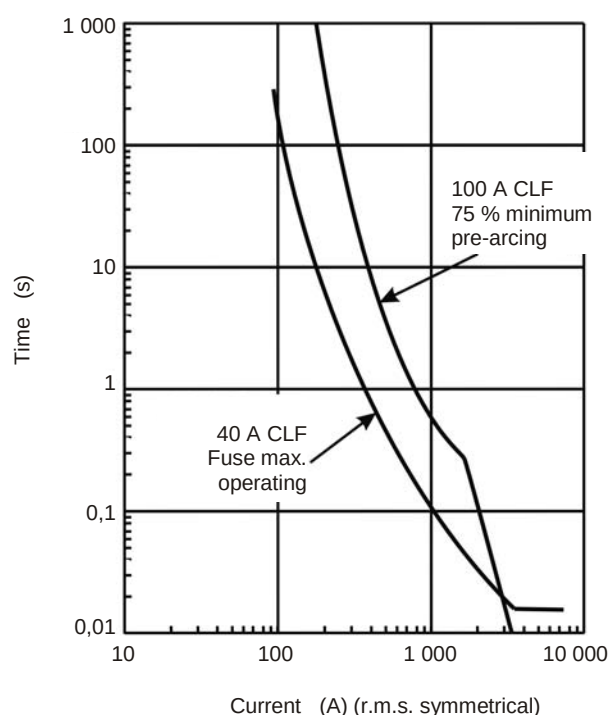


Figure 15 – Current-limiting fuse/Expulsion fuse example



IEC 1180/13

Figure 16 – Current limiting fuse/Expulsion fuse TCC curve example

Before comparing the fuse TCC curves, verify that the 100 A current-limiting fuse has adequate reach. The 100 A fuse must reach to the location of the 40 A fuse-link where the calculated fault current of 900 A is the lowest within its zone of protection. For a Full-Range current-limiting fuse, the fault current should be sufficient to melt the fuse in 300 s or less. The 100 A current-limiting fuse melts at approximately 220 A in 5 min. The ratio between the prospective current at the end of the zone protected by the 100 A current-limiting fuse and the 300 s fuse pre-arcing current is $900/220 = 4,1$. This is higher than most normally used reach factors, so the 100 A current-limiting fuse has adequate reach.

To check coordination, draw the maximum operating TCC curve of the 40 A fuse-link and the 75 % minimum pre-arcing curve of the 100 A fuse. The curves intersect at approximately 2 800 A. Therefore, since the maximum fault current at the 40 A fuse-link, I_p , is 1 000 A, time

coordination exists. Had the prospective current been over 2 800 A, coordination could not be guaranteed and operation of the expulsion fuse could damage the fuse elements of the current-limiting fuse.

5.1.4.2.5 Expulsion fuse to current-limiting fuse coordination

In this coordination, the expulsion fuse is the up-stream device.

For this case, the maximum operating TCC curve of the current-limiting (down-stream) fuse must lie to the left of the adjusted (typically downward to 75 % in time) minimum pre-arcing TCC curve of the expulsion (up-stream) fuse for all current values up to the maximum fault current available at the location of the current-limiting fuse. In addition, if the prospective current at the location of the current-limiting fuse is greater than the current where the current-limiting fuse maximum operating TCC curve crosses the 0,01 s line, the maximum operating I^2t of the current-limiting fuse must be verified to be less than the calculated minimum pre-arcing I^2t of the expulsion fuse, adjusted for preloading.

An approximation of the minimum pre-arcing I^2t for the expulsion fuse can be obtained by squaring the minimum pre-arcing current of the expulsion fuse at 0,015 s and multiplying this value by 0,015 s for 50 Hz (0,0125 s for 60 Hz). The adjusted value will be 75 % of this. Of course, if the manufacturer's I^2t data is available, it should be used.

An example of expulsion fuse/current-limiting fuse coordination is as follows: check coordination between a 160 A expulsion fuse and a General-Purpose 80 A CLF as shown in Figure 17. The TCC curves for this combination are illustrated in Figure 18.



Figure 17 – Expulsion fuse/Current-limiting fuse example

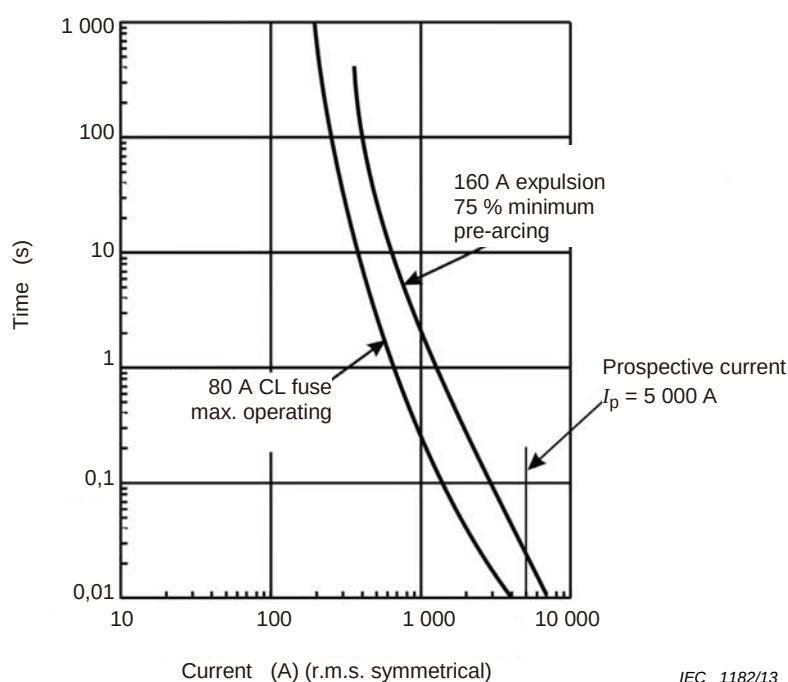


Figure 18 – Expulsion fuse/Current-limiting fuse TCC curve example

To check TCC curve coordination, draw the maximum operating TCC curve of the 80 A current-limiting fuse and the 75 % minimum pre-arcing TCC curve of the 160 A fuse-link. The curves do not intersect; therefore, TCC curve coordination exists.

Since the maximum available fault current I_p of 5 000 A is greater than the current value where the 80 A CLF maximum operating curve crosses the 0,01 s line, the maximum operating I^2t of the 80 A CLF is compared with 75 % of the minimum pre-arcing I^2t of the 160 A fuse-link; the maximum operating I^2t of the 80 A fuse is 181 000 A²s, as specified by the manufacturer. The minimum pre-arcing curve for the 160 A fuse-link crosses the 0,015 s line at approximately 6 000 A; therefore,

$$(6\,000)^2 \times (0,015) \times (0,75) = 405\,000\text{ A}^2\text{s and } 181\,000\text{ A}^2\text{s} < 405\,000\text{ A}^2\text{s}$$

Since the 80 A CLF maximum operating I^2t is less than the minimum pre-arcing I^2t of the 160 A fuse-link, reduced to 75 %, I^2t coordination exists.

5.1.4.2.6 Coordination with General-Purpose current-limiting fuses

A General-Purpose fuse is defined by standards as a device that can interrupt any fault current between a low value equal to a current that will cause the fuse to melt in one hour (here termed its "one-hour pre-arcing current") and its rated maximum breaking current. Typically, these fuses are used for transformer through-fault protection – see 5.2.2.1.1 b) – (for melting times less than about 1 hour), or to protect the system from the effects of a high current, low impedance fault.

General-Purpose current-limiting fuses may not require any series device to be used with them. However, care should be taken so that the fuse is not called upon to interrupt a continuous overload current that is less than its one hour pre-arcing current. In addition, general-purpose fuses should not be subjected to continuous currents between their rated current and their one-hour pre-arcing current, even if such a current does not result in melting. Operating a fuse in this zone can lead to fuse deterioration, which might later prevent the fuse from performing successfully at currents it could otherwise interrupt.

One method of ensuring that the General-Purpose fuse is not overloaded, or required to interrupt overload conditions, is to apply the fuse in conjunction with load or temperature sensing devices such as a secondary or primary breaker in liquid-filled distribution transformers. This prevents the fuse from melting open as a result of overloads or very long duration low current transformer through faults. Breakers must be selected so that they will interrupt the current going through the transformer before the General-Purpose fuse, mounted to the primary of the transformer, is damaged. A secondary breaker will not protect the transformer fuse from being damaged by a high impedance primary fault.

5.1.4.2.7 Coordination with Full-Range current-limiting fuses

A Full-Range current-limiting fuse, as defined by standards, can interrupt any continuous current between the minimum current that can cause melting of its elements, and its rated maximum breaking current. IEC 60282-1 allows two types of testing for Full-Range fuses depending on the surrounding temperature to which it will be subjected. Where the anticipated surrounding temperature is not expected to exceed 40 °C, the fuse must be shown to be capable of interrupting its rated current. The assumption is that use in an enclosure at moderate temperatures will not result in a de-rating sufficient to cause the fuse to melt with a current less than this value. For applications where it is known that the fuse will be subjected to severe temperatures (for example in a transformer) tests are performed with the fluid (air, gas, or liquid) surrounding the fuse at a temperature assigned by the manufacturer (Maximum Application Temperature – MAT). The fuse must interrupt a current, found from tests at the MAT, determined to be the lowest current that will cause it to melt.

A Full-Range current-limiting fuse does not require any other associated device to protect it from overloads or high-impedance faults, as long as the fuse is within its temperature limit. Full-Range fuses can be used to protect against both faults and overloads.

Manufacturer's will often list the allowable continuous current of Full-Range fuses at various surrounding temperatures, as well as de-rating factors for common enclosures such as canisters surrounded by air, SF₆ and oil.

5.1.4.2.8 Coordination with Back-Up current-limiting fuses

It should be noted that when the CLF being coordinated is a Back-Up fuse, because these fuses have a minimum breaking current capability, special coordination rules apply as they must be used in conjunction with another device that will interrupt the currents below their rated minimum breaking current. For specific information on coordination between Back-Up fuses and expulsion fuses see 5.2.2.4.

5.1.4.3 Recloser and fuse coordination

When selecting fuses for reclosers or circuit-breaker by-pass switches, some desirable protection characteristics to be considered are as follows:

- a) to protect the substation transformer from feeder faults in the zone from the bypassed device to the next main circuit down-stream overcurrent protective device, and coordinate with the next up-stream overcurrent protective device up to the maximum through-fault current available at the bypass fuse;
- b) to permit loading of the feeder to the maximum loading practice of the user;
- c) to properly coordinate with main circuit down-stream overcurrent protective devices.

With coordination of reclosers and down-stream (load-side) current-limiting fuses, the possibility of reclosing into a partially melted current-limiting fuse should be avoided, since the fuse may not satisfactorily interrupt if the element melts while picking up normal line current after a successful reclose. For a recloser that is protected by a fuse in overhead applications, the fast (A) curve of the recloser should be below and to the left of the 75 % minimum pre-arcing curve of the fuse for all possible fault currents, in order not to damage the fuse on a temporary fault (in this case it can be considered that the recloser is protecting the down-stream fuse).

To prevent an unnecessary time delay operation of the recloser, and possible fuse damage, there should be a 0,2 s margin required between the maximum operating curve of a "protecting" fuse and the time delay curve of the protected recloser.

On underground circuits, faults will most likely be permanent in nature. Therefore, it is unnecessary for the recloser to reach through the fuse and trip instantaneously for a fault on the load-side of the fuse. Typically, in these situations, the instantaneous trip of the recloser would be defeated.

For a fuse protected by a recloser (usually in a step-up or step-down transformer bank situation), the time delay curve of the recloser multiplied by the recloser "K" factor should be below and to the left of the 75 % minimum pre-arcing curve of the protected fuse when they are plotted on the same voltage base. No additional margin is required.

5.1.4.4 Coordinating current-limiting fuses with arresters

Since current-limiting fuses generate a substantial switching voltage during fault interruption, consideration has to be given to their coordination with source side arresters. While transformer and other equipment insulation does not appear to be adversely affected by the operation of current-limiting fuses, the peak arc voltage may be high enough to drive a source-side arrester into conduction. The energy from the system during the high switching voltage phase of the fuse clearing may, under certain rare circumstances, exceed the capability of the arrester. With the advent of Metal Oxide Varistor (MOV) arresters this situation is rare, since even if a fuse switching voltage causes an arrester to conduct (for example, with a low current rating wire element fuse) the peak of the switching voltage is brief and the MOV arrester quickly stops conducting.

An arrester on the load side of the current-limiting fuse is not vulnerable, i.e., it is neither exposed to the peak arc voltage generated by the fuse nor is it subject to the possibility of excessive energy from the system. Thus, it may be desirable to locate the current-limiting fuses on the source side of the arrester for a transformer installation, recognizing that other arresters on the source side of the fuse may remain vulnerable. The disadvantage of this arrangement is that lightning surges passing through the arrester also pass through the CL fuse (and expulsion fuse if a cutout/Back-Up fuse combination is used). Occasional lightning surges will be large enough to cause nuisance operation of the fuse(s) unless they are very large ratings (generally over 40 A).

5.1.5 Current rating and breaking capacity considerations for fuses in parallel

Fuse manufacturers supply both current-limiting and expulsion type multi-barrel fuse-links that are mounted in a parallel arrangement. Such "factory" paralleled arrangements are not the subject of this subclause.

Configurations of two or more fuses have been successfully used in parallel for many years. This has been accomplished by installing two or more fuse-links and/or their fuse-mounts (supports) connected in parallel. This may be done by a user, a third party assembler, or by a manufacturer supplying a device that holds two or more fuses in a single fuse-mount. This provides for increased current ratings. The continuous current carrying capability of the combination will usually be somewhat less than the sum of the current ratings of the individual parallel fuses due to variations in path resistances and proximity heating effects. The fuse manufacturer should be consulted to determine the appropriate de-rating factor; in many cases, a 10 % de-rating factor for two fuses and a 15 % de-rating factor when three or more fuses are used in parallel have been used.

Before a user places fuse-links and their bases in parallel, the manufacturer should be consulted to verify that the fuse and the fuse-base would function correctly when used together and for guidelines on how to connect the fuses so they have equal current paths. Only fuses from the same manufacturer and having the same type reference and rating should be connected in parallel.

In such cases the following should be noted:

- a) the fuse manufacturer should be consulted to determine the suitability of a given fuse design for connection in parallel;
- b) the current rating of the combination will usually be somewhat less than the sum of the individual fuse current ratings, e.g. due to proximity heating effects;
- c) the I^2t values of the combination during operation will be approximately equal to $n^2 \times I^2t$ of a single fuse-link, where n is the number of fuse-links connected in parallel;
- d) the cut-off current value of the combination during operation at a current of I_p will be approximately equal to $n \times$ cut-off current value of a single fuse-link at a prospective current of I_p/n , where I_p is the value of prospective current of the combination and n the number of fuse-links connected in parallel;
- e) unless otherwise advised by the manufacturer, the maximum breaking current of the parallel combination of fuses cannot be assumed to be greater than that for a single fuse;
- f) unless otherwise advised by the manufacturer, the minimum breaking current of the combination is no lower than n times that for a single fuse of the same given type, where n is the number of parallel fuses;
- g) the pre-arcing TCC curve of n fuse-links connected in parallel will consist, approximately, of a curve having a current I_p at any particular time, t , equal to $n \times I_s$, where I_s is the current at time t on the TCC curve for a single fuse. At long times (over about 100 s) this approximation may become less accurate as adjacent fuses can affect heat flow from each other. This will depend on a number of factors; consult the manufacturer for more information. For an approximation of the maximum operating TCC curve, a similar technique can be used. It should be noted that a manufacturer who approves the use of their fuses in parallel will normally supply TCC curves drawn for the fuse-links mounted in parallel. For longer pre-arcing times, there is the danger of current unbalance between the parallel fuses, causing the combination to melt at a lower current than anticipated. Care is therefore needed with back-up fuses that they do not melt at a current below the minimum breaking current of the combination.

The fuse-links and the fuse-base(s), or the manufacturer's device to hold multiple fuse-links, form a resistive current divider that divides the current flowing through each fuse-link according to the resistance of each current path. Adequate sharing is normally achieved if the resistance of the current path for each fuse-link lies within approximately 2 % to 3 % of the other fuse-link(s) current path(s). This assures that each of the fuses will experience approximately the same current under both steady state and fault interrupting conditions. If the current path of any given fuse has a significantly lower resistance than the other(s), more current will flow through that path, increasing the duty on that fuse-link. In some cases, the duty may cause damage to the fuse-link and it may not successfully carry its share of the load current or interrupt a faulted circuit.

Fuse-links that are paralleled need to be tested in their fuse-base(s), or with an equivalent mounting arrangement, as both the fuse-link resistance and the impedance of the current path through the fuse base(s) control the current distribution through the fuse-links. Generally, the manufacturer can provide information as to how the fuse-links have been tested, to verify performance, particularly for continuous current and circuit interruption tests. These tests are specified in the fuse standards.

When very large current ratings are achieved by paralleling current-limiting fuses, these parallel combinations may not provide any current limiting action (that is reduce the peak current value) even at current levels as high as the typical interrupting ratings of 50 kA or 63 kA.

5.1.6 Voltage considerations of fuses in series

The voltage rating of a combination of two or more fuses in series cannot be guaranteed to be higher than the individual voltage rating of each of the separate fuses. In order to achieve a higher voltage than either fuse alone, the combination in question should be subject to

separate tests to verify this. In some cases, a manufacturer will supply such fuses either as matched pairs, or permanently joined together in series.

In some cases, it is assumed that series connected current-limiting fuses will share voltage and be able to interrupt fault current at a voltage higher than the voltage with which they were tested. Traditionally this has only been considered to occur when fuses are in their current-limiting mode (but see 5.2.6). This is part of the basis for I_1 and I_2 tests in IEC 60282-1 being conducted at 87 % of the rated voltage of the fuse. In a three phase faulted circuit the assumption is that the second and third fuses to clear will share line-to-line voltage. Some North American type transformer applications use current-limiting fuses having a voltage rating equal to or greater than the system phase-to-neutral voltage (with earthed star-earthed star systems and with matched-melt coordinated Back-Up fuses/expulsion fuses combinations protecting delta connected transformers (see 5.2.2.6.2)). It is assumed that with a line-to-line fault (not involving earth) a fuse in each phase will share line-to-line voltage at high fault currents.

Care should be exercised when selecting and replacing fuses for applications in multi-phase circuits if the assumption has been made that, under fault conditions, two fuses will be effectively in series and will share the line-to-line voltage. For two fuses to share the voltage, they must arc simultaneously. Consequently, fuses in all phases should be of the same fuse rating, the same model and/or type of fuse, and be from the same manufacturer; consult the manufacturer for more information.

5.1.7 Fuse recovery voltage withstand

Most fuses are designed to withstand recovery voltage across a blown fuse indefinitely. In addition, outdoor fuses have creepage, and materials or coatings, designed to withstand voltage stress and contamination. However, distribution fuse-cutouts and other drop-out fuses are designed to incorporate a drop-open action following an interrupting operation. This action quickly removes all voltage stress across the fuse holder. There are, therefore, some types of non-drop-out fuses, such as some Back-Up current-limiting types, that are intended to be used with a series expulsion fuse, or other device, coordinated to provide isolation means. Also, many capacitor unit fuses have a built in disconnecter that removes any long-term voltage stress from a blown fuse. Isolation of a blown fuse then prevents possible dielectric breakdown of a, possibly contaminated, non-drop-open fuse if it is subjected to long-time voltage stress. This enables the fuse to be made shorter (with less creepage) than would otherwise be required.

For those special applications where long-time voltage stress can occur across a blown fuse, and dielectric breakdown would permit resumption of current flow, the fuse manufacturer should be consulted as to the adequacy of the proposed fuse for this application.

5.1.8 Partial discharge

See 5.2.5.5.

5.2 Typical applications

5.2.1 Protection of cables and overhead lines

5.2.1.1 General

5.2.1.1.1 Inrush considerations

Inrush current into a distribution circuit for the first few cycles can be very high due to magnetizing current for transformers that have high residual magnetic flux in the core and maximum energizing flux. This coupled with incandescent lighting inrush and locked-rotor inrush into motors (plus some out-of-phase residual flux) should be considered by the user. Transformer magnetizing current may be quite high for an individual transformer, but when the transformer is only one of many in the circuit being energized, one would expect the total magnetizing inrush current in the circuit to be less than the sum of each transformer's

maximum magnetizing inrush current. Also, inrush currents that are quite high could result in a voltage drop that would act to reduce the inrush currents.

For example, if ten 50 kVA transformers were being energized simultaneously for a total of 500 kVA, an inrush current of 20 times transformer rated current would represent a connected load of 10 000 kVA at that instant. Some distribution circuits would experience appreciable voltage dip during this period, and thus significantly reduce the inrush magnitude. However, since it may be difficult to determine which circuits are capable of producing and sustaining the higher inrush currents for varying numbers of transformers being applied, the conservative approach would be to utilize the connected kVA and the multipliers discussed in 5.2.2.1.2 (25/12 times at 0,01/0,1 s) for single transformers.

Experience has shown that if a distribution sectionalising fuse was carrying no more than 30 % of its rated current at the time of a power failure, power has not been off for more than one hour, and no significant changes in the load have taken place, then there should be no problem with inrush currents.

A fuse operation may result when the connected load current is between 30 % and 50 % of the fuse rating. Above 50 %, the circuit should be sectionalised to pick up only a part of the load. It is not recommended that a fuse be bypassed (by use of a low impedance "jumper", cable for example) to avoid sectionalising the circuit.

5.2.1.1.2 Load pick-up considerations

A more important factor for selecting a sectionalising fuse is often that of cold-load pick up. After an extended outage period, many applied loads are ready to start up as soon as the transformers are re-energized. Some of these loads, such as motors, can have current requirements of 5 to 10 times the normal running current for a period of time ranging into seconds. Published literature (see the bibliography) on this subject indicates that the sectionalising fuse should be capable of handling about 6 times the peak load current prior to the outages for one second, three times the peak load current prior to the outages for 10 s, and 2 times this value for 15 min.

5.2.1.1.3 Fault considerations

The rated maximum breaking current of the fuse should be higher than the prospective (available) fault current. The fuse manufacturer specifies maximum breaking current for a device. A sectionalising fuse typically would be required to interrupt high fault currents since the transformer fuse or protective device would sense and interrupt transformer secondary faults and abnormally high overload currents. When the transformer fuse is expected to respond to low-level overcurrents, it must be capable of interrupting those currents.

5.2.1.2 Fuses for reclosers or circuit-breaker bypass switches

Some desirable protection characteristics to be considered in selecting fuses in these applications are as follows:

- a) to protect the substation transformer from feeder faults in the zone from the bypassed device to the next main circuit down-stream overcurrent protective device, and coordinate with the next up-stream overcurrent protective device up to the maximum through-fault current available at the bypass fuse;
- b) to permit loading of the feeder to the maximum loading practice of the user;
- c) to properly coordinate with main circuit downstream overcurrent protective devices.

5.2.1.3 Fuses for sectionalising

Some desirable protection characteristics to be considered in selecting fuses for these applications are as follows:

- a) to protect conductors from thermal failure or extreme heating in the zone from the sectionalizing fuse to the next main circuit downstream overcurrent protective device, and coordinate with the next upstream overcurrent protective device up to the maximum fault current available at the sectionalizing fuse;
- b) to permit loading of the circuit to be maximum loading practice of the user;
- c) to properly coordinate with main circuit downstream overcurrent protective devices.

5.2.1.4 Fuse applications on subtransmission systems

Some desirable protection characteristics to be considered in selecting fuses for these applications are as follows:

- a) to protect the substation bus from faults at or within the distribution substation transformer, and coordinate with all upstream overcurrent protective devices up to the maximum fault current available on the substation bus;
- b) to provide maximum protection to the transformer from through-faults. The degree of transformer protection is determined by comparing the maximum operating time-current characteristic curve for the selected fuse with the appropriate transformer short-time loading curve. Both curves need to be properly adjusted to reflect differences between primary and secondary phase currents and winding currents associated with specific transformer connection involved and the types of possible faults in the secondary circuit;
- c) to provide detection and isolation of internal transformer faults and reduce the possibility of a transformer case rupture;
- d) to permit loading the transformer to the maximum loading practice of the user;
- e) to withstand combined transformer magnetizing inrush and load pickup current after short-time (up to 1 min) voltage interruption on the substation bus;
- f) to properly coordinate with overcurrent protective devices on the secondary of transformer.

5.2.1.5 Determining the zone of protection for fuses (reach)

Fuses melt and clear overcurrent conditions according to their TCC curves. The minimum current that produces successful fuse melting and interrupting should be less than the minimum fault current that might develop from a fault at the end of the zone to be protected (the end of the line or the next down-stream protection device). The minimum fault current must therefore be determined at each sectionalising point and at the end of each zone of protection.

A term used in coordination and overcurrent protection work is "reach". Reach is a measure of the ability of a protective device to sense a fault condition within its zone of protection. It was developed in the context of devices, such as reclosers, that have a clearly defined pick-up value – if a sufficient current is not available the device will not operate. The word was originally used to describe the ability of a recloser to "reach" beyond the next fuse and operate without the fuse melting (see 5.1.4.3). However it is now also used for fuses, and has particular relevance for those fuses having a defined minimum interrupting capability. Such fuses include General-Purpose current-limiting fuses and type "B" expulsion fuses (boric acid fuses). General-Purpose fuses should not generally be subjected to currents between their rated current and their one-hour pre-arcing current, and boric acid fuses can be damaged by prolonged overloading.

In order to clarify the concept of reach, refer to Figure 19. Consider device A as the device for which a calculation of the reach is desired. Fault current calculation methods are described in IEEE Std 141 [4], IEEE Std 399[5] and IEC 60909-0.

The zone of protection of device "A" is shown by the dotted line. It terminates at other protective devices ("B", "C", etc.) and the end of the radial taps (spurs). Assume that the desired operating current (minimum pick up value) of device "A" is 100 A. This is a current that gives a required operating time – for a general-purpose fuse it might be the minimum one

hour pre-arcing current. While a fuse may be capable of melting in several hours (e.g. a full-range current-limiting fuse) it is not normally desirable to permit a fault to exist for that long. An appropriate maximum time may therefore be chosen for the minimum device operating current, e.g. 300 s (all fuses have TCC curves drawn to 300 s) or a user might want a shorter maximum fault time. The current is calculated for various points within the zone of protection of the fuse. In the example the lowest prospective current in the zone is at point 10, which produces 300 A flowing through fuse "A".

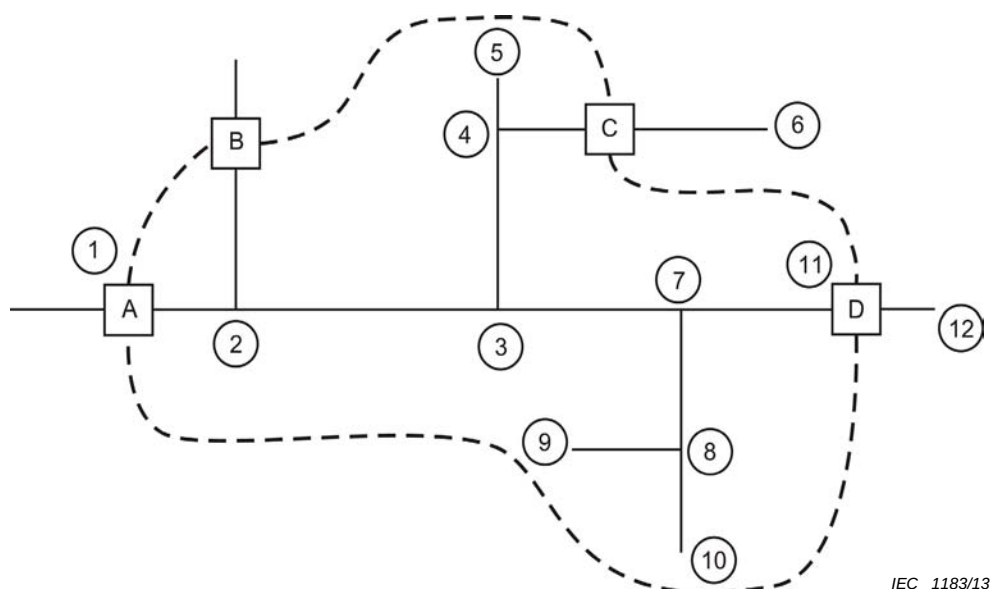


Figure 19 – Reach example

Clearly 300 A would cause the fuse to operate in less than the maximum desired time (for this example 300 s). However, typically, fault currents on distribution circuits are calculated for bolted faults (relatively low resistance faults). In actuality, upwards of 90 % of all faults encountered on overhead distribution circuits are temporary in nature (e.g., tree limbs brushing conductors), and many such faults have high resistance, thereby significantly reducing the magnitude of fault current. The possibility of reduced values of fault current must be taken into account when sizing a protective device to reach to the end of its zone of protection. A user can therefore use their experience to determine how much less current there can be, and incorporate a "safety factor" into the calculation. Typically factors of 3 or less are used. In the above example, the "reach" margin is:

$$\text{Reach margin} = \frac{(\text{minimum fault current through device within zone of protection})}{(\text{minimum current to operate protective device})}$$

which, in this example, would equal

$$\frac{300 \text{ A}}{100 \text{ A}} \quad \text{or} \quad \frac{3}{1}$$

This is normally an acceptable margin (it also allows for some errors in calculating the prospective current).

Experience shows that faults are normally either of low impedance, giving currents similar to calculated values, or are of such high impedance that it is very difficult to detect with upstream fuses. Utilities with this experience therefore tend to use lower reach margins.

5.2.1.6 Current-limiting fuses

5.2.1.6.1 Selecting minimum fuse current ratings

Fuses should be sized based on total connected nameplate kVA, magnetizing inrush, and the anticipated peak load conditions as discussed in 5.2.1.1.

Since magnetizing inrush is a high current for a short duration, if the fuse-link is not chosen correctly, one or more fuse elements may melt open at a minimal cross-sectional area. Partial melting of a fuse element, or full melting of a partial number of parallel elements, may reduce the continuous current capability of the fuse and its ability to withstand additional surges. For fuses fitted with a striker, which trips a series switch, this can result in nuisance operation. However for other designs of fuse the result could be overheating, and eventual fuse failure, or the fuse may be melted by a current that does not allow it to clear successfully. Because of this, sizing a current-limiting fuse properly to withstand magnetizing inrush is extremely important.

To evaluate the loading capability of fuses used for line protection, each fuse's minimum pre-arcing curve should be compared with the magnetizing inrush and the cold-load pick up characteristics of the circuit it is protecting. The value of current at which the fuse's minimum pre-arcing curve lies completely to the right of each of these points for each case, i.e. cold-load pick up and magnetizing inrush, can be tabulated.

Since the shape of the minimum pre-arcing curve for each fuse varies, some fuses are more suitable for withstanding cold-load pick up than magnetizing inrush and vice versa. This necessitates looking at each fuse individually instead of using a rule-of-thumb such as sizing a fuse for 1,5 times to 2 times the connected load current.

5.2.1.6.2 Zone of protection considerations

For many years, current-limiting fuses have been used for radial tap line (spur-line or branch) protection of overhead and underground distribution circuits. In addition to the current-limiting aspects of these fuses, they are used because of their effectively noiseless operation and their high interrupting capabilities. Applying current-limiting fuses as spur-line protection requires considerations not typically encountered with other overcurrent protective devices. With most overcurrent protection devices, miscoordination only results in the nuisance operation of a source-side device. Miscoordination of current-limiting fuses, however, may not only result in the nuisance operation of the fuse but also may result in the failure of the fuse. Subclause 5.2.1.6.2 outlines the special considerations needed for current-limiting fuses applied as spur-line protection.

a) General-Purpose current-limiting fuses

It is clear that a General-Purpose fuse will be subjected to a fault current at the end of its zone of protection; however it should also be able to interrupt the lowest value of fault current anticipated. Some General-Purpose current-limiting fuses can be damaged if they are subjected to a continuous current above their rated current and below their one-hour pre-arcing current (given by manufacturer). Either the fuse may melt at a current too low for it to interrupt, or the overload current heats up the fuse causing damage to the fuse components or its holder before the fuse can melt and interrupt the current. Therefore, the reach capability of a General-Purpose fuse is largely dependent on its design. Any limitation on overloading must be considered when determining the reach for these fuses.

For example, one manufacturer of a General-Purpose current-limiting fuse states that the fuse will carry 100 % of the current rating continuously without damage. However, in order to melt and clear properly, the over-current must be at least 220 % of the fuse's rating. If this fuse is subjected to a continuous current in excess of its rating (up to 220 %), it may sustain damage to its fuse body and possibly fail before the fuse element can melt and clear. Therefore, the minimum allowable fault current at the end of the zone of protection to obtain a 3/1 reach with this General-Purpose current-limiting fuse would be: $I_r \times 2,2 \times 3,0$ or $I_r \times 6,6$, I_r being the fuse current rating

b) Full-Range current-limiting fuses

The concept of reach (5.2.1.5), in the case of Full-Range current-limiting fuses, becomes almost arbitrary considering the low-current interrupting capability of the fuse. However, consideration should be given to whether the fuse will interrupt the low values of fault current before other devices in the system are adversely affected.

To determine reach, the current at which the fuse melts in an acceptable time (e.g. 300 s or less) must be determined. From the minimum pre-arcing TCC curve for one manufacturer's 100 A fuse it can be shown that a current of approximately 220 A will melt the fuse in 300 s. Therefore, to obtain a 3/1 reach, the minimum allowable fault current at the end of the zone protected by this fuse would be as follows: 220 A (current to melt at 300 s) times 3 meaning 660 A. Again, the Full-Range fuse will satisfactorily interrupt lower currents; however, the above criterion will limit the pre-arcing time.

5.2.1.7 Expulsion fuses

The most common type of fuse for line protection and sectionalising applications are expulsion fuses. They are normally drop-out fuses so that it is easy to see when a fuse has operated. Fuses should be sized based on total connected nameplate kVA, magnetizing inrush, and the anticipated peak load conditions as discussed in 5.2.1.1.

Since magnetizing inrush is a high current for a short duration, the fuse element may melt open where the fuse element has a minimal cross-sectional area. Partial melting of a fuse element may reduce the continuous current capability of the fuse and its ability to withstand additional surges. This can lead to nuisance operation.

Consideration of the zone of protection (reach) of an expulsion fuse is covered in 5.2.1.5.

5.2.1.8 Combination of Expulsion and current-limiting fuses

If the available fault current at the location of an expulsion fuse is higher than the fuse's rated maximum breaking current, then one of three options are available. The first is to replace the expulsion fuse with one having a higher maximum breaking current. If the device is a distribution fuse-cutout, this may require a different fuse-carrier or a different fuse-holder (fuse-carrier and fuse-base, i.e. the whole fuse except for the fuse-link). Alternatively, a Class B expulsion fuse may be needed, as they tend to have higher interrupting ratings. The second option is to replace the expulsion fuse with a current-limiting fuse. However this may make coordination with source side (up-stream) fuses and breakers harder since current-limiting fuses tend to have different TCC curves. Also, fewer current-limiting fuses having a drop-out action are available (usually desirable for overhead circuits for both isolation and visibility). The third option is to add a current-limiting fuse to the expulsion fuse and make a fuse combination (sometimes termed the "two-fuse" method). The current-limiting fuse in this case is usually a Back-Up fuse. When this is done, correct coordination between the two fuses is needed (see 5.2.2.5 and 5.2.2.6.2). The advantage of this method is that, if fault currents have increased beyond the capability of an economical expulsion fuse, it is often possible to retro-fit existing fuse installations with the current-limiting fuses. Adding a current-limiting fuse also helps with discrimination, that is minimizing the extent of an outage. This is because the relatively fixed current-limiting fuse I^2t makes it easier to coordinate with up-stream (source side) fuses and circuit breakers than an expulsion fuse. Of course the combination approach is also used extensively for new installations as a cost-effective solution to circuits having a high fault current and/or low power factor (high X/R). When considering the zone of protection (5.2.1.5), since it is the expulsion fuse that provides low current operation, it is the expulsion fuse characteristics that are considered.

5.2.2 Distribution transformer applications

5.2.2.1 General

5.2.2.1.1 Purpose of fuses

It should be remembered that the primary purpose of a transformer fuse is to remove a faulted transformer from the power system and minimize the risk of an eventful failure. Protection of the system, and minimization of the extent of the area affected by a fault, is therefore a

significant concern. An "eventful" transformer failure, is one that results in external damage that might be a risk to persons or property. In addition to these primary benefits, fuses can, under certain circumstances, also provide overload or secondary short-circuit protection for the transformer. While this is normally provided by secondary protection, it is sometimes required from the primary fuses (sometimes as "back up" to the secondary protection). Some desirable protection characteristics to be considered in selecting fuses for transformer applications are listed; however, it should be borne in mind that some of these requirements may be contradictory, in which case the user's priorities should be taken into account:

- a) to protect the distribution system from the effect of faults at or within the transformer, and coordinate with the next upstream overcurrent protective device up to the maximum fault current available at the transformer fuse;
- b) to provide the best possible protection to the transformer from damaging through-faults (the current flowing through the transformer from a secondary fault, outside the transformer). The degree of transformer protection is determined by comparing the operating time-current curve for the selected fuse with the appropriate transformer short-time loading curve. Both curves need to be properly adjusted to reflect differences between primary- and secondary-phase currents and winding currents associated with the specific transformer connection involved and the types of possible faults in the secondary circuit, see 5.2.2.1.5;
- c) to provide detection and isolation of internal transformer faults and reduce the possibility of transformer case rupture;
- d) to permit loading the transformer to the maximum loading practice of the user;
- e) to withstand combined transformer magnetizing inrush and load pickup current after short-time (up to 1 min) service interruption, and combined transformer magnetizing inrush and load pickup current after extended (30 min and longer) outages;
- f) to properly coordinate with overcurrent protection devices on the secondary side of the transformer;
- g) to withstand surge discharges through a transformer with an earthed primary winding that experiences saturation of its magnetic circuit by a lightning-induced surge voltage with a long time wave shape (primarily with small transformers 25 kVA and lower);
- h) to withstand surge currents that may be discharged through an arrester located on the load side of the fuse and ahead of the protected transformer. This surge may be in addition to that referred to in 5.2.2.1.1 g).

5.2.2.1.2 Inrush considerations

Fuses may be subject to damage if inrush currents cause partial melting of the fuse element(s). Inrush currents due to energizing a transformer can be high and require checking as part of the normal selection and coordination procedure.

When a transformer is energized, relatively high inrush currents may occur, depending upon the residual flux in the core and the voltage at the instant of closing the circuit. Tests with typical transformers, as well as many years of experience in applying both current-limiting and expulsion fuses for transformer applications, have produced a generally accepted set of guidelines for fuse selection. These guidelines consider the typical first loop current value, as well as the r.m.s. value over the duration of a typical inrush current. The guidelines are in the form of two time-current points, and are expressed as multiples of transformer rated full-load current. The transformer manufacturer's guidelines should be followed if available, but typically the values used are 25 times rated current for 0,01 s (North American practice) and/or 12 times rated current for 0,1 s (universal practice). Different values may be applied based on transformer size and design. These points are compared to the fuse's minimum pre-arcing TCC. If at these points, the fuse characteristic lies above and to the right, then the fuse is considered to be capable of properly withstanding the magnetizing-current inrush of the transformer.

5.2.2.1.3 Pick-up considerations

Cold-load pick up is a transient current condition that occurs upon energizing a circuit after it has been de-energized for 2 min or longer. Fuses used in certain applications, such as protecting pumps, can experience elevated currents after outage times as short as 6 s. Tests have shown that large fans can draw six times rated current for 60 s. On residential circuits, cold-load currents can cause problems because load diversity has been lost. Refrigerators, air circulating fans, air conditioner compressors and/or heat pumps, water pumps, etc., are all ready to cycle on. The combined starting currents of these devices could also contribute to an inrush current problem known as cold-load pick up. Since compressors have little or no head pressure, their motors are able to come up to speed rapidly enough to mitigate this problem.

Another problem, commonly referred to as sympathetic tripping, arises on a momentary dip in voltage, due to a fault on another part of the system, which is then cleared in a matter of cycles, allowing the subject area voltage to be restored to normal. During the voltage dip, voltage in parts of the system drop to a point that compressor motors stall. When full voltage is restored, the large compressor motors cannot come up to speed due to high head pressure. Locked rotor currents exist until the thermal overload on the compressor motor trips. Tests on circuits subject to this phenomenon indicate approximately 2,7 times pre-fault current for about 7 s. The 2,7 multiplier results from all motors being instantaneously energized (some contactors have not had a chance to open), with a loss of diversity. Low power factor locked rotor conditions combine with the inductance in the secondary, the transformer, the lateral, the mainfeeder, and the substation to cause low voltage on the motor terminals and the overcurrent. Seven seconds is the approximate time it takes for the thermal overloads on motors with locked rotor currents to trip open.

The distinction between sympathetic operation and cold-load pick up arises in part from the operating time of control relays and contactors. In most cases, there is enough randomness in closing to allow the relatively small, single-phase air conditioning motors to come up to speed, at normal voltage, in much less than one second, since there is no head pressure.

No standardized values have existed in IEC fuse standards as these pick-up requirements clearly depend on the user's practices. Furthermore, because these requirements may be in conflict with the desire that fuse operation in the 2 to 10 s region be with as low a current as possible (see 5.2.2.1.4), pickup requirements should be by agreement between manufacturer and user. However, in the absence of specific information, a commonly used rule of thumb in many parts of the world is that the fuse should be selected so that the minimum pre-arcing TCC curve lies to the right of the points corresponding to six times rated full-load current for one second, three times rated full-load current for 10 s, and 2 times rated full-load current for 15 min. These requirements can often be reduced for larger sized transformers.

Repeated starting currents from heavily loaded motors can cause unusual stresses on a current-limiting fuse element; special designs for motor-starter applications have been produced to handle this special application. This is discussed in 5.2.3.

5.2.2.1.4 Transformer loading and overloading considerations

IEC 60076-7 and IEC 60076-12 define the safe loading for transformers. These standards detail the potential loss of transformer life for various load levels and durations. The information is given in a series of equations and in tabular form. The data in the tables can also be graphed and expressed as a safe loading curve. The fuse's operating TCCs should lie to the left of the safe loading curve to provide adequate protection. In many cases, transformer overload protection is provided by secondary devices (fuses or circuit breakers). However, particularly with smaller sized transformers using the North American approach (see 5.2.2.4) primary fuses may have to provide overload protection.

Generally, a transformer or fuse manufacturer will recommend fuse sizes to handle full-load and some overload currents without fuse operation or damage. The surrounding temperature that the fuse encounters during the overloading will depend on where the fuse is located.

5.2.2.1.5 Through-fault considerations

The current flowing through a transformer due to a fault on the secondary side is often termed a "through fault". The highest current occurs when the fault is on the secondary terminals of the transformer (also then called a "bolted secondary" fault), when it is limited only by the transformer impedance (and also to a small extent by up-stream system impedance). IEC 60076-1 requires that a transformer have a thermal ability to withstand a short circuit for 2 s (with transformers up to 2 500 kVA neglecting system impedance if it is equal to or less than 5 % of the short-circuit impedance of the transformer). The primary fuse clearing TCC curves are required to lie to the left of the 2 s point. Other transformer standards recognize a mechanical component in the damage from through faults, and may have more stringent requirements. Fuse clearing TCC curves may then be required to lie to the left of an additional characteristic drawn for times longer than 2 s and based on constant I^2t values from the 2 s short-circuit point. Secondary faults, when reflected to the primary winding that the current-limiting fuse would be protecting, are typically of magnitudes to operate the fuse in 0,02 s to 1,0 s; thus, little or no current-limiting action would occur. Therefore, the fuse must have low-current interrupting ability to handle this duty. It should be noted that, under fault conditions, the transformer-winding arrangement will affect the current in the primary lines (and therefore the fuses) compared to current in a secondary phase. Thus for an earthed star – earthed star connected transformer, one per-unit current in a secondary phase is supplied by one per-unit current in a primary line. However, for a delta – earthed star transformer, one per-unit current in a secondary phase, experiencing a phase to ground fault, is supplied by only 58 % per-unit primary line current.

The through-fault condition may be disregarded under some conditions when using a switch-fuse combination (see 5.2.7.2)

5.2.2.2 Current-limiting fuses

5.2.2.2.1 General

Current-limiting fuses are commonly used to protect transformers for reasons covered in 4.1.5. There are two common methods of protecting transformers based loosely on "European" practice and "North American" practice, although there are many parts of the world that use one, or both, of these practices. IEC standards recognize "European practice" and "North American practice" in terms of preferred voltages and insulation levels; therefore these terms will also be used in relation to transformer protection practices, while recognizing that such practice is not unique to either area.

While there are many reasons why one or the other practice is adopted, one of the driving forces is the density of utilization. Where many customers are concentrated in a particular area, larger sized transformers used with ring main units (incorporating switch-fuse combinations, with the switch tripped by the back-up fuse striker, or circuit-breakers) are often more economical. This is "European" practice. Where customers tend to be more spread out, it is more common to provide a small number of households (often one) with an individual transformer. This makes the switch-fuse combination impracticable. Instead, either a Full-Range fuse is employed, or a combination of back-up fuse and expulsion fuse provides the full-range capability. This is "North American" practice, and such a combination of fuses poses special coordination requirements, which will be covered in 5.2.2.4.

5.2.2.2.2 Fuse-link time-current characteristics

The time-current characteristics of HV fuse-links for transformer circuit applications should have the following features:

- a) relatively high operating current in the 0,1 s region so as to withstand transformer inrush current and give good coordination with protection devices on the secondary side (where fitted), see 5.2.2.1.2;
- b) relatively low operating current in the 10 s region so as to:

- ensure rapid clearance of transformer winding faults, secondary side faults (see 5.2.2.1.5) and, if applicable, primary side earth faults;
- give good coordination with up-stream overcurrent protective devices (source side).

Therefore, the pre-arcing time-current characteristics of fuse-links for transformer circuit applications should preferably be within the following limits:

$$I_{f10} / I_r \leq 6$$

- to fulfil condition b)

$$I_{f0,1} / I_r \geq 7(I_r / 100)^{0,25}$$

- to fulfil condition a)

where, all current values being expressed in amperes,

I_r is the rated current of the fuse-link;

I_{f10} and $I_{f0,1}$ is the pre-arcing currents corresponding to 10 s and 0,1 s respectively, expressed as mean values with the tolerances specified in 4.11 of IEC 60282-1:2009.

The term $(I_r / 100)^{0,25}$ is introduced to take account of the fact that the pre-arcing time-current characteristics for a range of fuse-links diverge as they approach the short-time region.

5.2.2.2.3 Coordination

Figure 20 illustrates a typical transformer application involving a high-voltage fuse-link (or fuse-links), a transformer and possible protective devices on both source and load sides.

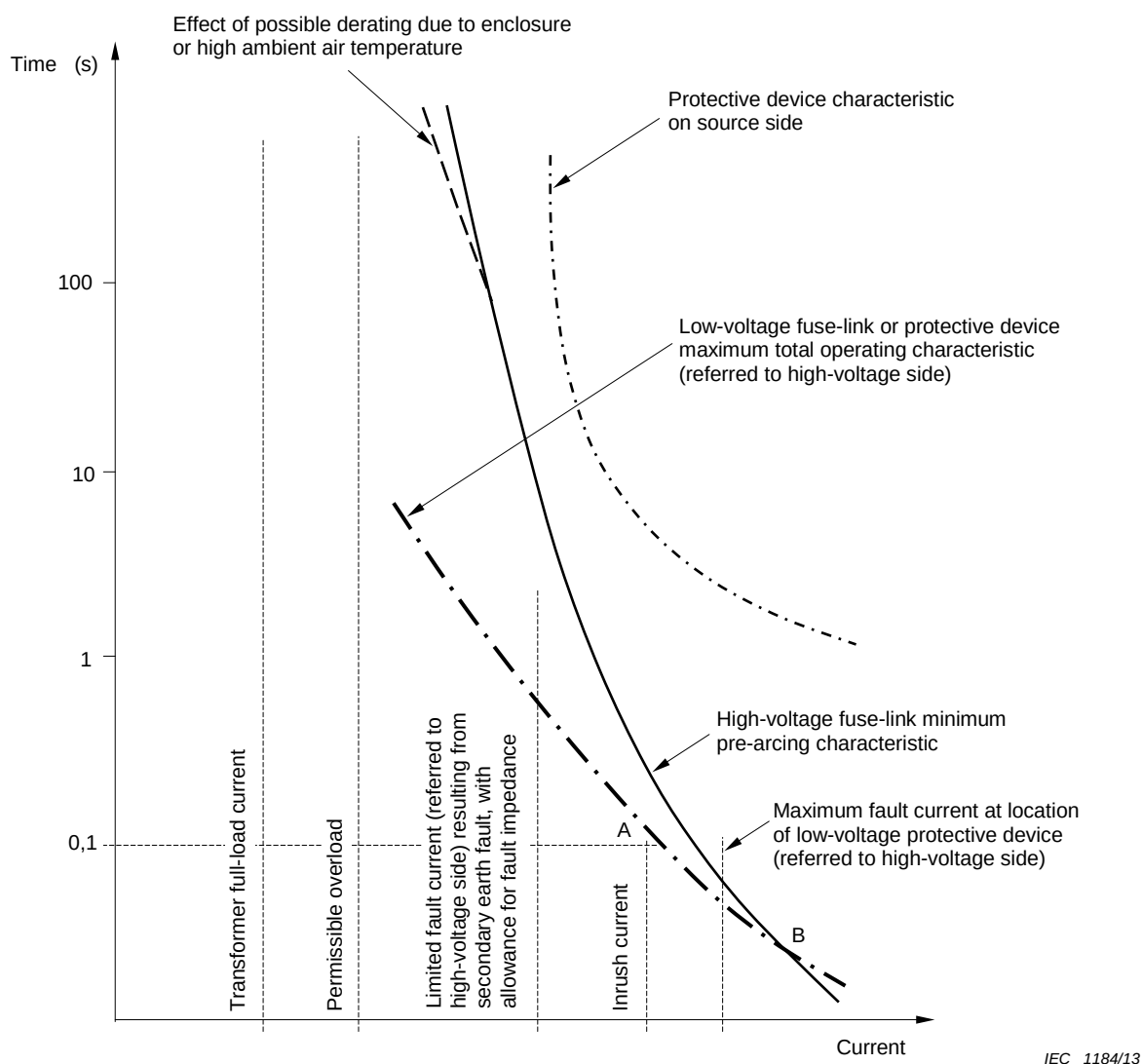


Figure 20 – Characteristics relating to the protection of the HV/LV transformer circuit

The transformer will be chosen first for its particular duty. This establishes the value of the rated current of the transformer, the value of the permissible overload current (where applicable) and also by inference, the inrush current. The HV fuse-link(s) are then chosen so as to give optimum protection to the circuit, bearing in mind the factors of Items a) to d) listed below.

With reference to Figure 20, the following should be noted:

- a) the primary side HV fuse-link minimum pre-arcing time-current characteristic should be to the right of point A defining the transformer inrush characteristic. For practical purposes this may be taken as approximately 12 times the transformer rated current for a duration of 0,1 s;
- b) the rated current of the primary side HV fuse-link should exceed the rated current of the transformer:
 - 1) by an amount sufficient to allow for permissible overloading of the transformer under service conditions (refer to IEC 60076-7 and IEC 60076-12);
 - 2) by a further amount where the fuse-link(s) are mounted in an enclosure so as to ensure that the specified temperature limits for fuse-links are not exceeded and so that excessive fuse element temperature does not lead to premature fuse operation. See Annex A;

- 3) by a further amount where the ambient air temperature is likely to exceed that specified in Clause 2 of IEC 60282-1:2009;
- c) the pre-arcing current of the primary side HV fuse-link should be as low as possible in the 10 s region of the fuse time-current characteristic in order to ensure the maximum protection of the transformer (see 5.2.2.1.5);
- d) for complete coordination between primary side and secondary side fuse-links or other protective devices on the load side, the intersection B of the primary side time-current characteristic (minimum pre-arcing) and the secondary side device characteristic (maximum operating) (as referred to the primary side taking into account the appropriate ratio) should occur at a value of current greater than that of the maximum fault current on the load side of the secondary side protective device.

Finally, where it is seen that the desired degree of coordination has not been achieved, the selection or setting of the source side overcurrent protective device may be re-examined. Similarly, the maximum rating of the secondary side fuse-link(s) may need to be reduced for the same reasons.

5.2.2.2.4 Rated voltage

Switching voltage (peak arc voltage) requirements for current-limiting fuse-links (see 4.2.4.5) are specified in IEC 60282-1, and are set at values that should not cause problems with transformer or system insulation levels. In some countries it is the practice to use "dual voltage" transformers, i.e. transformers that contain internal switching arrangements that enable them to be used with more than one standard primary voltage. The current-limiting fuse must have a voltage rating equal to or greater than the selected voltage. If the current-limiting fuse will not be changed depending on the actual service voltage, or if the typically North American practice of an internally mounted fuse that cannot easily be replaced is employed (see 5.2.2.4), then the fuse must be chosen based on a current rating suitable for the lower voltage setting, and a voltage rating suitable for the higher voltage setting. In this case, if the lower voltage is less than about 50 % of the fuse rated voltage, the switching voltage (suitably adjusted for the lower system voltage) should be checked to ensure that there will be no system insulation breakdown issues. In addition, the use of a single current-limiting fuse for both voltages, unless it is intended only to provide high-voltage short-circuit protection, may result in other transformer protection requirements being compromised.

5.2.2.2.5 Fuse class and rated minimum breaking current:

Back-Up fuse-links should be selected so that the value of minimum breaking current is appropriate to the particular application concerned. It should be stressed that use of a fuse-link having too high a value of minimum breaking current could, under certain circumstances, result in disruptive failure of the fuse-link and consequent damage (see 4.2.3.4). In the case of General-Purpose fuses, they should not be exposed to overload currents below a current that causes them to melt in one hour (see 4.1.2.1).

5.2.2.2.6 Back-Up fuses used in combination or association with other switching devices

When a Back-Up fuse is used in conjunction with a series switching device having a low current interrupting ability (switch, circuit breaker, or other fuse), its minimum breaking current need only be low enough to ensure correct coordination with the series switching device. Note that the term "combination" when applied to a fuse and series connected mechanical switching device refers to devices specifically covered by IEC 62271-105; in this report, the relationship between fuses and switching devices that are not covered by IEC 62271-105 is termed an "association" (see 5.2.7 for a full explanation of this).

- a) Use in switch-fuse combinations (striker tripped):

In applications where operation of the fuse striker ensures operation of the combination tripping mechanism, automatic transfer of interrupting duty under low fault conditions from the fuse to the combination switch is assured. Back-up fuses can be used for this

application where it is necessary to ensure that the duty transferred to the combination switch is within its maximum breaking capacity (transfer current criteria, see 5.2.7).

In the case of intentional delay of the tripping mechanism of the switch (see IEC 62271-105:2012, 3.7.119) it is the responsibility of the manufacturer of the switch-fuse combination to ensure that the arcing time of the fuse (consisting of the fuse initiated opening time plus the arcing time of the switch) remains below its demonstrated arcing withstand time, which is at least 100 ms; see also 5.2.7.2.4.

b) Use in relay-operated switchgear:

In such applications back-up fuses may be used where it is necessary to ensure that the time-current characteristics of fuse and associated switchgear relay intersect at a value of current above the minimum breaking current of the fuse and under the maximum breaking capacity of the associated switchgear (maximum take-over current for a combination).

c) Use with series expulsion fuse: (see 5.2.2.4)

For standardized applications of a) and b) above, refer to IEC 62271-105, *Alternating current switch-fuse combinations*, to IEC 62271-107, *Alternating current fused circuit-switchers for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV*, and to IEC 62271-106, *High-voltage alternating current contactors, contactor-based controllers and motor-starters*.

In principle, the guidance of a) and b) applies also to fuses used in other forms of association with switching devices not covered by IEC standards (see 5.2.7).

5.2.2.2.7 Current-limiting fuses used as the only protection on the HV side of the transformer

In European practice, for applications where it can be shown by calculation or by service experience that low fault levels are unlikely to occur, then suitable Back-Up fuses may be used. In this case it is necessary to ascertain that the rated minimum breaking current of the fuse-link is less than the smallest HV fault current likely to occur due to a fault located between the HV fuses and the low-voltage protecting device(s). This method is seldom used in North American practice, both because secondary protection may be some distance from the transformer, leading to lower potential fault currents, and because current-limiting fuses are often mounted in the transformer liquid, so that a fuse melting below its minimum breaking current could lead to a serious failure.

For applications where experience or calculation indicates there is a possibility of very low values of overcurrents (i.e. below the minimum breaking current of Back-Up fuses) then if a single fuse is desired, general-purpose or full-range fuses should be employed.

The latter class of fuse is especially recommended for applications where overcurrents can occur at values as low as the fuse minimum melting current or where the fuse has to be de-rated for use in an enclosure.

It should be checked that for a general-purpose fuse the 1 hour melting current (or the minimum breaking current if rated by the manufacturer), and for a Full-Range fuse the minimum melting current, of the selected fuse is not above the value of the overcurrent to be considered.

5.2.2.2.8 Current-limiting fuses used to provide short-circuit protection in combination with expulsion fuse-links

Minimum breaking current need only be lower than the cross-over current of the series combination. Values of minimum breaking current vary widely depending on the design of the combination. Back-up fuses are normally used for this application. See 5.2.2.4.

5.2.2.2.9 Selection of rated currents of fuse-links for transformer circuit applications

The manufacturer of fuse-links intended for transformer circuit protection should make available recommendations for rated currents of fuse-links for given kVA ratings of transformers. In most cases, the rated current of the fuse-link is significantly higher than the rated current of the transformer, due to the need to choose a fuse primarily by its TCC and meet the criteria in 5.2.2.2.2.

NOTE Existing selection tables generally do not cover the application with associated switchgear.

Manufacturing tolerances and variations between cold and hot characteristics of the various components of the circuit should be taken into considerations.

5.2.2.3 Expulsion fuses

Expulsion fuses are frequently used to protect pole type transformers (smaller units mounted on distribution power poles, normally single phase but often three phase). Often a combination of expulsion and current-limiting fuses are used (see 5.2.2.4). The expulsion fuses in this case are normally distribution fuse-cutouts, although liquid-filled expulsion fuses are quite common. Most of these are the "liquid-submerged" type (cartridge fuses, see 4.3.2.1.5), but external "liquid fuses" (see 4.3.2.1.6) have been used, particularly in areas where fire is a hazard. External liquid fuses are, however, tending to be replaced by full-range fuses for this application, in part due to the low maximum breaking current of the former. Also pad-mounted transformers using "North American" practice will often use internally mounted liquid-submerged expulsion fuses. While many units will use only an expulsion fuse (normally where prospective currents are quite low) it is becoming increasingly common to use a combination of expulsion fuse and back-up current-limiting fuse for these applications.

The selection procedures for expulsion fuses are very similar to those for current-limiting fuses outlined in 5.2.2.2. The main difference with under-oil fuses is that the effect of the transformer oil temperature on the pre-arcing TCC of the fuse becomes particularly important. If a high temperature fuse element material is used (e.g. copper or a copper alloy are quite common), then oil temperature will have little effect on the long time melting characteristic (generally less than 5 %). However, quite low melting point materials are often employed in order to make the fuse sensitive to oil temperature and thus transformer overload. If the user desires overload protection, then this can be provided by selecting an appropriate fuse-link element material. Overload protection is determined by examining the minimum fusing current of the fuse-link at 20 °C or 25 °C (published curve for IEC 60282-2 or IEEE C37.41 [6]) and applying a "shift" in the characteristic based on oil temperature. For example, an oil temperature of 120 °C can reduce a minimum pre-arcing current at a long melting time by as much as 60 %. By a combination of knowing how much overload current will produce a particular oil temperature, and how much current it takes to melt a particular fuse under substantially "steady state" conditions, it becomes possible to determine how much overload a particular fuse will permit. The transformer manufacturer and/or the fuse manufacturer must do this calculation, so application tables are normally provided to enable users to pick the correct fusing to meet their needs.

When distribution fuse-cutouts are used with pole-type transformers, it is important that lightning surges that pass through the fuse do not cause nuisance operation (see 5.1.4.4). Starting with Edition 3 of IEC 60282-2:2008, a "lightning surge impulse withstand test" is included in the "special tests" clause. Any type of link can be qualified – the test involves subjecting three samples to a standard 8/20 current impulse having a 15 kA peak value. The links must not be damaged. Small current rating links are available that will still meet this impulse withstand for fusing low kVA transformers.

The rated maximum breaking current of an expulsion fuse selected for use with a transformer should be equal to or higher than the prospective fault current that can occur at the transformer's location. Because expulsion fuses have lower rated maximum breaking currents than current-limiting fuses (sometimes much less) it is quite common to add a Back-Up fuse to the expulsion fuse for transformer applications (see 5.2.2.4).

5.2.2.4 Current-limiting fuses combined with expulsion fuses

As has been discussed in 5.2.2.3, while expulsion fuses are commonly used for transformer protection using "North American" practice, their limited maximum breaking current and lack of current-limiting action results in them frequently being "paired" with back-up current-limiting fuses. The characteristic of back-up fuses having a minimum breaking current (see 4.2.3.4) makes them a natural partner for expulsion fuses (and indeed some types of Full-Range current-limiting fuse make this pairing in the same body). The general coordination principle therefore becomes that each fuse must protect the other in its area of non-operation, i.e. the expulsion fuse must operate for currents below the back-up fuse's rated minimum breaking current, while the back-up fuse must operate at currents above the expulsion fuse's rated maximum breaking current. Detailed coordination information will be given for typical transformer applications; however the basic coordination principles will apply to other applications, including the common back-up current-limiting fuse/expulsion fuse combination used for line protection. Also, although expulsion fuses are the most common devices used with back-up fuses for the transformer application, HV circuit breakers are also available for mounting in the transformer oil. However the same coordination principles apply.

5.2.2.5 Coordination of a current-limiting fuse and a distribution fuse-cutout

A back-up fuse used out-of-doors in series with a distribution fuse-cutout presents a special case of coordination. Typically, back-up fuses used in this application are rated by the largest expulsion fuse-link with which they may be used while still meeting coordination rules. For instance, one type of back-up fuse that can be used with a 12 A type K expulsion fuse-link is designated as being a 12K coordinating fuse. The coordination method is "matched melt coordination", discussed in 5.2.2.6.2. This ensures that the fuse-cutout will drop open even if it is the back-up fuse that is responsible for the current interruption. The drop-out action provides two benefits. The first, and obvious, is that it can be seen that the fuse has operated. The second is that voltage stress is removed from the operated back-up fuse. This gives users the option of choosing particularly compact back-up fuses for this application that are not suitable for long-time exposure to severe outdoor conditions (e.g. pollution) while energized after operation. In most cases, fuses are not left energized for long periods due to fast user response; however there are applications (capacitor banks for example) where fuse operation can go unreported for long periods. While a distribution fuse-cutout is the most common pairing for outdoor use, current-limiting back-up fuses are also used with type "B" expulsion fuses, usually in higher current ratings.

5.2.2.6 Coordination of a current-limiting fuse and a liquid-submerged expulsion fuse

5.2.2.6.1 Basic coordination

The first step in selecting appropriate fusing is to choose the expulsion fuse, based on the application information in 5.2.2.3. The choice of the back-up fuse is then addressed by considering four fundamental areas, to ensure that proper coordination exists between a back-up fuse and a series-connected expulsion fuse:

- a) each fuse must protect the other in its area of non-operation;
- b) unless the back-up fuse is to be replaced after each expulsion fuse operation it must not be damaged by such an operation;
- c) overload currents must not damage the back-up fuse;
- d) the back-up fuse, like the expulsion fuse, must not be damaged by surges: the same rules that are used to select an expulsion fuse for this requirement also apply to the Back-Up fuse, and so this area will not be discussed further. However, it may be noted that if the expulsion fuse has been correctly chosen, a back-up fuse that coordinates correctly with it usually meets those same surge requirements.

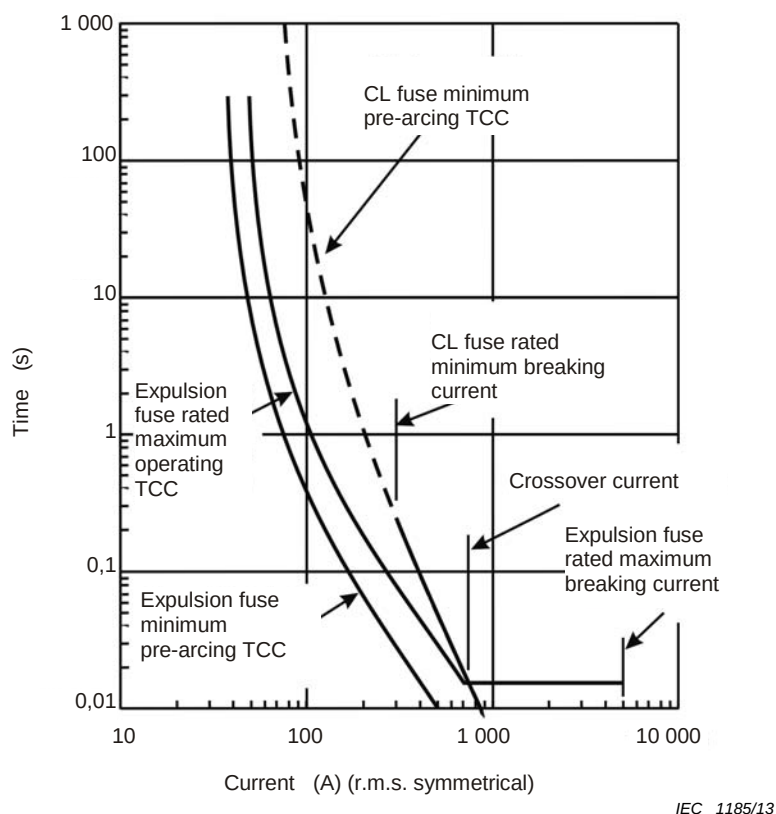
Primary coordination between the series expulsion fuse and the back-up current-limiting fuse (item a) above) ensures that the two will work together to clear all currents from the lowest current that will cause the expulsion fuse's element to melt up to the current corresponding to the rated maximum breaking current of the current-limiting fuse. Achieving this primary

coordination requires that when the appropriate time-current characteristic curves for the two devices are overlaid, the expulsion fuse maximum operating TCC curve crosses the minimum pre-arcing TCC curve of the back-up fuse at a current equal to, or higher than, the Back-Up fuse's rated minimum breaking current, and less than, or equal to, the rated maximum breaking current of the expulsion fuse. The two series devices then provide "full-range" protection and each fuse protects the other fuse in its zone of "vulnerability." This second criteria (crossover occurring below an expulsion fuse's rated maximum breaking current) is sometimes relaxed for large transformer applications, when certain operating and coordination conditions apply. This coordination is seen in Figure 21.

Depending upon the relative location of the two curves, one of two different types of coordination will exist. These two methods of coordination are commonly referred to as "matched melt" coordination and "time-current curve crossover" coordination, although matched melt coordination should in fact be considered a form of time-current curve crossover coordination with some additional requirements. Figure 21 and Figure 22 illustrate the principles involved.

5.2.2.6.2 Matched melt coordination

For this method of coordination, in addition to the basic coordination rules described in 5.2.2.6.1, another criterion must be met. This is to ensure that the expulsion fuse melts open any time the two-fuse combination clears an overload or fault. In general, matched melt coordination will result in the minimum pre-arcing time-current characteristic of the expulsion fuse lying to the left of the minimum pre-arcing TCC of the back-up fuse for all times longer than 0,01 s, as shown in Figure 21. However, this is not a reliable method of ensuring that the expulsion fuse will melt at times shorter than 0,01 s. To be certain that the expulsion fuse will always melt open at any current which causes the current-limiting fuse to operate, the minimum operating I^2t let through by the current-limiting fuse should be equal to, or greater than, the maximum pre-arcing I^2t of the series expulsion fuse, at 0,01 s and less. It is this criterion from which the method's name is derived.



IEC 1185/13

Figure 21 – An example of matched melt coordination

One conservative approach to ensuring that the current-limiting fuse will let through sufficient energy to melt open the expulsion fuse is to choose a current-limiting fuse having a minimum pre-arcing I^2t greater than the maximum pre-arcing I^2t of the expulsion fuse used in series with it. However, a more practical approach is to take into account the fact that the current-limiting fuse will, under almost all practical circumstances, let through more I^2t than its minimum pre-arcing I^2t . Minimum pre-arcing I^2t values correspond to very short fuse pre-arcing times, and worst-case manufacturing tolerances. Therefore, not only will the actual I^2t that causes pre-arcing likely be higher than the published minimum values, additional I^2t will be let through as a result of the current during the arcing that occurs after melting, and which continues until the fuse has cleared. Experience has shown that excellent coordination can be realized as long as the maximum pre-arcing I^2t of the expulsion fuse does not exceed approximately twice the minimum pre-arcing I^2t of the current-limiting fuse. The only circumstances under which such an approach could result in the failure of the expulsion fuse to melt open is if a very short duration surge of current (e.g. a lightning surge) were to occur and its magnitude just happened to be such that the I^2t of the surge exceeded the pre-arcing I^2t of the current-limiting fuse, but was less than the pre-arcing I^2t of the expulsion fuse. Obviously, such a situation would very rarely develop, and thus need not be a significant consideration in selecting the best current-limiting fuse for a particular application.

As is obvious from the preceding discussion, in order to use the matched-melt method of coordination, one must know the values of the short-time maximum pre-arcing I^2t for the expulsion fuse and the minimum pre-arcing I^2t for the current-limiting fuse. Although the latter is usually published by the current-limiting fuse manufacturer, the expulsion fuse manufacturer does not normally publish the former. However, it can be readily calculated from the expulsion fuse's minimum pre-arcing time-current characteristic curve. One method of calculation involves first determining the current corresponding to the value of time representing the fewest whole number of quarter-cycles. For many published curves this might be the current corresponding to three (3) quarter cycles (0,0125/0,015 s for 60/50 Hz). Once the current has been determined from the expulsion fuse's minimum pre-arcing curve, it should be increased by an appropriate factor to take into account variations resulting from manufacturing tolerances. In the case of expulsion fuses having silver fuse elements, this factor is 10 %. For fuses with elements made from other materials, this factor could be as high as 20 %. After the current has been corrected to allow for manufacturing tolerances, the maximum pre-arcing I^2t of the expulsion fuse can be calculated by first squaring this current and then multiplying that value by the time (expressed in seconds) that was the basis for determining the current. Obviously, should the expulsion fuse manufacturer publish a value for the fuse's maximum pre-arcing I^2t , that value should be used rather than the value that one would obtain from the previously described procedure.

The principal advantage of the matched-melt method is that the expulsion fuse will melt open even if the current-limiting fuse does the actual clearing. This is the method used with fuse-cutouts (see 5.2.2.5).

Another advantage of this coordination method is that in certain non-effectively earthed three-phase applications, the voltage rating of the back-up current-limiting fuse need only be equal to the system's line-to-neutral voltage as long as the voltage rating of the expulsion fuse is equal to the system's line-to-line voltage. Because this requires certain assumptions to be made regarding possible fault scenarios, in practice this is not usually done if a line-to-line rated fuse is available. However, there have been applications in which it was the only fusing option available and is the main reason why this coordination method is sometimes used with the under-oil back-up current-limiting fuse.

5.2.2.6.3 Time-current curve crossover coordination

The second method for coordinating back-up current-limiting fuses is referred to as time-current curve-crossover coordination. This method of coordination is frequently used with under-oil back-up current-limiting fuses, and is illustrated in Figure 22. In the example shown, the minimum pre-arcing TCC curve of the expulsion fuses crosses the minimum pre-arcing TCC curve of the expulsion fuse at a time longer than 0,01 s, making it less likely that the combination would meet the requirements for matched melt coordination. When a fault current

is higher than this crossover point, the current-limiting fuse may melt and clear without letting through sufficient energy to melt the expulsion fuse. Time-current crossover curve coordination is rarely used in applying outdoor back-up current-limiting fuses, since there is no assurance that a series distribution fuse-cutout would melt and drop open using this method. If the distribution fuse-cutout does not open, full voltage can be impressed on a weathered outdoor Back-Up fuse that may no longer have full voltage withstand capability.

Because of the location of the intersection or crossover point of the expulsion fuse's operating TCC curve and the back-up fuse's minimum pre-arcing TCC curve, one need not be concerned with the melt I^2t values of the two fuses when using this method of coordination. The principal criterion to be satisfied is that the previously discussed crossover point must correspond to a current which is greater than the rated minimum interrupting current of the current-limiting fuse, but less than the rated maximum interrupting current of the expulsion fuse. The manufacturers of the expulsion fuse and the current-limiting fuse are required to publish values for these performance characteristics.

The principal advantage of the time-current curve crossover method, compared to matched melt coordination, is that it normally permits the use of a current-limiting fuse having a smaller current rating. This can be significant in several regards.

Firstly, the lower the current-limiting fuse's current rating is, the less energy it is apt to let through under fault conditions. Obviously, the lower the energy that is let through by the current-limiting fuse, the better the protection will be against eventful failure anywhere on the system, that is protected by the current-limiting fuse. In addition, the fault will have less effect on the rest of the distribution system as voltage drops are minimized.

Secondly, the lower the current rating of the current-limiting fuse, the smaller it is apt to be and the less space it is apt to require for installation.

Thirdly, when this method of coordination is used rather than matched melt coordination, often the largest available back-up fuse rating can then be used to protect larger transformers.

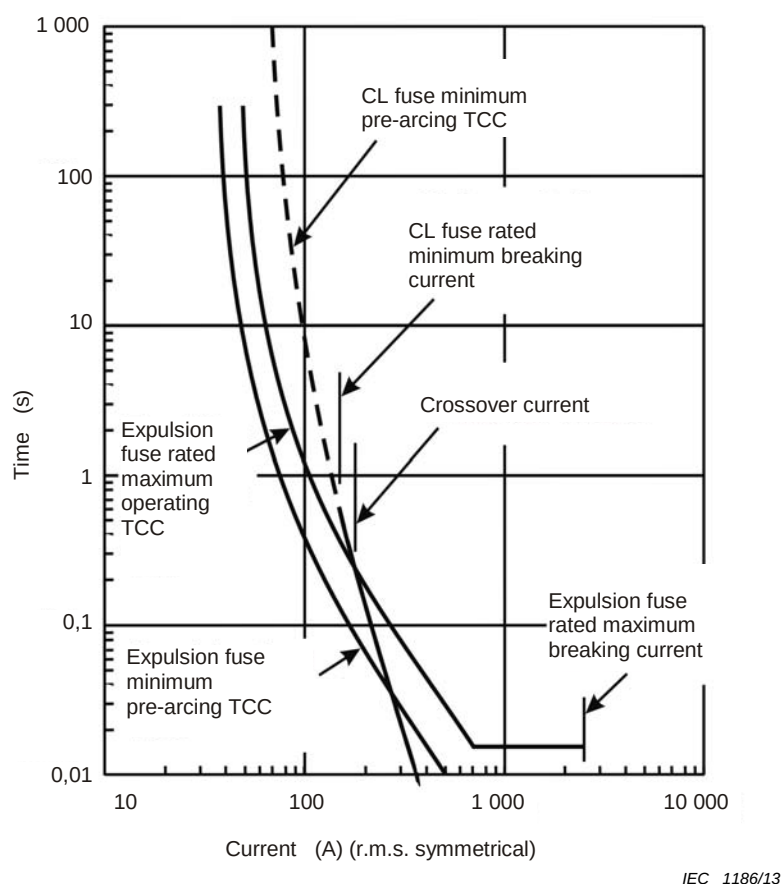


Figure 22 – An example of time-current crossover coordination

5.2.2.6.4 Prevention of damage to the back-up current-limiting fuse

For applications of back-up current-limiting fuses with expulsion fuses on the primaries of transformers, there is another selection criterion that is particularly important in practice. When the current-limiting back-up fuse is inside the transformer it is possible to arrange the coordination such it will only operate in the event of an internal transformer fault. In this way the back-up fuse does not have to be replaceable. The concepts to be discussed are illustrated in Figure 23, and involve currents up to the value corresponding to a fault at the secondary terminals of the transformer (that is a fault limited only by the transformer's impedance – often termed "bolted secondary fault current" or in the case of transformer testing "short-circuit current"). A current-limiting fuse should be chosen such that this current is less than the current corresponding to the crossover point of the expulsion fuse's maximum operating curve and the back-up fuse's minimum pre-arcing curve by an appropriate margin. This ensures that the back-up fuse does not melt with, and more importantly is not damaged by, a fault external to the transformer. "Damage" in this case refers to a partial melting of the fuse elements and/or, at longer melting times, deterioration of other components by fuse overheating. A damaged back-up fuse could later melt at a current below its minimum breaking current and fail to interrupt this current. The "appropriate margin" will therefore now be discussed.

Although not published by the fuse manufacturer, one can envision a "no-damage" characteristic curve, which lies slightly below and to the left of the minimum pre-arcing curve of a back-up current-limiting fuse. The separation between the published minimum pre-arcing curve and the imaginary no-damage curve represents a margin of safety and is intended to compensate for various factors associated with real life (practical) applications. Some factors affect the accuracy of the calculation of the bolted secondary fault current. These include the tolerances on the transformer impedance, system line voltage fluctuations, and the use of taps. Other factors involve actual damage to the fuse element(s), caused by partial melting

and mechanical stress, which can occur prior to the complete severing of the element. Only after the element(s) completely melt open can arcing be initiated, and it is this time that is used to plot the TCC curve.

If the fuse manufacturer has a recommended margin, this should be used. In the absence of this information, a commonly used method involves setting the no-damage current equal to 80 % of the current shown on the minimum pre-arcing curve for any particular pre-arcing time. Since proper coordination between the back-up current-limiting fuse and the series expulsion fuse requires that the current-limiting fuse not be damaged by any current equal to or less than the bolted secondary fault current, this method requires that the calculated bolted secondary fault current be no greater than 80 % of the current-limiting fuse minimum pre-arcing current at a time corresponding to the maximum operating time of the expulsion fuse (with a current equal to the bolted secondary fault current). Conversely, the Back-Up fuse's minimum pre-arcing current must equal at least 125 % of the calculated bolted secondary fault current at a time corresponding to the expulsion fuse's maximum operating time at that current.

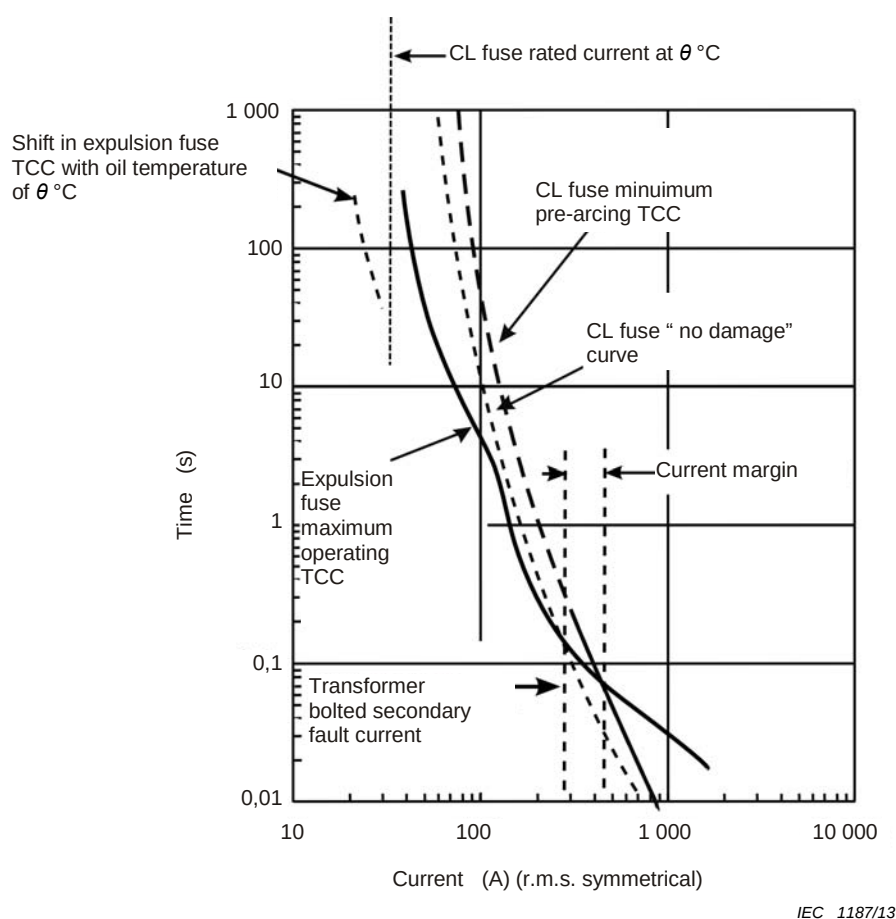


Figure 23 – Fuse "no-damage" margin

When a back-up current-limiting fuse has been chosen using appropriate bolted secondary fault current coordination, it is not necessary to provide access to permit a current-limiting fuse located inside the transformer to be replaced "in the field". If bolted secondary fault coordination is not achieved, then the back-up fuse must also be replaced any time the expulsion fuse operates.

5.2.2.6.5 Overload protection for the back-up current-limiting fuse

There is another aspect of coordination that must be considered before one can be sure that a back-up fuse is properly coordinated. This requires that checks be made to show that the back-up current-limiting fuse will not melt or be damaged as a result of overloads. This is also illustrated in Figure 23. First, when the back-up fuse is used for transformer protection, the maximum operating curve of the expulsion fuse should not cross the no-damage curve, discussed in 5.2.2.6.4, for all currents below the bolted secondary fault current of the transformer. In other words, for all expulsion fuse operating times from the value corresponding to the operating time at the bolted secondary fault current up to 1 000 seconds or more, the corresponding current on the expulsion fuse's maximum operating curve should be no more than 80 % of the corresponding current on the current-limiting fuse's minimum pre-arcing curve (unless the fuse manufacturer specifies a different no-damage criterion). Preloading should not affect this coordination as any shifting to the left of the characteristic curves due to Joule (I^2R) heating of the fuse elements, or surrounding liquid temperature rise will be as much or more for the expulsion fuse as for the current-limiting fuse.

The second condition to be satisfied is that under pre-loaded conditions, the maximum current that the expulsion fuse can carry without melting for a relatively long period of time (i.e. greater than five minutes) must be less than the current rating of the current-limiting fuse. When the expulsion fuse is located inside equipment, such as a transformer, any shifting of the curve caused by temperatures produced by overload conditions should be taken into account when this criterion is examined. For example, some types of expulsion fuses experience a significant shift in their maximum operating TCC curve at elevated temperatures. A "dual" element type fuse in oil at 120 °C can have its long time pre-arcing characteristic shifted, in terms of current, to about 40 % of the values published at 20 °C. Overload protection for the back-up fuse can also be provided by secondary protection.

See 5.2.2.6.4 for coordination techniques to prevent back-up fuse damage, and 5.3.5.5 for a discussion of fuse damage caused by the operation of a series device.

5.2.3 Motor-circuit applications

5.2.3.1 General

Fuses for motor circuit applications are primarily used with motors started direct-on-line on alternating current systems of 50 Hz and 60 Hz. They are typically back-up current-limiting fuses designed specifically for the application and are normally used in conjunction with a contactor that interrupts currents below their minimum breaking current. Their function is to provide short-circuit protection for the supply system from faults at or within the motor, and from cable faults between the motor and the motor starter, that are above the "takeover" point from the associated device that provides low overcurrent protection. The primary characteristic of the fuses is their ability to withstand repeated motor starting currents due to their specially designed fuse elements. For this purpose, the manufacturer may state a "K" factor (see 5.2.3.3), which will indicate to the user the degree to which the fuse-link is capable of withstanding cyclic overloads without deterioration. The "K" factor is based on test requirements specified in IEC 60644 and the manufacturer will state if the K factor is related to the minimum or the mean pre-arcing time-current characteristic.

5.2.3.2 Fuse-link time-current characteristics

Fuse-links complying with IEC 60644 will have characteristics as detailed below.

Relatively high operating current (slow operation) is desirable in the 10 s region of the pre-arcing time-current characteristic to give maximum withstand against motor starting current.

Relatively low operating current (fast operation) is desirable in the region below 0,1 s to give maximum short-circuit protection to associated switching devices, cables and motors and their terminal boxes.

The pre-arcing time-current characteristics of fuse-links for motor circuit applications are therefore within the following limits:

$$I_{f10}/I_r \geq 3 \text{ for } I_r \leq 100 \text{ A}$$

$$I_{f10}/I_r \geq 4 \text{ for } I_r > 100 \text{ A}$$

$$I_{f0.1}/I_r \leq 20(I_r/100)^{0.25} \text{ for all current ratings}$$

where:

I_r current rating of the fuse-link;

I_{f10} and $I_{f0.1}$ pre-arcing currents corresponding to 10 s and 0,1 s respectively expressed as mean values with the tolerances specified in IEC 60282-1:2009, 4.11.

The term $(I_r/100)^{0.25}$ is introduced to take account of the fact that the pre-arcing time-current characteristics for a range of fuse-links diverge as they approach the short-time region.

5.2.3.3 K Factor

5.2.3.3.1 General

This is a factor that defines an overload characteristic to which the fuse-link may be repeatedly subjected under specified motor starting conditions, and other specified motor-operating overloads, without deterioration.

For the purpose of IEC 60644, the value of K is chosen at 10 s. Unless otherwise stated by the fuse-link manufacturer, it is valid from 5 s to 60 s, for a frequency of starts up to six per hour and for not more than two consecutive starts. For conditions different from those specified above, for example where service conditions involve inching, plugging or more frequent starts, the manufacturer should be consulted.

The overload characteristic is obtained by multiplying the current on the pre-arcing characteristic by K (less than unity). This then defines the boundary of the overload curve for a given number of motor starts per hour.

5.2.3.3.2 Withstand requirements

The performance of a fuse-link for motor circuit applications is in general determined by the following criteria:

- to withstand without deterioration starting pulses in rapid succession due for example to abnormal conditions, such as those occurring during commissioning of the equipment;
- to withstand without deterioration a large number of motor starts in normal service conditions.

IEC 60644 therefore specifies two sequences of tests representative of these conditions: 100 cycles corresponding to abnormal service conditions, and 2 000 cycles corresponding to normal service conditions. It is expected that a fuse-link that passes these tests will have a good behaviour during a satisfactory life duration.

5.2.3.4 Selection of fuse-links for motor circuit applications and correlation of fuse-link characteristics with those of other components of the circuit

5.2.3.4.1 Selection of fuse-links

The fuse-link is inserted in the motor circuit that the fuse-link is intended to protect. Some ratings of the fuse-links (e.g. rated voltage and rated maximum breaking current) are therefore dependent on the system and others (e.g. rated current) are dependent on the motor.

The rated maximum breaking current of motor-starter fuses should equal or exceed the maximum available short-circuit duty at the point in the system where the fuses are installed. In general, the rated minimum breaking current need only be low enough to ensure correct coordination with the switching device over-current relay. However, where additional safety is required, the fuse-link minimum breaking current should be at least as low as the stalled rotor current of the protected motor.

The ability to withstand repetitive starting conditions is an important factor. When selecting a fuse-link for a given motor circuit application, due regard should be paid to the K factor, which should be applied to the pre-arcing time-current characteristic of the fuse-link to take account of these starting conditions.

The usual concept of rated current, based upon the ability of a fuse-link to carry a given current continuously without exceeding a specified temperature rise, is usually of secondary importance where the motor is started direct-on-line. The fuse-link for such applications is normally chosen by reference to the paragraphs above.

However, it should be verified that the rated current of the fuse-link exceeds the running current of the motor in the service conditions by an amount sufficient to take account of the effects of the temperature of the surrounding air when the fuse-links are enclosed in starting motor control equipment.

Where assisted starting is used and thereby starting currents are reduced, the above method of selection is generally applicable, but allowance may have to be made for the high transient currents which, with some methods of starting, flow during transition from one connection to the succeeding connection. Further, since assisted starting in general allows the use of fuse-links of lower current-rating, the temperature-rise under running conditions is likely to be of primary importance.

Some motor-starter fuses, using "North American" practice are not assigned a rated current but rather are identified by an "R" rating (e.g. 2R, 4R, etc.). IEEE C37.46 [8] specifies that an "R" rated fuse should melt in a range of 15 to 35 seconds at a value of current equal to 100 times the R number. IEEE C37.46 [8] also specifies minimum values for the allowable continuous current (see 5.1.1.1.3) rating of R rated fuses at surrounding temperatures of 40 °C and 55 °C (e.g. currents for a 2R fuse are 70 A and 63 A and for a 4R fuse 130 A and 115 A at 40 °C and 55 °C respectively). It should be noted that this TCC requirement is approximately in line with the requirements given in 5.2.3.2. As an historical note, the "R" number originally referred to the number of parallel "ribbons" (fuse elements) in a motor-starter fuse, but this is not necessarily the case with modern fuses.

5.2.3.4.2 Coordination with other circuit components

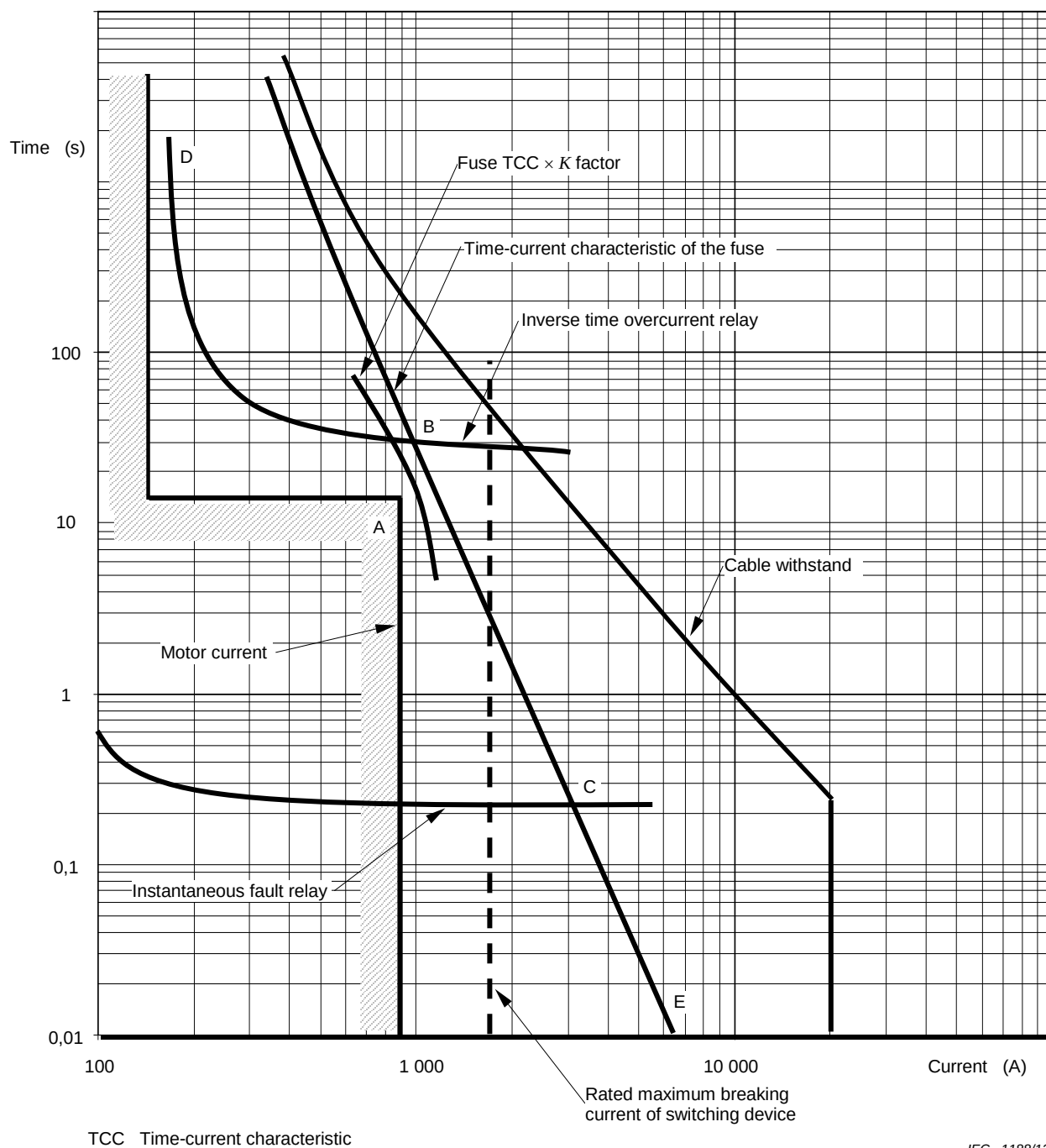
Figure 24 illustrates a typical motor circuit application involving a motor, relay or relays (providing one or more of the following: inverse overcurrent protection, instantaneous overcurrent protection, instantaneous earth fault protection), contactor or other mechanical switching device, the cable and the fuse-link itself.

The motor will be chosen for its particular duty, thus fixing the values of the full load current and the starting current. The duration and frequency of the starts will also be fixed. The characteristic of the associated inverse overcurrent relay will then be chosen to give adequate thermal protection to the motor. The switching device is selected in conjunction with fuse-link to co-ordinate with the already selected motor.

In particular:

- a) the pre-arcing time-current characteristic of the fuse-link, when multiplied by the appropriate K factor, should lie to the right of the motor starting current at point A;
- b) the mechanical switching device should be capable of withstanding the conditions defined by the combined operating characteristics dBCE;

- c) the rated current of the fuse-link should be chosen such that when the fuse-link is mounted in its service position it is capable of carrying continuously the running current of the motor without overheating. This is of particular importance where assisted starting is used;
- d) the current corresponding to the point of intersection B of the curves of the fuse-link and the overcurrent relay should be less than the maximum breaking current of the mechanical switching device;
- e) the minimum breaking current of the fuse-link should not exceed the minimum takeover current, "B";
- f) in the event of instantaneous protection being provided, the takeover point will move from B to C. Due regard should be paid to the possibility that the mechanical switching device might open at a current greater than its rated maximum breaking current;
- g) the cut-off current of the fuse-link at the maximum fault current of the system should not exceed the through-fault current withstand of the mechanical switching device for the operating time of the fuse, typically one half cycle or less;
- h) it is desirable that the minimum breaking current of the fuse-link should be as low as possible and preferably should be at least as low as the stalled rotor current of the motor;
- i) as shown in Figure 24, the whole of the withstand curve of the cable should lie to the right of the operating characteristic dBCE. Where high ratings of fuse-link are necessary due to the nature of the motor starting duty (for example, long starting times and frequent starts), the section BCE moves to the right and may necessitate an appropriate increase of cable size.



IEC 1188/13

Figure 24 – Characteristics relating to the protection of a motor circuit

5.2.4 Capacitor protection applications

5.2.4.1 General application information for external fuses for shunt capacitor banks

Subclause 5.2.4 provides application guidelines for fuses that are mounted external to the capacitor(s), and that are intended for the overcurrent protection of the capacitor(s). Capacitor fuses are typically tested to IEC 60549 or IEEE C37.41 [6]. While, at the time this report was produced, these standards show differences in testing methods, their differences were in the process of being resolved with changes to both standards.

An external fuse used for shunt capacitor-bank protection, within the limits of its ratings, minimizes damage to the system and to the capacitor bank or capacitor unit resulting from a fault. The capacitor fuse cannot prevent a capacitor from failing. For many installations, reducing the risk of capacitor tank rupture is a primary concern. Ideally the fuse should also clear before upstream protective devices operate or are damaged. Proper fuse performance will depend upon the correctness of the application.

There are two kinds of external capacitor fuses: capacitor line fuses and capacitor unit fuses. Capacitor line fuses (also commonly referred to as "group" fuses) are used for the protection of the entire capacitor bank installation, whereas capacitor unit fuses (often referred to as "individual" fusing) are used for the protection of individual capacitor units. Some installations incorporate both capacitor line fuses and capacitor unit fuses. The types of fault current seen by the two types of fuse tend to be different, so different breaking tests are specified for each. In most cases, different fuse designs are used for the two types of fuse, while in other cases the same fuse can be used as a line fuse or a unit fuse, but it will have been shown to be capable of interrupting fault currents associated with the two types of application. Often, small distribution capacitor banks are just protected by capacitor line fuses.

Typically, the melting of the fuse is initiated by power-frequency overcurrent and/or, for capacitor unit fuses, from stored capacitor energy that is discharged through the fuse.

Power-frequency current and stored energy factors that should be considered when determining the proper protection for a capacitor bank are: the system fault current available at the capacitor bank location, the type of capacitor bank connection (such as delta or star (wye), neutral earthed (grounded) or unearthed (ungrounded), the rating of the capacitor unit or capacitor bank in terms of volt-amperes reactive (usually divided by 1 000 and expressed as kVAr), and the number of capacitor units in parallel.

An unbalance protection scheme is frequently used for capacitor bank protection. The setting of the unbalance protection may affect the voltage across an individual capacitor unit fuse when it clears, and should be considered in determining the fuse voltage rating. Some earthed star capacitor banks on earthed star systems and some delta connected capacitors banks (regardless of system earthing), that use only one series connected string of capacitor units (no parallel strings), may not require unbalance protection for reliable capacitor bank protection.

For applications where capacitor line or capacitor unit fuses are used in enclosures or vaults, expulsion fuses that have controlled venting or current-limiting fuses should be considered.

Where fuse-links are used to protect capacitor units, very low minimum breaking current values may be desirable in order to take account of the small increases in current that occur when one or more series connected capacitor elements break down. In the case of fuse-links used only for line protection (where individual units are separately protected by other means) then fuse-links with an appropriately higher value of minimum breaking current may be employed (see IEC 60549).

While capacitors are considered constant current devices, they are subject to overcurrents in actual operation on a system. These are caused by over-capacitance (manufacturing tolerance), operation at higher than rated voltage, and system harmonic currents.

Overvoltage increases the current into a capacitor linearly with voltage change. Excessive voltage may also cause an increase in third harmonic current from over-excited transformers. Some standards allow operation at 10 % overvoltage and a 15 % over-capacitance. Harmonic currents depend on system conditions and are difficult to predict. Allowance for such increases in service current are termed "allowance factor", and are discussed in 5.2.4.5.1.

5.2.4.2 Capacitor fuse application aims

5.2.4.2.1 Capacitor line (group) fuses

Typically, when small star connected or single series group delta connected distribution capacitor banks are protected by fuses, only capacitor line fuses are employed. For larger banks a line fuse may be used to protect the bank along with unit fuses for protection of each capacitor unit.

Some desirable characteristics for capacitor line fuses may be to:

- a) protect the distribution system or substation bus from major faults at, or within, the capacitor bank, and coordinate with the next upstream overcurrent protective device up to the maximum fault current available at the capacitor bank;
- b) provide earliest possible isolation of one or more phases of a capacitor bank having a faulted capacitor unit, if no capacitor unit fuses are used;
- c) permit higher current loading associated with: plus-side tolerance of capacitance in capacitor units, operating voltage in excess of nameplate rating, and the presence of harmonic currents (a fuse is often chosen to have an allowable continuous current of 135 % of the nominal capacitor current, see 5.2.4.5.1);
- d) Operate, when one phase of an unearthened-star bank becomes faulted to neutral, within a time span that will minimize the probability of damaging the capacitor units in the unfaulted phases due to overvoltage.
- e) withstand the transient energizing current from the system and from other nearby energized capacitor banks;
- f) withstand or operate (user's choice) on discharge current from the capacitor bank into a fault on the system near the capacitor bank. It may be noted that a fuse pre-arcing characteristic that would be required if the bank is to remain connected during such a fault may provide less desirable bank protection than that obtained with a fuse having a characteristic that would result in operation with a fault close to the bank.

Some considerations where only capacitor line fuses are used:

- a) it is important that the fuse have a maximum operating time-current characteristic consistent with the degree of risk associated with capacitor unit rupture that is acceptable for the type of installation and location contemplated for the capacitor bank;
- b) where line fuses are used on an unearthened star connected bank the capacitor units on the unfaulted phases are subjected to overvoltages up to 1,73 per unit until the fault is cleared by the line fuse;
- c) where line fuses are connected outside of the delta on a delta-connected bank, a faulted capacitor unit is not disconnected from the circuit if only one fuse operates.

5.2.4.2.2 Capacitor unit (individual) fuses

Some desirable characteristics for capacitor unit fuses may be to:

- a) provide earliest possible isolation of a faulted capacitor unit;
- b) permit maximum normal loading associated with:
 - 1) capacitance of the capacitor unit larger than nominal;
 - 2) voltage across the capacitor unit higher than nominal, due to system operating voltage above nominal and/or increased voltage across the remaining capacitor units in a group resulting when parallel capacitor units are isolated;
 - 3) the presence of harmonics in the capacitor current;
- c) withstand the discharge transient "outrush" current from an individual capacitor unit into a faulted capacitor unit within the same series group.

5.2.4.3 Capacitor inrush considerations for line fuses

While being energized, capacitor banks may initially appear as a short-circuit. The capacitor bank charging current (or inrush current) will be limited by the circuits' impedance and depend on the system voltage phase angle at which the bank is initially energized.

The fuse's minimum pre-arcing I^2t must be larger than the inrush I^2t . The I^2t of the inrush current can be estimated with good accuracy. The initial magnitude of the inrush current, I without any consideration for damping due to system resistance can be calculated, using Equation (1):

$$I = U(CL)^{1/2} \quad (1)$$

which is based on the relationship $(L/2)I^2 = (C/2)U^2$

where

- U is the peak voltage,
- C is the capacitance,
- L is the source circuit inductance.

The inrush energy enters the capacitor by way of a high-frequency damped sinusoidal current, whose initial magnitude is determined by the system voltage, inductance, and surge impedance. The high-frequency resistance, a value much greater than the 60 Hz circuit resistance, and one that can only be empirically determined, causes damping of the high-frequency inrush current. A typically severe, and therefore conservative, inrush current is one having a first peak that is 90 % of that for an undamped current, with subsequent 1/2 cycle peaks that should be 81 % of each preceding peak. Equation 2 describes the I^2t that results from that current:

$$I^2t = 3,74 E^2 C^{3/2} L^{-1/2} A^2s \quad (2)$$

where:

- E is the phase to ground peak voltage in volts,
- C is the phase capacitance of bank in farads,
- L is the source circuit inductance in henries.

A capacitor with no initial charge (has not been energized in the previous 5 min) results in an initial instantaneous inrush current unaffected by an existing charge. This transient current diminishes as the capacitor charges until eventually the current is equal to $V\omega C$ (ω is equal to 2π times the power frequency). The transient current has a frequency, f , proportional to the reciprocal of the square root of the product of capacitance and the short-circuit inductance (Equation 3).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Excessive switching may degrade the characteristics of a fuse-link as repeated inrush currents can cause localized heating and movement of the fuse element(s). Considerations for inrush conditions in single bank applications are as follows:

- a) energizing a capacitor during recloser/breaker operations with short (measured in cycles) "open" time may result in higher inrush currents if the charge trapped on the capacitor is of a polarity opposite to the circuit voltage at the moment of energizing;

- b) energizing a capacitor bank on a circuit that has an energized bank already in service causes the instantaneous current to be a function of the impedance between the two banks as well as the short-circuit current from the source. The frequency of the inrush current has two components, one resulting from the inrush characteristics of the bank and the other from the short-circuit characteristics of the circuit. The following equations express these relationships:

$$f_{\text{inrush}} \text{ is proportional to } \{(L_{\text{betweenbanks}}) \times [(C1C2)/(C1 + C2)]\}^{-1/2} \quad (4)$$

$$f_{\text{short-circuit component}} \text{ is proportional to } \{(L_{\text{short-circuit}}) \times (C1 + C2)\}^{-1/2} \quad (5)$$

5.2.4.4 Selection of fuse rated voltage

5.2.4.4.1 General

The rated voltage U_r of the fuse is its rated maximum voltage, i.e. the maximum power-frequency r.m.s. voltage (including any system overvoltage or unbalance) at which it is intended to be applied.

The selection of the fuse voltage rating is based on achieving proper fuse operation at the maximum continuous system operating voltage. This basis for voltage rating selection does not include provision for operation during transient or short-time overvoltages associated with restriking circuit breakers, system faults, etc.

The rated voltage of expulsion fuses may exceed that required by the application by any desired amount.

When a shunt capacitor is used in a power system, the leading (capacitive) current it draws has the effect of increasing system voltage at the point where it is connected. This is because the current produces a voltage rise as it flows through the circuit reactance. While this is usually desirable for maintaining a satisfactory operating voltage level (and often the reason that shunt capacitors are used), excessive capacitive current can cause an unwanted voltage increase. Excessive capacitive current usually occurs due to the failure of capacitor elements or units that are in series with other capacitor elements or units (and/or the operation of unit fuses). A failure produces a significant increase in voltage across the remaining series elements or units, resulting in increased capacitive current flow through them. This higher than normal current can produce an increase in system voltage. Capacitors are usually required to operate satisfactorily at up to 10 % above their rated voltage, so capacitor banks normally use protection that limits overvoltage to 10 %. Testing to IEC 60549 limits the permissible rise in circuit voltage, due to the switching of the capacitance that produces the desired capacitive prospective current. This limit is set at 10 % above test circuit recovery voltage. There is no guarantee, however, that a given fuse has been tested in a circuit that gives a 10 % voltage rise (it may have been less). Therefore the "capacitive voltage rating" is set no higher than the power frequency recovery voltage (the same voltage as if the test had been with an inductive current). Because of this, the maximum circuit voltage, or internal bank voltage, that a fuse must be able to interrupt against, even under conditions of capacitor failure, must be known in order to choose the correct capacitor fuse rated voltage. The fuse rated voltage must be equal to or higher than this maximum voltage. IEC 60549 calls for a fuse to be rated at 1,1 times the rated voltage of the capacitor. However this is only the correct fuse rated voltage if the maximum fault current produced by failing capacitors can only result in a 10 % voltage rise above the nominal capacitor voltage rating before the capacitor bank protection operates.

5.2.4.4.2 Capacitor line fuses

Current-limiting fuses may produce switching voltages that are substantially higher than normal system peak power-frequency voltage. Selection of current-limiting fuses having a rated maximum voltage that is considerably higher than system power-frequency voltage may result in switching voltages that may cause insulation damage or surge arrester failure. The

lowest available voltage rated current-limiting fuse that meets the application voltage requirement is therefore recommended. If higher voltage rated current-limiting fuses are to be used, consult the manufacturer.

For unearthed capacitor banks (unearthed-star or delta-connected) the voltage across the second line fuse to clear is system line-to-line voltage, regardless of the system grounding at the capacitor bank (unearthed systems, including uni-grounded systems, or earthed star systems, including impedance earthed systems). For unearthed star or delta connected capacitor banks, fuses should have been tested at a voltage equal to, or exceeding, the maximum system line-to-line voltage. This may require a fuse having a rated maximum voltage equal to at least 115 % of the maximum line-to-line voltage (see 5.1.3).

For earthed-neutral star connected capacitor banks applied on effectively earthed (multi-earthed four wire) systems, fuses tested at 100 % of their maximum rated voltage should have a maximum rated voltage equal to, or exceeding, the maximum system line-to-ground voltage. Some Class B expulsion fuses and current-limiting fuses may be tested as three phase devices, with some tests at reduced voltage. This may require a fuse having a rated maximum voltage equal to at least 115 % of the maximum line-to-ground voltage (see 5.1.3). This application information is based on the usual application where the fuses are located close to the capacitor bank and a three-phase fault not involving ground is not likely to occur. For applications where the fuses are located remote from the capacitor bank, or the capacitor bank construction is such that a three phase fault not involving ground needs to be considered, the recovery conditions for this fault should be used to select the appropriate fuse. For these applications fuses having all test voltages equal to, or exceeding, the maximum system line-to-line voltage should be used.

It may be noted that, in the event of a three-phase unearthed fault, the first capacitor line fuse to clear would see a recovery voltage of 1,5 times the line-to-ground voltage after clearing the fault current in its phase. The probability of the occurrence of such faults will have an effect, as indicated above, on the determination of the fuse voltage rating selected for the application.

The insulation withstand voltage level (BIL, power frequency voltages and creepage) of the mounting used for the line fuse should be consistent with the system insulation level.

5.2.4.4.3 Capacitor unit fuses

An expulsion fuse or a current-limiting fuse should have a rated maximum voltage equal to or exceeding the maximum power frequency voltage that will appear across the fuse following its operation. Higher than nominal capacitor bank voltages can result from higher than nominal system voltages or from voltage unbalance within the bank. Formulae are available in IEEE Std C37.99 [10] for calculating the voltage across a capacitor group as a function of the number of isolated capacitor units, the number of series groups and the capacitor bank connection. For example, for a small bank operating at rated voltage, the operation of the first fuse may result in 109 % voltage across the affected series group (with an alarm), the operation of the second fuse may result in 120 % voltage across the affected series group until the unbalance voltage protection trips and operates. In this case the fuse rated voltage should be at least 1,2 times nameplate rating of the capacitor unit. If the capacitor bank will be operated at above rated voltage, the fuse rating may need to be even higher.

The unbalance protection in a capacitor bank should be fast enough to avoid the last fuse in a series group ever having to operate without a capacitor in parallel and with a very high recovery voltage. Refer to IEEE Std C37.99 [10] for information on unbalance protection.

An expulsion fuse can have a rated maximum voltage that exceeds the power frequency system voltage by any amount. If the bank is fused with current-limiting fuses and a fuse could be subjected to an inductive current fault, care should be taken in applying fuses with voltage ratings much greater than the maximum system voltage. The fuse manufacturer should be consulted in this regard.

5.2.4.5 Selection of fuse current rating

5.2.4.5.1 Allowance factor

In general, a capacitor fuse should be selected based on the highest anticipated capacitor bank or unit current. Specifically, the fuse selected should have an allowable maximum continuous current-carrying capability, as differentiated from its nominal ampere rating, which is greater than this highest anticipated current level.

It follows, then, that this maximum capacitor bank or unit current should be accurately known. This maximum current can be estimated by, first calculating the nominal current, and then applying correction factors.

The nominal capacitor line or unit current (I_{nominal}) for single-phase capacitor banks or units can be calculated using Equation (6):

$$I_{\text{nominal}} = \frac{kVAr}{kV} \text{ A} \quad (6)$$

where

$kVAr$ is the nominal single-phase rating of the capacitor bank or unit (in kVAr), and

kV is the nominal single-phase voltage rating of the capacitor bank or unit (in kilovolts).

The nominal capacitor line fuse current is equal to the nominal capacitor bank phase current. This nominal phase current (I_{nominal}) for three phase capacitor banks can be calculated using Equation (7):

$$I_{\text{nominal}} = \frac{kVAr_{3\phi}}{\sqrt{3} kV_{\phi-\phi}} \text{ A} \quad (7)$$

where

$kVAr_{3\phi}$ is the nominal three-phase rating of the capacitor bank or unit, measured in volt-amperes reactive divided by 1 000 (kVAr), and

$kV_{\phi-\phi}$ is the nominal phase-to-phase voltage rating of the capacitor bank or unit in kilovolts

Equations (6) and (7) provide a method for calculating the nominal phase current for single phase or 3-phase capacitor banks or nominal current for capacitor units when the expected operating voltage is equal to the nominal voltage rating of the capacitor bank or unit. When fusing the individual legs of a delta-connected capacitor bank, the current in each leg (i.e., the current seen by the capacitor line fuse) may be determined by multiplying the nominal capacitor bank phase current by 0,58. For systems operating at an expected voltage below their nominal rated voltage, the adjusted bank phase current (I'_{nominal}) can be determined by using Equation (8):

$$I'_{\text{nominal}} = I_{\text{nominal}} \frac{kV_{\text{system}}}{kV_{\text{nominal}}} \text{ A} \quad (8)$$

where

I_{nominal} is the nominal capacitor bank phase current,

kV_{system} is the nominal system voltage in kilovolts, and

kV_{nominal} is the nominal voltage rating of the capacitor bank in kilovolts.

For capacitor units operating at an expected voltage below their nominal rated voltage, the adjusted capacitor unit current (I'_{nominal}) can be determined by using Equation (9):

$$I'_{\text{nominal}} = I_{\text{nominal}} \frac{kV_{\text{operating}}}{kV_{\text{nominal}}} \text{ A} \quad (9)$$

where

I_{nominal} is the nominal capacitor unit current,
 $kV_{\text{operating}}$ is the expected operating voltage of the capacitor unit (in kilovolts), and
 kV_{nominal} is the nominal rated voltage of the capacitor unit (in kilovolts).

The same base reference is used for all voltage parameters (e.g., either a phase-to-phase or phase-to-ground voltage reference).

Once the nominal capacitor bank current has been calculated from the system voltage, capacitor bank voltage and capacitor bank kVAr rating, the highest anticipated capacitor bank current is then determined by considering the possibility of a system voltage higher than nominal, capacitor manufacturing tolerances, and the presence of harmonics. Past capacitor standards allowed a 6 % higher system voltage (excluding harmonics), a +15 % capacitance tolerance, and a +10 % higher current due to harmonic content. These factors, taken together, would require that the nominal capacitor bank current, calculated based on rated voltage and kVAr, be increased by an allowance as high as 34 % ($1,06 \times 1,15 \times 1,1 = 1,34$). This was typically rounded to an allowance of 35 % when conservatively selecting a capacitor line fuse. Recent capacitor standards, have changed the allowable variations listed earlier. This new tolerance results in an allowance of 29 % ($1,06 \times 1,10 \times 1,1 = 1,29$). Since the age of the capacitors to be used in an installation is not generally known, the use of the older allowance of 35 % is usually prudent.

When estimating the highest anticipated capacitor unit current, it may operate for some extended time at a voltage 10 % higher than its nominal voltage rating. Allowing for capacitor tolerance and harmonics, the nominal capacitor unit current, calculated based on rated voltage and kVAr, may be increased by an allowance as high as 39 % ($1,1 \times 1,15 \times 1,1 = 1,39$).

In practice, however, the operating variables described above rarely attain the maximum values listed, and it is even less likely that they will all be at their maximum value at the same time. Consequently, some presently used line fuse allowances are as low as 17 % for unearthed banks and 25 % for earthed banks. When applying expulsion type fuses, use of such allowances will typically result in the selection of a fuse ampere rating that can withstand inrush currents which result during switching of the capacitor bank even when other energized banks are nearby. For unit fuses, some presently used allowances are as low as 22 % for unearthed banks and 31 % for earthed banks. Capacitor banks for certain types of industrial users, on the other hand, may have currents of high harmonic content. Sufficient allowance must be factored in for these cases.

For small rated current expulsion fuses (less than 25 A), or for current-limiting type fuses, a slower speed ratio and/or a larger current rating may be required because of system transients caused by lightning, nearby faults, or switching of back-to-back banks.

When applying current-limiting type fuses, greater allowances may be required even with higher current rated fuses so the fuse can withstand these transient currents. For these types of applications, it is recommended that the manufacturer of the selected capacitor line fuse be consulted.

In addition, capacitor banks for certain types of industrial users may have currents of high harmonic content. Sufficient allowance must be made for these cases.

5.2.4.5.2 Unit fuse additional considerations

A further factor needs to be considered while selecting the current rating of a capacitor unit fuse. When capacitor units are paralleled within a capacitor bank and a full-fault occurs in one of the capacitor units, there is an energy discharge out of the other parallel-connected capacitor unit into the faulted capacitor unit. The discharge consists of a damped high frequency current whose characteristics depend upon such factors as capacitor bank construction (number, rating and spacing of capacitor units) and the location of the faulted capacitor unit. The capacitor unit fuses of capacitor units connected in parallel with the faulted capacitor should be capable of withstanding this "outrush" current without melting and without damage that would alter their time-current-characteristics (TCC). Some manufacturers may limit the application of certain fuses to avoid this type of damage.

For some current-limiting fuses the current rating may be dictated by the level of inrush and "outrush" currents occurring during operation of the capacitor bank, and to how frequently the capacitor bank is switched. Consult the application data of the fuse manufacturer for the selection of fuses for frequently switched back-to-back capacitor bank applications, or capacitor bank applications where a large number of nearby faults are expected.

5.2.4.5.3 Adjustment for ambient temperature

Some manufacturers publish a maximum allowable continuous current for each fuse ampere rating (higher than the rated current) when it is operating in a 25 °C or 30 °C ambient temperature. Peak load capabilities should be reduced according to manufacturers' recommendations to reflect operation in ambient temperatures as high as 40 °C (higher, if the installation warrants). Correction for a higher ambient recognizes that power-factor correction and voltage regulation provided by shunt capacitor banks is most crucial on those days when the load is highest. This condition may be coincident with summer peak loads and/or heat storms.

5.2.4.5.4 Maximum rated current of selected fuse

The above considerations guide the selection of the minimum rated current of a suitable fuse. The maximum rated current of a fuse for the application is determined by case rupture considerations.

For unearthed star connected banks, the ability of the capacitor units in the unfaulted phases to withstand the overvoltage described in 5.2.4.2.1 until the fault is cleared should be considered.

The smallest rated current fuse that meets the guidelines in 5.2.4.5.1, 5.2.4.5.2 and 5.2.4.5.3 is usually preferred for case rupture considerations and to minimize the time that the capacitors in the unfaulted phases of an unearthed neutral capacitor bank are exposed to overvoltage.

5.2.4.6 Selection of maximum breaking current

5.2.4.6.1 Capacitor line fuses

Generally, capacitor line fuses used for the protection of small capacitor banks must be capable of interrupting both capacitive type fault currents and inductive type fault currents. The capacitive and inductive fault current interrupting ratings for capacitor line fuses should be equal to or greater than the maximum fault current of each type that is available at the bank's location. Both types of fault current interrupting ratings are specified in symmetrical amperes and are directly comparable to calculated fault current values of each type that are available at the capacitor bank location.

Capacitive current faults occur when there is some amount of capacitance that remains in series with the fuse as it is interrupting the circuit. A typical minimum capacitive type current the fuse may be required to interrupt can occur when there is progressive pack failures within

the capacitor unit and the fuse is sized to respond prior to complete capacitor unit failure. A typical maximum capacitive type current the fuse may be required to interrupt can occur with a capacitor bank that has an unearthed-neutral and only one series group of capacitors per phase. This current is three times the normal bank current and occurs if one phase is fully faulted.

For some larger capacitor banks, a line fuse may be used to protect the bank along with capacitor unit fuses for protection of each individual capacitor unit. Depending on the application and capacitor bank configuration, the line fuse may not need to meet the capacitive current interrupting requirements associated with a capacitor line fuse. For example in a earthed-star bank with a single series group, the individual capacitor unit fuses will normally respond to failures within a capacitor unit thereby preventing the operation of the line fuse. As each individual capacitor unit is removed by its capacitor unit fuse, the line fuse sees decreasing current, and should only operate in the event of a catastrophic failure or fault external to the bank. In this case, the line fuse will see the full available inductive-type fault current. Another example where a line fuse may not need to meet the capacitive current interrupting requirements for a capacitor line fuse is an earthed-star capacitor bank with multiple series groups protected by a switch and associated fuse. As successive individual capacitor units in a series group are isolated from the bank by their respective fuses, the surviving units are protected against overvoltage stress by the capacitor unbalance protection. In this selective coordination scheme, the line fuse will only respond in cases where a line-to-ground, line-to-line, or three-phase inductive-type fault occurs. Other examples, including delta-connected banks with a single series group, illustrate this point. A capacitor line fuse, rated for capacitive current interruption, must be used for the protection of banks where the configuration of the bank is such that interruption of capacitive currents by the line fuse cannot be ruled out.

Inductive fault currents are always possible in capacitor banks protected by capacitor line fuses since inductive fault currents can occur in the leads to the capacitor bank, in equipment between the fuses and the capacitor bank (switches, arresters, etc.), for some types of capacitor unit failure, or in the case of a major fault within the bank.

If the prospective inductive fault current at the capacitor bank exceeds the interrupting rating of an expulsion type capacitor line fuse, or the capability of the connected equipment, a current-limiting fuse may be used. This can be a general-purpose or full-range fuse to replace the expulsion fuse or the addition of a back-up current-limiting fuse in series with the expulsion fuse. The let-through current of the current-limiting line fuse should be less than the withstand capability of the associated switch(es), expulsion fuse(s) and capacitor unit(s).

For applications where capacitor line fuses are used in enclosures or vaults, expulsion fuses that have controlled venting or current-limiting fuses should be used.

5.2.4.6.2 Capacitor unit fuses

Capacitor unit fuses may be required to interrupt capacitive type fault currents. With some bank configurations and some fault conditions they may also be required to interrupt inductive type fault currents. The capacitive and inductive fault current interrupting ratings for capacitor unit fuses should be equal to or greater than the maximum fault current of each type that is available at the fuse location. Both types of fault current interrupting ratings are specified in symmetrical amperes and are directly comparable to the calculated values of each type that is available at the capacitor fuse location.

Capacitive current faults occur when there is some amount of capacitance that remains in series with the fuse as it is interrupting the circuit. A typical minimum capacitive type current the fuse may be required to interrupt can occur when there is progressive pack failures within the capacitor unit and the fuse is sized to respond prior to complete capacitor unit failure. A typical maximum capacitive type current the fuse may be required to interrupt can occur with a capacitor bank that has an unearthed-neutral and only one series group of many parallel connected capacitors per phase. This current is three times the normal bank current and occurs if the failing capacitor unit is fully faulted. This maximum capacitive current to be

interrupted could be as high as 50 times the normal capacitor unit current if it is a large bank with many parallel capacitor units.

On systems where inductive fault currents can occur (such as star connected single series group capacitor banks with a earthed neutral and/or a earthed capacitor bank frame, or single series group delta connected banks) the maximum inductive fault current available at the bank location requires consideration. For the star connected banks listed above the fault current will be the available phase-to-neutral fault current and for the delta bank it will be the available phase-to-phase fault current. Fuses are rated for their interrupting capability in symmetrical amperes.

If the available inductive-fault current at the capacitor fuse location exceeds the interrupting rating of an expulsion type unit fuse, a current-limiting unit fuse may be used.

For applications where capacitor units are used in enclosures or vaults, and capacitor unit fuses are required, current-limiting fuses should be used.

5.2.4.7 Capacitor unit rupture protection

5.2.4.7.1 General

In addition to consideration for the fuse's rated maximum interrupting current, proper capacitor line fuse and unit fuse selection will also consider the maximum fault current that the capacitor unit can withstand without rupturing.

Capacitor units consist of series and parallel packs within a metal case that is filled with a dielectric fluid. These packs usually consist of a metal foil electrode and a film dielectric. Capacitor unit failure typically begins with the failure of a single pack. When this pack fails and shorts out, the voltage across and the current through the remaining packs increases. This increased stress causes additional packs to fail and, if the failure process is allowed to continue, it will result in all of the capacitor unit series packs being shorted. Other capacitor unit failures may be caused by improper internal connections or dielectric failure to the case. Capacitor failure may lead to case rupture.

To determine case rupture protection, the maximum operating TCC curve for the fuse or fuse-link is compared to the capacitor unit's case rupture curve. For typical case rupture curves, see Figure 25. The currents for both of these curves are expressed in symmetrical values. The degree of case rupture protection will be dependent on the fuse's current rating and the shape of its time-current characteristic curve. Protection is obtained if the maximum operating TCC curve of the fuse is to the left of and below the capacitor unit's case rupture curve.

For expulsion or other types of non-current-limiting fuses the lower part of the maximum operating TCC curve turns and becomes asymptotic with the 0,8 cycle (0,16 s for 50 Hz, 0,013 s for 60 Hz) line. Therefore, a fuse curve that is otherwise to the left of the capacitor case rupture curve will always intersect with the case rupture curve at this time. This intersection delineates the highest equivalent available symmetric fault current for which the fuse will protect the capacitor unit from case rupture. To avoid case rupture when using these types of fuses, the capacitive current or inductive current available at the bank location should be less than this value.

For inductive fault currents, the symmetrical current available at the bank should be used, instead of the asymmetrical current available. This is an acceptable practice for rupture protection comparisons since capacitors usually will degenerate into a total unit failure at or near a peak voltage, thereby producing a symmetrical current fault.

Capacitor manufacturers should be able to provide the case rupture curves mentioned above and/or provide additional information or assistance regarding the protection of their capacitor units. The maximum operating TCC curves are available from the fuse manufacturer.

5.2.4.7.2 Banks protected by line fuses only

If the prospective inductive fault current at the bank location exceeds the capacitor unit's withstand level, the system fault current may be limited by the use of general-purpose, full-range or back-up type current-limiting fuses. When an expulsion fuse/back-up current-limiting fuse combination is used as a capacitor line fuse, the series expulsion fuse should coordinate with the current-limiting fuse such that all currents below the rated minimum interrupting current of the Back-Up fuse are cleared by the expulsion fuse before the back-up fuse melts open.

On these systems with high inductive faults the use of a current-limiting fuse will reduce the probability of case rupture. Protection in the area where the operating time of the current-limiting fuse is greater than 0,010 s is determined by comparing the maximum operating TCC curve of the fuse to the capacitor unit's case rupture curve. Protection is obtained in this area if the maximum operating TCC curve of the fuse is to the left of and below the capacitor unit's case rupture curve. Generally when a current-limiting fuse is properly selected for capacitor case rupture protection for current levels below the current-limiting fuse's 0,010 s maximum operating current, the current limiting action of the current-limiting fuse will also provide adequate case rupture protection at higher currents. In the event that extrapolation of the curves up to the maximum short-circuit current available at the capacitor bank location indicates possible intersection, consult the capacitor and fuse manufacturers. An example of a capacitor case rupture curve characteristics is shown in Figure 25.

As capacitor bank size is increased by the use of multiple parallel capacitor units, the size of the capacitor line fuse will also increase. As the fuse size increases its total operating curve will move towards the right while the case rupture curve remains constant. As a result, the bank size that can be protected with a line fuse is limited. If the system requires that amount of capacitance in that location, one solution is to use larger (kVAR) capacitor units in the bank since larger units may have greater withstand capabilities. Another solution may be to use multiple smaller banks in the same basic location spacing them some number of poles apart.

5.2.4.7.3 Capacitor banks protected by capacitor unit fuses

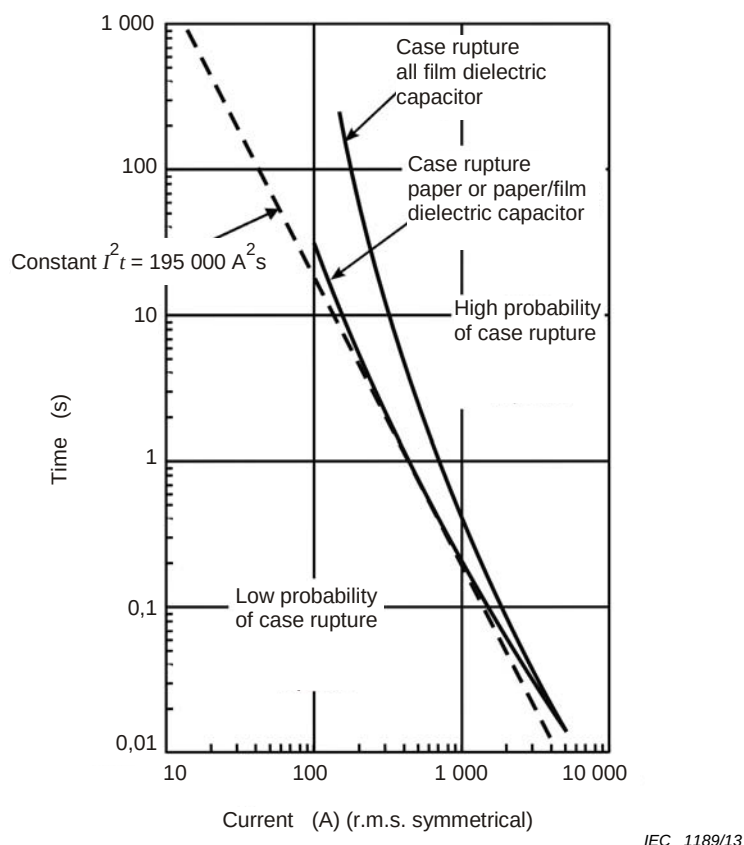
When the capacitor unit is completely shorted the power-frequency current through it depends upon various factors. For example, in a single series group earthed star bank applied on an effectively earthed system or a single series group delta bank, this will be the system inductive fault current that is available at the bank location. With multiple series group capacitor banks or unearthed star connected banks the power-frequency current will be the available capacitive current that is allowed by the capacitors that remain in the circuit.

If the bank can be subjected to inductive type fault currents and these fault currents exceed the capacitor unit withstand level, the system fault current can be limited by the use of current-limiting fuses. Protection in the area where the operating time of the current-limiting fuse is greater than 0,010 s is determined by comparing the maximum operating TCC curve of the fuse to the capacitor unit's case rupture curve. Protection is obtained in this area if the maximum operating TCC curve of the fuse is to the left of and below the capacitor unit's case rupture curve. Generally when a current-limiting fuse is properly selected for capacitor case rupture protection for current levels below the current-limiting fuse's 0,010 s maximum operating TCC current, the current limiting action of the current-limiting fuse will also provide adequate case rupture protection at higher currents. In the event that extrapolation of the curves up to the maximum short circuit current available at the capacitor bank location indicates possible intersection, the capacitor and fuse manufacturers should be consulted. An example of a capacitor case rupture curve characteristics is shown in Figure 25.

Many station banks have multiple series groups or other configurations such that capacitance remains in the circuit when a single capacitor unit fails. Since these fault currents are relatively small as compared to inductive system faults a current-limiting fuse is not normally required to limit available fault current.

The use of current-limiting fuses as a capacitor unit fuse is normally limited to:

- star connected single series group capacitor banks with a earthed neutral and/or a earthed capacitor bank frame, or a single series group delta connected bank;
- metal enclosed banks because of their non-gassing operation;
- applications where the discharge from many parallel units has enough energy that it exceeds the discharge interrupting capability of expulsion fuses or the withstand ability of the capacitor unit cases.



NOTE Typical case rupture characteristics for two types of capacitors. Curves vary by manufacturer and unit construction; refer to manufacturer for actual curves.

Figure 25 – An example of capacitor case rupture curve characteristics

5.2.4.8 Selection of the capacitor unit fuse for discharge-energy withstand

If a capacitor unit failure occurs in a capacitor bank, where the capacitor units are protected by unit fuses, the energy stored in the parallel connected unfaulted capacitors will discharge through the unit fuses on these units and into the failed capacitor unit and its fuse. The energy stored in a capacitor, or group of capacitors, measured in Joules, at a given instantaneous value of voltage is:

$$E = CU^2/2$$

where

E is energy in Joules,

C is the capacitance in microfarads,

U is the instantaneous voltage in kilovolts.

The capacitor unit fuse of a fully-faulted capacitor unit which is part of a parallel-group of other capacitors units must be able to operate and withstand, without bursting during

operation, the "outrush" current from the healthy parallel capacitors as they discharge into the faulted capacitor unit. The energy stored in the parallel connected capacitor units is available to be absorbed by the fuse and the faulted capacitor unit. While the fuse itself may absorb only a portion of the total energy available in the parallel-connected capacitor units, the withstand requirement for the fuse is determined by the total energy that is available for this discharge.

Capacitor units also have a discharge-energy withstand capability that is related to their construction. If the capacitor bank design can produce a total discharge-energy that is equal to or less than the withstand capability of the capacitor units, then the fuse is not required to limit the discharge. A fuse with a discharge-energy rating equal to or exceeding this total discharge-energy should be selected without regard to current limitation.

If a capacitor bank design has the capability to discharge more energy than the capacitor units can withstand, then the use of current-limiting fuses should be considered. Current-limiting fuses are capable of limiting the discharge energy from adjacent parallel connected capacitor units into the faulted capacitor unit. For proper protection of the capacitor unit from the discharge energy of the parallel capacitor units, the maximum operating I^2t of the fuse should be less than the withstand I^2t of the capacitor unit. For specific guidelines in this area the capacitor and fuse manufacturers should be consulted.

Other methods that can be used to eliminate excessive discharge energy are:

- a) to use more series groups and less parallel units;
- b) to use two smaller parallel capacitor banks.

The discharge-energy rating for a capacitor unit fuse is the maximum stored energy at rated voltage with which the fuse will be required to operate and successfully interrupt the circuit. Typical discharge-energy ratings for expulsion type capacitor unit fuses range from 10 to 30 kJ. The application of these fuses may be limited to less than the maximum discharge energy rating of the fuse by the withstand capability of the capacitor unit. The rating for current-limiting capacitor unit fuses are usually 40 kJ or higher.

5.2.4.9 Types of fuses used for capacitor applications

5.2.4.9.1 Current-limiting fuses

Current-limiting fuses can be used for all of the applications discussed. Where low current interruption is necessary, a Full-Range fuse (or under some circumstances a General-Purpose fuse) should be used. Fuses should be suitable for withstanding the repeated inrush currents where applicable, and fuses with specially designed elements for this purpose have been used. Capacitor unit fuses are available having a disconnecting action. In some cases this takes the form of a pigtail attached to the bottom of the fuse, disconnected by a small pyrotechnic charge. This is "fired" when the main elements interrupt the current. The disconnecting action removes voltage from across the fuse body. This allows a shorter fuse to be used than would be required if the fuse had to withstand voltage indefinitely in an outdoor environment. The loss of one capacitor in a large bank may not warrant immediate replacement. The advantages to using current-limiting fuses for capacitor protection are their high maximum breaking current and significant reduction in fault I^2t , reducing the possibility of capacitor can failure. Also there is no expulsion action, which can lead to a reduction in clearances.

5.2.4.9.2 Expulsion Fuses

Expulsion fuses are commonly used for both capacitor line fuses and capacitor unit fuses. Distribution fuse-cutouts, tested for capacitive interruption are often used as line fuses, particularly on small distribution circuit pole-top capacitor banks. Expulsion fuses, in the form of a fixed fuse-carrier with the fuse-link pigtail tensioned by a spring contact arm, are often used for capacitor unit fuses.

5.2.4.9.3 Combination Fuses

Some types of Full-Range fuse use a combination of a Back-Up style fuse element in series with an expulsion style fuse element. However, these fuses are not normally considered to be "combination" fuses. A fuse that is normally classed as a "combination fuse" is where a Back-Up fuse-link has an expulsion fuse attached to one end. It is possible to replace the expulsion fuse-link without replacing the current-limiting fuse-link. Because the expulsion part only has to interrupt low currents, the expulsion tube can be made shorter than with a typical distribution fuse-cutout (typically 75 mm long or less). In addition to providing for low current interruption, the expulsion fuse normally has its lower contact in the form of a flexible pigtail. This is attached to a spring, and provides a method of isolation after operation. Such fuses are used as capacitor unit fuses. The fuse must be sized to ensure that the Back-Up part of the fuse cannot be damaged by operation of the series expulsion fuse.

Where the available fault current is high, a method of providing capacitor protection is a combination of a fuse-cutout and Back-Up fuse. While not a "combination" fuse per standard, this "two-fuse" approach is common for capacitor line applications. Since the Back-Up fuse only operates in the event of a line-to-ground or line-to-line fault, it only has to interrupt high inductive currents, not capacitive currents. Such fuses therefore require no additional capacitive testing. Capacitive currents are interrupted by the fuse-cutout, which must be tested as a capacitor fuse.

5.2.5 Voltage transformer applications

5.2.5.1 General

Current-limiting fuses are normally used to protect the power system by isolating failed voltage transformers from the system. Since voltage transformers can be installed at the substation bus and their kVA ratings are lower than power or distribution transformers, they require fuses that combine low continuous current ratings with high rated maximum breaking current.

NOTE Some documents (e.g. IEEE standards) use the wording "potential transformer" for voltage transformers.

5.2.5.2 Voltage rating

Some manufacturers recommend the fuse's rated voltage be 100 % to 140 % of the maximum system line-to-line voltage to which the fuse is to be applied. This range of application voltage is recommended because the current-limiting action of the fuse is characterized by the generation of a switching voltage that should coordinate with system and circuit insulation levels. Since the current ratings are low, and often use wire fuse elements (see 4.2.4.5), for some designs switching voltages can be high. Other manufacturers feel that application at lower system voltage is acceptable for their design of fuse. The maximum voltage permitted for each fuse rating is based on its rated voltage, assigned by the manufacturer, and the system grounding (see 5.1.3.3).

For separately mounted fuses where higher voltage insulation than would normally be specified is required, the fuse is selected on the basis of actual service voltage. The fuse can be mounted with insulators of a higher voltage rating, providing additional insulation to ground.

5.2.5.3 Current rating

To provide maximum protection against damage to other equipment in the event of a failure of the voltage transformer, it is usually necessary to select the fuse with the smallest rating that will not result in nuisance fuse operations. The selected fuse should withstand magnetizing inrush currents to preclude nuisance fuse operation or damage to the fuse element(s) that could result in failure of the fuse. Since voltage transformer burdens are lower and the construction of these transformers is different from power transformers, fuses selected solely on the basis of inrush considerations will seldom protect voltage transformers from overloads.

The inrush withstand capability of the fuse is readily available from the manufacturer in the form of minimum pre-arcing I^2t values. The inrush current of the voltage transformer can be recorded with appropriate data capture electronics, and the I^2t calculated, or the I^2t value can be obtained from the voltage transformer manufacturer. For satisfactory fuse application and for preventing nuisance fuse operations, it is clear that the fuse's melt I^2t should exceed the transformer magnetizing inrush I^2t , with a reasonable margin of safety. This safety-margin, expressed as a multiplying factor, is dependent on the method used to connect the voltage transformer to the system bus. Empirically, for delta-connected transformers with three line fuses, or for open delta transformers with three line fuses (where three-phase voltage is obtained from only two voltage transformers), the multiplying factor is 4,5. That is, the I^2t of the fuse should be equal to or greater than 4,5 times the transformer's inrush I^2t . For single-phase units, open delta units with four fuses, or delta units with six fuses, this multiplying factor is 1,5. The inrush I^2t of the voltage transformer increases rapidly with an increase in applied voltage. In requesting I^2t values from transformer manufacturers, the voltage specified should be the maximum expected in service.

In some applications, particularly in underground cable circuits, there is a possibility that the inherent capacitance of the circuit will give rise to a discharge current through the primary windings of the voltage transformer connected to the bus. The magnitude and duration of the discharge currents may be calculated from the circuit constants. Caution should be used to ensure that the fuse will not operate under these conditions.

5.2.5.4 Maximum Breaking current

The fuse's rated maximum breaking current should be equal to or greater than the maximum short-circuit current from the system at the point of fuse installation.

5.2.5.5 Partial discharge

One concern with voltage transformer fuses is the possibility of partial discharge on the fuse elements, in this case commonly termed "corona". Partial discharge occurs from the sharp edges of energized apparatus parts. In the case of a voltage transformer fuse, the "sharp edge" is the very small diameter fuse element that is usually used, and the insulation is the air in the voids of the filler material. Radio influence voltage (RIV) measurements are made to determine the extent of radio interference generated by this corona. Normally the concern with corona (other than radio interference) is the damaging effect it can have on non-restorable insulation. In the case of a voltage transformer fuse, however, the insulation is self-restoring, so there is no damage but what is of concern is the effect on the fuse element itself. Because of the delicate nature of the elements used in the very low current rating fuses needed for voltage transformers (often less than one ampere) any appreciable partial discharge will lead to the element being damaged (the element material is removed, ion by ion, and deposited on the fuse filler and body). Such damage could lead to nuisance (or even incorrect) operation of the fuse. Suitable fuse mounting, to avoid the onset of partial discharge, is therefore important; primarily of concern is the location of earth-connected components near to the fuse.

5.2.6 Wind power generation applications

5.2.6.1 Introduction

The generation of electricity using renewable energy sources other than hydro-electric is becoming more common. One of the most developed methods is wind power, and this provides some opportunities, and challenges, for the use of fuse protection. The use of step-up distribution transformers to connect wind power generators to the network ("wind farm transformers") is normal, and the increasing power requirements has led to the use of innovative fusing schemes and the development of higher rated fuses. There are several technologies of wind power generators but fuse selection is not, in general, affected by these different technologies.

The step-up transformers used for this application can be liquid filled (oil or other insulating liquids) or cast-resin types. The transformers may be installed inside or outside the tower but

cast-resin and "less-flammable" or "non-flammable" liquid filled transformers, that minimize the fire risk, are more commonly used inside (in the nacelle or at the bottom of the tower) while oil-filled transformers are more commonly used outside. Liquid filled transformers have lower losses than cast-resin types, and are easier to use with liquid-immersed fuses. The preferred transformer connection on the HV side is usually delta, and the typical voltages range from about 20 kV to 36 kV, depending on utility practices at the location of the wind farm.

There are several methods used to protect the wind farm transformers on the HV side. Most methods use current-limiting fuses due to the high fault currents that can occur, particularly when multiple wind generators are used in a "wind farm". One common method is based on a switch-fuse combination according to IEC 62271-105. This method is, in general, well adapted to protect smaller wind farm transformers, generally lower than 2 MVA. In this case, operation of the CL fuse releases a striker that causes the series switch to open, isolating the transformer (see 5.2.7).

CL fuses are also used in association with other types of switches or interrupters. For these applications, the series switch or interrupter is not tripped by a fuse striker. They typically use coordinated Vacuum Interrupters, which are available to protect transformers, up to about 3 MVA for dry type transformers and 3,8 MVA for liquid-filled transformers. In this case, the series switch, or interrupter, uses a thermal or electronic trigger to cause the switch to open.

The use of interlinked switches or interrupters placed in series with CL fuses results in all three-phases being opened, effectively simultaneously, which may be advantageous. Protection schemes that use switches can therefore avoid putting the generator in a bi-phase or mono-phase supply, and isolate the step-up transformer from the fault currents coming from the network. In any case, the two devices used together must always result in interruption of the current when they operate.

Another approach to the protection of wind farm transformers involves the use of liquid-submerged expulsion fuses in series with liquid immiscible current-limiting Back-Up fuse (as discussed in 5.2.2.6). At the time of writing, transformers up to about 3,8 MVA at 34,5 kV delta can be protected in this way.

Which of the two basic methods used for transformer protection is chosen, switch-fuse or fuse-fuse, depends on a variety of considerations. Liquid-submerged expulsion fuses are relatively inexpensive, but their use is normally limited to liquid-filled transformers. For applications up to 23 kV, expulsion fuses that are easily replaced from outside the transformer (often termed "bayonet" type fuses) are available. However, for higher voltages, the liquid-submerged expulsion fuses normally require replacement through a transformer hand-hole. Therefore, if frequent expulsion fuse operation occurs, the more expensive approach of using a switch rather than an expulsion fuse may be preferred.

5.2.6.2 Fuse selection for wind farm transformers

In general, the rules for choosing fuses for wind farm transformers follow those for normal transformer applications (see 5.2.2). While there are differences from conventional transformer applications, these relate primarily to the additional protection requirements that occur as a result of the transformer being "fed" from both the high voltage and low voltage sides. These aspects will be discussed in 5.2.6.3. The sizing of fuses for transformer magnetizing inrush is the same as conventionally fed transformers (i.e. transformers fed from the HV side), but of course "cold-load pick-up" has no meaning in this application. However, experience has shown that, in general, good results are achieved if the pre-arcing TCC curve of the fuse-link coordinates with the commonly used transformer cold load pick-up points (see 5.2.1.1.2). That is, the element of the fuse will not be melted open by the current at conventional cold load pick-up current and time points (normally the expulsion fuse in the case of a combination expulsion fuse and back-up CL fuse). What the fuses are actually subjected to are surges associated with generator speed variations and fluctuations in power flow. These fluctuations may have peak values higher than the normal full-load current, depending on the level of load control achieved for the wind turbine and associated control

equipment. Such variations may be much more common than typical load pick-up variations, and therefore the fuse manufacturer should be consulted before their fuses are used for this application. For example, experience shows that expulsion fuses, usually available in a variety of element materials, should be chosen to use an element type less susceptible to fatigue resulting from the current cycling.

Phase-to-phase rated fuses are normally used for three-phase delta fusing applications (see 5.1.3 including the cautions involving isolated and resonant earthed systems). However, phase-to-ground rated current-limiting fuses that are "matched-melt" coordinated (see 5.2.2.6.2) with a series line-to-line rated expulsion fuse have also been used for wind farm applications, particularly at the higher voltages. The key consideration is that a combination of the current-limiting fuse applied in series with an expulsion fuse must be capable of interrupting any current that produces melting, and after current interruption the fuses must withstand the system recovery voltage. However, because using this technique requires various assumptions regarding the power system, and may require special testing of the fuses, the fuse manufacturer should be consulted for information before using this technique. While this technique permits the use of lower voltage rating fuses, it generally requires the use of higher current ratings to achieve matched melt coordination, (and higher values of I^2t let through).

5.2.6.3 Additional aspects of wind farm protection

A further aspect of wind farm applications that must be understood is that fuses on the HV side can only isolate the transformer from the power system. An internal transformer fault will continue to be fed from the LV (generator) side until the generator is also isolated from the circuit. Protection on the LV side must also quickly remove the generator if an eventful failure of the transformer is to be avoided.

An internal transformer failure on the system side of the HV coils will not produce a very high HV current fed from the LV side (having a maximum value equivalent to the normal bolted secondary "through fault" current, when fed from the HV side). However, arcing will continue to feed energy into the transformer until the LV protection operates. Commonly used over-voltage, under-voltage, over-current, and under-current relays that cause the low voltage circuit-breaker to trip may provide this protection.

It is important that the LV protection operate very quickly for another reason. If the transformer is isolated from the HV circuit by the operation of the fuse protection, a condition known as "islanding" may occur (i.e. the generator and transformer become an isolated power system). It has been shown that for some applications, the generator output can move out of phase with the system within a few cycles. This may result in higher than normal recovery voltages across the fuses, if there is no combined/associated switching device, theoretically approaching as much as twice the nominal voltage. However, this can only occur if the transformer continues to operate almost normally (that is it does not have a permanent internal fault). While this would be the case if the fuses operated as the result of an overload, overloads should be prevented by devices that limit the generator output to the rated power value. There is another way that loss of voltage synchronization across the primary protection could occur. This is a transient primary fault within the transformer, which causes the primary fuse combination to operate but leaves the HV transformer winding energized at the same voltage, but fed from the LV generator. Providing the low-voltage protection responds during the transient fault (when the fault is also fed from the generator), this will not happen. In the case of the higher voltage wind farm applications (36 kV), transient faults should be rare since a free arc in oil will not self-extinguish at this voltage.

In the case of a switch-fuse combination according to IEC 62271-105, an overvoltage produced by islanding may be withstood by the combination of the two different protection devices, the switch in the open position and the fuse itself. In the case of current-limiting fuses with no combination switch or similar device, the CL fuse must be able to withstand this voltage. Although the voltage is higher than the voltage the CL fuse had to interrupt against, once the CL fuse cools after interrupting a high current, even for a very short time, experience has shown that the CL fuse has a withstand voltage that is also higher than the voltage the

fuse interrupted against. If matched-melt coordination is used with a series connected under-oil expulsion fuse, a large, under oil, isolation gap always results even if the line-to-ground rated current-limiting fuses perform the interrupting function. After operation at currents not causing a current-limiting action, some types of Full-Range fuse may not be able to withstand a voltage significantly higher than the voltage against which they have operated, so they should not be exposed to an "islanding" condition for any significant duration. Careful consideration of the LV protection is therefore very important.

5.2.7 Current-limiting fuses used in conjunction with mechanical switching devices

5.2.7.1 General

Current-limiting fuses and mechanical switching devices are commonly used together in a variety of ways. A very common application uses a fuse with a striker (normally a Back-Up fuse) in series with a switch. Such arrangements, which are the subject of IEC 62271-105, are termed "switch-fuse combinations". By definition, this consists of a three-pole switch with three fuses provided with strikers, the operation of any striker causing all three poles of the switch to open. It includes fuse-switch combinations in which the fuses form the moving contacts. The arrangement of switches and fuses constitute a functional assembly. In this report, when fuses are used in conjunction with other mechanical switching devices (e.g. circuit-switchers, circuit-breakers, vacuum interrupters, contactors, etc.) or without striker tripping, the term "association" will be used, since the term "combination" is used by the switchgear standards only for their type of association covered by IEC 62271-105.

The use of current-limiting fuses and series connected mechanical switchgear combines the positive capabilities of the two types of device, while essentially eliminating any negative properties each may possess individually. The main positive property of a current-limiting fuse is its unsurpassed ability to interrupt high short-circuit currents so quickly, in fact within a few milliseconds, that the asymmetrical peak current and hence the hazardous effects of a potential short-circuit fault, will be significantly reduced. No mechanical switchgear is able to achieve that effect. This current-limiting effect, together with the very high maximum breaking current capability of the CL fuse, which increases the breaking capacity of the combination, are the main reasons for including them with switchgear. While various types of switchgear differ widely in their breaking capabilities, almost all current-limiting fuses have a rated maximum breaking current high enough as to virtually eliminate concern over what value the prospective fault current might be at any point in the system.

When back-up fuses are employed, protection for currents below their minimum breaking current is required. With the use of striker tripping, or appropriate relaying/sensing, the switching device can interrupt currents that the back-up fuse cannot. Normally, the fuse minimum breaking current therefore only needs to be low enough to ensure correct coordination with the switching device. An additional, and often important, feature of the association, that cannot be supplied by the single-pole fuse alone, is the ability to isolate all phases – faulty or not – downstream from the fuses.

The association of fuses and switchgear usually, but not necessarily, makes use of the tripping of the latter by the action of the striker of the first fuse to melt. The time-current characteristic of the fuse – extremely fast operation at high current to slow operation at low current – can thus be used in place of inverse time-current relay tripping of the switchgear. In the case of "release-operated" switching device, an overcurrent or shunt release is used to trip the device, either in addition to, or instead of, the fuse striker tripping. When both the switch and fuse have operating time-current characteristics (e.g. a fuse and a release-operated switch), a "take-over" current exists. This is the current at which the two TCC intersect, with fuse operation occurring above the take-over current and the switching device interrupting below the take-over current. This take-over point is used for coordination purposes. If the switching device is not tripped by a striker, the take-over current must be higher than the fuse's rated minimum breaking current.

There is a "hierarchy" of switching device capability (see IEC 62271-107 for a discussion of this). Switches tend to have limited breaking capability in terms of both current and TRV,

circuit-switchers come next with a higher capability and finally circuit-breakers tend to have the highest breaking capability. Because of the differing capabilities of the series devices, some different application considerations apply to each of them.

5.2.7.2 Switch-fuse combinations (IEC 62271-105)

5.2.7.2.1 General

Switch-fuse combinations are the subject of IEC 62271-105, which does not apply to fuse-circuit breakers, fuse-contactors, combinations for motor circuits or combinations including capacitor bank switches. Although they are most commonly used for transformer applications, they are subject to some application restrictions because of transformer fault TRV characteristics. The primary function of the fuses is to increase the short-circuit breaking rating of the combination beyond that of the switch alone, and to significantly reduce the I^2t permitted into the fault (see 4.1.5.2). The high voltage fuse may be mounted on the source side of the switch or be on the load side (when forming part of the actual switch mechanism it is termed a fuse-switch) so that when the switch is opened the fuses are electrically isolated making replacement more convenient. The fuses are fitted with a striker that ejects in the first few milliseconds after the fuse elements have melted, or in the case of thermally-operated strikers, when the temperature has reached a pre-determined value. The striker operates a tripping mechanism in the switch unit, designed to open the switch contacts. This performs two important functions:

- a) it ensures that even if only one or two fuses melt, all three phases are disconnected;
- b) if the fuse melts with a current less than its minimum breaking current, the striker trips the switch, interrupting the current and isolating the fuse from the supply.

IEC 60282-1:2009, 4.15, contains special testing for back-up fuses for switch-fuse combinations. It shows that they can arc for sufficient time (a minimum of 0.1 s), at a current that they cannot interrupt, to allow the switch to be released, open, and interrupt the current, without the fuse suffering external damage. The 0.1 s arcing time is derived from the sum of 0.05 s (the maximum time permitted for a striker to be released) and 0.05 s for the typical operating time of a striker released switch. This fuse testing is not required for full-range fuses, or fuses that use a thermally released striker (where it can be shown that the thermal release of the fuse striker, at currents below I_3 , operates before fuse arcing can occur).

The main and general requirement for the coordination of fuses and switches is that the transfer current for striker operation is less than the relevant breaking capacity of the switch. The transfer current is the current at which the fuses and switches exchange breaking duties – above this current only the fuses interrupt, while immediately below this current the fuse in the first pole to clear interrupts, but the current in the other two poles is interrupted by either the switch or the fuses, depending on fuse TCC tolerances. Refer to Annex B of IEC 62271-105:2012 for a fuller explanation. The combination is therefore assigned a "rated transfer current" based on testing specified in IEC 62271-105 (a fuse interrupts in one pole while the other two poles are fitted with solid links in place of fuses, requiring the switches to interrupt the current). IEC 62271-105:2012, Annex B, provides a method to determine the transfer current for a particular switch-fuse combination based on the fuse's TCC curve shape and tolerances, and the fuse-initiated opening time of the switch. This transfer current then has to be less than the rated transfer current for the switch. The transfer current calculation is complex, and users are advised to consult the fuse and/or switch manufacturer for advice on the correct application of switch-fuse combinations.

For a switch-fuse combination that uses a release-operated switch, tests at the maximum take-over current (taking into account tolerances, etc.) is required. If the maximum take-over current is equal to or higher than the transfer current, then the transfer current test is not required.

Fuses that are used in a switch-fuse combination should be adequately de-rated in terms of current to allow, if applicable, for the heating effects of the enclosure (see Annex A);

The following additional issues need to be considered in the interdependent coordination between fuse and switch:

5.2.7.2.2 Fuse-link current withstand

Fuses are susceptible to the transient current associated with transformer inrush. This needs particular consideration, since one or more transients passing through an incorrectly rated fuse may lead to local deterioration or melting of one or more fuse elements, a situation absolutely to be avoided. Such damage could lead to melting under normal operating conditions. See 5.2.2.1.2 for guidance on fuse selection for transformer applications. Transient current considerations often limit how low the fuse rating can be for a given application. However, a fuse that has a higher current rating than necessary will give less protection, and may lead to problems with the transfer current and the solid (bolted) secondary short circuit current (see 5.2.7.2.3).

5.2.7.2.3 Transformer applications

The widest application of switch-fuse combinations is in the protection of distribution transformers. However, the load/fault breaking capability of switches used in switch-fuse combinations is restricted not only in magnitude but also in the circuit conditions of power factor and TRV. A switch tested to IEC 62271-103 is not specified for and may not be capable of interrupting a solid short circuit (bolted fault) on the secondary terminals of a transformer, due to the high TRV conditions. The primary fuse is therefore required to interrupt such a current. The transfer current for the chosen fuse current rating (the current at which interrupting duty is transferred to the switch) must therefore not only be lower than the (tested) rated transfer current of the switch-fuse combination, but also less than the solid short-circuit current of the transformer. In cases where a system provider considers that the design of the LV connections between transformer and LV switchgear (e.g. inside prefabricated substations according IEC 62271-202) prevents a solid short-circuit on the secondary transformer terminals, the above fault condition need not be considered in the selection of the fuse-links. However, if no suitable switch-fuse combination exists, a different type of switching device should be used, e.g. a fused circuit-switcher (see IEC 62271-107) or fuse and circuit breaker. In critical cases, contact the fuse and/or the switchgear manufacturer.

5.2.7.2.4 Switch operating speed

A further point to be considered in the coordination context is that modern SF₆ and vacuum switches, due to their extremely short contact movement, inherently have correspondingly very short operating times. Such speed is not usually required for their operation in the combination, but may create conflicting situations with the slower operation of fuses at moderate currents. This exacerbates the concerns discussed in 5.2.7.2.3. At currents that are between the breaking capacity of the switch and the rated maximum breaking current of the fuse, the tolerance in operating time between the fuses of a multi-phase system may be such that the tripping of fast switches, initiated by the first fuse to melt, may result in switch contacts opening before the other fuses have had time to clear the fault current. This would expose the switches to currents that they are not capable of interrupting. Using a fuse having a smaller current rating helps this situation, but fuses must be able to withstand current surges such as transformer inrush (see 5.2.7.2.2). In this case a larger fuse can be used if a slight intentional delay is included in the tripping of the switch, sufficient to ensure that the last-operating fuses take over the fault clearance in all poles before contact separation in the switch occurs. However any delay introduced into tripping should not extend the time beyond the 0,05 s assumed in the fuse testing requirements (see 5.2.7.2.1), unless a Full-Range fuse or thermally released striker is used, or a Back-Up fuse with a longer arcing withstand time is available.

5.2.7.3 Fused circuit-switchers

Limitations in switch-fuse combinations discussed in 5.2.7.2 sometimes require the use of switching devices having a higher current interrupting ability. A circuit-switcher is such a device and the association of a circuit-switcher and fuse is covered by IEC 62271-107 (again

intended primarily for transformer applications). In addition to generally having a higher breaking capacity than switches, circuit-switchers are tested with a higher TRV. Since release-operation, not striker-tripping is a requirement, no transfer current test is specified but the switch must demonstrate successful interruption at a current greater than the maximum take-over current. This current corresponds to the maximum pre-arcing (melting) current of the maximum fuse to be used with the association, at a time equal to the minimum opening time of the switch. Obviously, this take-over current must also be higher than the rated minimum breaking current of the fuse. Any fuse used with the circuit-switcher must have a TCC that crosses the circuit-switcher TCC at a current higher than the fuse's rated minimum breaking current, unless the circuit-switcher is also released by a striker. A fused circuit-switcher may have tripping only initiated by a fuse striker (in effect substituting a circuit-switcher for a switch in a switch-fuse combination). However a fused circuit-switcher tested to IEC 62271-107 requires no additional "transfer current" testing for this application.

Although Circuit-switchers are tested with a higher TRV at the take-over current than switch-fuse combinations tested to IEC 62271-105, IEC 62271-107 still states that "The TRV specified for the take-over current type test may not cover the situation of a bolted short-circuit on the secondary side of a MV-LV transformer, if the type of transformer and the MV connections provide a very low capacitance." In this case, more severe TRV testing of the circuit-switcher, according to IEC 62271-100:2012, Annex M, is required (or a different type of switching device should be used).

5.2.7.4 Additional fuse and mechanical switching device associations

Fuses can also be used with circuit breakers. No IEC standard discusses this application, but the basic coordination rules of circuit-switchers apply – the take-over current should be above the fuse's rated minimum breaking current and less than the circuit breakers maximum breaking capacity. If a full-range fuse is used in conjunction with any series switching device, only the requirement for a take-over current less than the switching device's rated breaking capacity is needed, as the fuse can interrupt any current that causes it to melt.

In the association with circuit-breakers, only the current-limiting feature of the fuses is made use of (low I^2t and peak current) plus their higher breaking capacity to increase that of the series device. All classes of fuses are applicable in these associations.

Fuses used with mechanical switching devices, but not employing striker tripping, may need to be general-purpose or full-range type fuses in order to ensure clearance of low values of fault current unless other tripping devices are employed. Where a protection relay and switching device is used, refer to 5.2.2.2.6 and 5.2.3.

5.3 Installation, operation, maintenance and replacement considerations

5.3.1 General

A fuse in an electric circuit stands guard at all times to protect the circuit and the equipment connected to it from damage within the limits of its ratings. How well this fuse will perform depends not only upon the accuracy with which it was manufactured, but also upon the correctness of the application and the attention it receives before and after it is installed. If a fuse is damaged at any time, it may not be able to interrupt a current that causes it to melt. Therefore, if it is not properly applied, installed and maintained, considerable damage may occur to costly equipment. As an example, drop-out fuse-carriers that remain in the open position for prolonged periods of time, may accumulate water and pollution in their internal parts, which may result in the degradation of their operational properties (see 5.3.3.3).

High-voltage fuse-links should be handled with at least the same degree of care as any other precision-made item of equipment (such as a relay). Fuse-links should be stored in their protective packaging until required for use. If a fuse-link is dropped or otherwise subjected to severe mechanical shock, the manufacturer should be consulted as to the proper procedures to be followed to determine if the fuse is suitable for use.

It cannot be stressed too strongly that prescribed safety rules should be observed at all times when manipulating or maintaining fuses near energised equipment or conductors.

Fuses should be installed in accordance with the manufacturer's instructions. For multipole arrangements of fuses, when the distance between poles is not fixed by the construction, the poles should be mounted with clearances not less than those specified by the manufacturer.

When applicable, the manufacturer should provide information concerning the disposal of fuses with due regard to environmental considerations.

It is the responsibility of the user to consider and comply with all local relevant regulations concerning disposal.

For all application purposes, the ratings of a given fuse (current, voltage, maximum breaking current, etc.) are to be considered the maximum values, which should not be exceeded in service. The only exception is the minimum breaking current of a Back-Up fuse, which should be considered a minimum value.

Normal operation of current-limiting fuses: a normal operation of a current-limiting fuse will not produce excessive external forces on the mounting or surrounding parts. In addition, there is comparatively little noise or reaction when a current-limiting fuse operates.

Precautions should be taken concerning the selection of the site of installation of expulsion type fuses, due to the high level of noise and emission of hot gases during operation that are inherent in some types. They should be applied with adequate clearance in the direction or directions in which they are vented, and facilities should be provided to ensure that operators are not exposed to fuse discharges either during replacement or when working in the area. When this is not possible, the circuit should first be de-energized.

It should be noted that, when fuse-links are subjected to the effect of severe solar radiation, or are used in an enclosure that subjects the fuse-link to a surrounding temperature above 40 °C, certain aspects of the performance of these fuse-links may be significantly affected. Depending on the fuse design, aspects affected may include current rating, time-current characteristics and current interrupting ability. Some fuse types have to be specifically designed and tested for such an application (for example some organic fuse-links, see IEC 60282-1 for definition). The effect on the fuse's current rating and time-current characteristics is covered in 5.1.1.2 and 5.1.1.3. Additional testing requirements for certain fuse-links intended for use in a surrounding temperature above 40 °C are covered in IEC 60282-1.

5.3.2 Installation guidelines

The manufacturers guidelines concerning fuse installation should be followed. During installation and replacement of fuses, careless handling can result in a damaged fuse being installed. Current-limiting fuses are particularly sensitive to careless handling. While damage may be clearly visible, such as denting of the fuse cap or cracking or breakage of the fuse tube, there may be invisible damage – such as breakage of a fuse element inside the fuse or disruption of a seal in an under-oil fuse. This damage can interfere with key performance requirements placed on the fuse, that is a damaged fuse may not be able to carry its rated current or it may not be able to interrupt a faulted circuit. If the latter occurs, damage to associated equipment or even injury to personnel could result. While expulsion fuses tend to be more robust than current-limiting fuses, they can also have delicate elements and be damaged by dropping.

Some typical causes of damage include, but are not limited, to the following:

- dropping or mishandling a fuse;
- excessive force in closing a fuse into its mounting;

- improper alignment of the fuse with its base during insertion or removal;
- over-tightening or under-tightening of connection points;
- excessive lead size or weight causing too high a cantilever force being placed on a fuse;
- using a fuse in a thermal environment beyond its rating.

The manufacturer should be consulted as to proper installation force and acceptable mountings as well as correct handling guidelines. If damage is suspected, the fuse should be removed from service.

5.3.3 Operation guidelines

5.3.3.1 Installation of non-expendable cap on expendable-cap distribution fuse-cutouts

This results in a reduction of the expendable-cap cutout interrupting capability. Refer to manufacturers' instructions concerning the reduction in the rating.

5.3.3.2 Locking or latching of fuse-links, blades, or fuse-carriers in closed position

Special care should be taken to see that the fuse-link, blade, or fuse carrier is securely locked, latched, or held fast in the closed position as recommended by the manufacturer.

5.3.3.3 Fuse-carrier position

Certain types of outdoor fuses should not be left hanging in the open position as a means of isolating the equipment from the system since rain water may collect in the fuse tube and cause swelling or other damage, thus impairing the interrupting capability of the fuse. If an equipment installation or a circuit is to be left out of service the fuse-carriers may be hung upright from a pin or hook on the pole.

5.3.3.4 Operation of energized fuses

A fuse or piece of fused equipment not equipped with a means of breaking load should not be used to open a circuit unless it is known that no current is flowing (either because the fuse has blown or the circuit has been de-energized). When a fuse or piece of fused equipment equipped with a means of breaking load is used (e.g. see 4.3.2.3), it should not be opened immediately after the circuit has been energized. The time delay before opening will vary considerably, depending upon the current rating of the fuse, but should be adequate to allow the fuse to interrupt any existing fault current that might exceed the load-break rating of the device. For large-sized fuse-links above 100 amperes, this time delay could be as long as 10 min. Switch-fuse combinations according to IEC 62271-105 are not under the scope of Subclause 5.3.3.

5.3.3.5 Liquid-submerged expulsion fuses in enclosures

The liquid is an integral part of the equipment design and the fuse performance, and manufacturer's recommendations should be followed. The operation of the fuse may cause carbon to form in the liquid. The degree to which this will affect the equipment characteristics depends upon the number of operations as well as their magnitude and duration. Operating experience will usually be the best basis for establishing a maintenance schedule.

5.3.3.6 Electromagnetic compatibility (EMC)

Fuses within the scope of this report are not sensitive to electromagnetic disturbances and therefore no immunity tests are necessary. Any electromagnetic disturbance which may be generated by a fuse is limited to the instant of its operation.

5.3.4 Maintenance considerations

5.3.4.1 General

Under normal operating conditions, internal components of high-voltage fuses that have been correctly sized for their particular application are not normally subject to influences that could reduce their reliability. However, external effects may damage the outside casing and contact area of a fuse-link, and the contacts and insulators of a fuse-base particularly in outdoor applications. If the manufacturer of the fuses specifies maintenance requirements, then these should be followed. In the absence of specific guidelines, general maintenance information appears in 5.3.4.3. Since the time-scale of environmental damage varies greatly depending on the conditions (indoor in a clean environment or outdoor in a polluted environment being the two extremes) no guidance is possible as to the frequency of maintenance. For some users, maintenance may only occur during the replacement of a "blown" fuse-link, while for others, severe environmental conditions may call for frequent inspections.

When one or two current-limiting fuses in a three-phase arrangement are replaced, in addition to replacing the "blown" fuse(s), all fuse bases should be examined and the fuses in other phases should normally be replaced (see 5.3.5.5). Fuses of all types should always be replaced by identical fuse-links to those originally installed, unless the protection scheme is examined to ensure the replacement fuses will perform the same function. In a two or three phase arrangement, all fuses should be of the same current rating, be from the same manufacturer, and have the same manufacturer's type designation.

5.3.4.2 Precautions to be observed

Examination and maintenance of equipment that is connected to an energized circuit should be done at a safe distance from any exposed energized parts of equipment or conductors, or the circuit and equipment should be de-energized. In the case of equipment on capacitor installations, precautions should be taken to discharge and connect to ground the capacitors after de-energisation. Alternatively, live line techniques may be employed if they are adequate to ensure safety to personnel.

A very important precaution is that personnel should take special care when approaching equipment that may contain an active fault (usually evidenced by a hissing or buzzing noise) since it may be highly dangerous to do so. In such a case the supply should be disconnected upstream before proceeding further.

5.3.4.3 Inspection of fuse or switching device

Equipment within the scope of this report usually consists of several parts, some current-carrying and some non-current-carrying, all subject to atmospheric and other environmental conditions. The equipment is also subject to the normal and abnormal operating conditions of the system in which it is connected. The frequency and completeness of inspection will necessarily be a function of the service reliability required and the conditions at the specific equipment location and so can only be determined by the user, taking into account manufacturer's instructions. Some of the items that might be considered are as follows:

- a) general examination for obvious defects and to ensure that bolts, nuts, washers, pins, and terminal connectors are securely in place/tightened and in good condition;
- b) inspection of insulators and other porcelain or plastic parts for breaks, cracks, burns, or contamination. Cleaning of Insulators and other insulating surfaces of any excessive contamination, such as salt deposits and cement or road dust, to avoid flashover as a result of the accumulation of foreign substances on their surfaces. Cracked or broken insulators and other insulating parts should be replaced. To prevent flashover, consideration should be given to replacing badly burned insulating parts;
- c) Examination of current-contact surfaces for pitting, burning, alignment, and to ensure that the contacts when closed are held together with adequate pressure. Replacement and adjustment may be required

- d) vent holes on equipment so equipped should be examined to ensure the holes are not plugged with dirt or other foreign substances, and cleaned if necessary;
- e) if applicable to the equipment, the fuse unit or fuse tube and renewable fuse element should be examined for corrosion of the fuse element or connecting conductors, excessive erosion or delamination of the inside of fuse tubes, tracking and dirt on the outside of the fuse tube, and improper assembly that may prevent proper operation. Components showing significant signs of deterioration should be replaced. Fuse tubes made of organic material may be refinished according to manufacturer's specifications;
- f) current-carrying parts, such as blades or fuse-links, should be examined for thermal damage resulting from heavy short-circuit currents or overloads. Damaged fuse-links and other parts significantly deformed should be replaced;
- g) the mechanical operation should be checked per manufacturer's recommendations.

5.3.4.4 Inspection of fuse-links in distribution fuse-cutouts

Fuse-links in fuse-cutouts may require periodic replacement since corrosion of the lower terminal of the fuse-link (generally a flexible cable) at the lower open-end of the fuse holder may cause breakage or melting at this point rather than at the current-responsive fuse element. Link-break cutouts are more susceptible to this problem because of the mechanical strain placed upon the fuse-link by the link-break mechanism.

5.3.4.5 Additional maintenance guidelines for specific devices

5.3.4.5.1 Capacitor fuses

Care should be taken to discharge and ground capacitors before maintenance is performed. See 5.3.5 for further information.

5.3.4.5.2 Liquid-submerged expulsion fuses in enclosures

Liquid: The level and quality of the liquid in the equipment may affect the performance of the expulsion fuse. All gasketed joints and seals should be properly maintained. Inspection should include checking the tank for liquid leakage and for indications of any external damage or deterioration. The level of the liquid should be checked to see that it is in accordance with the switchgear manufacturer's recommendation. Liquid should not be withdrawn from, or added to, the switchgear while it is energized unless there is a suitable means or procedure for this function.

Component inspection: Manufacturer's recommendations and requirements for inspection and maintenance of fuse components should be followed. Replacement fuses should be those recommended by the switchgear manufacturer. Many users have established procedures to allow inspection and maintenance of energized equipment. In the absence of such procedures, the equipment should be de-energized before performing any inspection or maintenance.

The following are some general guidelines for inspecting and maintaining fuse components:

- a) all current-carrying components of a fuse carrier or bayonet assembly should be inspected. Any components showing indication of excessive heating or damage from arcing should be replaced. Excessive arc damage or heating of contact surfaces may indicate the need to inspect internal contacts. This generally requires removing the unit from service;
- b) any fuse carrier or cartridge showing signs of cracks, erosion, tracking, or excessive wear should be replaced;
- c) all seals and gaskets should be checked and any that are deteriorated or deformed should be replaced. Manufacturer-approved replacements should be used;
- d) electrical connections should be checked to determine that they are clean and tightly secured;

- e) satisfactory condition of the fuse should be verified, as recommended by the manufacturer.

5.3.4.5.3 Infrared testing

One way of evaluating current-limiting fuses, and higher ampere rated expulsion fuses while they are in service, and observable, is to use infrared test equipment. This approach is becoming more common.

Since fuses are, of necessity, heat producing devices and may often run hotter than other surrounding equipment, the following factors are appropriate to consider when using this equipment:

- a) a temperature reading of 30 °C above ambient temperature is common;
- b) in some cases total measured temperatures as high as 105 °C may be normal;
- c) on three-phase installations, readings on all three phases should be close if the loading is equal on all three phases.
- d) The focus of infrared measurement should be on fuse contact temperatures as element temperatures above 105 °C may be observed if the fuse body is included in temperature scans.

5.3.5 Replacement considerations

5.3.5.1 General

Replacement of fuses should be done with the circuit de-energized, unless their design, testing, and the manufacturer's recommendations permit replacement while energized. In the case of fuses that are under the control of a utility, fuse replacement should be done using utility practices developed in conjunction with the fuse's manufacturer. However, expulsion fuses should never be replaced from within the venting area with the circuit energized.

Replacement fuses should be those recommended by the manufacturer. Care is particularly required in certain applications (i.e. any time a fuse is coordinated with other devices, see below) Testing is performed in accordance with IEC standards that cover only the performance of fuses as tested, when the fuse consists of a particular combination of fuse-base, fuse-carrier, and/or fuse-link. Successful performance of other combinations of components from different manufacturers cannot be implied from such tests.

Particular caution should be exercised when replacing a back-up fuse, or the series device with which it is coordinated (e.g. see 5.2.2.5), after either, or both, have operated. Coordination between the two devices is critical to preventing damage to them and the associated equipment. Therefore, replacement of either protective device with one of a different rating or supplied by a different manufacturer should be done only after a careful review of the total protection scheme to be sure that coordination is maintained. Because Back-Up fuses are always coordinated with another device, care is often necessary when the series device has operated.

It is advisable to locate and correct the situation that caused the fuse to operate before re-energizing. The operator should be aware that a potential hazard may exist if the circuit is re-energized with the fault condition still present.

The exhaust-control device on expulsion fuses so equipped may be suitable for reuse after a fuse operation. This is dependent upon the fault magnitudes, and numbers of fault-current interruptions it has experienced. It is advisable, after the operation of a fuse, to inspect the exhaust-control device and follow carefully the manufacturer's instructions for determining the suitability of the device for further service.

5.3.5.2 Storing spare fuse-links and replaceable parts

Spare fuse-links, refill units, and replaceable parts of fuses should be stored in such a manner that they will not be damaged, and will be available when needed. Boric acid expulsion fuses are particularly sensitive to moisture ingress and should be stored in their original packaging in a dry environment. If several types and ratings of fuses are used in a given location the spare parts should be suitably marked, coded, or indexed to show the mountings, circuits, or equipment with which they are to be used. This will minimize the possibility of improper use. Consult the manufacturer for recommendations.

5.3.5.3 Capacitor fuse replacement

Care should be taken to discharge the capacitors after de-energisation, and to ground the entire capacitor bank before any maintenance is performed. Fuses used on capacitor units should not be handled, removed or replaced unless due precautions are taken beforehand to de-energize, discharge and ground the capacitor units. The entire capacitor bank should be de-energized and earthed while replacing capacitor-unit fuses. Capacitor line fuses may be handled using live-line tools.

Capacitor units used in power applications usually have a discharge resistor to reduce the capacitor unit voltage to a specified value in a specified time after being de-energized. This internal-discharge device should not be considered as a substitute for the recommended safety practice of manually discharging the residual stored energy before working on capacitor units. Capacitor units may be damaged if discharged too soon after being de-energized. It is recommended that at least 5 minutes be allowed for adequate discharge through the discharge resistor, and then the capacitor terminals should be shorted together and connected to ground.

When installing or removing capacitor unit fuses using fuse-links having a flexible tail or leader, the leader should first be disconnected from the capacitor bushing to avoid twisting of the fusible element.

When replacing a capacitor unit fuse it may be desirable to check the continuity and the condition of the fuses or fuse-links on adjacent parallel capacitor units.

5.3.5.4 Liquid-submerged expulsion fuses in enclosures

During removal and replacement of fuses, it should be considered that a sealed enclosure (tank) may have a pressure greater than atmospheric. This internal pressure should be returned to atmospheric pressure prior to removing fuses.

5.3.5.5 Three-phase applications/series fuse operation

Under certain circumstances, fuses may be damaged or experience partial element melting by a current that is not of sufficient magnitude and duration to cause total melting and operation of the fuse.

Considerations regarding fuse replacement after one or two fuse operation on two or three-phase applications include the following:

- a) if not all fuses of a two or three-phase group operates, there is a possibility that another phase was involved and, while it did not operate, its fuse may be damaged. Unless the user can positively rule out this possibility, then all fuses in a two or three-phase set should be replaced when any have operated;
- b) an example of a situation in which a multi-phase fault can be ruled out is in the case in which the fault location can be positively identified and only the phase(s) with the operated fuse(s) was involved with the fault;
- c) for capacitor banks that use capacitor line fuses (group fuses) the following conditions apply. On a earthed-star capacitor bank, if one fuse operates there is no need to replace

the other two fuses. On an unearthed-star capacitor bank, if one fuse operates the other two fuses may be damaged since they have been subjected to 3 times normal current when the capacitor shorted (which caused the first fuse to operate). On delta-connected banks, usually two fuses operate simultaneously and there is no need to replace the third. If a second fuse did not operate, then after the faulted capacitor is identified (and isolated), the second fuse, on the other line bushing of the faulted capacitor unit, should be replaced.

In applications where fuses are used in series with other fuses or interrupting devices in the same phase in such a manner that their pre-arcing or operating curves cross one another, it is advisable after an operation to follow carefully the manufacturer's instructions for determining the suitability of the other fuse(s) for continued service.

Care should be exercised when replacing fuses in multi-phase circuits if the assumption has been made that, under fault conditions, two fuses will be effectively in series and will share the line-to-line voltage. For two fuses to share the voltage, they must arc simultaneously. Consequently, fuses in all phases should be of the same fuse rating, the same model and/or type of fuse, and be from the same manufacturer; consult the manufacturer for more information.

5.4 Recycling

When applicable, the manufacturer should provide information concerning the disposal of fuses with due regard to environmental considerations.

It is the responsibility of the user to consider and comply with all local relevant regulations concerning disposal.

Reuse of current-limiting fuses after interruption: current-limiting fuse-links should not be reused or rebuilt (unless the work is performed by the fuse manufacturer or their authorized agent).

Annex A (informative)

Practical guidelines for thermal de-rating of current-limiting fuses

A.1 Object

The object of this annex is to provide guidance on the determination of thermal de-rating of a fuse when the temperature around the fuse exceeds 40 °C. This may be caused by higher ambient temperature in a non-enclosed situation or by use in an enclosure.

Hence methods are given for the following cases:

- a) de-rating for use in ambient air temperature above 40 °C (type 1CL see 5.1.1.2.2);
- b) de-rating for use in relatively large enclosures (type 1CL see 5.1.1.2.2);
- c) de-rating for use in relatively small enclosures (type 2CL see 5.1.1.2.2);
- d) de-rating for use in enclosures with insulating liquid surrounding the fuse-links (type 3CL see 5.1.1.2.2).

In addition, method e) may be used as an alternative to methods a), b), c) and d).

NOTE Other methods of de-rating are used in certain countries; see the bibliography.

A.2 General

Guidance on the use of current limiting fuses in elevated surrounding temperatures is covered in 5.1.1. IEEE standards have used the term "allowable continuous current" to describe a current higher or lower than rated current that a fuse can carry without deterioration and without exceeding permitted temperatures in a particular surrounding temperature (or in a given enclosure having a particular surrounding temperature). Annex A, uses the term "maximum permissible continuous current I_{encl} " to indicate the modified rated current caused by an enclosure and the two terms are approximately equivalent.

Subclause 5.1.1.2.1 further advises that the suitability for a specific application of the fuse-link in an enclosure is the responsibility of the supplier of the fuse enclosure package (FEP).

NOTE FEP means the combination of the fuse in its enclosure.

The results of the power-dissipation tests (see 4.2.4.6 and 6.5 of IEC 60282-1:2009), along with a method for determining enclosure temperature, may enable the FEP manufacturer to assess the maximum permissible continuous current which may be carried by any FEP, prior to confirmation by tests. However, often specific advice from the fuse manufacturer is required as to the suitability of a particular design for use in an enclosure, and the method to be used to determine appropriate de-rating.

Many HV fuse-links are used for transformer circuit application, for which 5.2.2 gives guidance for the selection of fuse-links. As stated in 5.2.2.2.2 item a), these fuse-links should have relatively high operating currents in the 0,1 s region of the time-current characteristics. To meet this requirement, the fuse-link rated current is generally in excess of circuit full-load current and, therefore, de-rating as determined using this annex will usually already be met for Back-Up fuses, although General-Purpose and Full-Range fuses frequently need de-rating.

The need for de-rating the fuse-link arises for one or other of the following reasons:

- to limit the internal hot-spot temperature to a value which will not cause deterioration. This value is dependent upon the specific fuse-link design;

- to ensure that contact temperatures do not exceed maximum values as given in IEC 60282-1.

It is often the first of these requirements that determines the fuse-link rating. However, as cooling become more restrictive and current de-rating increases, the temperature drop from the fuse element to the exterior of the fuse barrel decreases. This leads to a shift from having the maximum load current determined by the hot-spot temperature of the fuse elements to having it determined by the contact temperature.

a) De-rating for use in ambient air temperatures above 40 °C

A conservative method of calculating a current that will result in the same contact temperatures in a higher surrounding temperature assumes that heat loss from the fuse is proportional to the difference between contact temperature and ambient temperature. Figure A.1 uses this approach to provide the percentage de-rating required as a function of surrounding temperature for values of maximum temperature of contacts and terminals as specified in Table 6 of IEC 60282-1:2009 (and reminded in Table A.1). This is conservative for several reasons. Firstly it assumes that at rated current a fuse has the maximum temperature rise permitted. This is not always true for maximum current ratings and seldom true for lower ratings. Additionally it assumes the same fuse element temperature at the de-rated current while in practice the average temperature will generally drop (as explained in the previous paragraph). De-rating based on maximum hot-spot temperatures will generally give a de-rating factor that allows a higher percentage of the rated current than given in Fig A.1, so the values from Fig A.1 err on the safe side, and are intended to be used where more precise information is not available from the fuse-link manufacturer. Where such information is available, less onerous de-rating factors may be applicable. This method is also applicable to fuses in vaults or large enclosures where the heat generated by the fuse is an insignificant contribution to the heat generated in the enclosure.

b) De-rating for use in relatively large enclosures

Within this category are typically three-phase box-type enclosures with significant heat dissipation from the fuse-links by convection. Although not necessarily constructed from metal, the clearances to the sides (and partitions, if any) of the box will be consistent with clearances required for electrical purposes appropriate to the medium immediately surrounding the fuse-links for non-shrouded metal-type enclosures.

For such enclosures, Figure A.1 may be used to assist in determining the de-rated current (I_{encl}) value for the fuse-links when used in a given enclosure. If the temperature of the medium surrounding the fuses is known, then Figure A.1 is used to verify whether the I_{encl} is correct. However, the difficulty to be overcome is that the heat produced by the fuse-link has a direct effect on the temperature within the enclosure.

IEC 60890 gives a method for calculation of the temperature rise of air inside enclosures, and the same principles may be applied to enclosures containing HV fuse-links.

Consider the example shown in Figure A.2, and assume 100 A fuse-links with power dissipation of 85 W at rated current.

NOTE Actual power-dissipation values are obtained from the fuse-link manufacturer in accordance with 6.5.3. of IEC 60282-1:2009

Complete the table shown in Figure A.3 (a full explanation of the procedure is given in IEC 60890).

The completed table is shown in Figure A.4, and an I_{encl} value of 80 A has been assumed. The first section results in a value for effective cooling surface A_e . Constants K , d , $\times$ and c are obtained from IEC 60890. The effective power dissipation P requires some explanation.

It is necessary to assume an I_{encl} value and obtain the appropriate power dissipation. For the initial assessment in this example, an I_{encl} value of 80 A has been assumed giving a power dissipation of $(80/100)^2 \times 85 = 54,4$ W. The resultant temperature rise of the enclosure at the upper end is determined to be 37,5 K.

If Figure A.1 is now examined for a de-rating factor on bolted contacts (105 °C) and at an ambient temperature of 40 °C + 37,5 °C = 77,5 °C, the de-rating factor is seen to be 65 %.

Hence, since the selected rated current of 100 A exceeds the rated current $\times$ derating factor (i.e. $100 \text{ A} \times 0,65 = 65 \text{ A}$) an I_{encl} value of 80 A is seen to be excessive.

The exercise must now be repeated, using a lower current. Hence consider 70 A, where power dissipation $(70 \times 100)^2 \times 85 = 41,6 \text{ W}$. This in turn leads to a temperature rise of the enclosure at the upper end of 30,3 K. Now if we examine Figure A.1 for an ambient temperature of $40^\circ\text{C} + 30,3^\circ\text{C} = 70,3^\circ\text{C}$, the de-rating factor is seen to be 73 %. Hence the permissible rating of $0,73 \times 100 \text{ A} = 73 \text{ A}$ now exceeds the proposed I_{encl} value of 70 A and thus the latter is assessed as acceptable.

This example shows how the information available in Figure A.1, and in IEC 60890 can be used to assess an acceptable I_{encl} value for an FEP. Where there are other items of equipment or connections within the enclosure that produce appreciable power dissipation, then these values should be added to the power dissipation of the fuse-links.

c) De-rating for use in relatively small enclosures or canisters

The main characteristics of a canister, seen in the context of the de-rating of fuse-links are as follows.

The canister is typically a single-phase enclosure.

- The distance between the outer surface of the fuse-link and the inner wall of the canister is small, typically 10 % to 25 % of the fuse-link diameter.
- Due to the narrow space, cooling by convection is of little significance, whereas radiation and conduction may dominate. The fuse-link and canister form an integrated assembly, and de-rating may often be based on the maximum power dissipation the assembly can withstand.
- Depending upon canister construction and materials used, the temperature of the interior of the canister may, in some cases, be the determining factor for the de-rating.

Because of the close interaction of the canister and fuse-link, the de-rating of this combination can normally only be determined by measurement.

d) De-rating for use in enclosures with insulating liquid surrounding the fuse-links

The rated currents of fuse-links intended for use under insulating liquid are determined by tests under relatively restricted conditions, designed to simulate service conditions (see 6.5.1.2 of IEC 60282-1:2009). Hence de-rating, if any, within an enclosure is usually minimal. However, due account should be taken of external ambient temperatures above 40°C , particularly in the case of Full-Range fuses and with transformer applications (see 5.2.2.2).

Methods a) to d) provide a means of assessment and are not a substitute for actual tests expected to be carried out by the FEP manufacturer. When tests are conducted by the FEP manufacturer, then the results of those tests override any assessment made by use of this annex.

e) Alternative method for establishing de-rating

Where it is possible for the FEP manufacturer or end-user to make tests on the equipment complete with relevant fuses, the following method may be adopted for establishing the I_{encl} value for the FEP:

- 1) obtain from the fuse manufacturer the value of watts dissipation (W_f) at rated current (I_f) of the fuse under the normal test conditions. From this value, calculate the maximum permissible hot resistance of the fuse-link (W_f / I_f^2);
- 2) install a set of three fuses as in service. Apply a gradually increasing value of test current until:
 - the hot resistance (as given by dividing the voltage drop across each fuse-link by the current) reaches the value calculated in 1) above, or
 - the temperature rise on the fuse contacts and terminals reaches the permissible limits specified by the fuse manufacturer or in Table A.1;
- 3) the I_{encl} value for the fuse-link will be the lower of the following:
 - that value which results in the maximum permissible hot resistance;

- that value which results in the appropriate maximum temperature rise specified in 4.7 of IEC 60282-1:2009.

It should also be noted that this annex is concerned with continuous full-load current requirements of associated and/or protected equipment such as transformers or motors. Use under cyclic overload conditions should be subject to agreement between manufacturer and user.

Table A.1 – Contact Temperature limits extracted from Table 6 of IEC 60282-1:2009

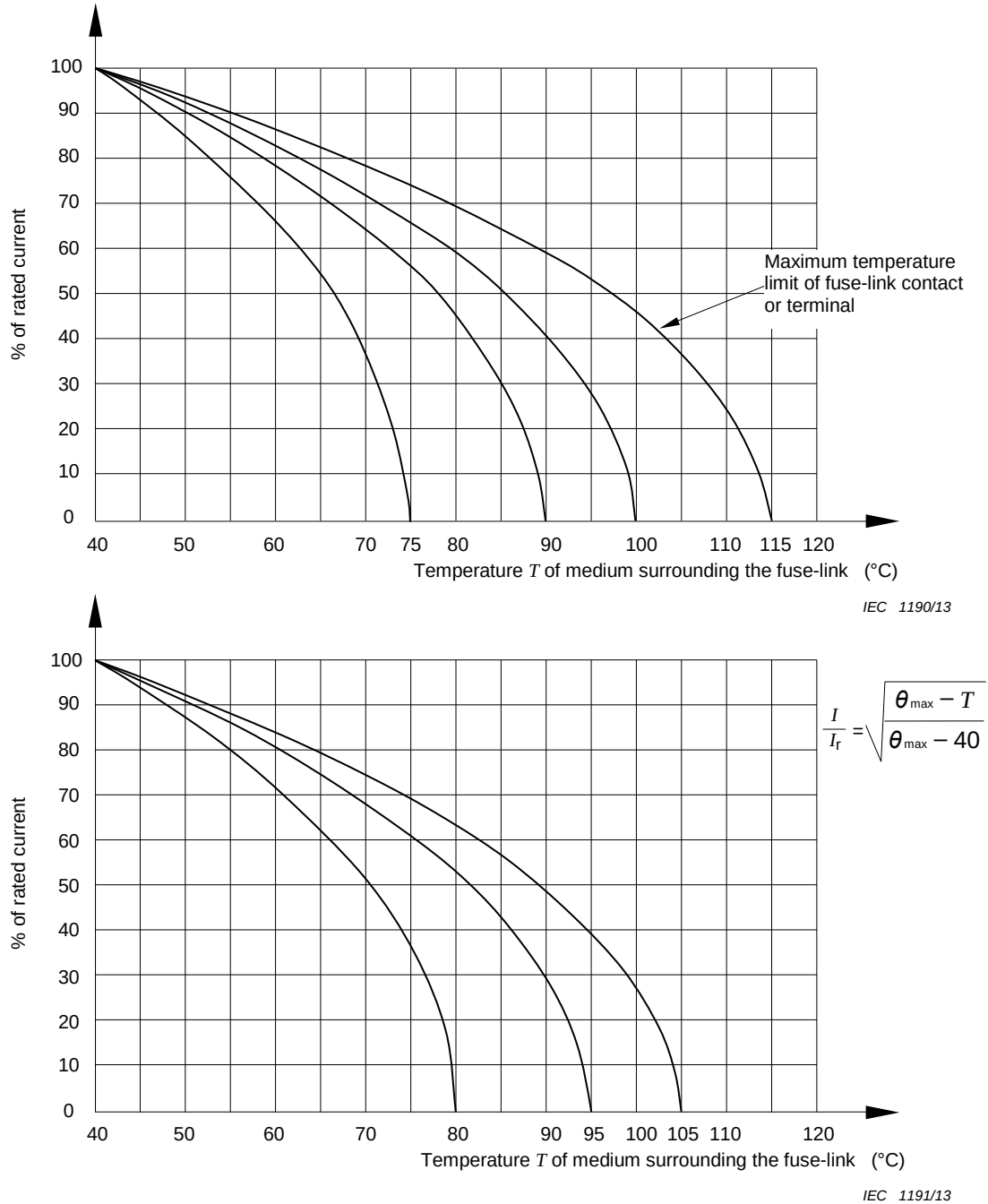


Figure A.1 – Derating curves for some allowed temperature limits

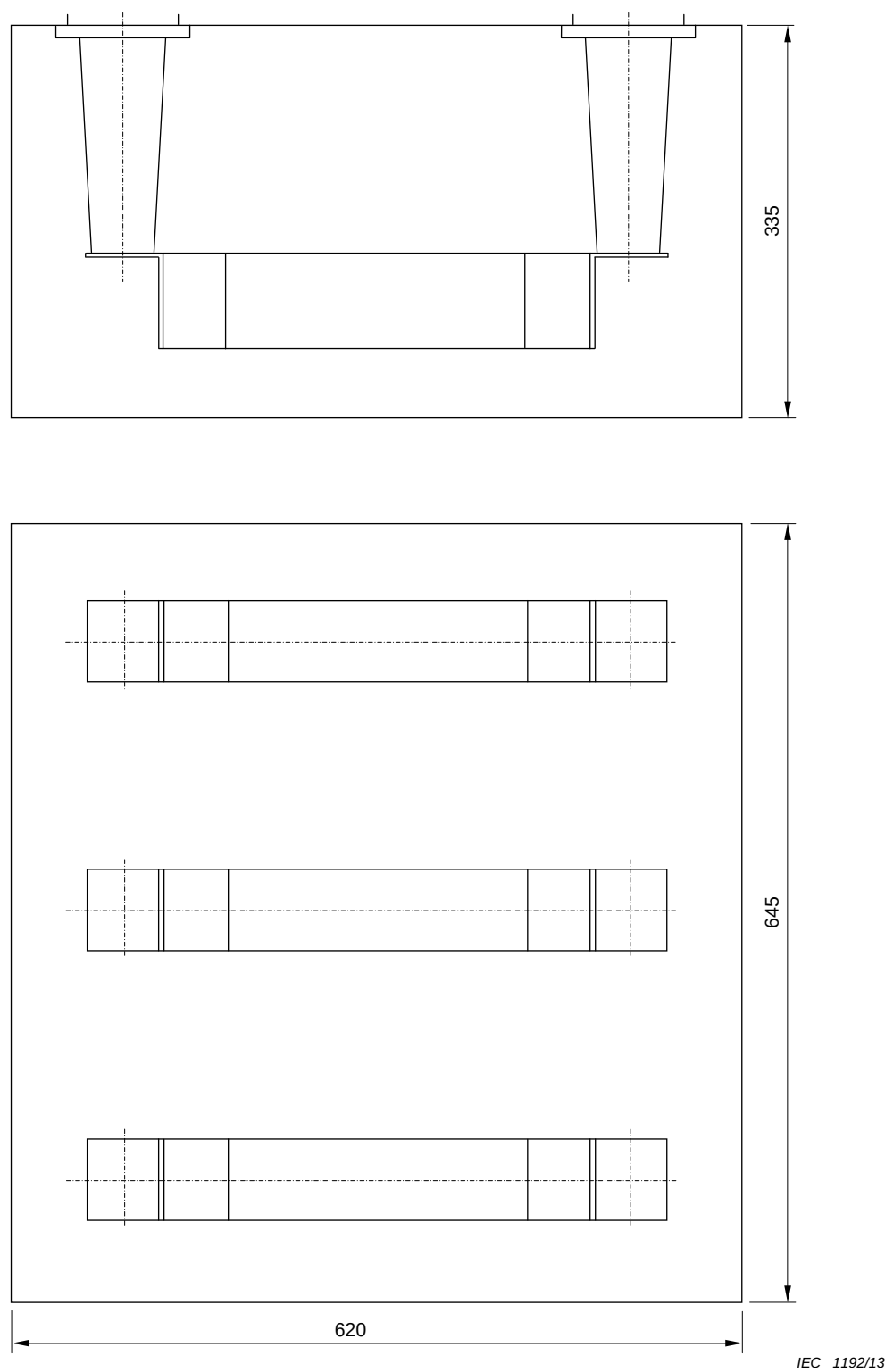
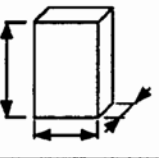
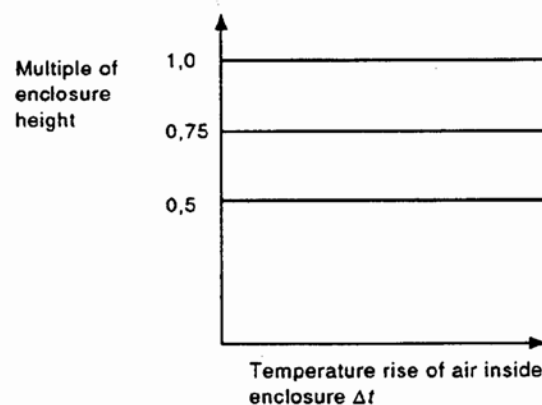


Figure A.2 – Practical example: dimensions

Calculation of temperature rise of air inside enclosures					
Customer/plant					
Type of enclosure					
Relevant dimensions for temperature rise	height	mm	Type of installation:		
	width	mm	Ventilation openings: yes/no		
	depth	mm	Number of horizontal partitions:		
Effective cooling surface		Dimensions	A_o	Surface factor b according to table III	$A_o \times b$ (column 3) $\times$ (column 4)
		m $\times$ m	m ²		m ²
		2	3		4
	Top				
	Front				
	Rear				
	Left-hand side				
	Right-hand side				
$A_o - \Sigma (A_o \times b) = \text{Total}$					
With an effective cooling surface A_o					
Exceeding 1,25 m ²			Not exceeding 1,25 m ²		
$f = \frac{h^{1,35}}{A_o} \quad (\text{see 5.2.3})$ _____			$g = \frac{h}{w} \quad (\text{see 5.2.3})$ _____		
Air inlet openings		cm ²			
Enclosure constant k					
Factor for horizontal partitions d					
Effective power loss P		W			
$P^x = P^{***}$					
$\Delta t_{0,5} = k \cdot d \cdot P^x$		K			
Temperature distribution factor c					
$\Delta t_{1,0} = c \cdot \Delta t_{0,5}$		K			

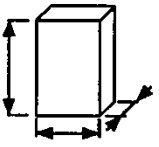
Characteristic curve:

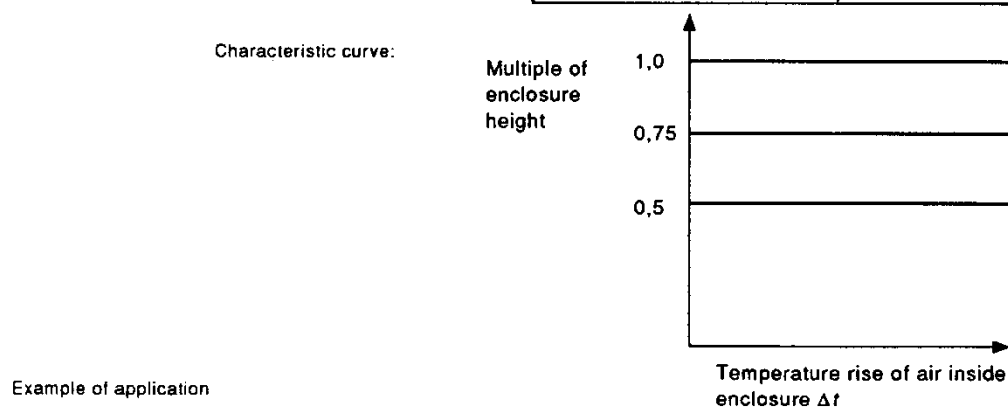


Extract from IEC 60890

IEC 1193/13

Figure A.3 – Extract from IEC 60890

Calculation of temperature rise of air inside enclosures					
Customer/plant		Example only (see figure 2)			
Type of enclosure		three-phase			
Relevant dimensions for temperature rise	height	620 mm	Type of installation:		
	width	645 mm	Ventilation openings: yes/no no		
	depth	335 mm	Number of horizontal partitions: None		
Effective cooling surface		Dimensions	A_0	Surface factor b according to table III	$A_0 \times b$ (column 3) $\times$ (column 4)
		m $\times$ m	m ²		m ²
		2	3	4	5
	Top	0,645 $\times$ 0,335	0,216	1,4	0,3024
	Front	0,645 $\times$ 0,620	0,400	0,9	0,3600
	Rear	0,645 $\times$ 0,620	0,400	0,9	0,3600
	Left-hand side	0,335 $\times$ 0,620	0,208	0,9	0,1869
	Right-hand side	0,335 $\times$ 0,620	0,208	0,9	0,1869
$A_0 - \Sigma (A_0 \times b) = \text{Total}$					1,396
With an effective cooling surface A_0					
Exceeding 1,25 m ²			Not exceeding 1,25 m ²		
$f = \frac{h^{1,35}}{A_0^{1,35}}$ (see 5.2.3 of IEC 60890)			$g = \frac{h}{w}$ (see 5.2.3 of IEC 60890)		
$\frac{0,620^{1,35}}{0,645 \times 0,335} = 2,43$			1st trial Final		
Air inlet openings	cm ²	-	-	-	-
Enclosure constant k		0,48	0,48	0,48	0,48
Factor for horizontal partitions d		1	1	1	1
Effective power loss P	W	54,4 $\times$ 3 = 163	41,6 $\times$ 3 = 124,8	41,6 $\times$ 3 = 124,8	41,6 $\times$ 3 = 124,8
$P^x = P^{0,804}$		60,1	48,5	48,5	48,5
$\Delta t_{0,5} = k \cdot d \cdot P^x$	K	28,85	23,3	23,3	23,3
Temperature distribution factor c		1,3	1,3	1,3	1,3
$\Delta t_{1,0} = c \cdot \Delta t_{0,5}$	K	37,5	30,3	30,3	30,3
		at 80A	at 70A	at 70A	at 70A



IEC 1194/13

Figure A.4 – Practical example of application

Bibliography

The bibliographic entries are either documents referred to in the body of the report or are references to information concerning fuses that may be of help to those using fuses.

- [1] AS1033.1, *High voltage fuses (for rated voltages exceeding 1 000 V) – Part 1 Expulsion type*
- [2] Electric Fuses, Wright and Newbery; IEE power and energy series; 49. ISBN: 0-86341-379-X & 978-0-86341-379-7. www.iet.org
- [3] IEEE Std 18, *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors*
- [4] IEEE Std 141, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*
- [5] IEEE Std 399, *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*
- [6] IEEE Std C37.41, *IEEE standard design tests for high-voltage (> 1 000 v) fuses, fuse and disconnecting cutouts, distribution enclosed single-pole air switches, fuse disconnecting switches, and fuse links and accessories used with these devices*
- [7] IEEE C37.42, *IEEE standard specifications for high voltage (> 1 000 v) expulsion-type distribution-class fuses, fuse and disconnecting cutouts, fuse disconnecting switches and fuse links and accessories used with these devices*
- [8] IEEE C37.46, *IEEE standard specifications for high-voltage (> 1 000 v) expulsion and current-limiting power class fuses and fuse disconnecting switches*
- [9] IEEE Std C37.47, *IEEE standard specifications for high voltage (> 1 000 v) distribution class current-limiting type fuses and fuse disconnecting switches*
- [10] IEEE C37.48, *IEEE guide for the application, operation, and maintenance of high-voltage fuses, distribution enclosed single-pole air switches, fuse disconnecting switches, and accessories*
- [11] IEEE Std C37.48.1:2011, *IEEE guide for the application, operation, and coordination of high-voltage (> 1 000 v) current-limiting fuses (ANSI)*
- [12] IEEE Std C37.99, *IEEE guide for the protection of shunt capacitor banks (ANSI)*
- [13] NFPA 70, *National Electrical Code, 1999 Ed.*
- [14] Rau, C., Leconte, C-J., Gibert, T., "Resistance of Transformers to Internal Faults: Synthesis of Experimental Results", CIREN 1989, Proceedings 10th International Conference on Electricity Distribution, Brighton, 8-12 May 1989

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	131
INTRODUCTION.....	133
0.1 Finalités et objectifs du présent rapport technique	133
0.2 Utilisation du rapport technique	133
0.2.1 Généralités.....	133
0.2.2 Explication concernant les fusibles	133
0.2.3 Informations relatives à l'application	133
1 Domaine d'application	135
2 Références normatives.....	135
3 Termes, définitions et abréviations	136
3.1 Termes et définitions	136
3.2 Abréviations	136
4 Section explicative	137
4.1 Introduction simple aux fusibles.....	137
4.1.1 Généralités.....	137
4.1.2 Classifications et terminologie des fusibles.....	139
4.1.3 Principes essentiels de fonctionnement des fusibles.....	141
4.1.4 Avantages de la protection par fusibles	142
4.1.5 Avantages des fusibles limiteurs de courant	142
4.1.6 Types de fusibles à haute tension.....	144
4.1.7 Applications des types de fusibles	147
4.2 Fusibles limiteurs de courant.....	147
4.2.1 Conception et fonctionnement des fusibles limiteurs de courant	147
4.2.2 Classification des fusibles limiteurs de courant.....	152
4.2.3 Caractéristiques assignées des fusibles limiteurs de courant.....	153
4.2.4 Caractéristiques des fusibles limiteurs de courant	155
4.3 Fusibles à expulsion.....	158
4.3.1 Principes généraux de fonctionnement	158
4.3.2 Construction et fonctionnement des fusibles à expulsion	159
4.3.3 Classification des fusibles à expulsion.....	166
4.3.4 Caractéristiques assignées des fusibles à expulsion.....	166
4.3.5 Caractéristiques des fusibles à expulsion	168
4.4 Autres appareils de protection associés	169
4.4.1 Généralités.....	169
4.4.2 Appareils activés électroniquement	169
4.4.3 Autres types de fusibles non-limiteurs de courant.....	171
4.5 Socle (support de fusibles)	172
4.5.1 Généralités.....	172
4.5.2 Propriétés d'isolation	172
4.5.3 Courant assigné	174
5 Section utilisation	174
5.1 Informations générales sur l'utilisation.....	174
5.1.1 Considérations relatives au fonctionnement.....	174
5.1.2 Sélection du courant assigné.....	184
5.1.3 Choix de la tension assignée du fusible	185
5.1.4 Coordination entre les fusibles, et entre les fusibles et d'autres appareils de protection	188

5.1.5	Considérations sur les caractéristiques de courant et le pouvoir de coupe pour des fusibles montés en parallèle	199
5.1.6	Tension en cas de fusibles montés en série.....	200
5.1.7	Résistance des fusibles à la tension de rétablissement.	201
5.1.8	Décharge partielle	201
5.2	Applications typiques.....	201
5.2.1	Protection de câbles et de lignes aériennes.....	201
5.2.2	Applications aux transformateurs de distribution	207
5.2.3	Applications pour des circuits comprenant des moteurs	223
5.2.4	Applications de protection de condensateur	227
5.2.5	Applications avec transformateur de tension.....	243
5.2.6	Applications pour production d'énergie éolienne	245
5.2.7	Fusibles limiteurs de courant utilisés en conjonction avec des appareils mécaniques de connexion	248
5.3	Observations relatives à l'installation, au fonctionnement, à l'entretien et au remplacement.....	252
5.3.1	Généralités.....	252
5.3.2	Directives relatives à l'installation	253
5.3.3	Directives de fonctionnement.....	254
5.3.4	Considérations relatives à la maintenance	254
5.3.5	Observations relatives au remplacement	257
5.4	Recyclage	259
Annexe A (informative) Conseils pratiques pour le déclassement thermique des fusibles limiteurs de courant		261
Bibliographie.....		269
Figure 1 – Courbe caractéristique temps-courant de préarc d'un fusible		137
Figure 2 – Interruption d'un courant élevé par un fusible limiteur de courant et par un fusible à expulsion		139
Figure 3 – Comparaison de l'intégrale de Joule de fonctionnement (I^2t) par rapport à un courant présumé pour des fusibles limiteurs de courant et des fusibles non limiteurs de courant		143
Figure 4 – Dessin de coupe de l'élément de remplacement d'un type de fusible limiteur de courant conforme aux dimensions DIN		149
Figure 5 – Gammes de courants auxquelles s'appliquent les différentes classes de fusibles		153
Figure 6 – Caractéristiques types d'amplitude du courant limité		156
Figure 7 – Construction d'un fusible-déconnecteur de distribution		160
Figure 8 – Types de fusibles à expulsion		164
Figure 9 – Fusible à expulsion de Classe "B"		165
Figure 10 – Schéma d'un limiteur de courant de type commutant		170
Figure 11 – Schéma d'un fusible assisté par un système pyrotechnique.....		171
Figure 12 – Définition des termes fusibles "amont" et "aval"		190
Figure 13 – Exemple de coordination entre fusibles limiteurs de courant.....		192
Figure 14 – Exemple de courbe TTC entre fusibles limiteurs de courant		193
Figure 15 – Exemple fusible limiteur de courant-coupe/circuit à expulsion		194
Figure 16 – Exemple de courbe fusible limiteur de courant/fusible à expulsion.....		194
Figure 17 – Exemple de fusible à expulsion-fusible limiteur de courant.....		195

Figure 18 – Exemple de courbe TCC fusible à expulsion-fusible limiteur de courant	196
Figure 19 – Exemple de portée	204
Figure 20 – Courbes caractéristiques pour la protection d'un circuit comprenant un transformateur HT/BT	212
Figure 21 – Un exemple de coordination de fusible à fusible	218
Figure 22 – Un exemple de coordination à croisement de courbes temps-courant.....	220
Figure 23 – Marge de fusible "sans dommage"	222
Figure 24 – Caractéristiques relatives à la protection d'un circuit comportant un moteur	227
Figure 25 – Exemple de caractéristiques de courbe de rupture de cuve de condensateur	241
Figure A.1 – Courbe de déclassement pour certaines limites de température autorisées.....	265
Figure A.2 – Exemple pratique: dimensions	266
Figure A.3 – Extrait de la CEI 60890	267
Figure A.4 – Exemple pratique d'application	268
Tableau 1 – Types courants de fusibles limiteurs de courants.....	145
Tableau 2 – Types courants de fusibles à expulsion	146
Tableau 3 – Types de fusibles non limiteurs de courants	146
Tableau 4 – Appareils apparentés à des fusibles	147
Tableau A.1 – Limites de température de contact tirées du Tableau 6 de CEI 60282-1:2009.....	265

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

GUIDE EXPLICATIF ET D'APPLICATION POUR LES FUSIBLES À HAUTE TENSION

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national de la CEI intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales ou régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Il convient que tous les utilisateurs s'assurent qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

La CEI 62655, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 32A: Coupe-circuits à fusibles à haute tension, du comité d'études 32 de la CEI: Coupe-circuits à fusibles

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
32A/296/DTR	32A/301/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de ce rapport technique.

La présente publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une part significative de ce rapport technique a été extrait et réutilisé avec l'autorisation de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, (IEEE) à partir du document C37.48.1-2012, "IEEE Guide for Operation, Classification, Application, and Coordination of Current-Limiting Fuses with Rated Voltages 1-38kV", Copyright 2002 IEEE, tous droits réservés, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854.

Remerciements:

Le Groupe de Travail remercie l'Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, (IEEE) pour la permission de reproduire des informations à partir de sa norme IEEE C37.48.1-2012. Tous les extraits sont la propriété de l'IEEE, Piscataway, New Jersey. Tous droits réservés. Plus d'informations sur l'IEEE sont disponibles sur le site internet www.standards.ieee.org. L'IEEE n'a aucune responsabilité quant aux emplacements et au contexte dans lesquels les extraits et contenus sont reproduits par les auteurs, ni n'est en aucun cas responsable des autres contenus et de leur exactitude.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "http://webstore.iec.ch" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTRODUCTION

0.1 Finalités et objectifs du présent rapport technique

- a) Pour aider les utilisateurs potentiels et les ingénieurs spécialisés en protection à comprendre les bases de la technologie des fusibles à haute tension (>1 000 V en courant alternatif) et des applications utilisant des fusibles haute tension (HT);
- b) pour illustrer les avantages particuliers et uniques de la protection par fusibles pour la plupart des applications;
- c) pour réduire au maximum les risques de mauvaise utilisation des fusibles pouvant entraîner des problèmes spécifiques;
- d) pour énumérer et décrire les nombreux types de fusibles actuellement utilisés, ainsi que les Normes internationales qui s'y rattachent, y compris les types de fusibles ne faisant pas l'objet de normes CEI spécifiques ou d'autres normes reconnues.

Le présent Rapport Technique rassemble des informations précédemment publiées dans des normes CEI ou d'autres publications, de même que des informations nouvelles. Les informations répétées présentes dans ces publications sont donc susceptibles d'être supprimées lors des révisions ultérieures.

0.2 Utilisation du rapport technique

0.2.1 Généralités

La lecture intégrale du présent rapport technique fournit une étude approfondie des fusibles à haute tension (HT) et de leurs applications. Ce rapport constitue essentiellement une explication qui couvre tous les types courants de fusibles (et certains moins courants) et la plupart de leurs applications. Cependant, on considère que peu d'utilisateurs liront ce rapport in extenso, mais liront plutôt les parties se rapportant particulièrement aux fusibles et applications pour lesquels ils ont besoin d'informations. Si on se base sur cette hypothèse, certaines informations sont inévitablement répétées. Pour aider l'utilisateur à exploiter au mieux ce document, une description du sommaire et de la pertinence de chaque article est fournie ci-après.

0.2.2 Explication concernant les fusibles

Après les articles qui concernent le domaine d'application, les références et les définitions, l'Article 4 contient en priorité des informations de type "explicatif". L'article commence par une simple introduction aux fusibles avec une explication sur le fonctionnement des fusibles suivie d'informations sur les classes de fusibles essentielles et sur la terminologie courante associée. Le Paragraphe 4.1.4 qui suit énumère les avantages liés à l'utilisation des fusibles puis 4.1.6 fournit une liste de types de fusibles essentiels pour lesquels des informations relatives à leur application seront apportées plus loin. Une présentation détaillée des types de fusibles les plus courants est donnée en 4.2, fusibles limiteurs de courant, et en 4.3 des fusibles à expulsion. Le haut degré de précision des informations apportées en 4.2 et 4.3, y compris les informations décrivant la construction, le fonctionnement, la classification et les caractéristiques assignées, peut être nécessaire pour comprendre les informations relatives à l'application, qui suivent dans l'Article 5. Pour être exhaustif, 4.4 donne une vue d'ensemble de types de fusibles moins courants ou d'appareils (associés) qui peuvent nécessiter des essais supplémentaires à ceux traités dans les normes existantes, et pour lesquels aucune autre information n'est fournie en ce qui concerne leur application. Le Paragraphe 4.5 couvre les montages de fusibles.

0.2.3 Informations relatives à l'application

Les informations relatives à l'application figurent dans l'Article 5 et l'Annexe A, et se divisent en quatre parties.

- a) Paragraphe 5.1: il traite des informations courantes qui concernent presque toutes les applications.

- b) Paragraphe 5.2: il comporte des informations relatives à des applications spécifiques.
- c) Paragraphe 5.3: il traite des opérations suivantes: installation, fonctionnement, maintenance et remplacement des fusibles.
- d) Annexe A: elle reproduit les informations relatives au déclassement thermique des fusibles limiteurs de courant initialement publiées dans la CEI 60282-1:2009.

Si un utilisateur averti a besoin des informations relatives à une application spécifique en 5.2, (par ex., fusibles de circuit moteur) il est possible que seul le paragraphe pertinent ait besoin d'être relu – cependant, dans la plupart des cas des informations complémentaires de 5.1 seront nécessaires pour une sélection satisfaisante des fusibles. Il convient de souligner que les informations contenues dans le présent rapport sont destinées à compléter les informations fournies par le fabricant du fusible et non à les remplacer. En cas de doute ou d'informations contradictoires, il convient de consulter le fabricant.

GUIDE EXPLICATIF ET D'APPLICATION POUR LES FUSIBLES À HAUTE TENSION

1 Domaine d'application

Le présent rapport technique donne des informations afin de faciliter la compréhension de la fabrication, du fonctionnement et de l'application des fusibles à haute tension dans leur ensemble. Tous les fusibles limiteurs de courant, fusibles à expulsion, électroniques, et autres fusibles non limiteurs de courant, ayant une tension assignée supérieure à 1 kV courant alternatif, sont couverts au même titre que les pratiques usuelles en Amérique du Nord, en Europe et autres. En tant que rapport technique, le présent document ne contient aucune exigence et est uniquement informatif.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60038, *Tensions normales de la CEI*

CEI 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

CEI 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

CEI 60076-7, *Transformateurs de puissance – Partie 7: Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile*

CEI 60076-12, *Transformateurs de puissance – Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec*

CEI 60282-1:2009, *Fusibles à haute tension – Partie 1: Fusibles limiteurs de courant*

CEI 60282-2:2008, *Fusibles à haute tension – Partie 2: Coupe-circuit à expulsion*

CEI 60549, *Coupe-circuit à fusibles haute tension destinés à la protection externe des condensateurs de puissance en dérivation*

CEI 60644, *Spécification relative aux éléments de remplacement à haute tension destinés à des circuits comprenant des moteurs*

CEI/TR 60890:1987, *Méthode de détermination par extrapolation des échauffements pour les ensembles d'appareillage à basse tension dérivés de série (EDS)*

CEI 60909-0, *Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif – Partie 0: Calcul des courants*

CEI 62271-100:2012, *Appareillage à haute tension – Partie 100: Disjoncteurs à courant alternatif*

CEI 62271-102, *Appareillage à haute tension – Partie 102: Sectionneurs et sectionneurs de terre à courant alternatif*

CEI 62271-103, *Appareillage à haute tension – Partie 103: Interrupteurs pour tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

CEI 62271-105:2012, *Appareillage à haute tension – Partie 105: Combinés interrupteurs-fusibles pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et jusqu'à 52 kV inclus*

CEI 62271-106, *Appareillage à haute tension – Partie 106: Contacteurs, combinés de démarrage à contacteurs et démarreurs de moteurs, pour courant alternatif*

CEI 62271-107, *Appareillage à haute tension – Partie 107: Circuits-switchers fusibles pour courant alternatif de tension assignée supérieure à 1 kV et jusqu'à 52 kV inclus*

3 Termes, définitions et abréviations

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la norme CEI 60282-1:2009 et la norme CEI 60282-2:2008 s'appliquent.

3.2 Abréviations

Les abréviations suivantes sont utilisées dans le présent document:

A^2s – Ampère-carré.seconde, également $A^2 \times s$, l'unité de l'intégrale de Joule (I^2t , voir 4.2.4.4)

CL – Limiteur de courant

CLF – Fusible limiteur de courant

FEP – Ensemble enveloppe-fusible (ou puits)

HT – Haute tension

I_{encl} – courant déclassé (d'un fusible dans une enveloppe)

I_r – Courant assigné (d'un fusible)

u_c – Tension de crête de la TTR en kV

t_3 – Temps de montée à la tension u_c en microsecondes

I_1, I_2, I_3 – Courant présumé dans la suite d'essais 1, suite d'essais 2, et la suite d'essais 3 de la CEI 60282-1:2009, respectivement

MAT – Température d'application maximale

TCC¹ – Caractéristique temps-courant

¹ L'abréviation "TCC" est dérivée du terme anglais développé correspondant "time current characteristic".

TTR – Tension transitoire de rétablissement

4 Section explicative

4.1 Introduction simple aux fusibles

4.1.1 Généralités

Les fusibles sont utilisés depuis le tout début de la distribution d'électricité. Si le véritable inventeur du fusible est inconnu, les pionniers en distribution d'électricité les ont vite intégrés comme "points faibles" dans leurs circuits afin d'empêcher une surchauffe des câbles due à un courant excessif, et de prévenir l'endommagement des lampes fragiles en raison de fluctuations de la tension. Les fusibles ont évolué pour devenir rapidement des dispositifs capables de détecter un courant supérieur à la normale et d'interrompre rapidement (couper) ce courant, le tout étant situé dans une unité autonome facilement remplaçable. Bien que les fusibles soient devenus plus complexes et plus variés, rendant nécessaires les guides d'utilisateur tels que celui-ci, ils fournissent toujours la meilleure protection au moindre coût.

La définition la plus simple d'un "fusible" est celle d'un dispositif qui conduit le courant à travers une partie conductrice appelée élément fusible qui, lorsque le fusible est soumis à un courant excessif, fond en raison de la surchauffe et initie la coupure du courant. Tous les fusibles traditionnels coupent le courant après la formation d'un arc électrique entre les parties d'élément scindées par le processus de fusion. Le temps de fusion d'un fusible est également appelé la durée de "préarc". Une des caractéristiques des fusibles est que la coupure du courant étant initiée par un processus de fusion, les aspects "mécaniques" n'interviennent pratiquement pas dans la formation de l'arc. Les fusibles présentent donc une relation temps-courant inversement proportionnelle (des courants plus élevés donnant des durées de préarc plus courtes) comme illustré à la Figure 1. Cela permet des durées de préarc extrêmement courtes à des courants élevés, pratiquement sans limite. C'est un phénomène en apparence si simple qu'il explique presque à lui seul le succès universel que les fusibles connaissent depuis très longtemps.

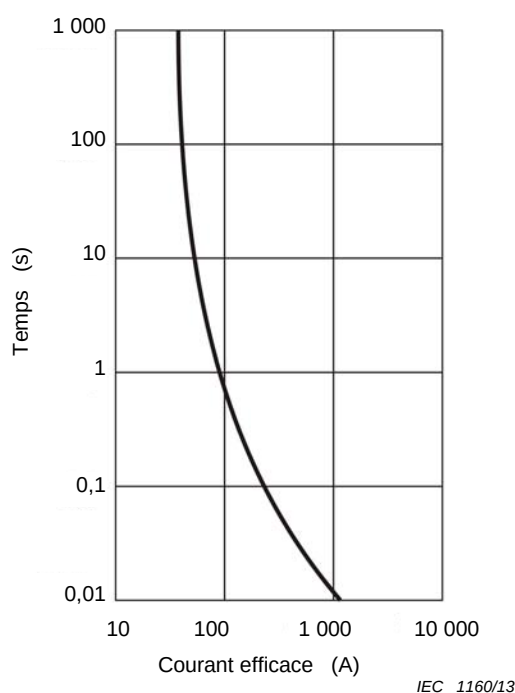


Figure 1 – Courbe caractéristique temps-courant de préarc d'un fusible

En général, les fusibles à haute tension (définis comme des fusibles ayant des tensions assignées supérieures à 1 000 V en courant alternatif) sont plus grands et plus complexes que les fusibles à basse tension car ils doivent fonctionner à des tensions beaucoup plus élevées. Les fusibles à haute tension peuvent réaliser l'une des deux ou les deux fonctions principales suivantes. La première est de réagir à des courants modérément excessifs, généralement appelés courants de "surchage". Dans ce cas, le courant assigné du fusible (le courant qu'il est capable de conduire indéfiniment sans subir de détérioration) est dépassé d'un facteur relativement peu élevé (généralement inférieur à 10). De tels courants peuvent être occasionnés par une charge trop élevée, ou par un défaut court-circuitant uniquement une partie de la charge. Il convient de noter que tous les types de fusibles ne sont pas conçus pour pouvoir fonctionner en cas de fusion à des surintensités très faibles, certains types de fusibles n'étant destinés à fonctionner qu'à des courants élevés (voir 4.1.2.1). En cas de fusion à un courant faible, ces fusibles peuvent produire des arcs jusqu'à ce qu'un dispositif en série coupe, en pouvant provoquer un endommagement du fusible et de son environnement. Cependant, certains fusibles de ce type peuvent rapidement initier le fonctionnement d'un autre dispositif pour couper le courant, en supportant le régime d'arc sans dommage jusqu'à la coupure du second dispositif.

La deuxième fonction, en pratique assurée par tous les fusibles, est de réagir à des surintensités beaucoup plus élevées, qui sont généralement appelées des courants de "court-circuit". Dans ce cas, presque toute la charge est court-circuitée par un défaut majeur et le courant disponible (qui, lorsqu'il n'est pas limité par un dispositif de protection, est appelé "courant présumé") peut être très élevé. Cependant, les différents types de fusibles varient grandement quant au niveau exact d'intensité du courant qu'ils peuvent couper, et ceci peut être un facteur déterminant dans le choix d'un type de fusible pour une application particulière. La façon dont les fusibles réagissent à des surintensités faibles et élevées, de même que la façon dont ils coupent le courant, expliquent que les fusibles à haute tension donnent lieu à des classifications différentes.

La première grande classification concerne les types "limiteurs de courant" et "non limiteurs de courant" (toutefois, presque tous les fusibles non limiteurs de courant étant des fusibles à expulsion, "fusible à expulsion" est généralement le terme utilisé de préférence à "non limiteur de courant"). "Limiteur de courant" (CL) décrit une classe de fusibles définie par le comportement produit lorsque le courant est si élevé que l'élément fusible fond avant la première crête du courant de défaut (en moins de quelques millisecondes). Au moment de la fusion, ce type de fusible introduit une résistance dans le circuit si rapidement que le courant cesse de croître et est très vite ramené à une valeur nulle (avant un passage naturel par zéro). La valeur de crête du courant présumé n'étant pas atteinte, le fusible limite l'amplitude du courant de même que sa durée, d'où le nom de "limiteur de courant". La limitation de courant est illustrée à la Figure 2a). Il convient de noter qu'en cours de fonctionnement, le fusible limiteur de courant introduit un pic de surtension (la tension de coupure du fusible) dans le circuit lors de la limitation de courant comme illustré à la Figure 2a).

Un fusible à expulsion, qui fond dans les mêmes circonstances, n'introduit qu'une faible résistance dans le circuit, de sorte que le courant continue de produire une valeur de crête presque aussi importante que si le fusible n'avait pas fondu. Une action d'expulsion (lorsque l'arc génère un gaz, qui est expulsé avec de la matière ionisée) produit un intervalle physique tel que, à un zéro naturel de courant, l'arc ne se réamorçait pas et le courant est interrompu. Ce type de fusible limite donc la durée d'un défaut mais pas son amplitude. Cette action est illustrée à la Figure 2b). Pour une explication de la TTR, voir 4.2.1.2).

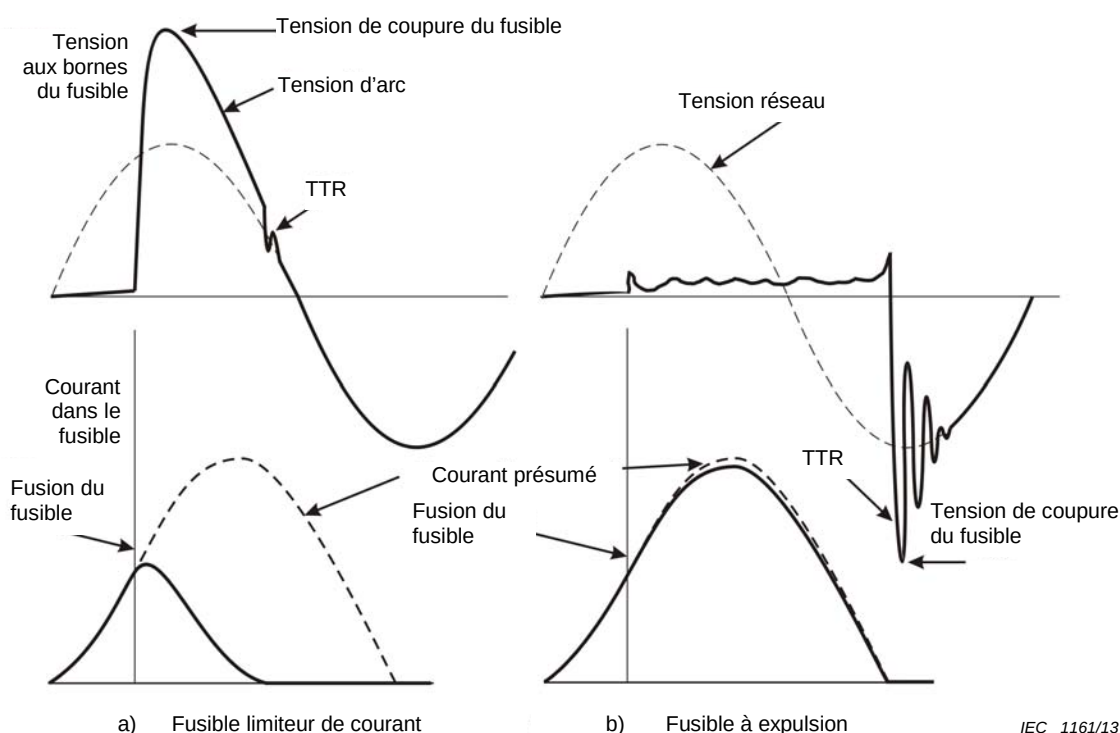


Figure 2 – Interruption d'un courant élevé par un fusible limiteur de courant et par un fusible à expulsion²

4.1.2 Classifications et terminologie des fusibles

4.1.2.1 Classifications des fusibles limiteurs de courant

L'aptitude de différents types de fusibles CL à couper des courants moins élevés que ceux qui produisent une limitation de courant donne lieu à des classes différentes de fusibles CL. Certains fusibles CL sont conçus pour ne couper que des courants élevés (c'est-à-dire que leur fonction principale est d'apporter une limitation de courant). Ils présentent donc une aptitude limitée à couper un courant faible et sont appelés fusibles "associés". Ils sont généralement utilisés en même temps qu'un autre dispositif en série; de tels dispositifs comprennent les interrupteurs (le plus souvent déclenchés par un percuteur dans un "combiné interrupteur-fusibles", voir 5.2.7.2), contacteurs, circuit-switchers ou un autre fusible ayant un pouvoir de coupure plus faible. On peut considérer qu'ils viennent "en renfort" de cet autre dispositif et outre la fonction essentielle de limiteur de courant, ils présentent également un plus grand pouvoir de coupure. Ceci parce que le dispositif en série a généralement un pouvoir de coupure limité tandis que les fusibles associés peuvent normalement couper des courants très élevés, c'est-à-dire qu'ils présentent un "courant maximal de coupure assigné" très élevé.

Les fusibles à haute tension capables de couper des surintensités de niveau faible de même que des courants élevés de court-circuit sont classés comme étant de types "à usage général" ou "à coupure intégrale". Le terme "à usage général" (qui a des origines historiques et qui était utilisé avant l'introduction des fusibles à coupure intégrale) ne signifie pas que le fusible peut être utilisé pour toute sorte d'application mais simplement que le fusible est conçu pour éliminer les courants de défaut et de surcharge de niveau faible. Les essais sont réalisés par le fabricant de fusibles pour montrer que les éléments de remplacement classés comme étant à usage général peuvent éliminer des courants de défaut d'un niveau si faible

² IEEE Std C37.48.1 -2012, "IEEE Guide for Operation, Classification, Application, and Coordination of Current-Limiting Fuses with Rated Voltages 1-38kV" - Réutilisé avec la permission de l'IEEE, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997 USA, Copyright 2002, IEEE.

qu'ils provoquent la fusion de l'élément fusible en au moins 1 h . Cela signifie que les fusibles à usage général peuvent être utilisés avec des courants de surcharge qui provoqueront leur fusion dans des délais pouvant aller jusqu'à une heure au maximum. Le terme "à coupure intégrale" est utilisé pour la classe de fusibles conçus pour éliminer des courants de défaut et de surcharge à des valeurs encore plus faibles; en fait, tout courant permanent entraînant la fusion de l'élément fusible doit être coupé par ce type de fusible. Les fusibles à coupure intégrale sont souvent utilisés dans des enveloppes, celles-ci étant parfois portées à des températures élevées; les deux facteurs peuvent réduire le courant le plus faible qui provoque la fusion de l'élément fusible, ce que reflètent les méthodes d'essai des fusibles à coupure intégrale.

4.1.2.2 Terminologie des fusibles limiteurs de courant

S'ensuit ici une explication de la terminologie courante relative aux fusibles, utilisée dans les normes concernant les fusibles et dans ce rapport. Un fusible est défini comme désignant toutes les parties constitutives d'un dispositif complet, c'est-à-dire tout ce qui est nécessaire pour le relier dans un circuit. Après le fonctionnement, au moins une partie du fusible doit être remplacée pour ramener la protection à son état "neuf". La partie remplacée après le fonctionnement s'appelle l'"élément de remplacement", qui est la partie qui exécute la fonction active de conduction et de coupure du courant. Dans certains cas (par exemple, les normes IEEE), l'élément de remplacement fait référence uniquement à la partie remplaçable d'un fusible-déconnecteur de distribution (voir 4.3.2.1.1). Les éléments de remplacement des fusibles limiteurs de courant sont souvent appelés "cartouches fusibles". Ceci en raison de leur forme presque toujours cylindrique et parce que l'élément fusible qu'ils contiennent est entouré d'une matière de remplissage, généralement à base de silice granuleuse, qui absorbe l'énergie de l'arc.

Un fusible limiteur de courant complet peut utiliser une base (parfois appelée support ou socle). Ce socle est généralement constitué de clips et de bornes enfichables, eux-mêmes montés sur des isolateurs. Ils sont utilisés avec un élément de remplacement muni de bagues insérées dans les clips. Des câbles ou barres sont fixés aux bornes. Ce type de fusible est encore largement utilisé, généralement dans un appareillage "à face sous tension" (c'est-à-dire un appareil où les conducteurs sous tension sont accessibles si les portes d'accès peuvent être ouvertes pendant que l'appareil est sous tension). Ou bien les éléments de remplacement peuvent être installés dans des puits (c'est-à-dire des enveloppes de petites dimensions) ou être moulés dans du caoutchouc ou de l'époxy pour être utilisés avec des câbles dans des installations submersibles et isolées ("isolées" signifie qu'aucun conducteur sous tension n'est exposé). Ils sont également utilisés dans des appareillages immergés dans l'huile, et dans ce cas, ils sont situés dans des porte-fusibles assez perfectionnés (pour faciliter le remplacement) ou dans de simples berceaux à l'intérieur de transformateurs lorsqu'ils n'ont pas besoin d'être remplacés par l'utilisateur (voir 5.2.2.6.4).

Dans certains cas, l'élément de remplacement est aussi le fusible, c'est-à-dire qu'il peut inclure tous les composants nécessaires à la connexion dans un circuit, par exemple, l'élément de remplacement est muni d'électrodes d'extrémité ou de bornes enfichables ou à boulon à œil. Un exemple de cette méthode de montage est un fusible CL qui peut être suspendu à une ligne aérienne ou installé sur un fusible-déconnecteur de distribution ou un isolateur de transformateur (dans ce cas, le déconnecteur ou l'isolateur remplace le "socle" du fusible).

4.1.2.3 Classifications et terminologie des fusibles à expulsion

Les fusibles à expulsion sont divisés en deux classes A et B (dans certaines parties du monde, ces deux classes sont appelées "Classe de distribution," et "Classe de puissance"). La majorité des fusibles de Classe A sont des fusibles particuliers appelés "fusibles-déconnecteurs de distribution". Ils sont caractérisés par un socle sur lequel repose un porte-fusible. Le porte-fusible est doublé d'un matériau d'extinction de l'arc et contient un élément de remplacement. L'élément fusible initie l'arc et le porte-fusible permet un allongement de l'arc et une grande partie de la production de gaz à des courants élevés. Après l'opération d'expulsion, le porte-fusible reste ouvert en indiquant son état et en permettant le sectionnement. Seul l'élément de remplacement, qui comporte un élément fusible fixé sur un

câble flexible (queue) et entouré par un petit tube d'extinction de l'arc, doit être remplacé. Du fait qu'ils sont très répandus, ils sont souvent désignés simplement comme "déconnecteurs" ou "fusible-déconnecteur" et, sauf mention contraire, le terme "fusible-déconnecteur" utilisé dans ce document désigne ce type de fusible-déconnecteur de distribution de Classe A. Il existe aussi des conceptions de coupe-circuit à éléments ouverts qui n'utilisent aucun porte-fusible mais dont l'élément de remplacement comporte toutes les parties nécessaires à la connexion sur le socle. Ils possèdent un courant maximal de coupure assez faible. Il existe un troisième type de fusible à expulsion de Classe A, courant dans certains pays. Il s'agit d'un coupe-circuit à fusible avec enveloppe de protection. Toutes les parties actives sont dans une enveloppe (généralement en céramique). Il peut s'agir d'une conception à ouverture automatique mais ce n'est généralement pas le cas. D'autres types de fusibles à expulsion de Classe A comprennent les fusibles destinés à la protection des condensateurs, et ceux pour lesquels l'élément fusible est entouré d'un liquide isolant.

Les fusibles de la Classe B (parfois appelés "Fusibles de puissance") sont conçus pour des circuits ayant un facteur de puissance plus faible et des valeurs de tension transitoire de rétablissement plus élevées (TTR, voir 4.2.1.2) que pour les fusibles de la Classe A, et ils présentent généralement un courant maximal de coupure plus élevé. L'élément de remplacement tend à être plus perfectionné que celui d'un fusible-déconnecteur de distribution et peut constituer une grande partie, voire la totalité, du porte-fusible. Certaines conceptions utilisent un élément de remplacement rechargeable qui, après le fonctionnement, peut être restauré par l'installation d'une recharge (contenant un élément et un matériel d'extinction de l'arc). Contrairement aux fusibles-déconnecteurs de distribution, tous les fusibles à expulsion de la Classe B ne se mettent pas automatiquement en position ouverte après fonctionnement.

4.1.3 Principes essentiels de fonctionnement des fusibles

Les principes essentiels de fonctionnement des fusibles sont communs à tous les types de fusibles, qu'ils soient limiteurs de courant ou non.

En mode passif ou de conduction du courant, un fusible doit être capable de conduire le courant de charge et des dépassements admis de charge, cycliques ou transitoires, sans détérioration, pendant un temps quasiment illimité (avec une durée de vie en service mesurée en décennies, voir 5.1.1.7). Lorsque le courant passe à travers le fusible, la température de l'élément s'élève mais, la chaleur se dissipant autour, la température se stabilise à une valeur inférieure à celle à laquelle le matériau et les connexions au circuit d'alimentation de l'élément fusible subiraient une détérioration. Dans ces conditions, la chaleur perdue à travers la conduction, la convection et le rayonnement s'équilibre parfaitement avec la chaleur générée par le courant qui passe à travers la résistance du fusible.

En mode actif ou de coupure de courant de défaut, une plus grande quantité de chaleur est générée dans l'élément fusible, que celle qui peut être dissipée avant que la température de fusion ne soit atteinte. La relation entre le courant et le temps de fusion est décrite au moyen d'une courbe caractéristique temps-courant. Un exemple de courbe caractéristique de la relation durée de préarc-courant d'un fusible est illustré à la Figure 1. Pour la plupart des fusibles, le courant de préarc devient asymptotique par rapport à l'axe du temps à des durées très longues, et est appelé "courant de fusion minimal". Les normes spécifient les durées pour lesquelles les courbes doivent être dessinées, en fonction du type de fusible. Toutes les courbes ne sont pas dessinées pour la durée du courant de fusion minimal, et tous les fusibles ne sont pas capables de couper ce courant (voir 4.1.2.1).

Au moment de la fusion, le processus de coupure du courant se produit, qui diffère selon le type de fusible concerné (de type limiteur de courant ou non). Le processus de coupure sera donc décrit pour chaque type de fusible dans la partie appropriée de ce rapport.

Après le processus de coupure, les fusibles doivent être capables de résister à la tension normale du système. Pour faciliter cette phase opératoire, certains fusibles s'ouvrent automatiquement, procurant un "intervalle" physique visible. Ceci est relativement courant

avec les fusibles de type à expulsion, mais l'est beaucoup moins avec les fusibles limiteurs de courant.

4.1.4 Avantages de la protection par fusibles

Si les fusibles et autres dispositifs de protection (comme les disjoncteurs) ont tous des avantages et des inconvénients qui leur sont propres pour une application donnée, les fusibles présentent certains avantages spécifiques:

- a) parce que leur fonctionnement est initié par la fusion d'un élément, il n'existe en théorie aucune limite à la rapidité à laquelle ils peuvent initier le processus de coupure (le plus vite on aura une production de chaleur dans l'élément fusible, le plus vite le processus de fusion interviendra). Il n'existe généralement pas de parties mobiles nécessitant une séparation avant que le processus de coupure puisse être initié;
- b) le fonctionnement rapide des fusibles dans des conditions de défaut de court-circuit minimise les creux de tension et assure une meilleure protection des lignes et des appareils;
- c) les fusibles ne pouvant pas être réinitialisés après la fusion, l'utilisateur est donc invité à identifier et à corriger le défaut avant d'alimenter à nouveau le circuit;
- d) les fusibles n'ont pas ou très peu de parties mobiles qui pourraient être endommagées par la poussière, l'huile ou la corrosion;
- e) le remplacement des fusibles après fonctionnement garantit que la protection est restaurée à son état initial d'intégrité après la coupure du circuit contrairement aux interrupteurs mécaniques;
- f) l'utilisation des fusibles est la solution la plus économique pour un degré élevé de protection du système;
- g) des types spécifiques de fusibles sont disponibles pour presque toutes les applications.

4.1.5 Avantages des fusibles limiteurs de courant

4.1.5.1 Généralités

En plus des avantages spécifiés en 4.1.4, les fusibles limiteurs de courant offrent d'autres avantages importants:

- a) la limitation du courant coupé limité et de l'énergie à l'emplacement du défaut assure une protection maximale et minimise les risques d'incendie, d'explosion, ou de blessures aux personnes;
- b) le courant maximal de coupure très élevé garantit que ces fusibles peuvent toujours être utilisés sur un système donné même lorsque ce système est modifié ultérieurement pour donner un niveau de défaut présumé plus élevé, et il n'est donc pas nécessaire de prévoir des coûts d'installation d'un nouveau système de protection plus onéreux;
- c) un fonctionnement silencieux sans émission de gaz et sans production de flammes ou d'arc;
- d) une taille compacte et un coût bien inférieur à celui de systèmes comparables de protection;
- e) l'aptitude à réduire la taille des câbles en raison de la limitation des contraintes de court-circuit;
- f) en limitant la valeur du I^2t (voir 4.2.4.4 pour une explication de I^2t) dû à un défaut, les contraintes thermiques exercées sur tous les équipements du circuit en défaut sont limitées;
- g) le courant de crête étant limité, les forces électrodynamiques résultant des champs magnétiques autour des conducteurs des transformateurs et d'autres équipements dans le circuit en défaut sont aussi limitées;
- h) parce qu'un fusible limiteur de courant limite le courant de crête tout en ramenant le courant à une valeur nulle avant son passage naturel par zéro, le fusible présente un I^2t

de fonctionnement (coupure) maximum spécifique. Les dispositifs de protection en amont (voir 5.1.4.1) nécessitant un I^2t minimum pour initier le processus de coupure, il est possible de coordonner les dispositifs afin de garantir qu'un défaut localisé en un point du système n'entraînera pas le fonctionnement d'un dispositif en amont, réduisant ainsi les effets de l'indisponibilité totale et permettant de conserver la fiabilité de l'alimentation.

4.1.5.2 Protection du transformateur

L'application la plus courante des fusibles limiteurs de courant à haute tension concerne la protection du transformateur. L'utilisation de fusibles limiteurs de courant à haute tension pour la protection au côté primaire des transformateurs de distribution fournit des avantages significatifs en raison de leur effet limiteur de courant. Dans la plupart des conditions de court-circuit, ils sont capables d'interrompre les courants de défaut en quelques millisecondes après l'apparition du défaut. Par conséquent, la valeur de crête présumée du courant de défaut ne sera pas atteinte et le courant coupé limité résultant ainsi que l'énergie résultante seront réduits de manière significative. Cette caractéristique, qui ne peut être obtenue avec aucune autre combinaison relais/appareil de coupure, rend les fusibles limiteurs de courant particulièrement adaptés à la protection des transformateurs de distribution étant donné leur capacité à prévenir ou à minimiser toutes conséquences majeures consécutives aux défauts internes des transformateurs.

La Figure 3 illustre le I^2t de fonctionnement en fonction du courant présumé pour un fusible non limiteur de courant, qui coupe après une boucle de courant entièrement asymétrique, et pour un fusible limiteur de courant. En principe, il convient de choisir le fusible limiteur de plus faible courant assigné qui répond aux exigences de coordination de 5.2.2. La raison en est qu'un élément de remplacement plus petit d'une conception donnée aura généralement un I^2t de fonctionnement plus faible. Dans le cas d'un défaut de faible impédance interne au transformateur, l'élément de remplacement limitera le courant et la limitation de le I^2t ainsi obtenue réduit significativement la probabilité d'un défaut grave, en particulier avec des transformateurs remplis d'huile.

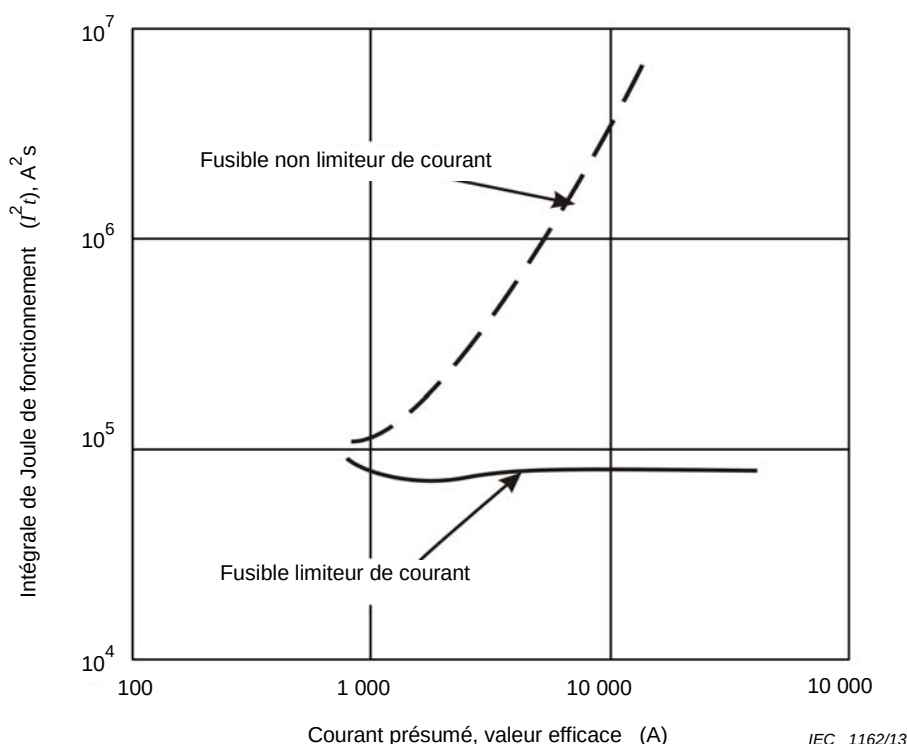


Figure 3 – Comparaison de l'intégrale de Joule de fonctionnement (I^2t) par rapport à un courant présumé pour des fusibles limiteurs de courant et des fusibles non limiteurs de courant

L'expérience a montré que le I^2t de fonctionnement associé à une interruption par fusible limiteur de courant est souvent d'un ordre de grandeur inférieur à celui provoquant un défaut grave du transformateur, d'où l'efficacité des fusibles limiteurs de courant à réduire la probabilité de tels incidents graves.

Il convient de noter que la différence en ce qui concerne la capacité de protection est encore plus grande lorsque le dispositif non limiteur de courant est un disjoncteur, en raison du retard dans l'initiation des processus nécessaires pour couper le courant. Ceux-ci sont: le temps nécessaire à la détection du courant par le relais, le temps nécessaire à l'ouverture des contacts du disjoncteur, et le temps nécessaire à l'interruption du courant. Par conséquent, en plus du I^2t de la première boucle, illustrée à la Figure 3, il faut ajouter le I^2t à partir des boucles supplémentaires de courant, qui circule jusqu'à ce que le défaut soit interrompu. Cela a pour effet de déplacer la courbe du "fusible non limiteur de courant" de la Figure 3 vers le haut, ce qui multiplie généralement le I^2t par un facteur de 2,5 fois celle illustrée.

Les fusibles limiteurs de courant sont disponibles pour assurer la protection des transformateurs de distribution jusqu'à environ 5 MVA. Pour les transformateurs plus puissants avec des valeurs assignées de courant atteignant plusieurs milliers d'ampères, les appareils limiteurs de courant à commutation (voir 4.4.2.1 pour une description) ayant des valeurs assignées de courant élevées peuvent être utilisés. Ils sont mis en fonctionnement au moyen d'un capteur électronique et d'une unité de déclenchement qui peuvent être adaptés à la fonction de protection requise. Le système électronique doit être capable de distinguer le courant de défaut du courant d'appel du transformateur.

4.1.6 Types de fusibles à haute tension

4.1.6.1 Généralités

Les fusibles à haute tension d'un type ou d'un autre sont disponibles pour assurer la protection des circuits et appareils à haute tension dans presque toutes les applications. Il peut être mentionné que ces fusibles fournissent généralement la solution la plus simple au moindre coût. Une liste des types les plus courants de fusibles et appareils associés traités dans le présent rapport est donnée ci-après. Ces fusibles et dispositifs associés sont regroupés en quatre catégories: les fusibles limiteurs de courant, les fusibles à expulsion, les fusibles non limiteurs de courant (qui ne sont pas des fusibles à expulsion), et les appareils associés (appareils qui intègrent des fusibles dans leur fonctionnement, ou qui sont installés sur des socles). Une brève description de chaque appareil est ajoutée et les endroits du rapport où ils sont traités sont indiqués dans l'index. On pense que certains types de dispositifs énumérés dans la liste sont obsolètes et/ou que leur fabrication a été interrompue ou qu'elle se poursuit en très faibles quantités. De tels appareils sont suivis du mot "obsolète". Ils sont traités (même si brièvement) dans ce document parce que l'on peut encore en trouver des exemplaires en service et parce qu'il peut être nécessaire de les remplacer par des dispositifs plus modernes.

4.1.6.2 Fusibles limiteurs de courant

Lorsque ce type de fusible fond à un courant suffisamment élevé pour provoquer sa fusion avant l'apparition naturelle de la première crête (le courant seuil pour un fusible particulier), il introduit une résistance suffisante dans le circuit pour que le courant soit ramené à une valeur nulle. Ce sont des fusibles munis d'enveloppes de protection, généralement remplis de silice, et plus le courant de défaut au-dessus du courant seuil est élevé, plus la réduction proportionnelle du courant coupé limité ayant atteint sa valeur de crête et de l'énergie résultants est importante. Le Tableau 1 énumère les types les plus courants couverts par le présent rapport:

Tableau 1 – Types courants de fusibles limiteurs de courants

	Type de fusible CL	Brève description
1	A coupure intégrale	Fusibles destinés à couper tous les courants qui causent la fusion du fusible, jusqu'au courant maximal de coupure assigné du fusible.
2	A usage général	Fusibles destinés à couper tous les courants d'une valeur faible, égale au courant causant la fusion de fusible en une heure, jusqu'au courant maximal de coupure assigné du fusible.
3	Fusibles associés	Fusibles destinés à couper tous les courants depuis leur courant minimal de coupure assigné jusqu'à leur courant maximal de coupure assigné.
4	Types 1 – 3 utilisant un indicateur ou un percuteur	Les indicateurs fournissent l'indication du fonctionnement du fusible; les percuteurs fonctionnent au moment de la fusion de l'élément fusible (ou à une température élevée) provoquant typiquement l'émergence d'une tige hors du fusible, et déclenchent les appareils de coupure associés.
5	Applications pour circuits moteurs ("fusibles pour démarreurs moteurs")	Fusibles utilisés dans des circuits qui alimentent des moteurs, et qui sont soumis à des courants de surcharge répétés au démarrage, plus élevés que leur courant assigné.
6	Fusibles pour transformateur de tension	Fusibles utilisés dans des circuits HT des transformateurs de tension (et ayant généralement un courant assigné de très faible valeur).
7	Fusibles pour condensateurs	Fusibles utilisés pour protéger les condensateurs et qui doivent être capables d'interrompre des courants capacitifs.
8	Types 1 – 7 pour utilisation intérieure, extérieure ou immergés dans un liquide isolant	Les fusibles utilisés à l'extérieur peuvent avoir des exigences diélectriques spécifiques par rapport aux fusibles utilisés à l'intérieur et ils ont également des exigences relatives à la protection contre les UV et/ou les infiltrations d'humidité. Les fusibles immergés dans un liquide ont des exigences particulières relatives à l'étanchéité pour empêcher le liquide de pénétrer.
9	Fusible dont le fonctionnement est déclenché par une source exothermique (obsolète)	Type de fusible à coupure intégrale qui utilisait un matériau exothermique pour provoquer des coupures multiples de l'élément à des courants faibles.

4.1.6.3 Fusibles à expulsion

Ce sont des fusibles qui fonctionnent par expulsion. Après fusion de l'élément fusible, une formation d'arc se produit au cours de laquelle la matière ionisée est expulsée d'une enveloppe grâce au gaz généré par l'interaction de l'arc avec les composants du fusible. Cela permet de produire l'"intervalle" qui permet de tenir la tension de rétablissement du circuit lors du zéro de courant. Ils ne réduisent pas l'amplitude d'un courant de défaut de manière significative, mais seulement sa durée; c'est pourquoi ils sont appelés fusibles "non limiteurs de courant". Le Tableau 2 énumère les types les plus courants couverts par le présent rapport.

Tableau 2 – Types courants de fusibles à expulsion

	Type de fusible à expulsion	Brève description
1	Fusible-déconnecteur de distribution (fusible à expulsion de Classe A) (fusible-déconnecteur à l'air libre)	Fusible à expulsion de Classe A utilisant un élément de remplacement dans un porte-fusible, et qui s'ouvre automatiquement après coupure en réalisant une distance de sectionnement. Utilisation à l'extérieur.
2	Coupe-circuit à fusible avec enveloppe de protection	Fusible à expulsion dans lequel les parties actives sont dans une enveloppe de protection. Ils peuvent s'ouvrir automatiquement ou non après fonctionnement. Utilisation à l'extérieur.
3	Coupe-circuit à fusible à élément à l'air libre	Coupe-circuit à fusible qui n'utilise pas de porte-fusible mais un type spécifique d'élément de remplacement fixé à des bras à ressort. Utilisation à l'extérieur.
4	Fusible de puissance utilisant de l'acide borique (fusible à expulsion de Classe B)	Fusible à expulsion de Classe B, qui utilise de l'acide borique pour générer les gaz à expulser. Peut être ou non à ouverture automatique. Des versions pour utilisation intérieure sont disponibles.
5	Fusible à expulsion immergé dans un liquide	Elément de remplacement immergé dans un liquide diélectrique, l'élément étant en contact avec le liquide.
6	Fusible rempli de liquide	Fusible étanche contenant un liquide diélectrique. Utilisation extérieure.
7	Fusibles pour condensateurs	Fusibles utilisés pour protéger les condensateurs et qui doivent être capables d'interrompre des courants capacitifs.
8	Coupe-circuit à fusible de distribution avec réservoir d'huile (obsolète)	Petit réservoir d'huile contenant un interrupteur rotatif muni d'un élément de remplacement.

4.1.6.4 Fusibles non limiteurs de courant (type n'étant pas à expulsion)

Tout comme les fusibles à expulsion, ils produisent une résistance faible pendant la formation de l'arc et reposent sur la création d'un "intervalle" dans des conditions diélectriques telles qu'à l'extinction de l'arc à un passage naturel du courant par zéro, l'arc ne se réamorçait pas et le courant cesse de circuler. Les types de fusibles non limiteurs de courant cités dans ce rapport sont indiqués dans le Tableau 3.

Tableau 3 – Types de fusibles non limiteurs de courants

	Type de fusible non limiteur de courant	Brève description
1	Fusible avec cornes de garde	Fusible qui utilise un fil entre deux cornes de garde.
2	Fusible SF ₆ (obsolète)	Fusible qui utilise un élément court entre deux électrodes, dans une petite enveloppe contenant du gaz SF ₆ .
3	Fusible à vide (obsolète)	Fusible qui utilise un élément court entre deux électrodes, dans une petite enveloppe sous vide.

4.1.6.5 Appareils apparentés à des fusibles

Ces appareils utilisent les fusibles dans leur fonctionnement ou des socles de fusibles dans leur conception. Les types courants référencés dans ce rapport sont indiqués dans le Tableau 4.

Tableau 4 – Appareils apparentés à des fusibles

	Type d'appareil associé à un fusible	Brève description
1	Limiteurs de courant à commutation munis de fusibles intégrés	Le dispositif comporte un conducteur à résistance faible, capable de transférer le courant très rapidement vers un fusible limiteur de courant installé en parallèle à l'émission d'un signal fourni par un appareil de détection séparé.
2	Dispositif électronique de sectionnement automatique	Appareil monté sur un socle de fusible-déconnecteur, qui peut s'ouvrir automatiquement et permettre le sectionnement pendant le temps de "repos" d'un réenclencheur ou d'un appareil similaire.
3	Déconnecteur-sectionneur	Fusible-déconnecteur de distribution muni d'une lame solide en lieu et place du porte-fusible.

4.1.7 Applications des types de fusibles

Certaines applications n'utilisent généralement qu'un seul type de fusible (par exemple, les applications pour circuits moteurs utilisent presque toujours des fusibles limiteurs de courant). Cependant, dans d'autres applications, on peut souvent trouver plus d'un type de fusible. Il peut s'agir de solutions de remplacement (par exemple, un fusible à expulsion ou un fusible limiteur de courant) ou une combinaison de fusibles (par exemple, un fusible-déconnecteur de distribution en série avec un fusible associé limiteur de courant). On trouve les combinaisons de fusibles dans les systèmes où un fusible limiteur de courant est associé à un fusible à expulsion (par exemple, dans des applications pour condensateurs). La sélection se fait en fonction des avantages et des inconvénients spécifiques des différents types de fusibles. Si le présent rapport établit une comparaison et une différenciation entre les différents types de fusibles, il n'est pas destiné à proposer un type de fusible plutôt qu'un autre sur la base d'un jugement qualitatif. Il vise surtout à montrer que certains types de fusibles seront plus adaptés que d'autres à certaines applications en fonction des exigences relatives à la protection souhaitée et du budget disponible.

4.2 Fusibles limiteurs de courant

4.2.1 Conception et fonctionnement des fusibles limiteurs de courant

4.2.1.1 Généralités

En mode passif ou de conduction du courant, le fusible doit conduire un courant de charge et des surcharges autorisées, cycliques et transitoires, pendant un temps indéfini sans détérioration (voir 4.2.4.7 et 5.1.1.7). En mode actif ou de coupure de courant en cas de surcharge ou de défaut, le fusible doit déconnecter le circuit, soit relativement lentement, en fonction de ses caractéristiques temps de pré-arc ou de fonctionnement – courant prédéterminées, ou très rapidement à des courants de défaut élevés, absorbant l'énergie produite par l'arc interne jusqu'à plusieurs kilojoules et limitant le plus possible le flux d'énergie dans le circuit défaillant protégé.

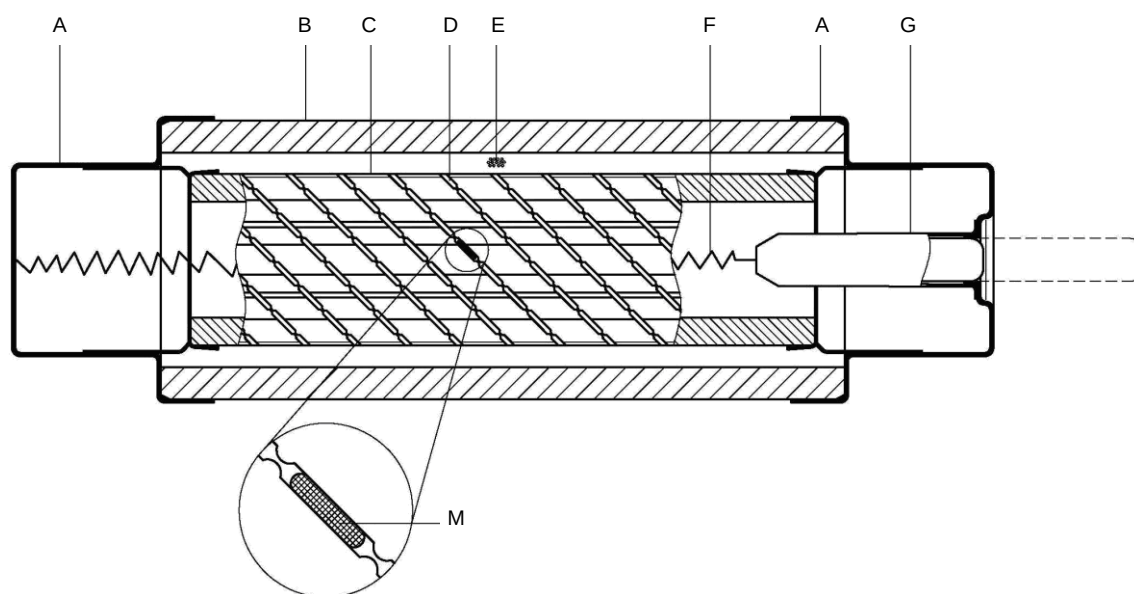
La Figure 4 montre un exemple type de conception d'un élément de remplacement associé dont les dimensions sont conformes aux normes DIN. Si d'autres types de fusibles limiteurs de courant montrent des différences dans la conception, cette figure illustre les caractéristiques principales de ces fusibles. Un tube isolant (le corps du fusible) en céramique ou en résine organique – fibre de verre contient les éléments fusibles montés en parallèle et qui conduisent le courant. Ceux-ci sont reliés à chaque extrémité à des capots métalliques, généralement en cuivre ou en laiton, qui rendent le corps étanche et servent de connexions électriques au fusible. Le corps et les capots doivent avoir les propriétés d'un récipient sous pression et être capables de résister à une pression élevée et à une température très élevée au moment précis du fonctionnement du fusible. Si le fusible est conçu pour être utilisé à l'extérieur ou immergé dans l'huile (ou dans un autre liquide ou gaz diélectrique, par exemple, une huile de synthèse, une huile végétale, ou gaz SF₆), des exigences supplémentaires d'étanchéité seront prises en compte pour empêcher l'infiltration d'humidité ou de fluide. Pour une utilisation extérieure, le fabricant emploiera tout un choix de

matériaux ou un revêtement spécial pour éviter une détérioration progressive due aux conditions climatiques et au rayonnement solaire.

Les éléments fusibles sont entourés d'une matière isolante d'aspect granuleux, généralement du sable de silice compacté de pureté élevée et à granulométrie contrôlée. Le fusible illustré, comme beaucoup de fusibles, nécessite une longueur de l'élément fusible supérieure à celle du corps du fusible et les éléments fusibles sont donc enroulés en spirale autour d'un support inerte ou "cœur", appelé aussi "cœur en étoile" en raison de sa forme. D'autres conceptions de fusibles nécessitent uniquement des éléments fusibles de la même longueur que le corps, et sont donc montés parallèlement au corps (notamment les fusibles pour circuits moteurs) comme les fusibles à basse tension. Les fusibles de faibles courants assignés peuvent n'avoir qu'un seul élément fusible tandis que les fusibles de courants assignés élevés auront généralement un grand nombre d'éléments fusibles montés en parallèle.

Les éléments fusibles constituent le cœur du fusible, et sont fabriqués avec un degré de précision élevé, généralement à partir de fil ou de ruban d'argent ou de cuivre pur. La longueur des éléments fusibles est proportionnelle à la tension assignée du fusible alors que la section transversale totale et le nombre d'éléments fusibles montés en parallèle déterminent le courant assigné. La forme des éléments fusibles assemblés ainsi que leur espacement et leur configuration déterminent un grand nombre des caractéristiques électriques de l'élément de remplacement. Ils influent grandement sur la forme des caractéristiques temps-courant, le degré de limitation du courant, et la crête de surtension lors d'un fonctionnement à un courant élevé (appelée "tension de coupure" ou "tension d'arc" – voir 4.2.4.5).

Lorsqu'ils sont fixés, les percuteurs (souvent utilisés pour déclencher un appareil auxiliaire) ou les indicateurs (utilisés pour montrer que le fusible a fonctionné), sont câblés parallèlement au système de l'élément fusible. Au cours du fonctionnement du fusible, lorsque les éléments fusibles principaux sont fondus, le courant passe dans le circuit du percuteur, avant de revenir rapidement vers les éléments fusibles principaux. Selon la conception, le courant allumera une faible charge pyrotechnique pour expulser la tige (en général, les types de fusibles conformes aux normes BSI ou les fusibles qui nécessitent un type de percuteur "fort") ou bien causera la fusion d'un petit fil de verrouillage (en général pour des types de fusibles conformes aux normes DIN) pour libérer un ressort hélicoïdal qui expulse la tige du percuteur. Dans certaines conceptions, le fil de verrouillage est thermosensible de sorte que le percuteur sera libéré et déclenchera l'appareillage de connexion associé une fois que le fusible aura atteint une température donnée, indépendamment du fonctionnement du fusible lui-même. Dans le cas où un indicateur est utilisé de préférence à un percuteur, un indicateur muni d'un ressort relativement petit peut fonctionner de la même façon qu'un percuteur, ou il peut utiliser un filament non conducteur, libéré par la chaleur produite par l'arc.



IEC 1163/13

Légende

A	capot d'étanchéité (contact d'un élément de remplacement)
B	corps
C	support (cœur)
D	élément fusible
E	matière granulaire de remplissage
F	fil du percuteur/indicateur
G	percuteur ou indicateur
M	revêtement basse température ("effet M")

Figure 4 – Dessin de coupe de l'élément de remplacement d'un type de fusible limiteur de courant conforme aux dimensions DIN

Les fusibles peuvent être conçus comme de simples fusibles à bague s'insérant dans des clips de forme adéquate ou peuvent être munis de bornes d'extrémité à boulonner sur des barres, etc. Certains, destinés à une utilisation extérieure, comportent des boulons à œil pour fixer les câbles ou des goujons pour un montage dans des bornes à boulon à œil.

Le fusible limiteur de courant à haute tension a deux modes de coupure de courant de défaut différents, qui seront décrits en 4.2.1.2 et 4.2.1.3. Pour étudier la théorie du phénomène de coupure, voir "Electric Fuses" de Wright et Newbery [2]³.

4.2.1.2 Fonctionnement dans des conditions de courant de défaut élevé

A des courants de défaut élevé (d'au moins dix à vingt fois le courant de charge), tous les composants d'un élément de remplacement atteignent une température de fusion pratiquement en même temps en seulement quelques millisecondes ou moins. Ils se morcellent sur toute leur longueur formant une multitude de petits arcs en série. Les éléments fusibles en ruban comporteront généralement des perforations ou des encoches sur leur longueur pour limiter le nombre de ces arcs formés séparément, effectuant ainsi un contrôle des surtensions de coupure (voir également 4.2.4.5). Les éléments fusibles en fil se morcellent également en une multitude d'arcs en série sous l'effet de forces thermiques/magnétiques complexes. Le nombre d'arcs tendant à être très élevé dans le cas

³ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

des éléments fusibles en fil, des surtensions de coupure élevées peuvent se produire, ce qui explique que les éléments fusibles en fil soient normalement utilisés pour des courants assignés très faibles (voir 4.2.4.5). La formation de l'arc, en effet, introduit une résistance élevée dans le circuit et ramène le courant à une valeur faible bien avant que la crête du courant de défaut présumé ne soit atteinte (connu comme le courant coupé limité). Ceci est illustré à la Figure 2a. L'arc s'allonge, augmentant d'autant la résistance. Lorsque le courant a été ramené à une valeur faible, les arcs s'éteignent presque simultanément dans la première demi-alternance du courant de défaut. Parce que le courant est ramené à une valeur nulle presque en même temps que la tension du circuit passe à zéro, les fusibles limiteurs de courants sont beaucoup moins sensibles à la TTR que les fusibles à expulsion, voir Figure 2a (la TTR – Tension transitoire de rétablissement – est la tension oscillatoire transitoire brève qui apparaît aux bornes d'un circuit ouvert, dans ce cas le fusible, après coupure du courant, et qui est due à une oscillation amortie de courant dans l'inductance du circuit et la capacité intrinsèque en parallèle).

Etant donné que la valeur de crête du défaut et sa durée sont réduites de manière significative par rapport au fonctionnement d'un appareil non limiteur de courant, l'énergie libérée à l'endroit du défaut ou dans le circuit protégé s'en trouve également très limitée. La rapidité de fonctionnement du fusible donne lieu à l'apparition d'une surtension transitoire dans le circuit – la tension de coupure. Ceci est dû à la chute du champ magnétique associé à l'inductance du circuit et ce phénomène est plus prononcé dans des circuits ayant un facteur de puissance faible. La tension de coupure, qui se produit aux bornes du fusible, peut être sensiblement plus élevée que la tension du système et il convient d'en tenir compte lors de la conception pour définir les distances d'isolement dans l'air et les lignes de fuite des équipements, et lors de la sélection des parafoudres.

L'énergie des arcs dans le fusible est absorbée par la formation de fulgurite à partir de la silice qui entoure les éléments fusibles. La fulgurite est le terme utilisé par les ingénieurs spécialisés en fusibles pour désigner le mélange de grains de silice frittés et fondus avec des gouttelettes de métal provenant de la fusion des éléments fusibles. La quantité de fulgurite produite au cours de la fusion est directement liée à l'énergie d'arc absorbée par le fusible. Environ 0,5 g de fulgurite sont produits par kilojoule d'énergie de l'arc. Des augmentations légères de la tension du système (au-dessus de la tension assignée pour le fusible donné) provoquent une augmentation importante de l'énergie de l'arc et donc de la quantité de fulgurite produite. L'enveloppe de protection du fusible a une limite supérieure définie par rapport à la masse de fulgurite qu'elle peut supporter. Par conséquent, en règle générale, les fusibles limiteurs de courant ne peuvent correctement interrompre des courants de court-circuit qu'à des tensions de système ne dépassant pas la tension assignée du fusible.

4.2.1.3 Fonctionnement dans des conditions de courant de défaut faible

4.2.1.3.1 Considérations de température

Dans le cas de courants de défaut faibles, jusqu'à cinq fois le courant assigné du fusible, les éléments fusibles atteignent progressivement la température de fusion après de nombreuses secondes ou minutes (ou même plusieurs heures pour les fusibles à coupure intégrale). La température de fusion de l'argent est de 960 °C, celle du cuivre, de 1 080 °C. Si le temps de fusion d'un fusible est de plus de quelques secondes (ou de quelques minutes pour certains types), et si le fusible dans son ensemble devait atteindre une température aussi élevée en cours de fonctionnement, le fusible lui-même ou ses dispositifs associés pourraient subir une détérioration. Divers moyens sont donc employés pour surmonter ce problème. Certaines conceptions de fusibles comportent une fine plaque localisée d'alliage à bas point de fusion, pour créer ce qu'on appelle un effet M (d'après la découverte du Professeur Metcalf), tel qu'illustré à la Figure 4. Si un alliage typique d'étain est utilisé pour créer l'effet M, à une température d'environ 230 °C, l'alliage fond et génère un phénomène de diffusion avec le métal de base de l'élément fusible. Cela entraîne la fusion et la rupture de l'élément fusible à une température inférieure à sa température de fusion normale, et l'initiation du processus d'interruption du courant. D'autres techniques que l'effet M ont été employées, qui comportent l'insertion de sections à bas point de fusion disposées en série avec un élément fusible (pratique couramment utilisée avec certains types de fusibles à coupure intégrale), et la formation d'un point chaud sur l'élément fusible en créant une longue section de largeur

étroite dans le ruban ou en enfermant une partie de l'élément fusible dans un matériau d'isolation thermique. L'objectif est là encore de s'assurer que la fusion de l'élément fusible intervient sans que tout le ruban atteigne une température excessivement élevée.

Une solution plus récente, employée lorsque le fusible est installé dans un appareil de coupure déclenché par un percuteur, consiste à utiliser un percuteur thermique conçu pour fonctionner et pour déclencher l'appareil associé, lorsque la température du fusible atteint une valeur prédéterminée. Dans ce cas particulier, c'est l'appareil de coupure, et non pas le fusible, qui réalise la coupure du courant.

4.2.1.3.2 Interruption d'un courant de défaut faible

Dans le cas de courants de défaut faibles ou de surcharges, avec des fusibles ayant plus d'un élément fusible, la fusion et la formation d'arc des différents éléments fusibles parallèles n'interviennent pas en même temps, comme avec les courants de défaut élevé, mais se font successivement dans un ordre aléatoire, en commençant généralement à un endroit précis de chaque élément, jusqu'à la fusion du dernier élément. Pour les fusibles qui emploient des éléments fusibles avec un ruban comportant des encoches et qui fonctionnent à plusieurs milliers de volts, il faut qu'il y ait plusieurs points de rupture en série des éléments fusibles pour interrompre le courant. Le courant dans le dernier élément qui fond doit donc être suffisamment élevé pour réaliser une fusion multiple pendant la production d'arc. Cette production d'arc entraîne le réamorçage des éléments fusibles parallèles restants avec de nombreux arcs en série, qui s'éteignent successivement à chaque fois qu'un autre élément se réamorce. Ce processus continue jusqu'à la production d'un nombre d'arcs en série sur chaque élément fusible suffisant pour supporter la tension de rétablissement (y compris avec la TTR présente).

Par conséquent, pour de nombreux types de fusibles à haute tension, si le courant de défaut était inférieur à une certaine valeur critique (d'environ 3 à 10 fois le courant assigné selon la conception particulière du fusible), la densité de courant dans chaque élément fusible en régime d'arc pourrait être trop faible pour initier des ruptures multiples en série dans chaque élément. Il en résulte une formation d'arcs allongés uniques, qui se réamorcent après chaque passage par zéro du courant en continuant de s'allonger, et causant probablement une défaillance finale du fusible. Ce type de fusible a donc un "courant minimal de coupure" défini, en dessous duquel la coupure satisfaisante du courant de défaut dans le circuit ne peut pas être garantie.

Ces fusibles sont appelés fusibles associés (voir 4.2.2 "classification") et sont destinés à être utilisés dans des applications où a) des défauts de niveau faible sont jugés très peu probables, b) où le fusible est associé à d'autres appareils de protection qui prennent en charge les défauts de niveau faible ou c) dans l'application courante où le fusible est utilisé dans un appareillage déclenché par un percuteur. Dans ce dernier cas, dans des conditions de défaut de niveau faible, la tige du percuteur est éjectée immédiatement dès le début de la formation d'arc dans le fusible. La tige déclenche l'appareil de coupure utilisé en série avec le fusible, déconnectant ainsi le fusible du courant de défaut avant son échauffement excessif, de manière à assurer une interruption du courant à tous les niveaux de défaut. Les fusibles associés destinés à être utilisés en série avec d'autres appareils de protection (par exemple, les fusibles à expulsion) peuvent avoir un courant de coupure minimal assigné correspondant à une durée de préarc de seulement quelques secondes ou moins. Dans ce cas, l'appareil en série est coordonné avec le courant assigné et la caractéristique durée de préarc-courant du fusible associé, afin que le fusible ne puisse pas être endommagé par un échauffement excessif pendant les surcharges.

On trouve également des fusibles ayant une aptitude intrinsèque à couper des courants de défaut de valeur faible. On les appelle les fusibles à usage général ou à coupure intégrale (voir 4.2.2 "classification"). Dans une version, on obtient une amélioration du pouvoir de coupure minimal en utilisant un grand nombre d'éléments fusibles en parallèle, chacun ayant une faible section transversale de sorte que chaque élément fusible, au moment où l'arc s'amorce, a une densité de courant suffisamment élevée pour se fragmenter en de multiples petits arcs et éliminer le courant de défaut. Dans d'autres cas, on utilise des matières qui se

transforment en gaz pour augmenter l'efficacité des arcs en série et le pouvoir de coupure minimal. Dans une autre version courante, chaque élément fusible limiteur de courant est connecté en série à un élément fusible qui fonctionne sur le principe de l'expulsion (voir la partie sur les fusibles à expulsion). Dans cette configuration, les éléments fusibles à expulsion gèrent n'importe quel défaut de niveau faible. Pour les défauts de niveaux plus élevés, les éléments fusibles limiteurs de courant prennent la relève pour éliminer le courant de court-circuit. Les fusibles basés sur ce principe (appelés parfois fusibles "à élément double") auront été soumis à des essais spécifiques, I_t , décrits dans la CEI 60282-1:2009. Ces essais vérifient le fonctionnement dans la zone d'intersection de l'élément fusible limiteur et de l'élément fusible dédié aux courants faibles. Les fusibles à usage général et à coupure intégrale peuvent généralement être utilisés comme seuls dispositifs de protection applicables à tous les niveaux de défaut sans qu'il soit nécessaire de les associer à d'autres dispositifs pour gérer les courants de défaut les plus faibles.

4.2.2 Classification des fusibles limiteurs de courant

La classification de ces fusibles est réalisée en fonction de leur aptitude à interrompre des courants de défaut de niveau faible, comme expliqué en 4.2.1.3).

Fusibles associés: ce type de fusible doit être capable d'interrompre toutes les surintensités depuis le courant maximal de coupure assigné, généralement plusieurs dizaines de kiloampères, jusqu'au courant minimal de coupure assigné du fusible, représentant le plus souvent 3 à 10 fois le courant assigné du fusible. De tels fusibles sont essentiellement destinés à la protection contre les courts-circuits. Ce type de fusible n'est pas censé éliminer les courants de défaut les plus faibles à lui seul.

A usage général: ce type de fusible doit être capable d'interrompre toutes les surintensités depuis le courant maximal de coupure assigné jusqu'à des valeurs qui entraînent le fonctionnement du fusible en une heure. Pour certaines applications, de tels fusibles sont indiqués comme seul moyen de protection dès lors qu'ils peuvent fournir un certain degré de protection contre les surcharges et les courts-circuits.

A coupure intégrale: Ce type de fusible peut n'avoir aucune valeur définie de courant minimal de coupure. Bien qu'il existe différentes exigences d'essai concernant les fusibles destinés à fonctionner dans une température ambiante supérieure ou inférieure à 40 °C, l'objectif recherché est que le fusible à coupure intégrale soit capable de fonctionner correctement à toutes les valeurs de courant permanent causant la fusion des éléments fusibles jusqu'à son courant maximal de coupure assigné. Il est donc particulièrement adapté aux applications où son utilisation dans une petite enceinte entraîne une réduction considérable de ses caractéristiques assignées et donc la possibilité d'un fonctionnement à une valeur proche du courant assigné du fusible (voir 5.1.4.2.7).

La Figure 5 illustre les gammes de courants auxquelles les différentes classes de fusibles doivent s'appliquer, et pour lesquelles elles sont soumises à essai. Dans la Figure, I_{ACC} représente le courant permanent maximal autorisé par l'application (voir 5.1.1.1.3). Dans une enceinte, il peut être de I_{encl} , (voir Annexe A) tandis qu'à l'air libre, il sera probablement de I_r . Les parties grisées représentent les valeurs de courant au-dessus du courant permanent admissible, auxquelles le fusible peut être endommagé et/ou fondre mais sans être capable d'interrompre le courant.

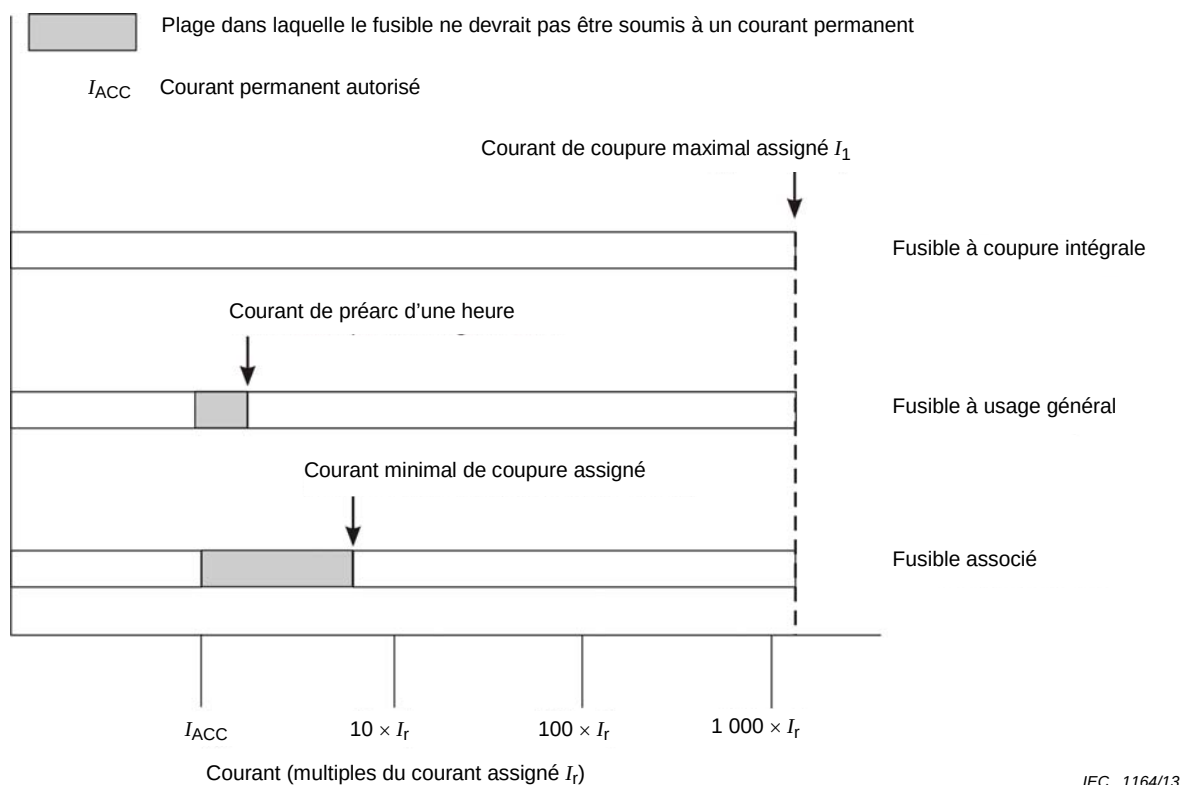


Figure 5 – Gammes de courants auxquelles s'appliquent les différentes classes de fusibles

4.2.3 Caractéristiques assignées des fusibles limiteurs de courant

4.2.3.1 Tension assignée

Comme expliqué en 4.2.1.2, les fusibles limiteurs de courant sont très sensibles à la tension. Par conséquent, ces fusibles ne doivent jamais être soumis à une tension de rétablissement un tant soit peu supérieure à celle utilisée pour les essais. La tension de rétablissement à laquelle le fusible est soumis en service dépend non seulement de la tension du système mais également, dans le cas des systèmes triphasés, du régime de mise à la terre. Deux aspects d'une application doivent être pris en considération pour la tension assignée d'un fusible. Le premier est que la tension assignée du fusible doit être au moins égale à la "tension la plus élevée d'un système" (voir CEI 60038) (c'est-à-dire la tension maximale du système) et non pas à la tension nominale du système (voir également 5.1.3). La tension assignée des fusibles est donc égale à la "tension la plus élevée d'un équipement" selon la CEI 60038. Le deuxième aspect est que, sauf dans le cas d'une utilisation sur un système triphasé dont le neutre est mis directement à la terre, une marge additionnelle peut être nécessaire. Par exemple, un fusible dont la tension assignée est de 12 kV serait destiné à être utilisé dans un système triphasé de 10 kV ou 11 kV avec un neutre directement mis à la terre, mais pas dans un système monophasé de même tension nominale ni dans un système mis à la terre par impédance accordée.

Sans qu'il soit besoin d'effectuer des essais spécifiques, il convient de ne pas connecter les fusibles en série dans le but d'obtenir une augmentation de la tension assignée car, à cause des tolérances de fabrication, l'un des deux fusibles en série fonctionnerait probablement avant l'autre et se verrait imposer une tension supérieure à sa valeur assignée (voir 5.1.6). Il est admis d'utiliser des fusibles ayant une tension assignée donnée dans des systèmes de tension inférieure. Il convient dans ce cas que le pic de tension pendant le fonctionnement du fusible ne dépasse pas le niveau d'isolement du système. Une règle empirique s'impose selon laquelle il est généralement admis d'utiliser des fusibles jusqu'à des valeurs de tension égales à environ la moitié de leur tension assignée.

4.2.3.2 Courant assigné

Le courant assigné est en grande partie déterminé au moyen d'essais d'échauffement normalisés effectués en laboratoire. Il convient que le courant de charge permanent ne dépasse normalement pas le courant assigné du fusible si on veut éviter la détérioration des éléments fusibles ou d'autres composants. Toutefois, en pratique, les fusibles à haute tension fonctionnent généralement à des courants de charge bien inférieurs à leur courant assigné pour des raisons liées aux exigences de résistance aux courants de surcharge transitoires et à la réduction de leurs caractéristiques assignées due à une utilisation dans une enceinte réduisant les échanges thermiques. Afin d'obtenir des courants assignés plus élevés, les fabricants utilisent souvent des corps de fusibles connectés en parallèle en permanence. Ces fusibles auront un courant assigné défini par le fabricant. L'utilisateur peut également obtenir une augmentation du courant assigné en montant des fusibles séparés en parallèle. Il convient de consulter le fabricant avant d'effectuer cette opération (voir 5.1.5).

4.2.3.3 Courant maximal de coupure assigné

Les fusibles limiteurs de courant sont généralement soumis à essai à des valeurs de courant maximal de coupure assigné (souvent comprises entre 25 kA et 50 kA) bien au-dessus des niveaux de défaut admissibles des systèmes. Les fabricants ne rechercheront normalement pas les courants les plus élevés que leurs fusibles peuvent interrompre, en raison du coût élevé de ces essais et/ou des limites des laboratoires d'essai. Cependant, il convient de ne pas utiliser un fusible à un courant de défaut présumé supérieur à son courant maximal de coupure assigné sans consulter le fabricant.

4.2.3.4 Courant minimal de coupure assigné

Généralement on peut ne pas réaliser que les fusibles à haute tension limiteurs de courant du type "fusibles associés" (voir 4.2.1.3), contrairement à d'autres dispositifs de coupure, ont une limite inférieure définie par rapport au courant pouvant être interrompu sans provoquer de détérioration externe des fusibles eux-mêmes ou des appareils associés. Cette valeur assignée doit être déclarée par le fabricant des fusibles et doit se baser sur des essais de coupure appropriés. On peut noter que le courant minimal de coupure n'a pas de lien direct avec le courant minimum de fusion d'un fusible. Celui-ci est égal à la valeur obtenue à l'extrémité supérieure de la courbe temps-courant minimum de préarc du fusible (voir 4.1.3) et peut être généralement de 1,3 à 2 fois le courant assigné du fusible, tandis que le courant minimal de coupure assigné est généralement de 3 à 10 fois le courant assigné du fusible.

4.2.3.5 Fréquence assignée

A condition de ne pas dépasser les limites autorisées, ce n'est pas un paramètre critique. Un fusible soumis à essai à 50 Hz conviendra parfaitement à une utilisation à 60 Hz. De même, en règle générale, un fusible limiteur de courant soumis à essai à 60 Hz conviendra à une utilisation à 50 Hz (contrairement aux fusibles à expulsion, voir 4.3.4.4). Si un fusible soumis à essai à 50 Hz ou 60 Hz peut convenir à une utilisation à des fréquences plus élevées, aucune recommandation ne peut être donnée ici, et il convient de consulter le fabricant de fusibles pour de telles applications. A des fréquences inférieures à 50 Hz, une plus grande attention peut être nécessaire, le temps plus long de demi-alternance donnant lieu à un plus grand dégagement d'énergie dans le fusible. Une réduction de la tension assignée est généralement nécessaire. Dans le cas extrême d'applications à courant continu, l'augmentation de l'énergie d'arc peut être si prononcée qu'une réduction importante de la tension assignée peut s'avérer nécessaire, et là encore, il convient de consulter le fabricant. Il convient de noter que les applications à courant continu ne font pas partie du domaine d'application de la CEI 60282-1:2009 ou de l'IEEE C37.41 [6]. Pour les informations sur les fusibles pour traction à courant continu, voir la CEI 60077-5.

4.2.4 Caractéristiques des fusibles limiteurs de courant

4.2.4.1 Généralités

Les caractéristiques d'un fusible, telles que publiées par le fabricant, déterminent s'il convient à une utilisation dans une application donnée et permettent d'établir des comparaisons entre les fusibles de différents types afin de pouvoir faire le meilleur choix possible.

4.2.4.2 Caractéristiques temps-courant

Les caractéristiques les plus utiles des fusibles, c'est-à-dire les caractéristiques temps-courant permettent de réaliser une coordination entre les fusibles et d'autres appareils de protection sur un système donné. Les fabricants publient ces données pour tous les types et valeurs assignées de leurs produits. Sauf spécification contraire, les courbes sont représentées dans des conditions de température ambiante de 20 °C. Pour la plupart des fusibles, la courbe est valable à une plage de températures donnée. Cependant, en fonction du type de fusible et de l'application, des courbes ou facteurs de correction valables pour d'autres températures peuvent être établis. La CEI 60282-1:2009 demande que les courbes de caractéristiques temps-courant soient représentées à une échelle bi-logarithmique et montrent la relation entre la durée virtuelle de préarc et le courant présumé. Des valeurs moyennes ou minimales peuvent être utilisées. La pratique européenne est d'utiliser des valeurs moyennes de courant avec une tolérance appropriée prenant en compte les tolérances de fabrication. Ces valeurs moyennes ne comprennent pas la durée du régime d'arc. Pour les temps de fusion très courts de moins de 0,1 s, le temps de fusion peut varier grandement selon l'instant du défaut. Par conséquent, on utilise couramment le "temps virtuel" plutôt que le temps réel à l'extrémité inférieure de la courbe. Le temps virtuel est donné par l'intégrale de Joule (I^2t) divisé par le carré de la valeur efficace du courant présumé.

Dans la pratique nord-américaine, au lieu d'une courbe moyenne de préarc, on publie normalement une courbe de préarc minimum (acceptant des tolérances minimales de fabrication) accompagnée d'une courbe de fonctionnement maximum (de coupure) (y compris les tolérances maximales de fabrication) qui comprend la durée d'arc. Des courants symétriques sont utilisés pour établir la courbe de préarc afin d'éviter la variabilité de l'asymétrie et on utilise normalement le temps "réel" et non pas le temps "virtuel".

NOTE En pratique, la différence est minime entre une courbe établie en utilisant un courant symétrique et une courbe établie en utilisant le temps virtuel pour la plupart des conceptions de fusibles. Par conséquent, les courbes des caractéristiques temps-courant utilisant l'une ou l'autre de ces techniques peut généralement servir à la coordination entre les fusibles, et entre les fusibles et d'autres appareils, jusqu'à des temps approximatifs de 0,01 s. La coordination à un temps plus court utilise l'intégrale de Joule I^2t (voir 4.2.4.4).

Les courbes temps-courant sont établies avec le fusible à froid, c.à.d. hors charge. En pratique, un préchauffage du fusible, dû à la présence du courant de charge, entraîne un fonctionnement légèrement plus rapide que celui indiqué sur les courbes publiées.

La valeur du courant minimal de coupure assigné pour un fusible associé est indiquée par le point où la courbe caractéristique temps-courant passe d'un tracé continu à un tracé en pointillés (voir Figure 20).

La coordination entre les fusibles et d'autres appareils (voir 5.1 et 5.2) nécessite fréquemment l'utilisation de courbes caractéristiques temps-courant minimum et maximum (à la fois la courbe caractéristique temps-courant de préarc et la courbe caractéristique temps-courant de fonctionnement [de coupure totale]). Si une courbe nominale est publiée, elle doit être corrigée à l'aide des tolérances de fabrication appropriées (concernant le courant). Les tolérances de la courbe caractéristique temps-courant de préarc varient en fonction du type de fusible utilisé; cependant, les fusibles soumis aux essais conformément à la CEI 60282-1:2009 doivent avoir une tolérance ne dépassant pas $\pm 20 \%$ pour les courbes nominales et $+50 \%$ pour les courbes minimales à maximales. Les fusibles modernes tendent à avoir des tolérances plus faibles, le plus souvent de $\pm 10 \%$. La pratique nord-américaine

est similaire, la tolérance ne devant pas dépasser + 20 % de la courbe minimale à la courbe maximale.

4.2.4.3 Caractéristiques d'amplitude du courant coupé limité

Ces courbes montrent les valeurs maximales instantanées les plus élevées du courant qu'un fusible donné laissera passer dans des conditions de défaut pour des valeurs variables de courant de défaut présumé. Ces caractéristiques sont utilisées pour pouvoir effectuer des vérifications du degré de protection apporté par le fusible aux câbles, jeux de barres, interrupteurs, etc. Cependant, étant donné que le fonctionnement du fusible est extrêmement rapide et que la détérioration des dispositifs associés est fonction du temps et du courant instantané, ces vérifications sont conservatrices. La Figure 6 illustre un ensemble de courbes caractéristiques d'amplitude du courant limité pour une "famille" de fusibles. Chaque fusible a une courbe qui comporte deux parties (normalement représentées par deux lignes droites). La ligne illustrée à gauche est commune à tous les fusibles et représente le courant de crête maximal d'un courant présumé entièrement asymétrique (ayant un courant de crête d'environ 2,5 fois la valeur efficace du courant à un facteur de puissance type correspondant à une fréquence de 50 Hz et un rapport de 2,6 pour une fréquence de 60 Hz). La deuxième partie de la courbe (à un angle plus faible) représente la limitation de courant produite par le fusible CL. La "charnière" où les deux courbes se rejoignent, représente le courant le plus faible qu'un fusible particulier peut limiter.

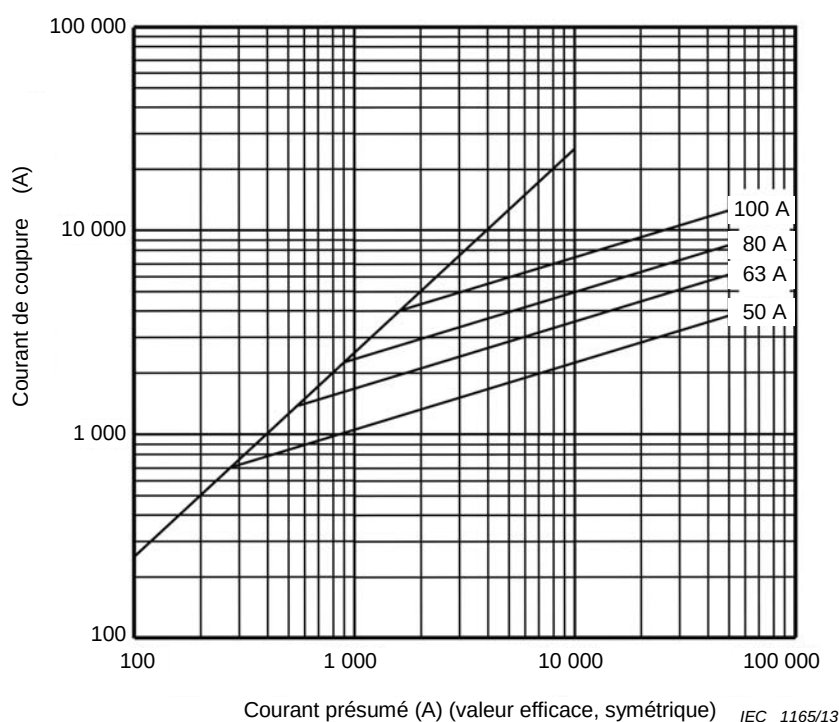


Figure 6 – Caractéristiques types d'amplitude du courant limité

4.2.4.4 Caractéristiques de l'intégrale de Joule (I^2t)

L'intégrale de Joule, ou plus couramment " I^2t " (qui est plus précisément $\int i^2 dt$) est une indication de l'énergie admise à travers le fusible dans le circuit protégé dans des conditions de défaut. L'énergie libérée dans un défaut qui amorce un arc est le produit du I^2t et de l'impédance de l'arc. Puisque, pour un fusible donné, sur une gamme raisonnable de courants le I^2t tend vers une valeur relativement constante, c'est un concept utile à la coordination entre le fusible et les autres appareils de protection dans la zone critique de temps de fonctionnement courts où la durée d'arc devient un facteur déterminant. Le fabricant doit publier deux valeurs: le " I^2t minimal de préarc (fusion)" qui représente la valeur minimale du I^2t nécessaire à la fusion du fusible (au courant maximal de coupure et avec des tolérances

minimales de fabrication) et le " I^2t maximal de fonctionnement", qui représente la valeur maximale du I^2t probable de service à tout courant provoquant une limitation du courant. Cette valeur maximale peut se produire à tout courant jusqu'au courant maximal de coupure assigné du fusible, selon la conception du fusible. Le I^2t de fonctionnement est la somme du I^2t de préarc et du I^2t d'arc (le I^2t d'arc étant l'intégrale de Joule pendant le temps d'arc du fusible). Dans certains ouvrages de référence, d'autres termes ont été utilisés pour désigner le I^2t maximal de fonctionnement tels que le " I^2t maximal de coupure", le " I^2t total", le " I^2t maximal total", et le " I^2t maximal traversant". La présentation des valeurs du I^2t peut se faire sous forme de tableaux ou de diagrammes (par exemple, histogrammes) ou peut employer une représentation graphique avec le courant présumé en abscisses et les valeurs du I^2t en ordonnées, les deux échelles étant logarithmiques.

La valeur du I^2t de fonctionnement est affectée par les caractéristiques du circuit comme le facteur de puissance et surtout par la tension appliquée. En service, les valeurs du I^2t de fonctionnement seront généralement inférieures aux valeurs publiées, lesquelles sont basées sur les conditions d'essai les plus défavorables.

4.2.4.5 Caractéristiques de surtension de fonctionnement (surtension crête, tension d'arc crête)

L'impulsion brève de surtension produite au cours du fonctionnement d'un fusible à des courants de défaut élevés comprend deux éléments, l'un dû à la valeur instantanée de la tension d'alimentation, l'autre dû à la vitesse de variation du courant dans l'inductance du circuit, le courant étant brutalement ramené à une valeur nulle. La valeur de la surtension de fonctionnement ou de la tension "d'arc en valeur de crête" dépend donc à la fois de la tension d'alimentation, du courant de défaut présumé et du facteur de puissance. Les valeurs limites de la surtension de fonctionnement sont définies par toutes les normes applicables aux fusibles et sont généralement maintenues bien en dessous de ces valeurs par les fabricants de fusibles.

Un dépassement des limites prescrites dans la conception de tous les types de fusibles pourrait avoir des conséquences graves et conduire à un claquage de l'isolement externe ou même à un contournement pendant le fonctionnement du fusible et à une défaillance du parafoudre (voir 5.1.4.4).

Etant donné que la surtension de fonctionnement diminue, dans une certaine mesure, avec la tension d'alimentation, il est souvent possible d'utiliser un fusible de tension assignée donnée dans un système ayant une tension inférieure sans dépasser les limites de tension d'arc spécifiées pour un fusible à cette tension, ou sans courir un risque de claquage d'isolement. Il convient que le fabricant soit capable de fournir des indications concernant la diminution de la tension d'arc pour tension d'alimentation réduite.

Les fusibles de faible courant assigné, qui ont souvent des éléments fusibles à fil, tendent à produire des tensions d'arc plus élevées, mais de durée très courte. En raison de cette durée courte, les normes applicables aux fusibles autorisent des valeurs plus élevées pour les fusibles ayant un courant assigné faible (inférieur ou égal à 12 A ou 3,15 A selon la série de tensions utilisées à des fins d'essai). Les tensions produites par les éléments fusibles à fil sont moins affectées par une réduction de la tension du système que les éléments fusibles à ruban.

4.2.4.6 Puissance dissipée

Un fusible à haute tension produit une quantité de chaleur importante en service. Par exemple, un fusible 100 A 12 kV peut produire 100 watts ou plus lorsqu'il conduit son courant assigné. Cette chaleur doit être dissipée de manière efficace dans l'environnement pour ne pas détériorer le fusible. Dans le cas d'un appareillage entièrement sous enveloppe, la chaleur générée par le fusible peut constituer un facteur de limitation important du courant assigné de l'équipement protégé.

Heureusement, il est rare de faire fonctionner des fusibles à haute tension à leur courant assigné de pleine charge en raison d'autres facteurs tels que la caractéristique de tenue au courant transitoire, par exemple enclenchement de transformateur ou démarrage moteur. Les fabricants fournissent normalement les données relatives à la puissance dissipée ("perte en watts") au courant assigné. En général, les fusibles ayant une puissance dissipée plus faible doivent être choisis en priorité. De tels fusibles nécessiteront un moindre déclassement de leurs caractéristiques assignées lorsqu'ils seront utilisés dans des environnements fermés et consommeront moins d'énergie.

La méthode de mesure de la puissance dissipée dans un fusible à haute tension, à des fins essentiellement pratiques, est de multiplier la chute de tension aux bornes du fusible par le courant le traversant (voir Annexe A).

4.2.4.7 Tenue aux charges cycliques et transitoires

Les fusibles doivent résister à des impulsions transitoires admissibles de surintensité telles que celles dues au courant d'appel d'un transformateur, au courant de charge d'un condensateur, ou au courant de démarrage d'un moteur. La tenue doit être éprouvée pendant la conception par une batterie d'essais dont les graphiques, tableaux et formules sont dérivés pour permettre au consommateur de choisir un fusible qui résistera à la valeur, la durée, et la fréquence de répétition des courants de surcharge attendus. Il convient de noter que si un courant transitoire dépasse ces limites acceptables, un ou plusieurs éléments fusibles peuvent subir une détérioration locale. Cela peut se traduire par une modification des caractéristiques assignées d'un fusible telles qu'il puisse fondre à un courant qu'il n'est pas capable d'interrompre. L'utilisation de fusibles avec un courant assigné plus élevé peut atténuer ce risque, mais il faut garder à l'esprit que la protection fournie par le fusible peut alors être réduite.

4.2.4.8 Caractéristiques du percuteur

Dans beaucoup d'applications, le percuteur a la fonction importante d'initier le fonctionnement des appareils de coupure associés permettant l'utilisation de fusibles associés à des conditions de courant de défaut faibles ainsi qu'une coupure triphasée réalisée avec le fonctionnement d'un seul percuteur (voir 5.2.7). Par conséquent, le percuteur est disponible en plusieurs versions. Les percuteurs à ressort de type moyen, ont un déplacement d'au moins 20 mm et délivrent une énergie supérieure ou égale à 0,5 J. Des graphiques représentant les caractéristiques des percuteurs sont généralement disponibles et montrent la force du percuteur, en Newtons, mesurée par rapport à la longueur du déplacement du percuteur. Les tiges des percuteurs à ressort ont une force continue qui est proportionnelle au déplacement et à la raideur du ressort.

Les percuteurs pyrotechniques (type lourd) qui utilisent une petite charge explosive pour éjecter la tige du percuteur ont une longueur minimale de déplacement de 10 mm et délivrent une énergie supérieure à un joule. Etant donné que ce type de percuteur est un appareil balistique (à éjection plutôt que de poussée comme un dispositif à ressort), il est impossible de fournir une caractéristique force/déplacement significative, mais il est possible de mesurer l'énergie fournie par le percuteur, permettant la comparaison avec l'énergie nécessaire au déclenchement du dispositif, tel qu'un interrupteur, devant être initié par le fusible.

4.3 Fusibles à expulsion

4.3.1 Principes généraux de fonctionnement

Il existe de nombreux types de fusibles à expulsion, mais leur caractéristique principale est que ce sont des dispositifs ouverts dans lesquels, après la fusion de leur élément fusible et la production d'arcs, l'expulsion des gaz produits par l'interaction de l'arc avec d'autres parties du fusible entraîne l'interruption du courant dans le circuit. Une autre caractéristique commune est qu'ils sont principalement non limiteurs de courant. Ils se caractérisent par une tension d'arc relativement faible et ne réduisent donc pas significativement la valeur de la première crête d'un courant de défaut. Par conséquent, ils interrompent également le courant à une valeur naturellement nulle, lorsque les conditions diélectriques appropriées ont été

établies. Ceci est illustré à la Figure 2b). Par conséquent, tout ce qui augmente l'amplitude de la première grande boucle d'un courant de défaut asymétrique rend l'interruption plus difficile. Etant donné que l'amplitude de la première grande boucle dépend du courant de défaut disponible, du facteur de puissance (ou rapport X/R) du réseau, et du degré d'asymétrie du courant, ces types de fusibles sont sensibles aux circuits en défaut ayant un facteur de puissance faible (rapport X/R élevé) (plus que ne le sont des fusibles limiteurs de courant).

En plus d'être sensibles au facteur de puissance, les fusibles à expulsion et les autres types de fusibles non limiteurs de courant sont sensibles à la TTR (voir 4.2.1.2 pour une explication de la TTR). Ils ne modifient pas de manière significative la phase du courant par rapport à la tension du circuit, de sorte qu'aux faibles valeurs du facteur de puissance, le passage naturel à zéro du courant intervient à un moment proche d'une crête de tension du réseau. Lorsque le courant atteint une valeur nulle, le rétablissement diélectrique doit se faire à une vitesse et à une amplitude plus élevées que la TTR du réseau. La TTR implique généralement un dépassement allant jusqu'à deux fois la tension à fréquence industrielle. Si les conditions de rétablissement ne sont pas respectées au premier passage à zéro du courant après fusion, le dispositif devra conduire le courant pendant d'autres demi-périodes jusqu'à la réalisation de l'interruption. A des courants élevés, qui entraînent la fusion sur une ou deux périodes, cela doit se produire en seulement quelques demi-périodes ou sinon le fusible ne pourra pas interrompre le courant. Si contrairement aux fusibles limiteurs de courant (voir 4.2.1.2), les fusibles à expulsion ne sont pas particulièrement sensibles à la tension du réseau pendant la durée d'arc, ils sont sensibles à la tension de rétablissement après un passage à zéro du courant. Par conséquent, de même que les fusibles limiteurs de courant, il convient de ne jamais les utiliser à une tension plus élevée que leur tension assignée (voir 5.1.3.2).

Etant donné leurs applications typiques, les fusibles à expulsion et autres types de fusibles non limiteurs de courant ont été conçus pour interrompre tout courant depuis le courant de surcharge causant la fusion de l'élément fusible jusqu'au courant maximum de défaut assigné. Ceci, comme nous l'avons vu, n'est pas nécessairement vrai pour tous les types de fusibles limiteurs de courant.

Comme tous les fusibles, les éléments fusibles à expulsion ont une caractéristique de fusion définie. Cependant, du fait que les éléments fusibles sont relativement courts et que leur taille et leur construction influent relativement peu sur le processus d'interruption, le même fusible à expulsion peut être disponible avec de nombreuses caractéristiques temps-courant de préarc différentes. Ainsi, par exemple, un fusible-déconnecteur de distribution peut accepter et être compatible avec plusieurs éléments de remplacement ayant des courbes différentes (voir 4.3.5) mais un courant assigné identique.

Les normes CEI reconnaissent deux classes de fusibles à expulsion, la Classe A et la Classe B (voir 4.3.3), qui sont communes aux fusibles reconnus par d'autres normes dans le monde. En théorie, tous les types de dispositifs non limiteurs de courant peuvent être soumis à essai conformément à la norme CEI 60282-2:2008, même si cela a pour effet de leur assigner un courant maximal de coupure très faible. Cependant, certains types courants de fusibles à expulsion sont utilisés lorsque le facteur de puissance et les valeurs de TTR sont moins critiques que ceux recommandés dans les normes CEI, et ils peuvent donc être soumis à essai dans des conditions moins défavorables qui ont été spécifiées dans une norme reconnue (par exemple, les fusibles-déconnecteurs à éléments ouverts dans l'IEEE C37.41 [6]) ou non. En raison de leur similarité ou de leur utilisation avec d'autres types de fusibles couverts par des normes, les types les plus courants seront décrits dans le présent document.

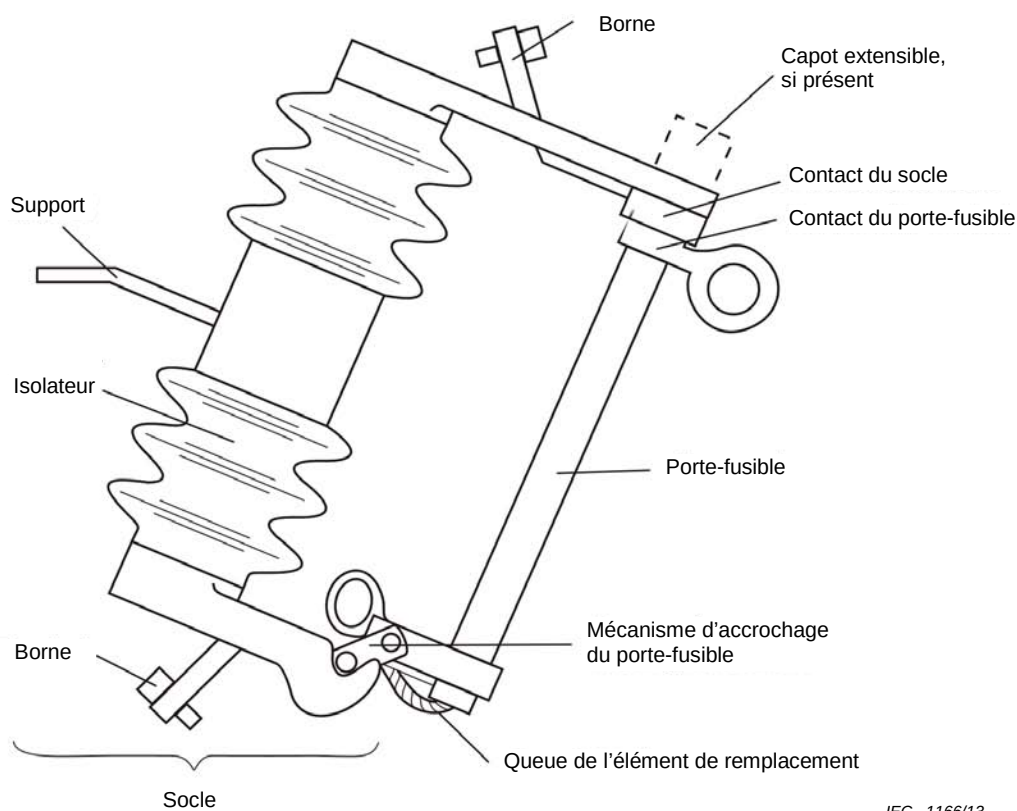
4.3.2 Construction et fonctionnement des fusibles à expulsion

4.3.2.1 Fusibles à expulsion de Classe "A"

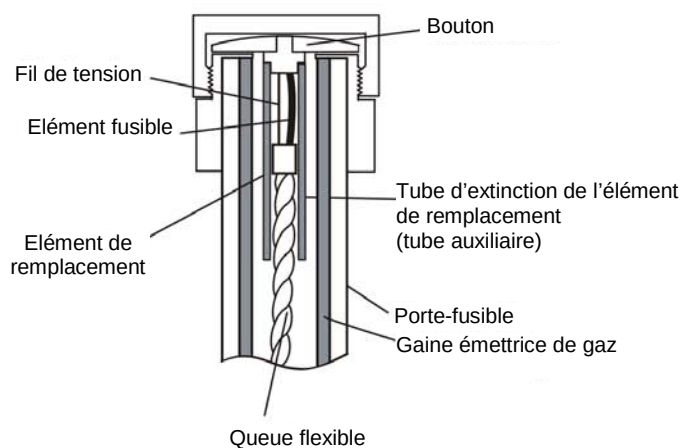
4.3.2.1.1 Fusibles-déconnecteurs de distribution

Le type le plus courant de fusibles à expulsion de "Classe A" sont appelés des fusibles-déconnecteurs de distribution. En effet, dans la plupart des pays, ils sont le type de fusibles

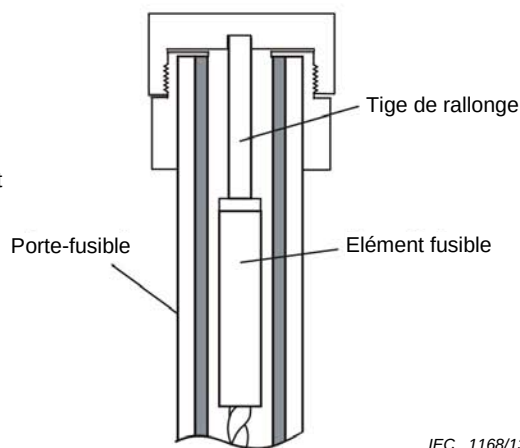
le plus couramment utilisé à l'extérieur. La Figure 7a) montre les composants d'un fusible-déconnecteur de distribution type. Le socle (support) se compose d'un isolateur, généralement en céramique, mais de plus en plus dans un matériau différent (à base de polymère). Une console en son milieu permet de le fixer sur une traverse d'un poteau. Les bornes et les contacts au sommet et à la base sont reliés au circuit et établissent le contact électrique avec un porte-fusible articulé par assemblage à pivot. Le porte-fusible comprend un tube doublé d'une matière émettrice de gaz, qui contient l'élément fusible, généralement monté dans un élément de remplacement à cartouche.



7a) Composants d'un fusible-déconnecteur de distribution



7b) Disposition typique d'élément de remplacement



7c) Porte-fusible avec tige de rallonge

Figure 7 – Construction d'un fusible-déconnecteur de distribution

La Figure 7b) montre une construction typique d'un élément de remplacement, monté sur un porte-fusible, dans lequel un tube émetteur de gaz (appelé tube d'extinction d'arc ou tube associé) entoure l'élément fusible. L'élément fusible dans ce type de fusible est normalement assez court (par exemple, 30 mm) et est relié à un contact au sommet de l'élément de remplacement, et à un câble flexible ("queue") à la base. Un fil de tension, monté parallèlement à l'élément fusible, permet le montage de l'élément de remplacement en tension mécanique. Le câble flexible est relié à un contact à la base du porte-fusible, retenant généralement un mécanisme à loquet qui est libéré lors de la fusion de l'élément fusible, permettant au porte-fusible de s'ouvrir après l'interruption du courant. Cela permet d'avoir une distance d'isolement (propre au fusible à "ouverture automatique") et aussi une indication visuelle du fonctionnement du fusible. Les caractéristiques du courant assigné et de fusion du fusible dépendent principalement de la conception de l'élément de remplacement.

Lorsque l'élément fusible (et le fil de tension) fond sous l'effet d'une surintensité, l'arc résultant est seulement confiné modérément et brûle dans la partie tubulaire du porte-fusible qui contient la matière émettrice de gaz ("extinction d'arc"). Cette matière était traditionnellement réalisée en fibre, mais tend aujourd'hui à être dans un matériau à base de polymère. Lorsque l'élément fusible fond à un courant faible, l'arc brûle uniquement dans le tube auxiliaire, tandis qu'à des courants élevés, le tube éclate et le revêtement du porte-fusible génère les gaz d'expulsion. Le revêtement subit une ablation sous l'effet de l'arc et dégage des gaz, tels que l'hydrogène et divers hydrocarbures. Cela protège la paroi du tube d'une érosion excessive, alors que l'arc brûle de manière stable avec des températures au centre qui atteignent 20 000 °C. Les gaz expulsent la vapeur métallique et le câble flexible ("queue") du tube du fusible. Le mouvement du câble flexible allonge l'arc jusqu'à la longueur du porte-fusible, et facilite grandement le rétablissement diélectrique lors du passage naturel à zéro du courant. La production de gaz est proportionnelle au dégagement de chaleur par l'énergie de l'arc. Le flux de gaz se refroidit efficacement et dé-ionise l'intervalle de l'arc au zéro de courant, permettant à celui-ci de résister à la TTR. Cela se traduit par une interruption du courant dans le circuit. Dans certaines conditions, les fusibles à expulsion expulsent des matières solides à des vitesses élevées lors de l'interruption d'un courant de défaut. Il convient d'en tenir compte dans le choix du lieu d'installation de l'appareil.

Certaines conceptions utilisent un capot extensible (Figure 7a)) au sommet du tube. Aux courants de défaut élevés, ce capot s'ouvre pour libérer la pression et permettre aux gaz de s'échapper à chaque extrémité du tube. Les fusibles à expulsion qui libèrent les gaz à chaque extrémité du tube sont connus sous le nom de "types à double ouverture". C'est une des techniques utilisées pour augmenter le courant maximal de coupure assigné des fusibles-déconnecteurs de distribution. Une conception plus ancienne de fusible-déconnecteur de distribution utilise un porte-fusible ouvert en permanence aux deux extrémités.

Une autre technique utilisée pour augmenter le courant maximal de coupure d'un fusible-déconnecteur de distribution est appelée tige de rallonge ou de raccourcissement de l'arc. Il s'agit d'une tige conductrice reliée au contact en haut du porte-fusible et au sommet de l'élément de remplacement. Elle a pour effet de déplacer l'élément fusible plus bas dans le porte-fusible, de sorte que l'amorçage de l'arc débute plus près de l'extrémité ouverte du tube. Cela réduit la pression dans le porte-fusible. Cette technique est illustrée à la Figure 7c). Une construction plus résistante du tube du porte-fusible, par exemple, en utilisant une structure en verre-époxy enroulée, contribue également à obtenir un courant de coupure plus élevé. Les fabricants auront donc souvent plusieurs modèles de porte-fusible, chacun ayant un courant maximal de coupure assigné différent adapté à divers emplacements dans un réseau d'alimentation. Un avantage des types à "ouverture unique" est l'absence d'émission de gaz ionisés vers le haut, qui pourrait affecter les lignes aériennes adjacentes.

4.3.2.1.2 Fusibles-déconnecteurs à élément ouvert

Les fusibles-déconnecteurs à élément ouvert (voir Figure 8a)) n'utilisent pas un porte-fusible, mais suspendent plutôt un élément de remplacement ouvert entre des pinces. L'élément de remplacement contient toutes les parties permettant l'extinction de l'arc. Les pinces comprennent un mécanisme à ressort pour tendre l'élément de remplacement. Ils fonctionnent de la même manière que les fusibles-déconnecteurs de distribution décrits en 4.3.2.1.1, mais ont généralement un pouvoir de coupure relativement faible, et sont souvent utilisés en

combinaison avec un fusible limiteur de courant associé. Ils sont de moins en moins utilisés. Bien qu'étant définis dans la norme CEI 60282-2:2008, ils ne sont normalement pas fournis avec les mêmes exigences d'essai que dans cette norme mais avec des exigences moins strictes (par exemple, celles spécifiées pour les fusibles-déconnecteurs à élément ouvert dans l'IEEE C37.41 [6]).

4.3.2.1.3 Fusibles-déconnecteurs sous enveloppe de protection

Un fusible-déconnecteur sous enveloppe de protection (voir Figure 8b)) est semblable à un fusible-déconnecteur de distribution, mais toutes les parties actives sont enfermées dans une enveloppe de protection (généralement en porcelaine). Une "porte" pivotante accompagne le porte-fusible. Ils peuvent être à ouverture automatique mais cela est rare, cette caractéristique étant souvent laissée au choix de l'utilisateur. Ils fonctionnent de la même façon que les fusibles-déconnecteurs de distribution décrits en 4.3.2.1.1.

4.3.2.1.4 Fusibles pour condensateurs

Un type courant de fusible à expulsion pour condensateur utilise un porte-fusible relié à un bus de raccordement. Un "bras" à ressort fixé à l'isolateur du condensateur le relie au câble flexible ("queue") de l'élément de remplacement, pour le maintenir en tension. Les principes de fonctionnement sont semblables à ceux décrits en 4.3.2.1.1.

4.3.2.1.5 Fusibles à expulsion immergés dans un liquide

Ce sont des fusibles à expulsion dans lesquels l'extinction de l'arc est réalisée par immersion des éléments fusibles dans un liquide isolant. Ils sont couramment utilisés dans de nombreuses régions du monde et sont immergés dans un liquide isolant (traditionnellement de l'huile) dans des transformateurs ou appareillages. Ils utilisent un tube résistant de petit diamètre avec un élément fusible suspendu entre des bornes à chaque extrémité. Le tube est ouvert et rempli avec le liquide qui l'entoure. Différents noms ont été utilisés pour ces fusibles, dont fusibles "à cartouche" et "à élément faible", mais ils sont définis comme étant des "fusibles à expulsion immergés dans un liquide" dans l'IEEE C37.41 [6]. Ils fonctionnent sur le même principe que les fusibles-déconnecteurs de distribution (décrits en 4.3.2.1.1), excepté qu'un liquide isolant (généralement de l'huile) est utilisé comme milieu diélectrique. Après la fusion de l'élément fusible, l'arc résultant réchauffe, évapore et dissocie le liquide. Les gaz et produits générés par l'arc sont évacués par une ou les deux extrémités du fusible dans la cuve contenant le fusible et, généralement, d'autres composants immergés dans le liquide. L'effet dé-ionisant des gaz permet l'interruption du courant lorsque les conditions diélectriques appropriées sont remplies à un passage à zéro naturel du courant. Dans de nombreux cas, le gaz provenant du liquide est suffisant pour réaliser le processus d'interruption. A des courants plus élevés, la paroi du tube du fusible libère aussi du gaz pour faciliter le processus d'interruption. Ces fusibles ont un courant maximal de coupure très limité.

Une variante de ce type de fusible place l'élément de remplacement dans un porte-fusible à l'extrémité d'une tige amovible, suspendu dans un support contenant les contacts électriques, comme illustré à la Figure 8c). L'assemblage est réalisé en respectant un angle de montage, de sorte que l'élément de remplacement soit immergé tandis que le sommet de la tige amovible est au-dessus du liquide. Après fonctionnement, le porte-fusible peut être retiré du liquide, et l'élément remplacé. Ce type de fusible est couramment appelé "fusible à baïonnette".

Les fusibles à expulsion immergés dans un liquide peuvent être utilisés seuls pour les applications peu contraignantes, ou en combinaison avec des fusibles limiteurs de courant lorsque les conditions du circuit sont plus sévères. Par conséquent, de nombreux types ont été soumis à essai dans des conditions moins défavorables que les exigences d'essai des fusibles de "Classe A", définies dans la norme CEI 60282-2. L'IEEE C37.41 [6] reconnaît des exigences d'essai spécifiques pour ce type de fusibles lorsqu'ils sont utilisés dans des applications d'appareillages, où ils sont désignés comme "fusibles à expulsion immergés dans un liquide". Bien que les conditions d'essai soient similaires à celles des fusibles de la

Classe A, définies dans la norme CEI 60282-2, un nombre moins important de séries d'essais est requis en raison de leur courant maximal de coupure généralement limité.

4.3.2.1.6 Fusibles remplis de liquide

Un autre type de fusible non limiteur de courant qui entoure l'élément fusible de liquide désigne des "fusibles à liquide" appelés parfois des "fusibles de puissance à liquide" à usage extérieur uniquement. Ils sont généralement constitués d'un tube en verre fermé hermétiquement par des bagues à chaque extrémité. Le tube est rempli d'un liquide d'extinction d'arc, généralement du tétrachloroéthylène et/ou du trichloroéthylène. Un élément fusible court, souvent un fil ou un ruban comportant des encoches, est connecté à une extrémité du fusible. L'élément fusible est maintenu en tension par un ressort. Un câble flexible connecte l'élément fusible à la bague inférieure. Ces fusibles fonctionnent de la même manière que les fusibles immergés dans un liquide décrits en 4.3.2.1.5, excepté qu'aucun tube subissant l'ablation n'est présent pour faciliter le processus d'interruption à des courants plus élevés. Cependant, lorsque l'élément fusible fond, le ressort tire l'arc à travers le liquide, augmentant donc sa longueur. Pour soulager le tube d'une pression excessive, le fusible est équipé d'un diaphragme à l'extrémité supérieure, qui est éjecté pour tous les défauts sauf les plus faibles. Ces fusibles ont un pouvoir de coupure maximum très limité, et tendent à être remplacés par des types de fusibles plus modernes.

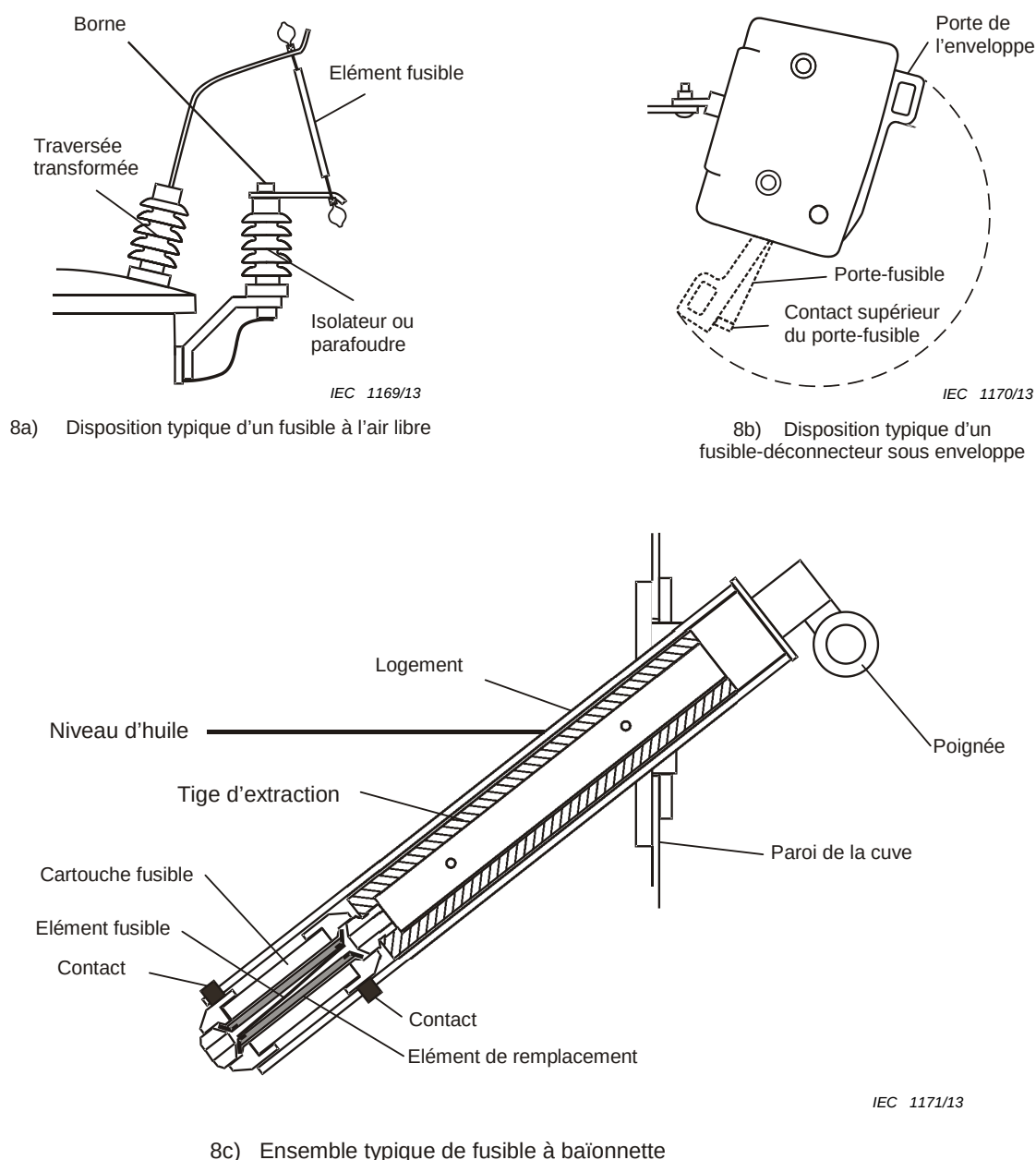


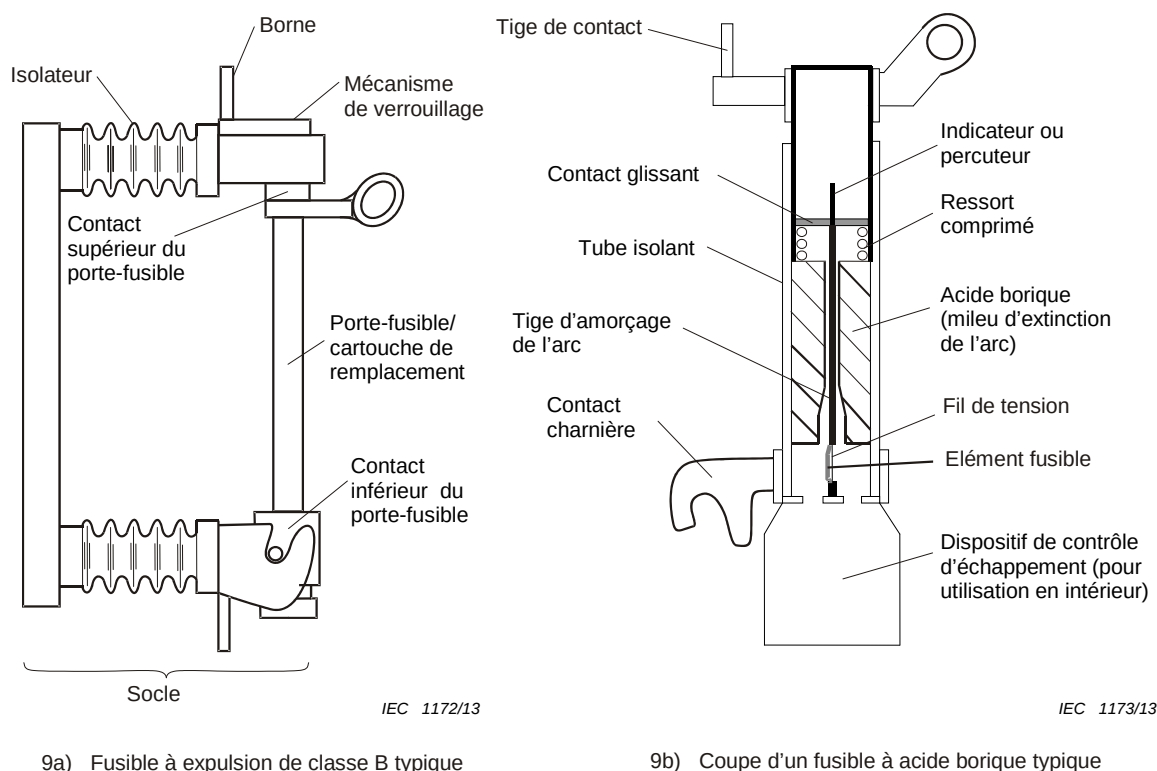
Figure 8 – Types de fusibles à expulsion

4.3.2.2 Fusibles à expulsion de Classe "B"

Ils sont communément appelés fusibles de puissance à expulsion ou fusibles à acide borique. Le type le plus courant, illustré à la Figure 9a), désigne des fusibles à expulsion dans lesquels la coupure de l'arc est effectuée en utilisant de l'acide borique qui tapisse la paroi intérieure du tube du porte-fusible. Ce procédé donne à ce type de fusibles un plus grand pouvoir de coupure dans des conditions plus défavorables que les fusibles à expulsion de Classe A. De plus, étant donné que la vapeur d'eau est le gaz principal produit pendant le processus d'interruption, certains fusibles de puissance à expulsion peuvent être munis d'un dispositif de contrôle des gaz d'échappement pour condenser la vapeur d'eau et éliminer presque totalement l'effet de ces gaz. Cela permet leur utilisation à l'intérieur et dans des enceintes, en plus de leur utilisation extérieure. Certains dispositifs de contrôle des gaz d'échappement ne nécessitent pas un déclassement du pouvoir de coupure assigné au fusible.

Bien que l'aspect extérieur des fusibles à expulsion de Classe B puisse être similaire à celui des fusibles-déconnecteurs de distribution décrits en 4.3.2.1.1, ils ont une structure intérieure plus complexe, comme le montre la vue en coupe simplifiée d'un porte-fusible type à la Figure 9b). Cette structure comporte un alésage principal pour l'interruption des courants élevés et, dans certaines conceptions (non illustrées), un alésage parallèle, plus petit, pour l'interruption des courants faibles. Un élément fusible relativement court est utilisé. Généralement, l'extrémité inférieure de l'élément fusible est fixée à l'intérieur du porte-fusible tandis que l'autre extrémité est reliée à une tige d'amorçage de l'arc attachée à un ressort comprimé. Un fil de tension est le plus souvent monté parallèlement à l'élément fusible pour maintenir la tige d'amorçage de l'arc en place. Lors de la fusion de l'élément fusible (immédiatement suivie par la fusion du fil de tension), la tige d'amorçage de l'arc tire l'arc à travers la membrane d'acide borique. Cela a pour effet d'augmenter la longueur de l'arc et la longueur d'acide borique exposé à l'arc. Les gaz produits par l'arc sont principalement de la vapeur d'eau, qui refroidit l'arc et a un effet dé-ionisant. Cet effet dé-ionisant est tel que, à un zéro naturel du courant, la rigidité diélectrique de l'intervalle d'arc est suffisante pour résister à toute tension de rétablissement transitoire et à fréquence industrielle.

Les fusibles utilisant de l'acide borique emploient généralement une cartouche de remplacement, qui contient l'élément fusible et des parties associées nécessaires pour restaurer un fusible à son état initial après un fonctionnement. Les fusibles de Classe B peuvent être à ouverture automatique, comme les fusibles-déconnecteurs de distribution, ou rester dans les pinces du fusible après fonctionnement comme la plupart des fusibles limiteurs de courant.



9a) Fusible à expulsion de classe B typique

9b) Coupe d'un fusible à acide borique typique

Figure 9 – Fusible à expulsion de Classe "B"

4.3.2.3 Considérations relatives à l'utilisation

Un critère à prendre en compte pour l'utilisation des fusibles à expulsion est que les gaz expulsés soient correctement dirigés, et que le bruit et la pression engendrés soient acceptables. Il convient de suivre les recommandations des fabricants concernant l'utilisation des fusibles à expulsion.

Les fusibles-déconnecteurs de distribution, ou d'autres types de fusibles munis d'un élément de remplacement amovible et d'un porte-fusible, n'ont pas de pouvoir de coupure en charge intrinsèque quand ils sont ouverts manuellement sauf si ils sont équipés, ou utilisés, avec des dispositifs de coupure en charge. Il existe trois moyens usuels d'effectuer une coupure en charge avec ces dispositifs. Le premier est un dispositif de coupure en charge séparé, installé sur la manette de l'interrupteur utilisée pour ouvrir le fusible. Dans ce cas, aucune modification du fusible n'est requise. Le second moyen est un dispositif de coupure en charge, installé sur le socle. A l'ouverture du fusible, le courant de charge est d'abord conduit par le dispositif séparé, qui effectue alors l'interruption, souvent à l'aide d'un contact à ressort et de matières émettrices de gaz. Un troisième moyen consiste à utiliser un mécanisme de rupture de l'élément de remplacement. Dans ce cas, l'élément de remplacement du fusible-déconnecteur est rompu mécaniquement, et l'interruption de courant est réalisée à travers le processus usuel d'extinction d'arc. Il convient de noter que certains éléments de remplacement utilisent un élément fusible spiralé en argent qui peut être trop long pour être rompu par ce moyen. Quand aucun moyen de coupure en charge n'est employé, ce qui est souvent le cas, on ne peut pas garantir qu'au moment de l'ouverture, même pour des charges très faibles, le fusible-déconnecteur éliminera le courant sans dommage. Dans ce cas, il convient de déconnecter la ligne, en amont du dispositif, avant un fonctionnement manuel.

4.3.3 Classification des fusibles à expulsion

Au moment du choix de la Classe et du type de fusible qu'il convient d'utiliser à un endroit particulier, des facteurs tels que la puissance fournie, les propriétés diélectriques de l'équipement protégé, les rapports X/R , les courants de défaut disponibles, et la sévérité de la tension transitoire de rétablissement (TTR) doivent être pris en considération. Ce qui suit peut être pris en compte comme guide général.

- Classe A (désignée comme "Classe de distribution" dans les normes IEEE)
Ces fusibles sont généralement utilisés pour la protection des petits transformateurs et des petites batteries de condensateurs, pour la correction du facteur de puissance ou le contrôle de la tension, situés sur des réseaux de distribution d'énergie aériens ou souterrains à distance des grandes sous-stations. Ils sont aussi utilisables comme dispositifs de protection aux points de tronçonnement de ces réseaux. Les conditions de TTR sont décrites par les paramètres d'essai de TTR, avec des valeurs plus faibles d' u_c et des valeurs plus longues t_3 que celles applicables aux fusibles de Classe B. Ils sont généralement utilisés dans des applications monophasées, mais conviennent à des applications triphasées où les aptitudes élevées des fusibles (de puissance) de Classe B ne sont pas requises et où les exigences relatives à d'autres applications sont respectées.
- Classe B (désignée comme "Classe de puissance" dans les normes IEEE)
Ces fusibles sont généralement utilisés pour la protection des équipements analogues à ceux protégés par les fusibles de Classe A, mais à plus grande proximité d'une sous-station importante d'alimentation, et pour les lignes partant de ces sous-stations. Les conditions de TTR sont plus sévères que celles des fusibles de Classe A et les paramètres d'essais spécifiés de TTR sont donc plus sévères. Ils sont plus susceptibles d'être utilisés dans des applications triphasées et dans des sous-stations, des cabines ou des postes souterrains où une grande quantité d'énergie électrique est fournie à un réseau de distribution ou à une installation qui consomme beaucoup d'énergie. Ils sont généralement utilisés dans la partie du réseau où des propriétés diélectriques élevées sont requises pour tous les équipements. Ils peuvent également être utilisés dans des applications monophasées dans un lieu où les fusibles de distribution seraient normalement employés, mais où on envisage des défauts sévères, des rapports X/R élevés, ou des TTR critiques.

4.3.4 Caractéristiques assignées des fusibles à expulsion

4.3.4.1 Courant assigné

Le courant assigné d'un fusible à expulsion est égal au courant assigné de l'élément ou de la cartouche de remplacement utilisé(e). Le courant assigné d'un élément de remplacement doit être le courant maximal qu'un élément de remplacement neuf peut supporter en permanence

sans que sa température ou son échauffement ne dépasse les valeurs spécifiées, lorsqu'il est monté sur un socle, et éventuellement dans un porte-élément de remplacement spécifié par le fabricant, à une température de l'air ambiant ne dépassant pas 40 °C ou conforme aux spécifications du fabricant. Lorsque la température environnante est plus élevée que la température spécifiée, des facteurs d'ajustement en fonction de la température environnante sont normalement indiqués par le fabricant (voir 5.1.1.3).

4.3.4.2 Tension assignée

Les tensions du réseau varient beaucoup; cependant, il convient que l'une des tensions normalisées du fusible soit adaptée. Dans tous les cas, il convient de choisir une tension assignée de fusible égale ou supérieure à la tension maximale appliquée au fusible en cours de fonctionnement. En général, il peut être déclaré que la tension assignée d'un fusible doit être plus élevée que la tension maximale du réseau mesurée entre phases, dans le cas de circuits triphasés, et à la tension phase-neutre, dans le cas de circuits monophasés. Cependant, dans certains endroits, l'expérience de fonctionnement a amené à utiliser des fusibles ayant une tension assignée supérieure ou égale à la tension phase-neutre dans certaines applications triphasées (généralement celles ayant un neutre directement à la terre). Il doit cependant être reconnu que certaines conditions et hypothèses doivent se vérifier pour que ce soit possible, et des essais supplémentaires effectués par le fabricant peuvent être requis. Dans certains cas, les fusibles sont soumis à essai dans l'intention de les utiliser uniquement dans des circuits triphasés. Lorsque ces dispositifs sont utilisés dans des circuits monophasés, des considérations particulières relatives au choix de la tension des fusibles s'appliquent (voir 5.1.3.2).

En règle générale, les fusibles à expulsion peuvent être utilisés à toute tension inférieure à leur tension assignée sans conséquences négatives.

4.3.4.3 Courant maximal de coupure assigné

Le courant maximal de coupure assigné à un fusible et à un porte-fusible est le courant maximal de coupure (en ampères symétriques efficaces) spécifiés lors des essais conformément à la norme applicable (suite d'essais 1 ou I_1). C'est le courant le plus élevé que le fusible s'est montré capable d'interrompre dans des conditions spécifiées de fréquence, de courant alternatif, de TTR, de tension de rétablissement à fréquence industrielle et de facteur de puissance (ou X/R).

Les facteurs de puissance spécifiés sont généralement plus sévères que ceux expérimentés sur les réseaux d'alimentation réels. Dans les rares cas où le facteur de puissance d'un réseau est inférieur à celui spécifié dans les essais du fusible, un déclassement du pouvoir de coupure assigné peut être nécessaire. Il convient alors de consulter le fabricant.

Dans beaucoup d'applications, le courant de défaut disponible est dans les limites du courant maximal de coupure d'un seul fusible à expulsion. Dans certaines applications, particulièrement lorsqu'on utilise des fusibles de Classe A, le courant de défaut disponible peut être supérieur au courant maximal de coupure d'un seul fusible. Dans ce cas, il est assez fréquent d'ajouter un fusible limiteur de courant en série pour interrompre les courants plus élevés que le courant maximal de coupure assigné au fusible. Le fusible à expulsion est alors utilisé pour éliminer les courants de défaut faibles, inférieurs au courant minimal de coupure du fusible associé. La coordination entre ces deux dispositifs est traitée dans 5.1.4.2.4 et 5.2.2.4.

Les fusibles de Classe B étant souvent utilisés dans les applications triphasées, certains fabricants fournissent des caractéristiques assignées de coupure triphasée équivalentes, de sorte qu'on puisse les comparer avec d'autres types de dispositifs de coupure ayant un pouvoir de coupure assigné de courants triphasés.

4.3.4.4 Fréquence assignée

Les valeurs normalisées de fréquence assignée sont 50 Hz, 50/60 Hz et 60 Hz. Des essais sont effectués à des fréquences comprises entre 48 Hz et 52 Hz pour des fusibles ayant des valeurs de fréquence assignée de 50 Hz et 50/60 Hz, et à des fréquences comprises entre 58 Hz et 62 Hz pour des fusibles ayant une valeur de fréquence assignée de 60 Hz. Ils peuvent être utilisés dans des systèmes ayant des fréquences comprises entre 48 Hz et 62 Hz pour des fusibles ayant des valeurs de fréquence assignée de 50 Hz et 50/60 Hz, et à des fréquences comprises entre 58 Hz et 62 Hz pour des fusibles ayant une valeur de fréquence assignée de 60 Hz. Les fusibles à expulsion sont donc adaptés à une utilisation à des fréquences plus élevées que leurs fréquences assignées, mais pas à des fréquences inférieures. Ceci est dû au fait que les fusibles à expulsion sont sensibles au I^2t avant qu'un zéro de courant ne soit atteint. Le I^2t pendant la première période d'un courant entièrement asymétrique, ayant la même valeur de courant efficace symétrique, est de 20 % plus élevée à une fréquence de 50 Hz qu'à une fréquence de 60 Hz.

4.3.5 Caractéristiques des fusibles à expulsion

Les fabricants de fusibles à expulsion fournissent deux caractéristiques de fonctionnement de leurs fusibles. Ce sont la courbe caractéristique temps-courant de préarc (fusion) et la courbe caractéristique temps-courant de fonctionnement (coupure totale).

Pour les besoins des études de coordination (voir 5.1 et 5.2) une courbe temps-courant minimum de préarc est normalement requise. Si seulement une courbe nominale est disponible, la courbe minimale peut généralement être considérée comme étant de 10 % inférieure à la courbe nominale (en termes de courant) bien que pour certains types d'éléments fusibles, on obtienne une tolérance de 5 %. Il convient de consulter le fabricant pour plus d'informations. La courbe caractéristique temps-courant de fonctionnement représente la courbe temps-courant maximum de préarc (courbe nominale plus tolérances maximales) plus la durée d'arc du fusible. Cette courbe est également requise pour réaliser des études de coordination.

En plus de désigner un courant assigné à un fusible et à un élément de remplacement, les fabricants désignent chaque courbe caractéristique temps-courant avec un code alphabétique. Si certains de ces codes alphabétiques sont propres à un ou plusieurs fabricants, il existe deux types d'éléments de remplacement qui sont désignés comme "type T" ou "type K", selon leur conformité à des caractéristiques temps-courant de préarc spécifiques. Ces caractéristiques sont spécifiées dans les normes (par exemple, la norme CEI 60282-2:2008 et l'IEEE C37.42 [7]) sous la forme de "portes". Ces portes sont désignées à 0,1 s, 10 s, et 300 s ou 600 s (selon le courant assigné). A chaque temps désigné, des courants minimum et maximum sont spécifiés pour chaque courant assigné. Pour être conforme avec les caractéristiques assignées d'un élément de remplacement de type "K" ou "T", la courbe caractéristique temps-courant de préarc doit se situer entre les valeurs maximale et minimale.

Une telle désignation peut permettre l'interchangeabilité entre les éléments de remplacement des différents fabricants pour être utilisés dans des fusibles-déconnecteurs de distribution. Cependant, comme il est noté dans la définition de l'interchangeabilité des éléments de remplacement de la norme CEI 60282-2:2008, les performances de protection et de coupure fournies par la combinaison constituée de l'élément de remplacement et du porte-fusible sélectionnés peuvent uniquement être garanties par des essais de performance de cette combinaison spécifique.

La différence entre les courbes caractéristiques temps-courant de préarc des éléments de remplacement K et T se situe aux temps de fusion plus courts. Les "portes" des temps les plus longs (600 s pour un élément de remplacement de plus de 100 A et 300 s pour 100 A et moins) sont les mêmes pour les éléments de remplacement de types K et T. Cependant, si les éléments de remplacement de types K et T sont comparés à une durée de préarc plus courte, l'élément de remplacement de type T nécessite un courant plus élevé pour produire la fusion. Les éléments de remplacement de type T sont donc déclarés plus "lents" et présentent donc

une meilleure résistance aux surcharges pour une même courbe caractéristique temps-courant de préarc à une durée plus longue. Les éléments de remplacement de type T sont donc souvent utilisés dans des applications pour condensateurs. Lorsqu'une protection contre les surcharges plus élevées n'est pas nécessaire, les éléments de remplacement plus rapides de type "K" sont souvent employés pour fournir, par exemple, une protection plus rapprochée des transformateurs. La vitesse, ou rapport de vitesse, est défini comme le rapport entre un courant pris sur la courbe caractéristique temps-courant minimum de préarc du fusible (normalement à 0,1 s) et le courant à 300 s (ou 600 s). Ainsi, pour un élément de remplacement de type K de 100 A, le rapport est de 7,6 alors que pour un type T de 100 A, il est de 13,1. L'élément de remplacement de type T de 100 A nécessite donc environ 72 % de courant supplémentaire pour provoquer la fusion en 0,1 s qu'un élément de remplacement de type K de 100 A.

4.4 Autres appareils de protection associés

4.4.1 Généralités

Bien qu'en théorie tous les fusibles soient soumis à des essais conformément aux normes de la CEI (ou d'autres normes dérivées telles que la norme IEEE C37.41 [6]), il existe des appareils apparentés ou associés aux fusibles qui peuvent ne pas avoir été adéquatement testés si seuls les essais actuellement spécifiés sont effectués sur ces derniers. Ces appareils et les essais nécessaires supplémentaires peuvent ne pas être reconnus par les normes pour différentes raisons, y compris le fait d'être le produit d'un fabricant unique ou d'être produit en des quantités insuffisantes ne permettant pas de justifier la création d'une norme. En réalité, on pense que plusieurs des appareils cités en 4.4 ne sont désormais plus fabriqués. Toutefois, une brève description sera donnée par souci d'exhaustivité, mais aussi, car il se peut qu'ils soient toujours en service (les remplacer par des appareils plus modernes peut donc être nécessaire). Cependant, étant donné qu'ils ne sont pas pleinement traités dans les normes, très peu d'informations relatives à leur utilisation seront fournies. Il convient de consulter le fabricant d'un tel appareil pour obtenir des informations relatives à son utilisation.

Les appareils qui seront abordés sont regroupés dans deux grandes catégories: les appareils activés électroniquement et les appareils non-limiteurs de courant.

4.4.2 Appareils activés électroniquement

4.4.2.1 Fusibles et appareils apparentés aux fusibles

L'une des variétés d'appareils limiteurs de courant est communément appelée limiteurs de courants à commutation, limiteurs de courant déclenchés ou encore fusibles activés électroniquement. Lorsque ce rapport a été publié, ils ont été soumis à un PWI (Preliminary Work Item) de la CEI intitulé "Dispositifs de commutation limiteurs de courant, à fusibles intégrés, pour les applications à fort courant". Ces appareils conduisent le courant dans un circuit à très basse impédance par rapport aux éléments fusibles typiques. Par conséquent, le courant assigné est supérieur à celui que les fusibles limiteurs de courant traditionnels peuvent obtenir. Par rapport aux fusibles conventionnels, ces appareils sont relativement complexes et onéreux, mais ils sont utilisés là où de grands courants assignés ainsi qu'un certain niveau de limitation du courant sont exigés. Ainsi, il est possible de protéger des transformateurs de plus grande taille que ceux protégés avec des fusibles limiteurs de courants traditionnels. Un schéma de ce type de fusible est représenté à la Figure 10. Lors de l'occurrence d'un défaut, ce chemin principal de courant est ouvert (par exemple, par une charge pyrotechnique) et le courant de défaut est commuté vers un fusible limiteur de courant en parallèle, avant la première crête. Le fusible en dérivation, d'un modèle traditionnel de limiteur de courant, interrompt le circuit. Pendant que le fusible parallèle fond, produit un arc et interrompt le circuit, le chemin parallèle à fort courant doit développer un niveau de tenue diélectrique afin de pouvoir résister à la tension d'arc produite par le fusible. Ces appareils sont généralement dotés d'une détection électronique pour que la commutation rapide du conducteur principal puisse se produire. L'électronique peut également être utilisée pour activer sélectivement l'interruption en mode non limiteur de courant.

Un autre modèle de fusible non commutant qui utilise l'augmentation du processus normal de fusion de l'élément pour réaliser la coupure de faibles courants est représenté à la Figure 11. L'élément fusible possède un capteur de surintensité (le point noir) qui réalise la TCC (caractéristique temps-courant) du fusible. Plusieurs charges chimiques pyrotechniques sont situées à des points stratégiques tout au long de l'élément fusible. Ces charges sont allumées en faisant traverser le courant au moment voulu. Dans des conditions normales, ce circuit est isolé au moyen d'un éclateur à air. Lorsque l'élément principal s'ouvre, la tension d'arc du fusible amorce l'éclateur et allume les charges, sectionnant ainsi l'élément pour créer une série d'arcs nécessaire à l'interruption des courants de faible intensité. Ce type de fusible peut également être déclenché par un module de contrôle auxiliaire de manière identique à un fusible à commutation. On pense que ce type de fusible n'est plus fabriqué.

Le National Electrical Code (NEC) (NFPA 70-1999 [11]) des Etats-Unis est une norme nationale qui définit "un fusible activé électroniquement" (mais elle ne fournit aucune consigne quant à ses essais). Selon cette norme, un appareil de protection contre les surintensités consiste généralement en un module de contrôle, qui fournit une détection du courant, des TCC (caractéristique temps-courant) obtenues par voie électronique, une énergie pour contrôler le déclenchement et un module d'interruption qui interrompt le courant en cas de surintensité. Les fusibles activés électroniquement peuvent ou non limiter le courant en fonction du type de contrôle sélectionné.

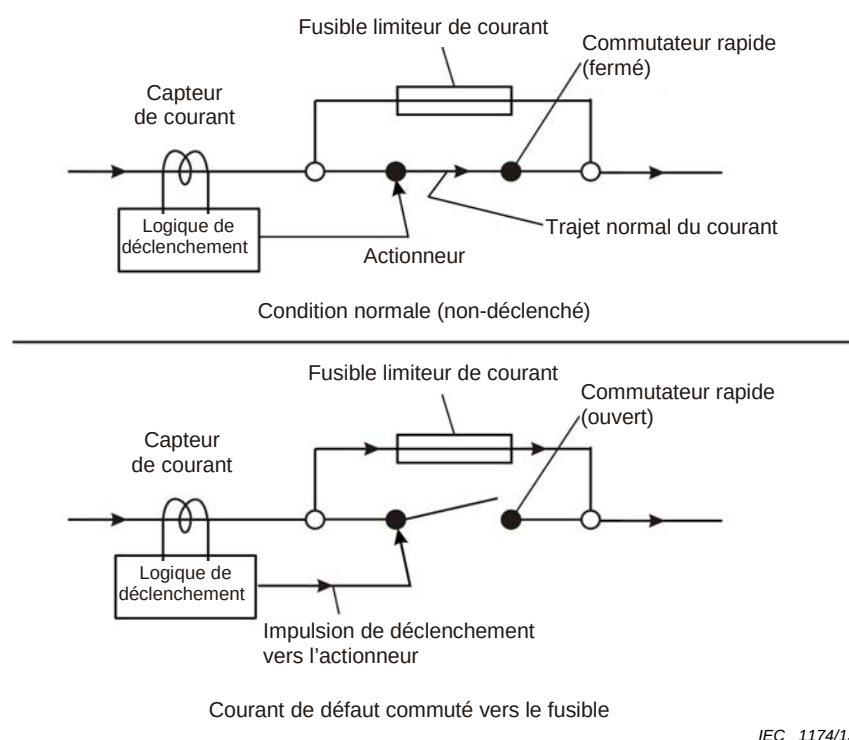
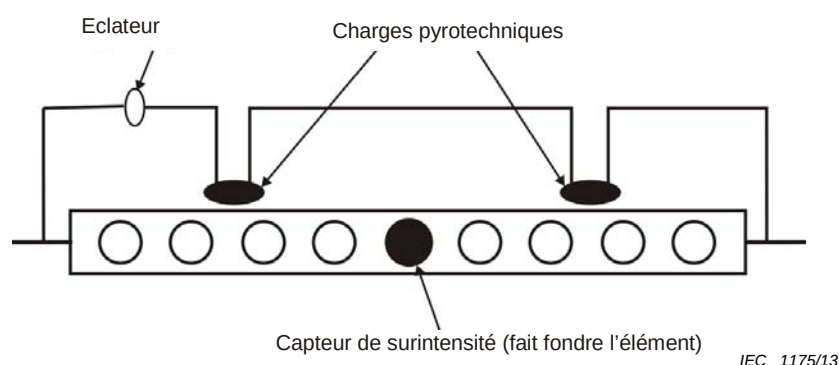


Figure 10 – Schéma d'un limiteur de courant de type commutant



IEC 1175/13

Figure 11 – Schéma d'un fusible assisté par un système pyrotechnique

4.4.2.2 Sectionneurs automatiques

Les sectionneurs automatiques électroniques sont conçus pour remplacer le tube porte-fusible normal d'un fusible à expulsion. Les liaisons contiennent un circuit électronique capable de faire la distinction entre les défauts transitoires sans danger et les vrais défauts permanents. Dans le cas de ces derniers, la liaison se déverrouille et bascule pour fournir une distance d'isolement et une signalisation visuelle. La liaison n'a pas de capacité d'interruption, mais elle fonctionne pendant le "creux de tension" fourni par l'appareil de protection en amont (normalement un réenclencheur). Bien qu'il ne s'agisse pas vraiment d'un "fusible", ils sont inclus dans cette catégorie, car ils utilisent le socle d'un fusible-déconnecteur de distribution. Un autre appareil non apparenté à un fusible qui utilise ce socle est le "coupe-circuit de sectionnement" (voir IEEE C37.41 [6]) dans lequel le porte-fusible est remplacé par une lame solide. Il est utilisé pour la commutation et l'isolation des circuits (normalement, quand il est utilisé avec un appareil de commutation externe approprié).

4.4.3 Autres types de fusibles non-limiteurs de courant

4.4.3.1 Fusibles à cornes

Les fusibles à cornes sont des appareils très simples dans lesquels deux rubans métalliques coudés ou incurvés sont fixés sur des isolateurs et connectés au moyen d'un fil fusible (élément fusible). Le fil peut être ouvert à l'air libre ou confiné dans un tube en verre pour une protection environnementale. Chaque ruban est connecté au circuit afin qu'en cas de surcharge, l'élément fusible fonde et produise un arc. L'interaction naturelle entre l'arc et le champ magnétique produit par le courant propulse l'arc au-dessus des "cornes", étendant ainsi l'arc. Lorsque l'arc est assez long, il s'éteint au passage naturel du courant par zéro. Étant donné que les arcs à haute tension assez longs sont relativement stables, ces appareils ont un très faible courant maximal de coupure. Bien qu'ils ne soient généralement pas soumis à des essais conformément aux normes de la CEI ou de l'IEEE, ils sont amplement utilisés dans les pays en voie de développement en raison de leur bas prix.

4.4.3.2 Fusibles SF₆

Les fusibles SF₆ sont dotés d'un tube rempli de gaz diélectrique d'hexafluorure de soufre et de contacts axiaux reliés par l'élément fusible. Les fusibles SF₆ ont des capacités d'interruption du circuit similaires à celles des fusibles à expulsion. On estime que ce type de fusible n'est plus fabriqué.

4.4.3.3 Fusibles à vide

Les fusibles à vide possèdent généralement un élément fusible très court attaché à deux plateaux tournants opposés fixés à l'intérieur d'un pot isolant. Les fusibles à vide ont des capacités d'interruption similaires à celles des fusibles à expulsion. On estime que ce type de fusible n'est plus fabriqué.

4.4.3.4 Coupe-circuits à fusible de distribution en bain d'huile

Les coupe-circuits à fusible de distribution en bain d'huile fonctionnent de manière similaire aux fusibles à expulsion submergés dans un liquide. Le coupe-circuit à fusible en bain d'huile contient généralement un porte-fusible (tube) fixé sur une structure tournante avec des contacts sur chaque extrémité afin qu'il puisse être utilisé tant comme interrupteur avec coupure en charge que comme appareil de protection. Les contacts, le porte-fusible et l'élément fusible sont submergés dans l'huile dans un caisson capable de résister à de très fortes pressions. Lorsque l'élément fond, ses extrémités sont enlevées du porte-fusible par un jet d'huile vaporisée. L'hydrogène gazeux généré grâce à l'huile dissociée refroidit la zone de l'arc et provoque une dé-ionisation rapide des gaz dans la zone de l'arc, entraînant ainsi l'interruption du circuit au passage du courant par zéro. Le porte-fusible peut également produire des effets ablatifs pour faciliter le processus d'interruption. Il convient de noter que ces appareils, bien qu'ils puissent toujours être en service, sont considérés comme obsolètes dans certaines régions. Bien qu'officiellement reconnues par les normes de l'IEEE, par exemple, les références en termes d'essai de ces appareils ont été supprimées des normes actuelles.

4.5 Socle (support de fusibles)

4.5.1 Généralités

Un socle, également appelé support de fusible, est doté de toutes les pièces nécessaires pour assembler un élément de remplacement ou un porte-fusible aux isolateurs et bornes. Le socle apporte les propriétés diélectriques d'un fusible. Il convient de noter que certains types d'éléments de remplacement sont fournis pour être montés par l'utilisateur, par exemple certains éléments de remplacement à expulsion immergés dans un liquide ou limiteurs de courant et certains éléments de remplacement limiteurs de courant externes fixés sur des traversées, des fusibles-déconnecteurs de distribution ou fixés directement aux conducteurs aériens de distribution. Lorsque seul l'élément de remplacement est fourni, car ce dernier n'a pas de propriété diélectrique inhérente, le constructeur peut ne pas effectuer d'essai diélectrique d'un élément de remplacement seul.

Il convient d'installer les fusibles en respectant les instructions du constructeur. Pour les dispositions multipolaires de fusibles, lorsque la distance entre pôles n'est pas fixée par la construction, il est recommandé de monter les pôles à des distances au moins égales à celles spécifiées par le constructeur du fusible et/ou de l'équipement.

4.5.2 Propriétés d'isolation

Les propriétés d'isolation des fusibles se basent sur celles du socle (porte-fusible ou support de fusible). Le niveau d'isolation assigné d'un socle s'exprime en valeurs de tension (fréquence industrielle et impulsion), qui caractérisent l'isolation d'un socle relative à ses capacités de résistance aux contraintes diélectriques. Les normes CEI 60282-1 et CEI 60282-2 distinguent des groupes de tensions recommandées, la série I étant basée sur les tensions européennes habituelles et la série II sur les tensions nord-américaines habituelles.

Deux niveaux d'isolement sont acceptables pour un socle selon la pratique en Europe (voir Tableau 4 des normes CEI 60282-1 et CEI 60282-2). Ils sont destinés aux tensions de la série I et sont intitulés "Liste 1" (valeurs inférieures) et "Liste 2" (valeurs supérieures). Ils sont liés à différentes sévérités d'utilisation et correspondent à différentes valeurs de tension d'essai pour les essais diélectriques. Il convient de choisir entre la Liste 1 (valeurs inférieures) et la Liste 2 (valeurs supérieures), en considérant le degré d'exposition aux surtensions de foudre et de manœuvre, le mode de mise à la terre du neutre du réseau et le type d'appareil de protection contre les surtensions (voir CEI 60071-1).

Le matériel répondant à la Liste 1 convient à des installations telles que celles indiquées ci-dessous:

- a) dans les réseaux et dans les installations industrielles non reliés à des lignes aériennes:

- 1) dont le neutre est mis à la terre, soit directement, soit par une bobine dont l'impédance a une valeur faible par rapport à celle d'une bobine d'extinction. Des dispositifs de protection contre les surtensions, tels que des parafoudres, ne sont généralement pas nécessaires;
- 2) dont le neutre est mis à la terre par une bobine d'extinction et lorsqu'une protection convenable contre les surtensions est prévue dans des réseaux particuliers, par exemple un réseau étendu de câbles où des parafoudres aptes à décharger la capacité des câbles peuvent être nécessaires;
- b) dans les réseaux et dans les installations industrielles reliés à des lignes aériennes par l'intermédiaire de transformateurs pour lesquels il existe des câbles ou des capacités additionnelles d'au moins 0,05 mF par phase connectés entre les bornes secondaires du transformateur et la terre, côté transformateur par rapport aux fusibles et aussi près que possible des bornes du transformateur. Cela couvre le cas des réseaux:
 - 1) dont le neutre est mis à la terre, soit directement, soit par une bobine dont l'impédance a une valeur faible par rapport à celle d'une bobine d'extinction. Une protection contre les surtensions au moyen de parafoudres peut être souhaitable;
 - 2) dont le neutre est mis à la terre par une bobine d'extinction, et sur lesquels une protection convenable contre les surtensions est assurée par des parafoudres;
- c) dans les réseaux et dans les installations industrielles reliés directement à des lignes aériennes:
 - 1) le neutre est mis à la terre soit directement soit par une bobine dont l'impédance a une valeur faible par rapport à celle d'une bobine d'extinction et sur lesquels existe une protection convenable contre les surtensions, soit par éclateurs, soit par parafoudres, adaptée à la probabilité de l'amplitude et de la fréquence des surtensions;
 - 2) dont le neutre est mis à la terre par une bobine d'extinction, et sur lesquels une protection convenable contre les surtensions est assurée par des parafoudres.

Dans tous les autres cas, ou lorsqu'on exige un très haut degré de sécurité, il convient d'utiliser le matériel répondant à la Liste 2.

NOTE En cas d'utilisation de tensions de tenue assignées aux chocs de foudre de la Liste 1, un accord entre le constructeur et l'utilisateur peut être nécessaire en ce qui concerne les valeurs maximales des surtensions de fonctionnement spécifiées.

Le tableau des valeurs spécifiées pour les fusibles de tension de la série II n'indique pas de valeur assignée de tension de tenue au choc de foudre inférieure et supérieure pour chaque tension. Cependant, il distingue les fusibles à expulsion de Classe A et de Classe B. Les fusibles de Classe A (généralement des fusibles-déconnecteurs de distribution) ayant des tensions comparables à celles de la Série I ont des tensions de choc de foudre légèrement supérieures à celles de la "Liste 1" pour des tensions de 15 kV et des valeurs similaires à celles de la Liste 2 pour des tensions supérieures. Les fusibles à expulsion de classe B et les fusibles limiteurs de courant ont des valeurs légèrement supérieures à celles de la Liste 2 pour les fusibles d'intérieur et d'extérieur de n'importe quelle tension.

Les tableaux figurant dans les normes d'essai indiquent des valeurs de tenue "sur la distance de sectionnement". Ces valeurs sont uniquement valables pour les socles où la distance d'isolement entre contacts ouverts est conçue pour satisfaire aux exigences diélectriques spécifiées pour les sectionneurs (voir CEI 62271-102).

Les niveaux d'isolement assignés peuvent aussi être choisis dans les valeurs supérieures à celles correspondant à la tension assignée du fusible ou du socle.

Le constructeur indiquera si le fusible est utilisable à l'intérieur et/ou à l'extérieur.

Il est recommandé que la tension assignée du socle choisi soit égale "à la tension la plus élevée d'un matériel" (CEI 60038) et soit sélectionnée à partir du tableau des tensions assignées fourni par les normes CEI 60282-1 et CEI 60282-2 (c'est-à-dire qu'il convient qu'elle soit au moins égale à la tension de service phase-phase la plus élevée du système

polyphasé ou monophasé.) Il convient de noter que le fait d'effectuer avec succès les essais de tenue diélectrique ne prouve pas qu'un coupe-circuit donnant une distance de sectionnement en position d'ouverture amorcera, dans tous les cas, à la masse et non sur la distance de sectionnement, lorsqu'il est ouvert.

4.5.3 Courant assigné

Le courant assigné d'un socle est un courant qu'un socle neuf et propre pourra conduire en permanence, sans dépasser les températures spécifiées et les échauffements, lorsqu'il est équipé d'un élément de remplacement ou d'un porte-fusible de même courant assigné conçu pour être utilisé dans le socle. Le socle est connecté au circuit au moyen de conducteurs spécifiés de différentes tailles et longueurs et il est à une température ambiante n'excédant pas 40 °C.

Les valeurs recommandées du courant assigné du socle sont 50 – 100 – 200 – 315 – 400 et 630 A pour les fusibles à expulsion et 10 – 25 – 63 – 100 – 200 – 400 – 630 et 1000 A pour les fusibles limiteurs de courant.

5 Section utilisation

5.1 Informations générales sur l'utilisation

5.1.1 Considérations relatives au fonctionnement

5.1.1.1 Température

5.1.1.1.1 Généralités

Les fusibles répondant aux normes de la CEI sont destinés à être utilisés dans les conditions suivantes:

a) conditions générales, tous types de fusibles à haute tension:

Les appareils conformes aux normes correspondantes sont assignés pour une utilisation à une altitude n'excédant pas 1 000 m et la fréquence du réseau d'énergie est de 50 ou 60 Hz;

b) fusibles limiteurs de courant:

- la température maximale de l'air ambiant est de 40 °C et sa valeur moyenne mesurée sur une période de 24 h ne dépasse pas 35 °C;
- les éléments de remplacement destinés à être utilisés à des températures supérieures à 40 °C (dus soit à une température ambiante supérieure à 40 °C soit à une utilisation dans une enveloppe) doivent se conformer à des normes supplémentaires, voir 9.1.1.2;
- la température minimale de l'air ambiant est de –25 °C.

c) fusibles à expulsion:

- la température maximale de l'air ambiant est de 40 °C et sa valeur moyenne mesurée sur une période de 24 h ne dépasse pas 35 °C;
- étant donné que les fusibles à expulsion sont souvent utilisés à l'extérieur, il faut également que le rayonnement solaire n'excède pas 1 kW/m²;
- lorsque les fusibles à expulsion sont utilisés à l'intérieur, les valeurs recommandées de température ambiante minimale sont –5 °C, –15 °C et –25 °C;
- pour une utilisation à l'extérieur, les valeurs minimales recommandées sont –10 °C, –25 °C, –30 °C et –40 °C.

5.1.1.1.2 Température d'utilisation

Les normes internationales reconnaissent que les fusibles peuvent être conçus et soumis à des essais pour être compatibles avec deux catégories de conditions de fonctionnement habituel. La différence entre les conditions réside dans la valeur de la température maximale d'utilisation (MAT) assignée au fusible par son constructeur.

- a) S'il n'est pas prévu qu'un fusible soit utilisé dans des conditions où la température du milieu en contact direct avec le fusible est supérieure à 40 °C, les conditions de fonctionnement habituel listées dans 5.1.1.1.1 s'appliquent. Les essais d'interruption (de coupure) sont réalisés selon les températures prédominantes du lieu de l'essai (dans les conditions de fonctionnement du fusible). Cela comprend les utilisations extérieures dans la plupart des régions du monde et les utilisations dans de grandes enveloppes où la circulation autour du fusible est relativement libre (en cellule par exemple).
- b) Si le constructeur assigne un fusible comme étant compatible avec une utilisation à une température environnante supérieure à 40 °C, la deuxième catégorie de conditions s'applique, la température environnante acceptable allant à présent de –25 °C/–40 °C à la température d'application maximale spécifiée par le constructeur. Les fusibles compatibles avec cette deuxième catégorie de conditions sont soumis aux mêmes essais que ceux des fusibles de la première catégorie ainsi qu'à des essais d'interruption du courant réalisés à la température d'application maximale du fusible (avec quelques exceptions pour les fusibles à expulsion).

Etant donné que les températures environnantes supérieures à 40 °C surviennent généralement lorsque le fusible est installé dans une enveloppe, ce dernier essai est souvent appelé "essai de fusibles en enveloppes". Si le fusible est dans un boîtier relativement étroit, ou si le boîtier modifie considérablement le flux thermique à partir du fusible, il est normalement nécessaire de soumettre à un essai le "boîtier fusible/enveloppe" (FEP), c'est-à-dire la combinaison du fusible et de l'enveloppe. L'essai du FEP peut être exigé même si la température d'application maximale du FEP n'est pas supérieure à 40 °C et si, à l'intérieur du FEP, le fusible est soumis à des températures environnantes immédiates supérieures à 40 °C et à des températures différentes de celles auxquelles il serait soumis à l'air libre ou dans un liquide.

Bien entendu, plus la température environnante est élevée, plus ses effets sur le fusible et ses caractéristiques seront importants. Voir l'Annexe A pour obtenir des conseils sur le déclassement des fusibles limiteurs de courant à des températures environnantes élevées.

Il convient de noter que selon la CEI, "température ambiante" signifie la température extérieure, donc la température extérieure à toute enveloppe. Selon d'autres normes, la température ambiante est utilisée pour la température du fluide (liquide ou gaz) en contact avec le fusible lui-même. Etant donné qu'ambient provient du Latin "qui circule autour", les deux interprétations sont légitimes, mais la différence peut semer la confusion. Dans le présent rapport, le terme "température environnante" est donc fréquemment utilisé pour désigner la température du fluide qui refroidit le fusible.

5.1.1.1.3 Influence de la température sur le courant assigné (courant permanent assigné) et le courant permanent admissible

Le courant assigné d'un fusible (courant assigné à un élément de remplacement ou à un socle) est le courant maximal que le fusible peut conduire dans des conditions normales de fonctionnement sans dépasser les températures maximales spécifiées dans les normes correspondantes et sans risque de détérioration sur le long terme des éléments fusibles. Ce dernier point est important, car pour se protéger contre une telle détérioration, de nombreux modèles de fusible se verront assigner des caractéristiques de courant largement inférieures. Le fusible atteindra ainsi le seuil de température autorisé par la norme (en réalité certains modèles de fusibles à coupure intégrale sont conçus pour fondre avec des courants de surcharge qui empêchent les contacts du fusible d'atteindre la température maximale autorisée). Par conséquent, selon la température donnée du milieu de refroidissement entourant le fusible, un modèle particulier de fusible peut recevoir en permanence un courant plus élevé, ou uniquement un courant plus faible, que son courant assigné. Le courant qu'un

fusible peut recevoir en permanence, à une température environnante particulière, sans détérioration et sans excéder les températures spécifiées, est défini comme étant son "courant permanent admissible". Lorsque les constructeurs assignent ces caractéristiques à leurs fusibles, les informations sont généralement sous la forme de facteurs de déclassement (surclassement) appliqués au courant assigné du fusible ou présentées sous forme de tableau des caractéristiques du courant liées à la température.

5.1.1.1.4 Influence de la température sur les caractéristiques temps-courant

La courbe des caractéristiques temps-courant (TCC) d'un fusible est déterminée à une température ambiante comprise entre 15 et 30 °C et est dessinée pour 20 °C. Si la température du milieu environnant diffère, une modification des TCC peut survenir, avec des températures plus élevées provoquant la fusion accélérée du fusible pour un courant donné. Le degré de modification des TCC d'un fusible dépend du modèle individuel du fusible et est différent selon les types de fusibles. Les facteurs d'ajustement de la température ambiante/environnante sont généralement disponibles auprès du constructeur.

L'aspect le plus préoccupant concerne généralement la modification apportée aux caractéristiques de fusion lente des fusibles, puisqu'elle peut changer la façon dont un fusible est affecté par une surcharge.

5.1.1.2 Fusibles limiteurs de courant dans les enveloppes

5.1.1.2.1 Généralités

De nombreuses applications nécessitent l'utilisation de fusibles limiteurs de courant dans des enveloppes où le fusible et les contacts associés peuvent être soumis à des températures ambiantes supérieures à 40 °C. D'autres applications peuvent nécessiter l'immersion du fusible dans un liquide tel que de l'huile diélectrique pouvant atteindre des températures assez élevées. Il convient que les fusibles limiteurs de courant conçus pour cette application soient conformes aux essais de conception correspondants spécifiés par les normes CEI 60282-1 et/ou IEEE Std C37.41 [6] (ANSI), IEEE Std C37.46 [8] et IEEE Std C37.47 [9] (ANSI).

Lorsque des fusibles limiteurs de courant sont utilisés dans des enveloppes de tout type, les caractéristiques de performance du système global doivent être évaluées, comme détaillé dans les paragraphes suivants. La compatibilité d'un élément de remplacement avec une application spécifique dans une enveloppe est de la responsabilité du fournisseur de l'ensemble fusible-enveloppe (FEP) et il est conseillé à l'utilisateur de suivre les instructions du constructeur du FEP.

5.1.1.2.2 Types d'ensembles fusible-enveloppe

Les types d'ensembles fusible-enveloppe (FEP) couverts par le présent article sont:

- type 1CL: Un fusible installé dans une grande enveloppe avec une circulation de l'air relativement libre (par exemple, un fusible installé dans un transformateur à face sous tension monté par bloc ou dans une cellule). La température d'application maximale (MAT) assignée de l'élément fusible concerné est basée sur la température de l'air qui refroidit le fusible. Il peut être noté que si un fusible était installé à l'extérieur, mais à une température ambiante supérieure à 40 °C, les conditions sur le fusible seraient identiques.
- type 2CL: Un fusible installé dans un puits fusible (boîtier de fusible). Il s'agit d'une enveloppe relativement petite qui soutient le fusible et restreint l'air, le gaz ou le liquide autour du fusible (par exemple, un fusible dans un puits à l'intérieur d'un transformateur ou d'une cellule). Toutefois, le fluide (gaz, liquide ou une combinaison des deux) qui refroidit la surface extérieure du puits circule relativement librement. La MAT du fusible concerné est basée sur la température de l'air qui refroidit le fusible. Les fusibles soumis à l'essai pour une utilisation à l'air libre à une température inférieure à 40 °C et encapsulés dans une isolation solide (par exemple du caoutchouc ou de l'époxyde) peuvent être considérés comme faisant partie de ce type de FEP lorsqu'ils sont encapsulés. Dans ce

cas, La MAT du fusible concerné est basée sur la température de l'air qui refroidit le fusible.

- type 3CL: Un fusible directement immergé dans un liquide et installé dans une enveloppe avec une circulation du liquide relativement libre autour du fusible (par ex., un fusible immergé dans l'huile dans un transformateur ou dans l'enveloppe de l'appareillage de connexion). La MAT correspondante est basée sur la température du liquide en contact avec le fusible.

Fusibles limiteurs de courant utilisés dans des puits

Les puits (FEP type 2CL) permettent d'accéder à un fusible limiteur de courant dans un transformateur ou dans l'enveloppe d'un appareillage de connexion et permettent d'effectuer un remplacement dans le cas où le fusible s'activerait. Généralement, le puits est entouré d'air, de SF₆ ou d'huile, bien que l'huile ou un substitut d'huile soit le plus répandu. Les fusibles utilisés sont généralement des limiteurs de courant standards d'intérieur à coupure intégrale. Les puits sont également souvent utilisés dans les combinés d'interrupteurs-fusibles. Dans ce cas, les fusibles sont équipés de percuteurs et des fusibles associés sont généralement utilisés. Les utilisations de puits peuvent avoir un impact sur les caractéristiques assignées du conducteur de courant des fusibles limiteurs de courant. La chaleur doit non seulement être transférée du fusible limiteur de courant vers l'air du boîtier, mais également du boîtier vers son milieu environnant. Les fusibles utilisés dans des puits doivent être sélectionnés pour de telles applications et leur courant assigné peut être différent de celui de fusibles utilisés sans puits. Par exemple, le courant de fusion lente peut avoir une valeur dépréciée par rapport à celle obtenue lorsque le fusible est utilisé dans une libre circulation de l'air. L'utilisation est particulièrement sévère lorsque les puits fusible sont placés dans la couche supérieure de l'huile d'un transformateur en charge, qui atteint souvent 105 °C, voire même jusqu'à 135 °C dans des conditions de surcharge.

Fusibles limiteurs de courant immergés dans un liquide

Les fusibles utilisés dans ce cas doivent être dotés d'un système d'étanchéité approprié pour une utilisation dans l'huile ou dans d'autres liquides (FEP type 3CL). En effet, si le liquide pénètre dans le fusible, il se peut que ce dernier fonctionne mal ou n'arrive pas à éliminer le courant de défaut et à interrompre le circuit.

Les fusibles limiteurs de courant conçus pour une immersion directe dans un liquide possèdent d'excellents moyens de transfert de chaleur par le biais du liquide. Par conséquent, le courant de fusion lente peut être supérieur à celui du même fusible dans l'air à la même température ambiante. Le constructeur du fusible peut donc affecter aux fusibles destinés à être immergés un courant assigné supérieur à celui des fusibles pour usage en puits ou dans l'air. Toutefois, cela ne s'applique que lorsque la température du liquide est égale ou proche de la température ambiante; c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas d'autres sources de chaleur notables dans l'enveloppe du liquide, excepté celle du fusible. Si, en revanche, le fusible est utilisé dans un transformateur, la température du liquide peut dépasser la température ambiante normale, ce qui doit être pris en compte pour déterminer l'aptitude à l'usage du fusible. Par conséquent, il convient de consulter le constructeur du fusible lorsque ce type de fusible est utilisé.

La CEI 60282-1 contient les exigences d'essai pour démontrer l'étanchéité au liquide des éléments de remplacement utilisés dans des situations où le fusible était la première source de chaleur dans l'enveloppe (par ex., un appareillage de connexion). Les essais d'étanchéité lorsqu'une chaleur importante provient d'un autre matériel de l'enveloppe (par ex., le transformateur) sont inclus dans la norme IEEE Std C37.41 [6]. Il est prévu que cet essai soit inclus dans la norme CEI 60282-1 dans un avenir proche. Il convient de consulter le constructeur de l'élément de remplacement pour toute information relative à la compatibilité des éléments de remplacement pour ce type d'utilisations.

Utilisation de fusibles limiteurs de courant à proximité de sources de chaleur

Des sources de chaleur adjacentes peuvent augmenter la température du fusible à un niveau inacceptable pouvant affecter les caractéristiques assignées du fusible. Il convient de consulter le constructeur pour tout conseil relatif à de telles conditions. De plus, la conception du fusible limiteur de courant peut différer selon les constructeurs. Les conseils d'un

constructeur peuvent donc ne pas s'appliquer à un produit de remplacement d'un autre constructeur.

Utilisation de fusibles limiteurs de courant où la circulation de l'air et/ou le refroidissement sont restreints

Une circulation de l'air restreinte (FEP type 2CL) réduira la capacité de l'environnement à agir en tant que dissipateur de la chaleur produite par le courant traversant le fusible limiteur de courant sur une longue période de temps. Etant donné que le fusible ne peut pas dissiper la chaleur de manière aussi efficace, un déclassement des caractéristiques assignées en courant peut en résulter.

Utilisation de fusibles limiteurs de courant dans des cellules ou dans des sous-stations souterraines

Il convient d'assigner les fusibles limiteurs de courant utilisés dans des cellules (FEP type 1CL) en fonction de la plus haute température environnante prévue dans la cellule. Si la cellule contient également d'autres appareils producteurs de chaleur, tels que des transformateurs, une ventilation accrue peut être nécessaire. La taille de la cellule peut aussi influencer la circulation de l'air dans la cellule. Une petite cellule fermée peut piéger l'excédent de chaleur et réduire le transfert de chaleur à partir du fusible, qui, par conséquent, peut avoir à être déclassé.

Utilisation de fusibles limiteurs de courant dans des enveloppes extérieures

Des enveloppes extérieures aérées (FEP type 1CL) seront affectées par la chaleur du soleil et, par conséquent, il pourra être nécessaire de déclasser les fusibles limiteurs de courant utilisés dans l'enveloppe. Des enveloppes extérieures non ou peu aérées peuvent également nécessiter un déclassement supplémentaire du fusible. Consulter le constructeur. Il faut également savoir que les fusibles de remplacement d'un autre constructeur peuvent avoir un facteur de déclassement différent (voir 5.1.1.1.3) en raison d'une conception différente.

5.1.1.2.3 Distances d'isolement et écartement

L'utilisation de barrières isolantes adaptées peut permettre de réduire les distances entre phases à condition qu'elles aient été vérifiées au moyen d'essais appropriés. Il convient de garder à l'esprit que les normes autorisent une tension aux bornes du fusible (lors d'interruption de défaut) légèrement supérieure à trois fois la tension du système. Ainsi, un fusible assigné à 12 kV peut produire jusqu'à 38 kV entre phases ou entre phase et terre tandis que de très faibles courants assignés (voir Tableau 8 de CEI 60282-1:2009) peuvent avoir des valeurs encore plus élevées.

5.1.1.2.4 Température d'application maximale

Il convient que l'application FEP prenne en compte toute température supérieure de fonctionnement du fusible causée par son confinement ou par des températures environnantes élevées. Le fournisseur du FEP spécifie la température d'application maximale (MAT) en degrés Celsius, sélectionnée de préférence parmi la série R20 des nombres recommandés (généralement 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125 ou 140). C'est la température ambiante maximale à laquelle un appareil peut être utilisé sans provoquer de détérioration qui inhiberait la capacité du fusible à interrompre le circuit. Outre l'essai habituel, un fusible doit démontrer sa capacité à interrompre le courant dans une enveloppe ou dans des conditions équivalentes à celles d'une enveloppe, avec une température environnante devant être égale à la MAT.

(La série R20 comprend les nombres suivants: 1; 1,12; 1,25; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00; 2,24; 2,50; 2,80; 3,15; 3,55; 4,00; 4,50; 5,00; 5,60; 6,30; 7,10; 8,00; 9,00 et leur multiple de 10).

5.1.1.2.5 Courant assigné et courant permanent admissible pour un FEP

Les fusibles utilisés dans un FEP peuvent ne pas être en mesure de conduire leur courant assigné (valeur de la plaque signalétique ou caractéristiques indiquées sur le fusible) sans détérioration ou sans excéder les températures maximales spécifiées dans les normes. Cela

peut également être le cas pour un fusible non situé dans une enveloppe, mais soumis à une température environnante supérieure à 40 °C. Le courant qu'un fusible peut conduire en permanence dans ces différentes conditions, sans excéder les températures spécifiées, est défini comme étant son courant permanent admissible. Le courant est lié à une température ambiante spécifique. Il convient qu'une telle valeur, lorsque le fusible fait partie d'un FEP, soit disponible auprès du constructeur du FEP ou généralement du constructeur du fusible. Les informations sont normalement fournies sous la forme de facteurs de déclassement (surclassement) appliqués au courant assigné du fusible et permettent normalement de prendre en compte l'influence de l'enveloppe et/ou de la température ambiante. Sinon, un tableau des courants assignés liés à la température peut être fourni.

5.1.1.2.6 Fusibles ayant une température d'application maximale (MAT)

Certains fusibles ont une MAT assignée très élevée (par exemple les fusibles destinés à être utilisés dans des transformateurs) et le fusible connaîtra de telles températures uniquement dans des matériels en surcharge importante ou en avarie. L'essai à la MAT montre que le fusible conserve sa capacité d'interruption dans ces conditions. Dans certains cas, donc, la MAT assignée à un fusible peut être supérieure aux températures de contact maximales autorisées (voir tableau A.1). Dans ce cas, le fusible ne peut pas avoir de courant permanent à sa MAT, mais seulement à une température plus basse à laquelle il est censé fonctionner en permanence.

S'il est exigé qu'un fusible soit capable de fonctionner à des températures de composants plus élevées que celles spécifiées dans la norme CEI 60282-1, il convient que cette application soit convenue d'un commun accord entre le constructeur et l'utilisateur.

5.1.1.2.7 Caractéristiques temps-courant

La modification de l'environnement thermique pour le fusible lorsqu'il est contenu dans une enveloppe provoquera un déplacement des TCC vers la gauche (courant plus faible). Le degré d'importance dépendra d'abord de la construction du fusible (matériaux et conception des éléments fusibles). Par exemple, des éléments fusibles qui fondent à des températures élevées (plus de 900 °C) ont généralement des déplacements peu significatifs, tandis que les éléments fusibles qui fondent à des températures plus basses auront un déplacement plus important. Bien que pour certains modèles il y ait un effet sur la courbe globale des TCC, les déplacements dans la région de fusion lente sont généralement les plus préoccupants en raison d'un fonctionnement intempestif éventuel. Il convient que les effets détaillés sur les caractéristiques dus à une enveloppe particulière soient disponibles auprès du constructeur du FEP. Ils sont généralement présentés sous la forme de facteurs multiplicateurs appliqués aux TCC du fusible.

Il peut être noté que l'utilisation de la règle générale du facteur de coordination, selon laquelle il convient que le temps d'élimination maximal de l'appareil de protection côté charge n'excède pas 75 % du temps de fusion minimal de l'appareil côté source, permet généralement un déplacement des TCC dans la région de 0,01 s à 1 000 s. Toutefois, pour des fusibles d'usage général et à coupure intégrale, cette règle peut être insuffisante pour des périodes de temps supérieures à 1 000 s. Consulter le constructeur pour toute information sur les ajustements spécifiques.

Un deuxième facteur de déclassement peut être publié par le fournisseur du FEP. Ce facteur donne le pourcentage de réduction du courant de fusion lente minimale lié à la température du diélectrique gazeux ou liquide entourant le FEP par rapport à une température standard de 20 °C (25 °C pour les fusibles soumis à des essais conformément à la norme IEEE C37.41 [6]).

5.1.1.2.8 Sélection du fusible, courant assigné

Lorsqu'un fusible est utilisé à une température ambiante supérieure à 40 °C, ou dans un FEP, il est important d'évaluer les effets de l'environnement sur le fusible. Il convient de comparer la température d'application maximale réelle à la MAT du fusible et l'effet sur le courant

assigné et les TCC seront ainsi pertinents. Il est important que les conditions ne provoquent pas de détérioration du fusible et des composants associés. Par exemple, des fusibles associés limiteurs de courant et d'usage général dans des conditions de surcharge. Il est tout autant important de s'assurer que les modifications des TCC du fusible n'appellent pas le fusible à interrompre un courant pour lequel il n'a pas été conçu ni testé. Il convient donc d'accorder une attention particulière à la coordination du fusible en fonction de toutes les températures ambiantes possibles.

La modification des TCC de préarc due à une enveloppe et à une température ambiante élevée est souvent importante pour les fusibles limiteurs de courant à coupure intégrale et d'usage général, tandis que la modification des TCC pour les fusibles associés est souvent beaucoup moins importante. En conséquence, les fusibles limiteurs de courant de type associé coordonnés avec d'autres fusibles (ou appareils sensibles aux surcharges) fonctionnant à de faibles courants de surcharge ne nécessitent aucun facteur de dépréciation des TCC. Cependant, il convient de toujours s'assurer que les fusibles associés utilisés à des températures élevées ne sont pas soumis à une surcharge et à une éventuelle détérioration.

5.1.1.3 Fusibles à expulsion dans des enveloppes

5.1.1.3.1 Généralités

Les exigences en termes d'essais supplémentaires pour les fusibles à expulsion dans les enveloppes ne sont actuellement pas couvertes par les normes de la CEI. Elles sont donc convenues d'un accord commun entre le constructeur et l'utilisateur. Toutefois, la norme IEEE Std C37.41 [6] peut servir de base pour les essais en question puisqu'elle contient les exigences relatives aux essais des fusibles à expulsion dans des enveloppes (et les exigences d'essais basiques pour les fusibles à expulsion sont presque identiques à celles de la norme CEI 60282-2). Par conséquent, les conseils d'utilisation donnés en 9.1.3 s'appliquent spécifiquement aux fusibles soumis à des essais conformément à la norme IEEE Std C37.41 [6], mais peuvent ne pas s'appliquer aux fusibles qui n'ont pas été soumis à des essais. Le terme recommandé par les normes de l'IEEE pour une enveloppe étroite réduisant le refroidissement du fusible est "boîtier de fusible" plutôt que "puits". Pour les fusibles CL, le boîtier le plus communément utilisé est un puits (un puits sec ou un puits isolé), mais ce n'est pas le cas pour les fusibles à expulsion, donc le terme boîtier de fusible est utilisé en 5.1.1.3).

Lorsque les fusibles à expulsion sont utilisés dans des enveloppes de tout type, il convient d'évaluer les caractéristiques de performance du système global.

Le fusible, le boîtier de fusible (si présent) et l'enveloppe produisent un système avec des effets interdépendants. Chaque composant peut être fourni par un constructeur différent. Il convient que les données soient disponibles auprès du constructeur de composants pour permettre une utilisation adaptée. Il convient que le caractère approprié d'une utilisation spécifique d'un fusible dans un boîtier de fusible ("fusible et boîtier de fusible" ou F/C) incombe au constructeur du F/C. Il convient que le caractère approprié d'une utilisation spécifique d'un fusible ou d'un F/C dans une enveloppe incombe au constructeur de l'appareillage de connexion. Il convient que la bonne utilisation de l'appareillage de connexion, sur la base des recommandations du constructeur de l'appareillage de connexion, incombe à l'utilisateur.

5.1.1.3.2 Types de boîtiers fusible-enveloppe

Les boîtiers fusible-enveloppe (FEP) utilisant des fusibles à expulsion de classe B (classe puissance) conçu pour l'intérieur compris dans ce paragraphe sont:

- type 1E: Un fusible fixé dans une enveloppe avec une circulation de l'air relativement libre dans cette dernière (par ex., un fusible à expulsion installé dans une enveloppe ou dans une voûte);
- type 2E: Un fusible fixé dans un boîtier de fusible avec une circulation réduite de l'air autour du fusible, mais avec une circulation de l'air relativement libre au sein de

l'enveloppe sur l'extérieur du boîtier (par ex. un fusible à expulsion dans une enveloppe avec des barrières isolantes qui forment un boîtier réduisant la circulation de l'air);

- type 3E: Un fusible directement immergé dans un liquide et installé dans une enveloppe avec une circulation relativement libre du liquide autour du fusible (par ex. un fusible à expulsion dans l'enveloppe d'un appareillage de connexion).

Il convient de noter que les exigences d'essai de la norme IEEE C37.41 [6] concernant les fusibles à expulsion immergés dans un liquide sont uniquement destinées aux fusibles situés dans des appareillages de connexion (non directement associés à des transformateurs).

5.1.1.3.3 Distance d'isolement et écartement

Les fusibles à expulsion produisent des gaz à haute pression qui sont expulsés lors du processus d'interruption. Il convient de ne pas diriger ces gaz d'une manière qui réduise la tenue diélectrique entre les phases et depuis les phases-terre à un niveau qui provoquerait une rupture diélectrique.

Il convient qu'un ensemble triphasé soit capable de résister aux tensions transitoires et à la fréquence industrielle de rétablissement associées au fonctionnement simultané des fusibles lors des trois phases.

Il convient que les distances d'isolement entre les fusibles des phases adjacentes et entre chaque fusible et le sol permettent de maintenir une tenue diélectrique adéquate à tout moment. Il convient de suivre les recommandations du constructeur en matière de distances d'isolement et d'écartement appropriés.

L'utilisation de barrières isolantes adéquates peut permettre une réduction des séparations, à condition qu'elles soient vérifiées au moyen d'essais d'isolation appropriés.

5.1.1.3.4 Température d'application maximum (MAT)

Les fusibles à expulsion situés dans des enveloppes ou boîtiers ont une température d'application maximale (MAT) assignée, exprimée en degrés Celsius, sélectionnée de préférence parmi la série R20 des nombres recommandés (généralement 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, ou 140). C'est la température environnante maximale à laquelle un appareil peut être utilisé sans provoquer de détérioration qui inhiberait sa capacité d'interruption du circuit. Outre l'essai habituel, un fusible doit démontrer une interruption efficace du courant dans l'enveloppe avec une température environnante devant être égale à la température ambiante d'essai normale, si la MAT assignée est de 55 °C ou moins et à la MAT si elle est supérieure à 55 °C. Il convient de noter que selon les normes de l'IEEE, le terme "température d'application maximale assignée" (RMAT) est utilisé à la place de "température d'application maximale" (MAT).

5.1.1.3.5 Réduction de la capacité du courant permanent admissible

Une utilisation qui soumet le fusible à des températures environnantes élevées peut conduire à une réduction du courant permanent admissible que le fusible ou le boîtier de fusible (F/C) est capable de recevoir, étant donné que les capacités sont souvent liées à une température ambiante inférieure.

Le courant permanent admissible est la valeur désignée du courant que le fusible est capable de recevoir à une température environnante spécifiée sans excéder les seuils de température totale maximale acceptés par l'appareil.

Il convient que le constructeur du fusible ou du F/C fournisse le courant permanent admissible correspondant à chaque fusible utilisé. Généralement, ces capacités sont disponibles sur la base d'un environnement de référence de 25 °C ± 5 °C. Les facteurs normalement publiés par le constructeur du fusible donnent le pourcentage de réduction des capacités du courant permanent admissible pour des températures environnantes supérieures à 25 °C.

Un facteur supplémentaire sera nécessaire si un fusible normalement conçu pour être utilisé seul est placé dans un boîtier étroit, donnant ainsi un F/C. Ces facteurs s'ajustent à condition que la température de l'air autour du fusible dans le boîtier soit supérieure à celle de l'air entourant le F/C.

5.1.1.3.6 Caractéristiques temps-courant

Lorsqu'un fusible à expulsion est utilisé dans une enveloppe ou dans un boîtier, une augmentation de la température environnante peut provoquer une modification des caractéristiques temps-courant de la fusion du fusible. Il convient que les informations sur les effets sur les TCC dus à une enveloppe particulière soient disponibles auprès du constructeur de l'enveloppe en question. Il est recommandé de faire preuve de prudence si les modifications des caractéristiques affectent la coordination avec d'autres appareils dans le système. Dans le cas de fusibles à expulsion submergés dans un liquide, certains modèles sont notablement plus sensibles à la température du liquide que d'autres modèles. Il est donc difficile de généraliser. Consulter le constructeur pour toute information sur les effets de la température sur les TCC des fusibles à expulsion.

5.1.1.3.7 Efforts de fonctionnement pour les fusibles à expulsion dans des enveloppes

Il convient de consulter le constructeur du fusible ou du F/C pour la direction et l'amplitude de la force exercée par le montage lorsqu'il fonctionne à son pouvoir de coupure maximal. Cela permet de garantir que la robustesse du montage est adéquate.

5.1.1.4 Altitude

Pour des altitudes supérieures à 1 000 m (3 300 pieds), les facteurs de correction pour les fusibles limiteurs de courant peuvent être trouvés en 2.1 de la norme CEI 60282-1:2009 et pour les fusibles à expulsion en 3.1 de la norme CEI 60282-2:2008.

5.1.1.5 Intérieur/extérieur/submersible dans un liquide

Avant toute utilisation d'un fusible, il convient de prendre en compte l'environnement physique de l'utilisation et de choisir un fusible adapté. Le choix et l'utilisation inadaptés d'un fusible peuvent endommager le fusible et les matériels associés.

Les fusibles conçus pour des utilisations intérieures peuvent ne pas convenir à des utilisations extérieures. Il convient de ne pas les utiliser ainsi à moins que le constructeur ait approuvé une telle utilisation. Les fusibles conçus pour l'intérieur peuvent ne pas convenir à une utilisation dans des enveloppes au sein desquelles l'air extérieur circule librement. Le brouillard, l'humidité et la condensation en cas de conditions météorologiques défavorables ou de toute autre condition, telle que l'accumulation de la poussière et des particules sur les surfaces isolantes, peuvent dégrader la capacité de tenue diélectrique de l'appareil ainsi que de ses structures de soutien.

Les fusibles destinés à une utilisation extérieure doivent être conçus pour résister aux détériorations du tube dues aux conditions climatiques, aux rayons ultraviolets et à l'ozone. Il convient qu'ils soient en mesure de résister à la tension de rétablissement du système pour une période de temps suffisante permettant de localiser et de corriger le problème de surintensité ayant provoqué l'activation du fusible. Les fusibles conçus pour l'extérieur conviendront en général à une utilisation en intérieur, à moins que les fusibles émettent des gaz ionisés lors du processus d'interruption. Les fusibles d'extérieur de construction non céramique peuvent être plus longs que ceux conçus pour l'intérieur et/ou sont dotés de revêtements spéciaux résistant aux intempéries étant donné qu'ils sont exposés à des contaminants pouvant s'accumuler sur le corps du fusible.

Des consignes relatives à l'estimation des seuils de pollution et d'humidité acceptables peuvent être trouvées pour les fusibles limiteurs de courant en 2.1 de la norme CEI 60282-1:2009 et pour les fusibles à expulsion en 3.1 de la norme CEI 60282-2:2008.

5.1.1.6 Chocs et vibrations

Si dans les conditions normales d'installation et de service, l'élément de remplacement est soumis à des contraintes mécaniques sévères, par exemple chocs, vibrations, etc., agissant suivant une ou plusieurs directions, il convient de vérifier en consultant le constructeur du fusible que l'élément de remplacement peut supporter ces contraintes sans dommage ni détérioration. De plus, il faut veiller à ce que le contact électrique avec l'élément de remplacement ne se détériore pas (par ex., pression de ressort). Des essais pratiques destinés à vérifier la tenue mécanique des éléments de remplacement et des contacts peuvent être effectués par accord entre l'utilisateur et le constructeur des fusibles et de l'appareillage. Pour les combinés interrupteurs-fusibles, voir la norme CEI 62271-105.

5.1.1.7 Durée de vie prévue des fusibles

Etant donné que les fusibles fonctionnent normalement sans aucune pièce mécanique en mouvement, excepté pour un percuteur éventuel ou un système d'indication, l'expérience prouve que dans des conditions normales de service, la durée de vie typique s'entend en plusieurs dizaines d'années.

Les causes possibles (en dehors des conditions normales) d'une réduction de la durée de vie peuvent être l'influence d'effluves (voir 5.2.5.5) issus de l'élément fusible (surtout pour les plus petits modèles) ou, pour les fusibles à expulsion, l'influence d'atmosphères corrosives pouvant dégrader les éléments fusibles ou le fût extérieur, etc. Les surintensités persistantes, supérieures au courant assigné ou au courant permanent admissible (voir 5.1.1.1.3) d'un fusible peuvent également provoquer une réduction de la durée de vie.

Une dégradation du fût extérieur peut, dans une large mesure, dépendre des matériaux employés.

5.1.1.8 Stockage

Pour toute recommandation concernant le stockage des fusibles, voir 5.3.5.2.

5.1.1.9 Bruit et échappements

Les fusibles à expulsion peuvent produire de courts bruits intenses pendant une interruption de défaut. Il est recommandé que la hauteur, la situation et le contrôle des échappements des fusibles à expulsion permettent de minimiser le niveau sonore à tout endroit normalement occupé par le personnel. Certains fusibles à expulsion de classe B peuvent être fournis avec un dispositif de contrôle des échappements pour éliminer presque tous les bruits produits pendant une interruption.

Les fusibles limiteurs de courant conformes aux normes référencées sont des dispositifs inertes en service normal. Il est aussi demandé qu'aucune émission externe significative ne se produise. Ce sont donc des dispositifs non polluants en service et en fonctionnement.

5.1.1.10 Conditions/exigences spéciales de service

La majorité des fusibles actuellement fabriquée est conforme aux conditions de service habituelles. Les fusibles peuvent être conçus pour d'autres conditions de service, mais être toujours conformes aux normes correspondantes, à condition qu'ils soient conçus et soumis à des essais dans ces autres conditions considérés dans le processus d'essai et de conception.

Par accord entre le constructeur et l'utilisateur, les fusibles à haute tension peuvent être utilisés dans des conditions différant des conditions normales de service telles qu'indiquées dans la norme correspondante. Pour toute condition spéciale de service, il convient de consulter le constructeur.

Quelques normes nationales comprennent des exigences supplémentaires, y compris des classifications relatives à des conditions spéciales d'application. Voici certaines d'entre elles:

- essai de production d'étincelle (AS 1033 [1] pour les fusibles à expulsion utilisés dans des zones propices aux feux de brousse et d'herbes);
- solidité mécanique des éléments de remplacement (IEEE C37.41 [6]);
- mesurage de la résistance des éléments de remplacement;
- vérification des efforts mécaniques pour ouvrir et fermer les coupe-circuits à ouverture automatique (à expulsion) après les manœuvres mécaniques;
- essais d'influence des perturbations radioélectriques/ essais de décharge partielle (IEEE C37.41 [6]).

Voici une liste de certaines des conditions que les fusibles ont déjà dû supporter:

- a) altitudes supérieures à 1 000 m;
- b) fréquences du réseau d'énergie autre que 50 ou 60 Hz;
- c) températures ambiantes inférieures à -30 °C;
- d) exposition à des fumées ou vapeurs nocives, poussière excessive ou abrasive, mélanges de poussières ou de gaz explosifs, vapeur, embrun salé, humidité excessive ou gouttes d'eau;
- e) exposition à des vibrations, chocs ou basculements anormaux;
- f) exposition à des conditions de transport ou de stockage anormales;
- g) limitations d'espace anormales;
- h) fonctionnement anormal et fréquence de fonctionnement anormale, difficulté de maintenance, etc.

Effets de l'environnement sur les caractéristiques des fusibles

Il convient que l'utilisateur sache que certains matériaux isolants organiques peuvent se dégrader sous l'exposition aux rayonnements ultraviolets et/ou à l'ozone. Ces deux éléments sont présents en extérieur et une protection doit être fournie par le constructeur et envisagée par l'utilisateur dans ce cas d'utilisation. De plus, les fusibles utilisés à l'extérieur sont exposés à des contaminants, à des polluants, à la pluie, à la neige, au brouillard, au smog et à d'autres conditions (par ex., de très hautes températures issues de la lumière directe du soleil ou du gel). Tous ces événements peuvent affecter la capacité du fusible à interrompre un circuit et à résister à la tension. Le constructeur conçoit le fusible pour qu'il résiste à ces conditions et garantit qu'il possède un système d'étanchéité adapté. Il est recommandé de n'utiliser à l'extérieur que les fusibles spécifiquement conçus pour l'extérieur. En cas de doute quant à la compatibilité d'un fusible avec l'extérieur, il convient de consulter le constructeur du fusible.

Utilisation de fusibles limiteurs de courant dans des environnements dangereux

Les fusibles limiteurs de courant n'émettent pas de gaz ionisés à partir du processus d'extinction de l'arc et conviennent à des utilisations où du gaz combustible peut être présent dans la zone entourant le fusible. Il convient de consulter le constructeur pour ce type d'utilisations. En l'absence d'émission de gaz ionisés, les lieux possibles de montage sont moins restrictifs. Il faut malgré tout faire attention à s'assurer que la déconnexion du fusible ne provoque pas de petit arc pouvant enflammer les gaz combustibles. De même, le fonctionnement des indicateurs ou des percuteurs peut provoquer de petits arcs externes pouvant poser un problème pour certaines utilisations.

5.1.2 Sélection du courant assigné

La sélection du courant assigné approprié du fusible implique non seulement de prendre en compte sa capacité de conduire le courant selon les exigences de l'utilisation, mais également la forme de ses caractéristiques temps-courant relatives aux différentes exigences spécifiques à diverses utilisations. Il convient également de noter que différents modèles de fusibles qui ont un courant assigné identique auront généralement des courbes de TCC légèrement différentes, car, en général, les TCC ne sont pas standardisées. La sélection spécifique des caractéristiques de courant des fusibles est par conséquent prévue à l'Article 10 dans les sections appropriées d'utilisation individuelle. La sélection du courant

assigné adapté et de la forme des TCC est particulièrement importante dans le cas de fusibles limiteurs de courant, car une mauvaise coordination peut entraîner des problèmes pour le fusible (par ex., voir 5.1.4.2.1).

Dans le cas de courants supérieurs au courant assigné (à savoir, des défauts, des surcharges et des chocs), les divers types de fusibles réagiront de manière différente. La plupart des types de fusible connaîtront des niveaux et durées de courant auxquels ils ne convient pas de les soumettre. Par exemple, il n'est pas recommandé de soumettre les fusibles limiteurs de courant d'usage général à des courants persistants supérieurs à leur courant assigné, mais à des courants inférieurs au courant assigné provoquant la fusion en l'espace d'une heure. Etant donné que certains défauts ou certaines surcharges peuvent endommager les éléments fusibles ou d'autres composants vitaux des fusibles, les laissant ainsi dans l'incapacité d'interrompre correctement le courant ou vulnérables à une fusion pour des courants qu'ils ne peuvent pas interrompre, un vaste système de règles de coordination existe. Ces règles visent à empêcher les dommages mentionnés à cet alinéa et sont largement abordées dans le présent document, notamment en 5.2.

5.1.3 Choix de la tension assignée du fusible

5.1.3.1 Généralités

Les fusibles sont des appareils monophasés qui ne réagissent qu'au courant qui les traverse effectivement. Presque toutes les exigences d'essai reposent donc sur un seul fusible qui coupe le courant dans un circuit monophasé. Alors qu'on utilise couramment les fusibles dans des circuits monophasés, les fusibles trouvent aussi de nombreuses applications dans des circuits triphasés. La plupart des exigences d'essai de la CEI supposent donc qu'on utilise normalement les fusibles dans certains types de circuits triphasés. Comme on ne peut pas partir des mêmes hypothèses pour tous les circuits et que les versions nationales des normes CEI des fusibles ne prennent pas les mêmes hypothèses dans tous les pays, il n'est pas possible de décrire simplement le choix de la tension du fusible. Le Paragraphe 5.1.3 décrit donc les règles reconnues pour choisir la tension assignée d'un fusible dans diverses applications courantes quand les fusibles ont fait l'objet d'essais aux exigences minimales des normes applicables de la CEI. On évoque cependant brièvement à titre d'information d'autres manières de procéder qui peuvent s'écarter légèrement de celles de la CEI. Comme toujours, il est recommandé que l'utilisateur s'adresse au fabricant du fusible pour obtenir des informations supplémentaires. Cela tient à ce que les normes permettent à un fabricant de procéder à des essais dans des conditions plus strictes que celles qui sont spécifiées, leurs principes d'utilisation peuvent donc s'écarter de ceux qui sont indiqués ici.

Il est très important de choisir la bonne tension assignée de fusible pour une application. Comme expliqué dans 4.2.1.2 et dans 4.3.1, tous les fusibles sont très sensibles à la tension appliquée lors d'une interruption de défaut. Un fusible qui coupe parfaitement quand la tension qui lui est appliquée a la bonne valeur peut ne pas réussir à couper quand la valeur de la tension est légèrement supérieure.

Quand on prend en compte la tension du système, on doit utiliser la tension maximale du système pour sélectionner la tension assignée du fusible, et non la tension nominale du système. Les normes de la CEI (et de l'IEEE) sur les fusibles ne spécifient aucune tension d'essai de coupure supérieure à la tension assignée du fusible, ici nommée "tension assignée". Alors que les tensions d'essai présentent une tolérance de -0% à $+5\%$ et que le fabricant peut permettre de dépasser la tolérance maximale, il n'est pas permis de supposer que les essais réels ont été réalisés selon une tolérance supérieure à $+0\%$. Les fluctuations de la tension du système doivent donc rester dans la capacité du fusible vis-à-vis de la tension de rétablissement.

Le dimensionnement en tension des fusibles qui servent à protéger les condensateurs en dérivation est traitée dans 5.2.4.

5.1.3.2 Fusibles à expulsion

L'essai d'après la norme CEI 60282-2:2008 demande de réaliser les essais de type coupure de courant à une tension égale à la tension assignée du fusible. Il est donc recommandé d'utiliser un fusible dont la tension assignée (tension assignée maximale) est égale ou supérieure à la tension maximale du système à laquelle peut être exposé le fusible quand il doit réaliser la coupure. Dans un système triphasé, il est donc recommandé que la tension assignée du fusible soit égale ou supérieure à la tension phase-phase maximale (tension composée); dans un système monophasé, il est recommandé que la tension assignée au fusible soit égale ou supérieure à la tension monophasée maximale.

La tension assignée des fusibles à expulsion peut dépasser d'une valeur souhaitée la tension du système puisque ces fusibles non limiteurs de courant ne produisent pas de surtension significative pendant la coupure. Des surtensions existent en effet dans le fusible pendant l'opération de coupure, elles sont principalement dues à la TTR inhérente au circuit; la tension assignée au fusible n'a donc pas d'effet significatif sur la grandeur de la tension d'interruption.

Alors que la méthode d'essai la plus couramment utilisée demande de soumettre les fusibles à l'essai au courant maximal de coupure (suite d'essai 1 ou I_1) et à une tension assignée U_r , si un fusible est destiné à n'être utilisé que dans des circuits triphasés, la norme CEI 60282-2:2008 permet d'utiliser une autre méthode d'essai. Il convient cependant de souligner qu'en pratique cela n'a d'effet que dans très peu d'applications. Cette autre méthode permet de réaliser la suite d'essai 1 sous forme de deux essais distincts. Le premier est réalisé à 100 % de la tension assignée mais seulement à 87 % de I_1 et le deuxième essai à 100 % I_1 mais seulement à 87 % U_r . Cela suppose que le premier fusible qui se déclenche dans les conditions d'un défaut triphasé sans mise à la terre verra seulement une tension qui représente 87 % de la tension phase-phase (tension phase-neutre multipliée par un facteur d'effacement de première phase de 1,5), à la valeur complète du courant triphasé présumé. Le deuxième fusible qui se déclenche dans le cas d'un défaut triphasé sans mise à la terre (ou le premier fusible qui coupe un défaut phase-phase) verra la tension phase-phase complète mais à un courant de défaut réduit qui représente seulement 87 % du courant triphasé présumé normal. Les fusibles qui sont soumis à l'essai de cette manière peuvent être utilisés dans un circuit monophasé dans la mesure où:

- la tension du circuit monophasé n'est pas supérieure à 87 % de la tension assignée du fusible, ou
- le courant de défaut présumé du circuit monophasé n'est pas supérieur à 87 % du pouvoir de coupure assigné maximal du fusible.

Dans la manière de procéder en Amérique du Nord (normes IEEE), l'autre méthode d'essai est celle qui est privilégiée, mais seulement pour les fusibles à expulsion "de puissance" de classe B (et pour les fusibles limiteurs de courant de puissance). En pratique, on combine normalement les deux essais (la méthode "privilégiée" de la CEI) puisque le fabricant a moins d'essais à faire.

Les fusibles à multiples tensions assignées ne sont pas reconnus par les normes de la CEI mais sont communs dans de nombreuses parties du monde (par exemple 15/27 kV). Ces fusibles sont surtout conçus pour être utilisés dans des systèmes triphasés montés en étoile et munis d'une mise à la terre efficace (systèmes en étoile directement mis à la terre). La norme IEEE C37.41 [6] comprend un essai spécial pour ces appareils. Le principe consiste à soumettre à un essai un seul fusible à la valeur totale de tension phase-phase à des courants assez faibles (inférieurs à environ 25 % de I_1) et à une tension phase-terre à des courants assez élevés. Une exigence supplémentaire d'essai stipule que deux fusibles en série doivent couper I_1 à une tension phase-phase. Cet essai simule le cas où un défaut phase-phase ne concerne pas la terre, un fusible réalisant la coupure dans chaque phase. Il faut faire des hypothèses pour cette application en ce qui concerne les conditions du système; des règles pour choisir la tension assignée sont nécessaires pour des circuits qui ne sont pas des systèmes neutres directement mis à la terre. Il est donc recommandé de demander l'avis du fabricant pour choisir la tension du fusible.

Les fusibles dont la tension assignée est égale ou supérieure à la tension phase-neutre du système sont aussi utilisés dans certains systèmes directement mis à la terre dans lesquels des défauts polyphasés qui ne concernent pas la terre ne peuvent pas avoir lieu ou sont improbables. Il est là aussi recommandé de consulter le fabricant puisque des techniques supplémentaires de protection peuvent être nécessaires dans de telles applications.

5.1.3.3 Fusibles limiteurs de courant

Les essais d'après CEI 60282-1:2009 supposent que les fusibles limiteurs de courant sont utilisés dans des circuits triphasés. Il est donc nécessaire que les essais de type coupure de courant dans lesquels le fusible est en mode limiteur de courant aient lieu à une tension égale à 87 % de la tension assignée de l'élément de remplacement. La valeur de 87 % représente la tension de rétablissement dans le premier fusible qui se déclenche lors d'un défaut en mode triphasé sans mise à la terre. On suppose que les deux éléments de remplacement restants partageront la tension de rétablissement phase-phase (ainsi que la fonction de coupure) et seront donc chacun exposés à moins de 87 % de la tension phase-phase. Dans le cas d'un défaut phase-phase sans mise à la terre, deux fusibles partageront là aussi la fonction quand les éléments de remplacement sont en mode limiteur de courant (voir 5.1.6).

Dans un système triphasé avec neutre directement mis à la terre ou dans un système avec neutre mis à la terre par basse impédance ou basse résistance, il est recommandé que la tension assignée de l'élément de remplacement soit au moins égale à la tension phase-phase maximale.

Dans une application monophasée, il est recommandé que la tension assignée de l'élément de remplacement soit au moins égale à 115 % de la tension maximale du circuit monophasé.

Comme l'essai des fusibles a lieu dans un circuit monophasé, les exigences de CEI 60282-1:2009 impliquent que, quand on les utilise dans un circuit triphasé, la tension de rétablissement à fréquence industrielle ne soit pas supérieure aux valeurs spécifiées pour les essais de coupure (pour la suite d'essais 1 et la suite d'essais 2, ces valeurs sont inférieures à la tension assignée au fusible). Il convient donc de noter qu'on se trouve dans une condition spéciale quand on utilise des fusibles sur un système triphasé à neutre isolé ou mis à la terre par une impédance accordée. Comme un double défaut à la terre est possible, un des défauts se trouvant côté alimentation et un des défauts côté charge d'un fusible sur une autre phase, il est recommandé que la tension assignée de l'élément de remplacement soit au moins égale à 115 % de la tension phase-phase maximale du système, on peut par exemple utiliser un fusible de 24 kV pour une tension maximale du système supérieure à 20,88 kV. On peut utiliser un fusible dont la tension assignée est inférieure à 115% de la tension maximale phase-phase du système à condition que tous les essais de coupure du courant aient été réalisés à une valeur au moins égale à la valeur maximale phase-phase (la méthode la plus prudente consiste à avoir soumis les fusibles à un essai avec les courants I_1 et I_2 dont la tension de rétablissement est égale à la tension assignée du fusible). Dans ce cas, il est recommandé de consulter le fabricant pour savoir si les fusibles sont adaptés à cette application.

On peut remarquer que les normes de la CEI sur les fusibles qui ont été modifiées dans certains pays (par exemple norme IEEE Std C37.41 [6]), en particulier là où les applications monophasées sont courantes, demandent de réaliser les essais de coupure à 100 % de la tension assignée du fusible pour certains types d'éléments de remplacement limiteur de courant. Pour ces fusibles, les exigences mentionnées dans 5.1.3.3 pour choisir un élément de remplacement dont la tension assignée est au moins de 115 % de la tension maximale du système sont remplacés par une exigence qui stipule que la tension assignée est au moins de 100 %. Il est possible que d'autres exigences d'essai prennent en compte le courant réduit présumé en cas de défaut phase-phase par rapport à un défaut triphasé (voir 5.1.3.2 où il est question des exigences d'essai pour des fusibles à expulsion dans la norme CEI 60282-2 qui permet d'utiliser cette méthode d'essai). Il convient de consulter la documentation du fabricant pour plus de précisions.

Un fusible limiteur de courant produit une tension élevée de commutation (tension d'arc) pendant la coupure pour obtenir la limitation du courant. Il est donc judicieux de choisir un fusible dont la tension assignée n'est pas supérieure à deux fois la tension du système pour limiter la contrainte à laquelle est soumise l'isolation du système (voir 4.2.3.1 et 4.2.4.5). Consulter le fabricant pour toute précision sur la tension de commutation que produit une combinaison donnée d'un fusible et d'une tension.

Il est aussi recommandé de prendre en compte l'éventualité de couper des courants capacitifs à l'aide de fusibles limiteurs de courant en cas de défaut monophasé-terre. Si dans un tel réseau on utilise des éléments de remplacement sans que l'interrupteur associé n'ait d'ouverture par percuteur, on peut réaliser les essais après accord entre le fabricant et l'utilisateur en suivant les conditions d'essai appropriées indiquées dans la CEI 62271-103 (interrupteurs de 1 à 52 kV). Il convient de choisir les courants d'essai d'un commun accord en fonction de l'élément de remplacement à soumettre à l'essai et des valeurs des courants dans les phases correctes et défectueuses lors du défaut à la terre.

Dans certains pays, on utilise des éléments de remplacement dont la tension assignée est inférieure à la tension phase-phase pour protéger des transformateurs montés en étoile à la terre, à la fois côté haute tension et côté basse tension. Ces éléments de remplacement sont typiquement essayés avec une tension égale ou supérieure à la tension phase-neutre. L'utilisation de fusibles de plus petites dimensions et de tensions d'interruption plus faibles compte parmi les avantages de cette méthode de protection. L'utilisation de cette technique demande cependant que s'appliquent à cette application certaines hypothèses sur le type des défauts possibles et sur la proportion de la charge des transformateurs mise à la terre. Il est recommandé de consulter le fabricant de l'élément de remplacement pour plus de précisions. Dans bien des cas, ces éléments de remplacement sont des fusibles Associés qui sont utilisés en liaison avec un autre appareil de coupure de défaut monté en série. L'appareil monté en série demande en général une tension assignée égale ou supérieure à la tension phase-phase. Quand on utilise conjointement les deux appareils, leur combinaison doit être en mesure d'effectuer la coupure et de résister à la tension de rétablissement du système. Certaines hypothèses, certaines exigences et certains essais particuliers peuvent être nécessaires pour assurer une bonne coordination entre les deux appareils. Il est donc recommandé de consulter le fabricant du ou des fusibles.

Il convient de prêter une attention particulière au choix des fusibles pour des applications dans des circuits polyphasés si on est parti du principe que, dans des conditions de défaut, deux fusibles seront réellement montés en série et partageront la tension phase-phase. Pour que deux fusibles puissent partager la même tension, ils doivent réagir simultanément. Il est donc recommandé que tous les fusibles aient le même calibre, que leur modèle et/ou leur type soit identique et qu'ils proviennent du même fabricant; consulter le fabricant pour plus de précisions.

5.1.4 Coordination entre les fusibles, et entre les fusibles et d'autres appareils de protection

5.1.4.1 Généralités

Pour que les fusibles fonctionnent correctement dans un système électrique et qu'ils protègent le système comme on le souhaite, il ne suffit pas de prêter attention à la tension, au courant permanent et aux caractéristiques de coupure pour choisir le bon fusible pour une application particulière. Il faut aussi s'assurer que le fusible choisi fonctionnera correctement en liaison avec les autres appareils de protection montés en série qui sont utilisés dans le système.

Une discussion sur les procédures nécessaires pour y parvenir dans tous les cas d'appareils montés en série dépasse le cadre des normes sur les fusibles. On évoquera cependant ici les applications les plus courantes. Consulter les fabricants des fusibles et/ou des appareils montés en série pour toute précision sur la coordination qui ne se trouve pas dans le présent rapport.

Quand les appareils en série sont deux fusibles, l'opération qui permet la coordination est appelée coordination entre fusibles. Dans le présent paragraphe, les informations sur la coordination concernent les fusible à fusible conventionnels qui ont recours à un élément fusible sensible au courant pour détecter un courant et une durée particuliers et fondre.

Deux caractéristiques du fusible servent notamment à choisir les fusibles qui se coordonnent; les caractéristiques temps-courant (TCC) d'un fusible et ses caractéristiques de I^2t . La méthode primaire consiste à comparer les courbes TCC pour les caractéristiques de préarc (fusion) et de fonctionnement (coupure) des fusibles concernés (voir 4.2.4.2 et 4.3.5 où il est question des relations entre les tolérances de fabrication et les courbes minimale, nominale et maximale). La courbe qui représente la caractéristique temps-courant minimale de préarc indique la durée minimale (en secondes) qu'il faut pour que le ou les éléments fusibles fondent et pour provoquer l'arc pour une valeur particulière d'un courant symétrique à fréquence industrielle. La courbe TCC de fonctionnement (courbe TCC de coupure totale) indique la durée maximale (en secondes) pour couper le courant à une valeur particulière du courant symétrique. Les deux courbes prennent en compte les variations qui résultent des tolérances de fabrication et elles représentent les performances dans des conditions données. Si des courbes nominales sont disponibles, il faut les corriger pour prendre en compte les tolérances du fabricant.

Pour tous les types de fusibles, les courbes de préarc minimales et les courbes de fonctionnement sont reportées sur des échelles logarithmiques où la limite inférieure de durée est 0,01 s. La durée supérieure dépend du type de fusibles. A mesure que le courant augmente, la durée de fusion d'un fusible diminue et la durée réelle de préarc d'un fusible peut varier si le courant n'est pas symétrique. Le I^2t de préarc (fusion) diminue cependant vers une valeur fixe qui dépend du matériau et de la géométrie de l'élément fusible. C'est pourquoi on utilise souvent le I^2t (qui varie beaucoup moins avec l'asymétrie du courant) pour parvenir à la coordination. Pour des courants élevés et des durées très courtes de préarc, on peut utiliser le I^2t de fonctionnement des fusibles limiteurs de courant (voir 4.2.4.4) pour déterminer la coordination avec d'autres appareils.

Pour des fusibles non limiteurs de courant, la coupure ne peut pas avoir lieu avant un passage naturel par zéro du courant. Quand les durées de fusion sont longues, la coupure peut nécessiter plusieurs périodes d'arc, alors que pour les courtes durées de fusion elle ne peut pas se produire avant le premier passage à zéro du courant. Les courbes temps-courant sont établies en utilisant des courants symétriques parce qu'en présence de courants asymétriques chaque fusible aurait un nombre infini de courbes en fonction de l'angle de fermeture à la mise sous tension et du facteur de puissance du circuit. Dans le cadre de la coordination à des courants élevés, la durée maximale dont un fusible devrait avoir besoin pour se déclencher est cependant une boucle asymétrique, quel que soit le niveau du courant. Cette valeur est d'environ 0,013/0,016 s ($0,8 \times$ un cycle) pour un facteur de puissance d'essai typique et de 60/50 Hz. La courbe caractéristique temps-courant de fonctionnement pour un fusible non limiteur de courant est donc ramenée à une durée d'environ 0,013/0,016 s, elle se transforme à ce moment en ligne horizontale qui donne une durée constante de déclenchement pour tous les courants plus élevés. Il en résulte que la courbe de fonctionnement pour un fusible non limiteur de courant coupe toujours la courbe minimale de préarc pour tout fusible plus grand quand on compare ces appareils dans le cadre de la coordination; on évoquera plus loin les questions spéciales de coordination qui en résultent.

Quand on coordonne des fusibles (ou des fusibles et d'autres appareils) dans un système, on souhaite généralement que le fusible en aval (le fusible le plus proche de la charge) fonde, puis coupe le circuit avant que le fusible en amont (fusible le plus proche de la source) ne fonde.

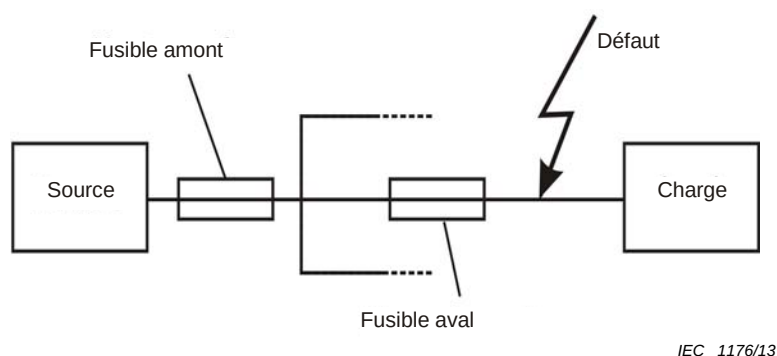


Figure 12 – Définition des termes fusibles "amont" et "aval"

Cette méthode isole les parties défectueuses du système tout en affectant le moins possible le reste du système.

NOTE Dans les paragraphes suivants, les termes "amont" et "aval" correspondent à la description ci-dessus qu'illustre la Figure 12. Dans certains documents, le fusible en amont est appelé appareil "protégé" parce que le fusible en aval ("protecteur") fonctionne et le "protège" en l'empêchant de fonctionner ou d'être endommagé.

5.1.4.2 Procédures de coordination entre fusibles

5.1.4.2.1 Généralités

Coordonner correctement les fusibles dans la zone supérieure à 0,01 s consiste avant tout à faire en sorte que la courbe de préarc du fusible en amont reste au-dessus et sur la droite de la courbe de fonctionnement du fusible en aval dans la gamme des courants de défaut disponibles sur le fusible en aval. On peut consulter le fabricant pour ce qui est des variables comme les variations de pré-charge et de température ambiante. En l'absence de données du fabricant, on peut avoir recours à une des techniques courantes ci-dessous. On utilise généralement une valeur qui représente 75 % de la durée de préarc du fusible en amont pour établir les tolérances sur les variables de fonctionnement comme l'échauffement de l'élément fusible par le courant de charge, les variations normales à température ambiante et celles qui empêchent que l'élément du fusible en amont ne soit endommagé. Pour utiliser cette méthode à 75 %, on fait correspondre la ligne de 4 secondes de la courbe de préarc du fusible en amont et la ligne de 3 secondes de la courbe de fonctionnement du fusible en aval. Une autre méthode consiste à accorder une marge de sécurité de 10 % pour le courant quelle que soit la valeur de durée.

La coordination non seulement limite la zone affectée par un défaut mais elle tente souvent d'abaisser le risque qu'un fusible qui fonctionne correctement expose un fusible monté en série à des dommages dus à ce défaut. On appelle ici "dommage" une fusion partielle mais non totale d'un ou de plusieurs éléments fusibles qui modifie ensuite ses caractéristiques de fonctionnement. Un tel changement pourrait provoquer ultérieurement la fusion du fusible endommagé par un courant qui normalement ne provoquerait pas sa fusion. Si le fusible réalise ensuite correctement la coupure, on est en présence d'un fonctionnement intempestif. Il peut cependant arriver que le fusible ne soit pas en mesure de couper le courant (par exemple parce que le courant est inférieur au courant minimal de coupure d'un fusible associé), en particulier en présence de fusibles limiteurs de courant. C'est pourquoi on introduit des "marges de sécurité" appropriées dans les règles habituelles de coordination.

Pour les fusibles limiteurs de courant Associés, on représente souvent en trait tireté ou en trait discontinu les courants inférieurs au courant de déclenchement assigné minimal sur la courbe TTC de préarc. Les courants inférieurs au courant minimal que le fusible peut couper ne sont habituellement pas représentés sur la courbe de fonctionnement parce que le fusible ne peut pas couper de manière fiable ces courants, on peut cependant les représenter en trait discontinu sur une courbe maximale de fonctionnement quand ils représentent la courbe TTC maximale de préarc.

Le courant maximal de coupure assigné (pouvoir de coupure assigné) du fusible est une autre information fournie par le fabricant du fusible et nécessaire dans certains cas pour assurer une coordination correcte. Il est recommandé de ne pas dépasser cette caractéristique. D'autres caractéristiques comme le I^2t , de préarc minimal, le I^2t de fonctionnement minimal et les graphiques représentant le courant coupé limité par rapport au courant présumé sont aussi publiées et généralement disponibles.

5.1.4.2.2 Entre fusibles à expulsion

Le fusible en aval doit interrompre le courant maximal de défaut à l'endroit où il se trouve avant que le fusible en amont ne subisse de dommages. Pour empêcher que le fusible en amont ne soit endommagé, il est recommandé que la durée de fonctionnement du fusible en aval soit inférieure à 75 % de la durée minimale de préarc du fusible en amont pour tous les courants jusqu'au courant maximal de défaut à l'endroit où se trouve le fusible en aval.

5.1.4.2.3 Entre fusibles limiteurs de courant

Comme pour la coordination entre fusibles à expulsion, le fusible en aval doit interrompre le courant maximal de défaut à l'endroit où il se trouve avant que le fusible en amont ne subisse de dommages. Pour empêcher que le fusible en amont ne soit endommagé, il est recommandé que la durée de fonctionnement du fusible en aval soit inférieure à 75 % de la durée minimale de préarc du fusible en amont pour tous les courants jusqu'au courant maximal présumé à l'endroit où se trouve le fusible en aval.

Quand les courants de défaut sont supérieurs, les fusibles limiteurs de courant sont en mesure de réaliser la coupure en moins de 0,01 s qui est la durée minimale que représentent les courbes TTC de fusibles. Si les courbes TCC des deux fusibles ne se coupent pas au-dessus de la ligne de 0,01 s et que le courant présumé a une grandeur suffisante sur le fusible en aval, c'est-à-dire sur la droite de l'endroit où la courbe de fusion du fusible en amont coupe la ligne de 0,01 s, il faut confirmer la coordination dans la gamme de limitation de courant. Pour cette coordination, il est recommandé que 75 % du I^2t de préarc minimal pour le fusible en amont soit supérieur au I^2t de fonctionnement (coupure) du fusible en aval. Il s'agit là d'une "coordination I^2t ". Les valeurs du fabricant pour le I^2t minimal de préarc (fusion) et le I^2t maximal de fonctionnement (coupure) des fusibles limiteurs doivent être publiées et facilement disponibles.

Voici à titre d'exemple une coordination entre fusibles limiteurs de courant: vérifier la coordination entre un fusible limiteur de courant (CLF) 125 A à coupure intégrale et un CLF 63 A à usage général au point "A" comme le montre la Figure 13. Vérifier aussi que le CLF 125 A sera en mesure de fonctionner correctement en cas de défauts entre lui et le fusible 63 A (c'est à dire dans sa zone de protection). Cette question est traitée en détail en 5.2.1.5 sous la dénomination "Portée".

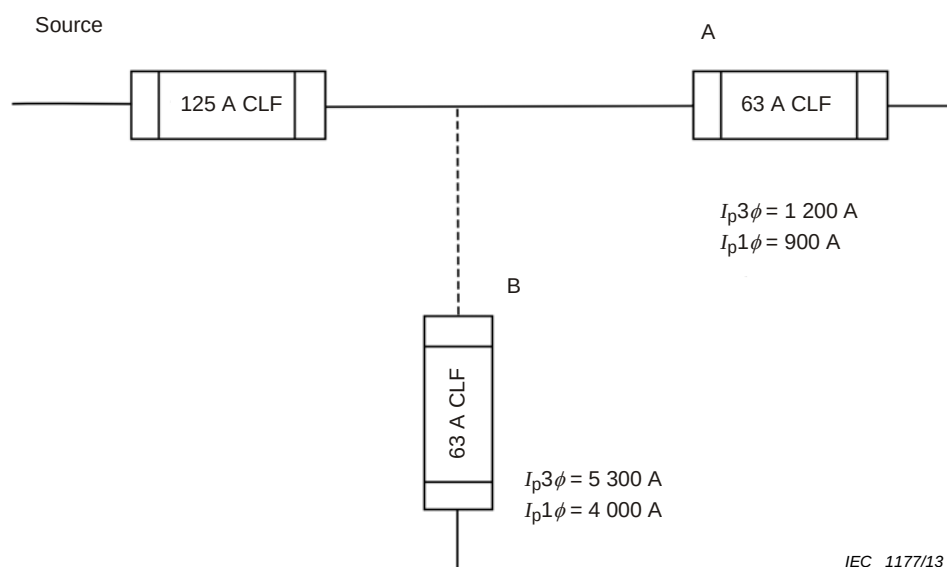


Figure 13 – Exemple de coordination entre fusibles limiteurs de courant

La Figure 14 montre les courbes TTC pour cette combinaison. Avant de comparer les courbes TTC des fusibles, vérifier que le CLF 125 A a la bonne portée (qu'il est en mesure de fonctionner s'il y a un défaut au point "A"). Au point "A", le courant présumé phase-terre I_p est de 900 A (en supposant un défaut franc, c'est-à-dire un défaut sans impédance). Un fusible limiteur de courant à coupure intégrale est en mesure de couper tout courant qui provoque sa fusion, il fonctionnera donc à un courant qui correspond au maximum de sa courbe minimale TTC de préarc publiée. Un défaut qui dure des heures n'est cependant pas souhaitable, il est donc probable qu'on choisira une durée plus courte pour le fonctionnement du fusible. Si la durée maximale souhaitée est 300 s, le courant à 300 s du fusible 125 A est 300 A. Comme le courant de défaut phase-terre est de 900 A sur le fusible 63 A, le fusible fondra en moins de 300 s. Il faut cependant prendre en compte le fait que les courants réels de défaut sont légèrement inférieurs à la valeur calculée à cause de l'impédance de défaut. Dans cet exemple, le courant pourrait être un tiers inférieur ("marge de portée" de 3, voir 5.2.1.5) et toujours déclencher le fusible en moins de 300 s.

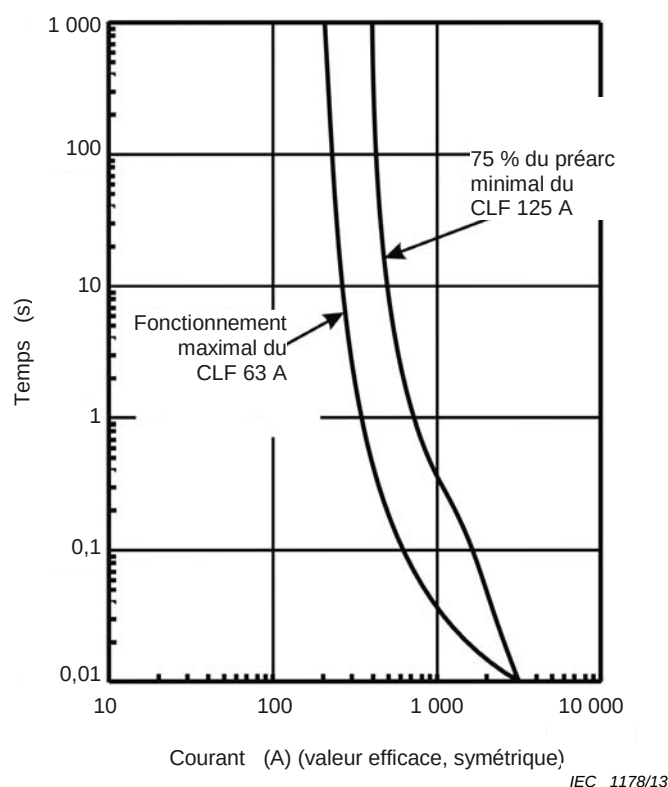


Figure 14 – Exemple de courbe TTC entre fusibles limiteurs de courant

Pour vérifier la coordination de la courbe TTC entre les fusibles 125 A et 63 A, tracer la courbe 75 % du préarc minimal pour le CLF 125 A et la courbe de fonctionnement maximal pour le CLF 63 A. Noter que les courbes se coupent à environ 3 100 A et à une durée inférieure à 0,01 s. Il y a donc coordination de durée puisque le courant maximal présumé sur le CLF 63 A ne dépasse pas 3 100 A. Comme le courant présumé est inférieur au point où la courbe TCC 125 A coupe la ligne 0,01 s, il n'est pas nécessaire de vérifier la coordination du I^2t .

Si le courant présumé de défaut sur le 63 A avait été plus élevé, par exemple de 4 000 A (position B à la Figure 13), il serait nécessaire de vérifier la coordination I^2t . La valeur du I^2t de fonctionnement maximal pour le fusible 63 A est de 100 000 A²s, alors que le I^2t de préarc minimal est de 100 800 A²s pour le fusible 125 A. Dans ce cas, on n'obtiendrait pas la coordination du I^2t à 4 000 A ($100\,000\text{ A}^2\text{s} > 0,75 \times 101\,000\text{ A}^2\text{s} = 75\,750\text{ A}^2\text{s}$). S'il était possible d'utiliser un fusible de 160 A au lieu du fusible de 125 A (le I^2t de préarc serait de 136 000 A²s) on serait dans un cas acceptable ($100\,000\text{ A}^2\text{s} < 0,75 \times 136\,000\text{ A}^2\text{s} = 102\,000\text{ A}^2\text{s}$). La portée serait encore acceptable; en effet bien que le courant de 300 s soit alors supérieur (il serait de 350 A), le courant présumé de défaut est aussi plus élevé. Il serait aussi nécessaire de vérifier la coordination du plus gros fusible de 160 A avec la protection en amont.

5.1.4.2.4 Coordination entre fusible limiteur de courant et fusible à expulsion

Dans cette coordination, le fusible limiteur de courant est l'appareil en amont. C'est pourquoi il est recommandé de comparer la courbe maximale TTC de fonctionnement pour le fusible à expulsion (en aval) à la courbe TCC minimale de préarc ajustée (réduite à 75 % de la durée) du fusible limiteur de courant (en amont). Comme on l'a expliqué en 5.1.4.1, la courbe TTC de fonctionnement du fusible à expulsion devient horizontale au moment qui correspond à 0,8 cycle, de sorte que la courbe coupera toujours la courbe de préarc du fusible limiteur de courant. C'est pourquoi cette disposition de fusible n'est susceptible de coordination que jusqu'à un certain niveau de courant à l'intersection des deux courbes.

Voici à titre d'exemple une coordination fusible à expulsion / fusible limiteur de courant: vérifier la coordination entre un fusible limiteur de courant à coupure intégrale 100 A et un élément de remplacement d'expulsion 40 A comme le montre la Figure 15. Vérifier aussi que le fusible limiteur de courant de 100 A a une "portée" appropriée (voir 5.2.1.5 et 5.1.4.2.3) pour sa zone de protection. La Figure 16 montre les courbes TTC pour cette combinaison.

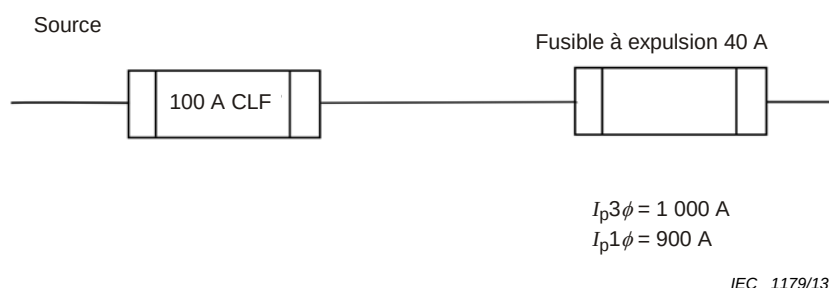
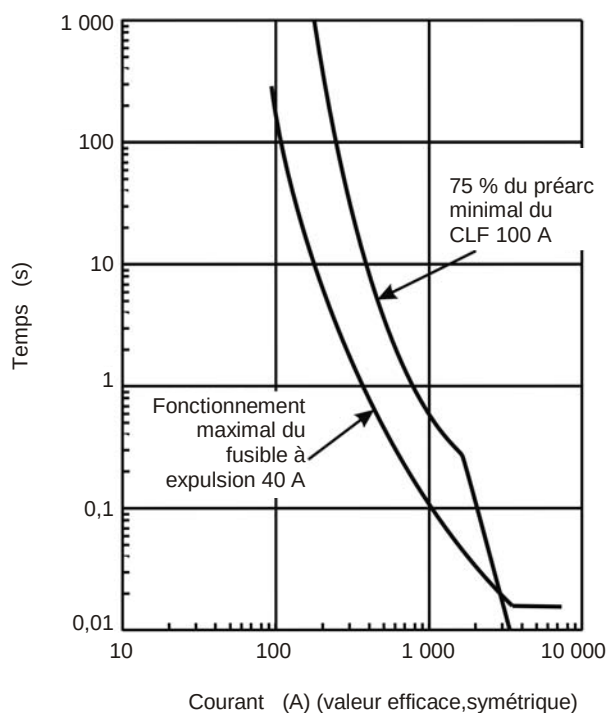


Figure 15 – Exemple fusible limiteur de courant-coupe/circuit à expulsion



IEC 1180/13

Figure 16 – Exemple de courbe fusible limiteur de courant/fusible à expulsion

Avant de comparer les courbes TTC des fusibles, vérifier que le fusible limiteur de courant de 100 A a une portée appropriée. Le fusible de 100 A doit atteindre l'endroit de l'élément de remplacement de 40 A où le courant de défaut calculé de 900 A est le plus faible dans sa zone de protection. Pour un fusible limiteur de courant à coupure intégrale, il est recommandé que le courant de défaut soit suffisant pour faire fondre le fusible en 300 s ou moins. Le fusible limiteur de courant de 100 A fond en 5 min à environ 220 A. Le rapport entre le courant présumé à l'extrémité de la zone protégée par le fusible limiteur de courant de 100 A et le courant de préarc du fusible de 300 s est de $900/220 = 4,1$. Comme cette valeur est supérieure aux facteurs de portée qui sont normalement utilisés, le fusible limiteur de courant de 100 A a une portée appropriée.

Pour vérifier la coordination, tracer la courbe TCC maximale de fonctionnement pour l'élément de remplacement de 40 A et la courbe minimale de préarc à 75 % pour le fusible de 100 A. Les courbes se coupent à environ 2 800 A. La coordination temporelle existe donc puisque le courant de défaut maximal sur l'élément de remplacement de 40 A, I_p , est de 1 000 A. Si le courant présumé avait été supérieur à 2 800 A, la coordination n'aurait pas pu être assurée et le fonctionnement du fusible à expulsion pourrait endommager les éléments fusibles du fusible limiteur de courant.

5.1.4.2.5 Coordination entre fusible à expulsion et fusible limiteur de courant

Dans cette coordination, le fusible à expulsion est l'appareil en amont.

Dans ce cas, la courbe maximale TCC de fonctionnement du fusible limiteur de courant (en aval) doit se trouver sur la gauche de la courbe minimale TCC de préarc ajustée (typiquement vers le bas à 75 % de la durée) du fusible à expulsion (en amont) pour toutes les valeurs de courant jusqu'au courant de défaut maximal disponible à l'endroit du fusible limiteur de courant. De plus, si le courant présumé à l'endroit du fusible limiteur de courant est supérieur au courant à l'endroit où la courbe TCC maximale de fonctionnement du fusible limiteur de courant coupe la ligne 0,01s, on doit vérifier que le I^2t de fonctionnement maximal du fusible limiteur de courant est inférieur au I^2t de préarc minimal calculé du fusible à expulsion ajusté pour la pré-charge.

On peut obtenir une approximation du I^2t de préarc minimal pour le fusible à expulsion en élevant au carré le courant minimal de préarc du fusible à expulsion à 0,015 s et en multipliant cette valeur par 0,015 s pour 50 Hz (0,0125 s for 60 Hz). La valeur ajustée représentera 75 % de ce résultat. Il est évidemment recommandé d'utiliser les données I^2t du fabricant si elles sont disponibles.

Voici à titre d'exemple une coordination fusible à expulsion-fusible limiteur de courant: vérifier la coordination entre le fusible à expulsion 160 A et le CLF à usage Général 80 A comme le montre la Figure 17. La Figure 18 montre les courbes TCC pour cette combinaison.

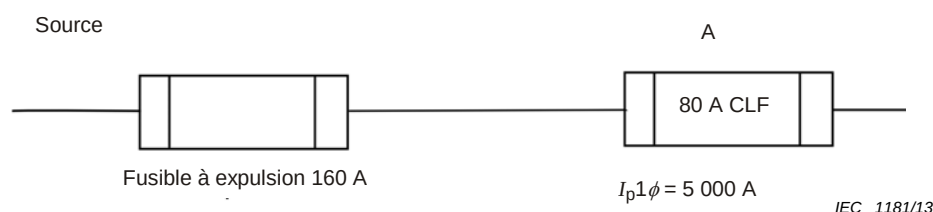


Figure 17 – Exemple de fusible à expulsion-fusible limiteur de courant

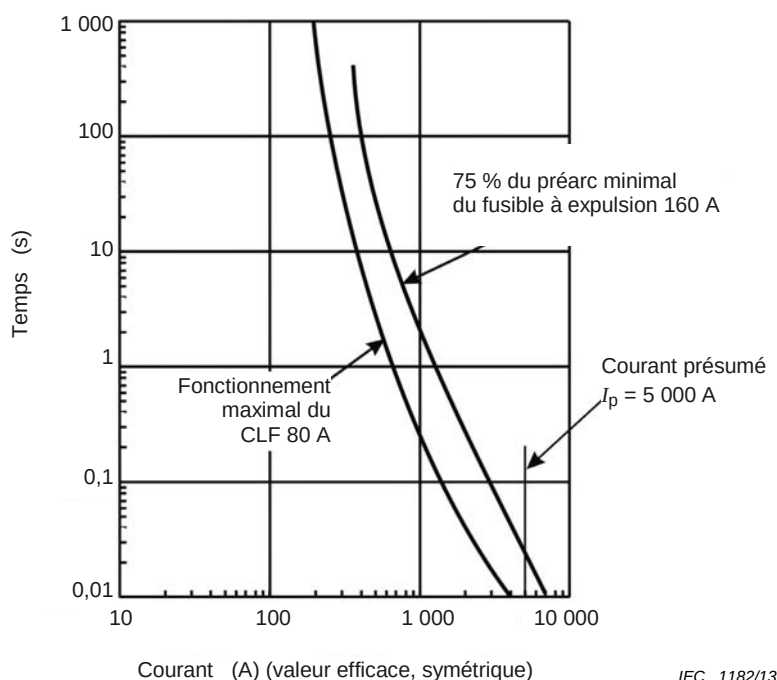


Figure 18 – Exemple de courbe TCC fusible à expulsion-fusible limiteur de courant

Pour vérifier la coordination de la courbe TCC, tracer la courbe TCC maximale de fonctionnement pour le fusible limiteur de courant 80 A et la courbe TCC minimale de préarc à 75 % pour l'élément de remplacement de 160 A. Les courbes ne se coupent pas, donc la coordination de courbe TCC existe.

Comme le courant de défaut maximal disponible I_p de 5 000 A est supérieur à la valeur de courant là où la courbe maximale de fonctionnement du CLF de 80A coupe la ligne 0,01s, le I^2t de fonctionnement maximal du CLF 80A est comparée à 75 % du I^2t du préarc minimal de l'élément de remplacement de 160 A; le I^2t de fonctionnement maximal du fusible 80 A est de 181 000 A²s comme le spécifie le fabricant. La courbe minimale de préarc pour l'élément de remplacement 160 A coupe la ligne 0,015 s à environ 6 000 A; donc

$$(6\,000)^2 \times (0,015) \times (0,75) = 405\,000\, \text{A}^2\text{s} \text{ et } 181\,000\, \text{A}^2\text{s} < 405\,000\, \text{A}^2\text{s}$$

Le I^2t de coordination existe puisque le I^2t de fonctionnement maximal du CLF 80 A est inférieur au I^2t de préarc minimal de l'élément de remplacement 160 A réduit à 75 %.

5.1.4.2.6 Coordination dans le cas de fusibles limiteurs de courant à usage général

D'après les normes, un fusible à usage général est un appareil qui peut couper tout courant de défaut entre une valeur inférieure égale à un courant qui provoque la fusion du fusible en une heure (appelé ici "courant de préarc d'une heure") et son courant maximal de coupure assigné. Typiquement, ces fusibles servent à protéger les transformateurs des défauts traversants – voir 5.2.2.1.1 b) – (pour des durées de fusion inférieures à environ 1 heure) ou à protéger le système des effets d'un défaut de courant élevé et de faible impédance.

Les fusibles limiteurs de courant à usage général peuvent ne pas exiger d'utiliser des appareils en série. Il est cependant recommandé de veiller à ce que le fusible ne soit pas sollicité pour couper un courant permanent de surcharge qui est inférieur à son courant de préarc d'une heure. Il est de plus recommandé que les fusibles à usage général ne soient pas soumis à des courants permanents entre leur courant assigné et leur courant de préarc d'une

heure, même si un tel courant ne provoque pas la fusion. Si un fusible fonctionne dans cette zone, il pourra subir des dommages qui pourraient ensuite l'empêcher de fonctionner efficacement pour des courants qu'il aurait coupés sans cela.

Une méthode qui permet de s'assurer que le fusible à usage général n'est pas surchargé ou qu'il n'est pas chargé de la coupure dans des conditions de surcharge consiste à utiliser le fusible en liaison avec des appareils sensibles à la charge ou à la température, comme des interrupteurs primaires ou secondaires dans des transformateurs de distribution à remplissage liquide. Cela empêche le fusible de fondre et s'ouvrir suite à des surcharges ou à des défauts traversants de faible courant de très longue durée sur le transformateur. Il faut choisir les interrupteurs pour qu'ils puissent couper le courant qui traverse le transformateur avant que le fusible à usage général monté dans le primaire du transformateur ne soit endommagé. Un interrupteur secondaire ne protégera pas le fusible du transformateur contre des dommages dus à un défaut primaire à haute impédance.

5.1.4.2.7 Coordination en cas de fusible limiteur de courant à coupure intégrale

D'après les normes, un fusible limiteur de courant à coupure intégrale peut couper tout courant permanent entre le courant minimal qui peut provoquer la fusion de ses éléments et son courant maximal de coupure assigné. La CEI 60282-1 permet deux types d'essais pour les fusibles à coupure intégrale, en fonction de la température de l'environnement à laquelle ils seront soumis. Si on escompte que la température de l'environnement ne dépassera pas 40 °C, il faudra établir que le fusible est en mesure de couper son courant assigné. On part du principe qu'une utilisation dans une enveloppe à des températures modérées ne provoque pas de déclassement suffisant pour faire fondre le fusible sous l'effet d'un courant inférieur à cette valeur. Pour des applications dans lesquelles on sait que le fusible sera soumis à des températures extrêmes (par exemple dans un transformateur), on réalise des essais quand le fluide (air, gaz ou liquide) entoure le fusible à la température assignée par le fabricant (Température d'application maximum – MAT) Le fusible doit couper un courant, indiqué par des essais à la MAT, déterminé pour être le courant le plus faible qui provoquera sa fusion.

Un fusible limiteur de courant à coupure intégrale ne demande pas que lui soit associé d'autre appareil qui le protège de surcharges ou de défauts à haute impédance du moment que le fusible est dans sa limite de température. On peut utiliser les fusibles à coupure intégrale pour assurer la protection à la fois contre les défauts et les surcharges.

Les fabricants indiquent souvent le courant permanent admissible des fusibles à coupure intégrale à diverses températures de l'environnement ainsi que les facteurs de déclassement pour les enveloppes courantes comme les puits entourés d'air, de SF₆ et d'huile.

5.1.4.2.8 Coordination en cas de fusibles limiteurs de courant Associés

Il convient de noter que quand le CLF coordonné est un fusible Associé, il faut, parce que ces fusibles ont un courant minimal de coupure, appliquer des règles spéciales de coordination puisqu'il faut les utiliser en liaison avec un autre appareil qui coupera les courants inférieurs à leur courant minimal de coupure assigné. Pour des informations particulières concernant la coordination entre les fusibles Associés et les fusibles à expulsion, voir 5.2.2.4.

5.1.4.3 Coordination disjoncteur à réenclenchement et fusible

Voici les caractéristiques souhaitables de protection à prendre en compte quand on choisit des fusibles pour des disjoncteurs à réenclenchement ou des interrupteurs de contournement disjoncteurs:

- a) protéger le transformateur de poste contre les défauts d'artère dans la zone entre l'appareil en dérivation et l'appareil suivant de protection contre les surintensités en aval du circuit principal et assurer la coordination avec l'appareil suivant de protection contre les surintensités en amont jusqu'au courant de défaut maximal traversant disponible sur le fusible en dérivation;
- b) permettre que l'artère soit chargée au maximum de chargement pratiqué par l'utilisateur;

- c) assurer la coordination appropriée avec les appareils de protection contre les surintensités en aval du circuit principal.

En cas de coordination entre des disjoncteurs à réenclenchement et des fusibles limiteurs de courant en aval (côté charge), il est recommandé d'éviter la possibilité de réenclenchement dans un fusible limiteur de courant en partie fondu puisque le fusible peut ne pas réaliser de coupure satisfaisante si l'élément fond pendant qu'il reçoit un courant de phase normal après avoir réussi le réenclenchement. Pour un disjoncteur à réenclenchement protégé par un fusible dans des applications de lignes aériennes, il est recommandé que la courbe (A) rapide du disjoncteur à réenclenchement soit au-dessous et sur la gauche de la courbe minimale de préarc à 75 % du fusible pour tous les courants de défaut possibles afin de ne pas endommager le fusible par un défaut temporaire (on peut dans ce cas considérer que le disjoncteur à réenclenchement protège le fusible en aval).

Pour éviter que le disjoncteur à réenclenchement ne fonctionne avec retard sans que ce soit nécessaire et qu'il endommage éventuellement le fusible, il est recommandé d'exiger une marge de 0,2 s entre la courbe maximale de fonctionnement d'un fusible "protecteur" et la courbe de retard du disjoncteur à réenclenchement protégé.

Sur les circuits souterrains, les défauts seront probablement de nature permanente. Il n'est donc pas nécessaire que le disjoncteur à réenclenchement atteigne le fusible et se déclenche instantanément pour un défaut sur le côté charge du fusible. Dans ces situations, le déclenchement instantané du disjoncteur à réenclenchement serait typiquement mis en échec.

Pour un fusible protégé par un disjoncteur à réenclenchement (habituellement en situation de banc de transformateur élévateur ou abaisseur), il est recommandé que la courbe de retard du disjoncteur à réenclenchement, multipliée par le facteur "K" du disjoncteur à réenclenchement, soit au-dessous et sur la gauche de la courbe minimale de préarc réduite à 75 % du fusible protégé quand elles sont tracées sur la même base de tension. Aucune marge supplémentaire n'est nécessaire.

5.1.4.4 Coordonner des fusibles limiteurs de courant et des parafoudres

Comme les fusibles limiteurs de courant produisent une tension de coupure notable pendant l'interruption de défaut, il faut être attentif à leur coordination à des parafoudres côté source. Alors que les transformateurs et les autres isolations des équipements ne semblent pas subir d'effets indésirables du fait que des fusibles limiteurs de courant fonctionnent, la tension maximale d'arc peut être assez élevée pour rendre conducteur le parafoudre côté source. L'énergie issue du système pendant la phase de tension de coupure élevée du fusible dépasse la capacité du parafoudre dans certains cas rares. Cette situation est rare depuis que les parafoudres à résistance variable à oxyde métallique (MOV) sont apparus puisque, si une tension de coupure de fusible rend un parafoudre conducteur (par exemple avec un élément fusible filiforme assigné à un courant bas), le maximum de la tension d'interruption est bref et le parafoudre à MOV cesse vite d'être conducteur.

Un parafoudre sur le côté charge du fusible limiteur de courant n'est pas vulnérable, c'est-à-dire qu'il n'est ni exposé à la tension maximale d'arc produite par le fusible ni à l'éventualité d'une énergie excessive provenant du système. En conséquence, il peut être souhaitable de disposer les fusibles limiteurs de courant côté source du parafoudre dans une installation de transformateurs, en sachant que d'autres parafoudres côté source du fusible peuvent rester vulnérables. Cette disposition a pour inconvénient que les surtensions atmosphériques qui traversent le parafoudre traversent aussi le fusible limiteur de courant (et le fusible à expulsion si on utilise une combinaison fusible-fusible associé). Des surtensions atmosphériques occasionnelles seront assez importantes pour perturber le fonctionnement du ou des fusibles sauf si leurs courants assignés sont très élevés (en général supérieurs à 40 A).

5.1.5 Considérations sur les caractéristiques de courant et le pouvoir de coupure pour des fusibles montés en parallèle

Les fabricants de fusibles fournissent des éléments de remplacement limiteurs de courant et de type à expulsion à plusieurs enveloppes qui sont montés en parallèle. Ces montages "d'usine" en parallèle ne sont pas traités dans le présent paragraphe.

On a utilisé avec de bon résultats depuis des années des configurations comportant deux fusibles ou davantage en parallèle. On a installé à cet effet deux éléments de remplacement ou davantage et/ou leurs socles (supports) connectés en parallèle. Un utilisateur peut s'en charger, tout comme un assembleur tiers ou un fabricant qui fournit un appareil comportant deux fusibles ou davantage sur un seul socle. Il en résulte des valeurs de courant assigné plus élevées. Le courant permanent que peut conduire la combinaison est en général légèrement inférieur à la somme des courants assignés de chaque fusible monté en parallèle à cause des variations de résistance des trajets et des effets thermiques de proximité. Il est recommandé de consulter le fabricant du fusible pour déterminer le facteur approprié de déclassement: on a utilisé la plupart du temps un facteur de déclassement de 10 % en présence de deux fusibles et un facteur de déclassement de 15 % en présence de trois fusibles en parallèle ou davantage.

Avant que l'utilisateur monte en parallèle des éléments de remplacement et leurs socles, il est recommandé qu'il consulte le fabricant pour s'assurer que le fusible et le socle du fusible fonctionnent correctement quand on les utilise conjointement et pour obtenir des indications sur la manière de relier les fusibles pour que leurs chemins de courant soient égaux. Il est recommandé de ne monter en parallèle que des fusibles provenant du même fabricant et dont la référence et les caractéristiques sont de même type.

Dans ces cas, il convient de respecter ce qui suit:

- a) il convient de consulter le fabricant du fusible pour déterminer l'adéquation d'une conception donnée d'un fusible pour une connexion en parallèle;
- b) le courant assigné de la combinaison sera généralement légèrement inférieur à la somme des courants nominaux de chaque fusible, en raison, par exemple, des effets thermiques de proximité;
- c) les valeurs du I^2t de la combinaison pendant le fonctionnement seront à peu près égales à $n^2 \times I^2t$ d'un élément de remplacement unique, n étant le nombre d'éléments de remplacement montés en parallèle;
- d) la valeur du courant coupé limité de la combinaison pendant le fonctionnement à un courant de I_p sera à peu près égale à n fois la valeur du courant de coupure pour un élément de remplacement unique à un courant présumé de I_p/n , I_p étant la valeur du courant présumé pour la combinaison et n le nombre d'éléments de remplacement montés en parallèle;
- e) sauf indication contraire du fabricant, le courant maximal de coupure du montage en parallèle des fusibles n'est pas supposé être supérieur à celui d'un seul fusible.
- f) sauf indication contraire du fabricant, le courant minimal de coupure du montage n'est pas inférieur à n fois celui d'un seul fusible du même type, n étant le nombre de fusibles montés en parallèle;
- g) la courbe TCC de préarc de n éléments de remplacement montés en parallèles consistera, approximativement, en une courbe ayant un courant I_p à tout instant, t , égal à $n \times I_s$ où I_s est le courant à l'instant t sur la courbe TCC pour un seul fusible. Pour des durées importantes (à partir de 100 s environ), cette approximation devient moins précise puisque des fusibles voisins peuvent agir sur le flux de chaleur de chacun des autres. Cela dépend de plusieurs facteurs; prendre contact avec le fabricant pour obtenir des informations supplémentaires. On peut utiliser une technique comparable pour obtenir une approximation de la courbe TTC maximale de fonctionnement. Il convient de noter qu'un fabricant qui approuve le montage en parallèle de ses fusibles fournit habituellement des courbes TCC pour des éléments de remplacement montés en parallèle. Pour des durées plus importantes de préarc, il y a un risque que le courant soit déséquilibré sur les fusibles

montés en parallèle, ce qui peut faire fondre le montage à un courant plus faible que celui escompté. Il faut donc veiller à ce que les fusibles Associés ne fondent pas à un courant inférieur au courant minimal de coupure du montage.

Les éléments de remplacement et les socles, ou l'appareil du fabricant servant à maintenir plusieurs éléments de remplacement, forment un diviseur résistif de courant qui divise le courant traversant chaque élément de remplacement en fonction de la résistance de chaque trajet de courant. On obtient normalement un partage adapté si la résistance du chemin de courant pour chaque élément de remplacement varie d'environ 2 % à 3 % par rapport à celle des trajets de courant du ou des autres éléments de remplacement. On est ainsi assuré que chacun des fusibles obtient à peu près le même courant, à la fois dans des conditions d'état stationnaire et de coupure de défaut. Si le trajet de courant pour l'un des fusibles a une résistance significativement inférieure aux autres, une quantité de courant plus importante traversera ce trajet, ce qui augmentera la sollicitation de cet élément de remplacement. Dans certains cas, la sollicitation peut endommager l'élément de remplacement et le rendre impropre à assumer sa part de courant de charge ou à couper un circuit en défaut.

Il est nécessaire de soumettre à essai les éléments de remplacement montés en parallèle sur leur support ou munis d'un dispositif de montage comparable puisque la résistance de l'élément de remplacement et l'impédance du chemin de courant à travers le ou les socles contrôlent la distribution du courant sur les éléments de remplacement. En général, le fabricant peut fournir des informations sur les essais que les éléments de remplacement ont subis pour vérifier les performances, en particulier pour les essais de courant permanent et de pouvoir de coupure. Ces essais sont spécifiés dans les normes des fusibles.

Quand on obtient des valeurs de courant assigné très élevées en montant en parallèle des fusibles limiteurs de courant, ces montages en parallèle peuvent ne pas produire d'effet limiteur de courant (c'est à dire réduire la valeur maximale du courant) même à des niveaux de courant qui atteignent les caractéristiques typiques de coupure de 50 kA ou 63 kA.

5.1.6 Tension en cas de fusibles montés en série

Il n'est pas possible de garantir que la tension assignée de deux fusibles ou davantage montés en série soit supérieure à la tension assignée particulière de chacun des fusibles pris individuellement. Pour obtenir une tension supérieure à l'un des fusibles, il est recommandé de s'en assurer en soumettant le montage en question à des essais distincts. Dans certains cas, le fabricant fournira ces fusibles soit en paires soit montés en série de façon permanente.

Dans certains cas, on suppose que les fusibles limiteurs de courant montés en série se répartissent la tension et seront en mesure de couper un courant de défaut à une tension supérieure à la tension à laquelle les essais ont eu lieu. On a traditionnellement considéré que c'est le cas quand les fusibles sont en mode limiteur de courant (voir cependant 5.2.6). Cela fait partie des bases pour les essais I_1 et I_2 dans la CEI 60282-1 réalisés à 87 % de la tension assignée du fusible. Dans un circuit triphasé en défaut, on suppose que le deuxième et le troisième fusible qui coupent se répartissent la tension composée. Certaines applications de transformateur de type nord-américain utilisent des fusibles limiteurs de courant dont la tension assignée est supérieure ou égale à la tension simple du système (dans des systèmes en étoile avec neutre mis à la terre et des montages de fusible Associé/fusible à expulsion, coordonnés pour la fusion, qui protègent des transformateurs montés en triangle, (voir 5.2.2.6.2)). On suppose qu'en cas de défaut entre phases (sans mettre en jeu la terre), un fusible dans chaque phase partagera la tension composée à des courants de défaut élevés.

Il convient de prêter une attention particulière au choix et au remplacement des fusibles pour des applications dans ces circuits polyphasés si on a supposé que, dans des conditions de défaut, deux fusibles seront effectivement en série et qu'ils partageront la tension composée. Pour que deux fusibles puissent partager la même tension, ils doivent réagir simultanément. Il est donc recommandé que tous les fusibles aient le même calibre, que leur modèle et/ou leur type soit identique et qu'ils proviennent du même fabricant; consulter le fabricant pour plus de précisions.

5.1.7 Résistance des fusibles à la tension de rétablissement.

La plupart des fusibles sont conçus pour résister indéfiniment à la tension rétablie à leurs bornes après coupure. Les fusibles d'extérieur ont en outre une ligne de fuite et des revêtements conçus pour résister aux contraintes de tension et à la pollution. Les fusibles de distribution et d'autres fusibles à ouverture automatique sont conçus pour assurer un effet d'ouverture après l'opération de coupure. Cet effet supprime rapidement la contrainte de tension dans le porte-fusible. Il existe donc certains types de fusibles sans ouverture automatique comme les types limiteurs de courant Associés conçus pour être utilisés avec des fusibles à expulsion en série ou d'autres appareils coordonnés pour fournir des moyens d'isolation. De nombreux fusibles de condensateurs unitaires comportent un sectionneur qui supprime toute contrainte de tension de longue durée sur un fusible fondu. L'isolation d'un fusible fondu empêche alors l'éventuelle rupture diélectrique d'un fusible sans ouverture automatique, éventuellement contaminé, s'il est soumis à une contrainte de tension de longue durée. Ceci permet de réaliser un fusible plus court (où la ligne de fuite est moindre) qu'il ne serait nécessaire sans cela.

Pour les applications spéciales dans lesquelles il peut y avoir une contrainte de tension de longue durée dans un fusible fondu et dans lesquelles la rupture diélectrique permettrait le rétablissement d'un courant, il est recommandé de consulter le fabricant du fusible pour vérifier que le fusible envisagé convient à cette application.

5.1.8 Décharge partielle

Voir 5.2.5.5.

5.2 Applications typiques

5.2.1 Protection de câbles et de lignes aériennes

5.2.1.1 Généralités

5.2.1.1.1 Au sujet du courant d'appel

Le courant d'appel dans un circuit de distribution peut être très élevé pendant les premiers cycles à cause du courant magnétisant pour des transformateurs qui comportent un flux magnétique résiduel élevé dans le noyau et un flux magnétique maximal. Il est recommandé que l'utilisateur en tienne compte, ainsi que du courant d'appel de l'éclairage incandescent et du courant d'appel à rotor bloqué dans les moteurs (à quoi s'ajoute un certain flux résiduel en discordance de phases). Le courant magnétisant de transformateur peut être assez élevé pour un transformateur isolé mais quand il s'agit d'un transformateur parmi d'autres dans le circuit à mettre sous tension, on s'attend à ce que le total du courant d'appel magnétisant dans le circuit soit inférieur à la somme du courant d'appel magnétisant maximal de chaque transformateur. Les courants d'appel assez élevés pourraient faire chuter la tension, ce qui réduirait les courants d'appel.

Si par exemple dix transformateurs de 50 kVA étaient mis simultanément sous tension, ce qui donne un total de 500 kVA, un courant d'appel de 20 fois le courant assigné de transformateur représenterait à cet instant une charge de 10 000 kVA. Certains circuits de distribution subiraient une importante baisse de tension pendant cette période, ce qui réduirait significativement l'amplitude du courant d'appel. Mais comme il peut être difficile de savoir quels circuits sont en mesure de produire et de supporter les courants d'appel élevés quand un nombre variable de transformateurs sont branchés, il serait prudent d'utiliser la valeur en kVA branchés et les multiplicateurs présentés dans 5.2.2.1.2 (25/12 fois à 0,01/0,1 s) pour des transformateurs isolés.

L'expérience a montré que si un fusible sectionneur de distribution n'était chargé qu'à 30 % du courant assigné au moment d'une coupure de courant, si le courant n'était pas coupé plus d'une heure et s'il n'y avait pas de changements significatifs de la charge, les courants d'appel ne poseraient pas de problème.

Un fusible peut se déclencher quand le courant de charge connecté est compris entre 30 % et 50 % des caractéristiques du fusible. Au-delà de 50 %, il est recommandé de sectionner le circuit pour qu'il ne reprenne qu'une partie de la charge. Il n'est pas recommandé de dériver un fusible (en utilisant un "cavalier" à basse impédance, par exemple un câble) pour éviter de sectionner le circuit.

5.2.1.1.2 Au sujet de la reprise de charge

La reprise de charge à froid est souvent un facteur plus important dans le choix d'un fusible sectionneur. Après une importante période d'interruption, beaucoup de charges connectées sont prêtes à redémarrer dès que les transformateurs sont remis sous tension. Certaines de ces charges, comme les moteurs, peuvent exiger un courant qui représente de 5 à 10 fois le courant de fonctionnement normal sur une période de l'ordre de quelques secondes. Les références publiées (voir la bibliographie) sur le sujet recommandent que le fusible sectionneur soit en mesure de supporter environ 6 fois le courant maximal de charge avant les interruptions d'une seconde, trois fois le courant maximal de charge avant les interruptions de 10 s et 2 fois cette valeur avant les interruptions de 15 min.

5.2.1.1.3 Au sujet du défaut

Il est recommandé que le courant assigné de coupure maximal du fusible soit supérieur au courant de défaut présumé (disponible). Le fabricant du fusible spécifie le courant maximal de coupure pour un appareil. Un fusible sectionneur devrait typiquement couper des courants de défaut élevés puisque le fusible du transformateur ou l'appareil de protection détecterait et couperait les défauts secondaires du transformateur et les courants de surcharge anormalement élevés. Si on escompte que le fusible du transformateur réagisse à des surintensités de faible niveau, il doit être en mesure de couper ces courants.

5.2.1.2 Fusibles pour des disjoncteurs à réenclenchement ou des disjoncteurs de contournement

Voici quelques caractéristiques souhaitables de protection à prendre en compte lors du choix des fusibles dans ces applications:

- a) protéger le transformateur de poste contre les défauts d'artère dans la zone entre l'appareil en dérivation et l'appareil suivant de protection contre les surintensités en aval du circuit principal et assurer la coordination avec l'appareil suivant de protection contre les surintensités en amont jusqu'au courant de défaut maximal traversant disponible sur le fusible en dérivation;
- b) permettre que l'artère soit chargée au maximum de charge pratiqué par l'utilisateur;
- c) assurer la coordination appropriée avec les appareils de protection contre les surintensités en aval du circuit principal.

5.2.1.3 Fusibles pour le sectionnement automatique

Voici quelques caractéristiques souhaitables de protection à prendre en compte lors du choix des fusibles dans ces applications:

- a) protéger les conducteurs des défaillances dues à la température ou des échauffements extrêmes dans la zone entre le fusible de sectionnement et l'appareil suivant de protection contre les surintensités en aval du circuit principal et assurer la coordination avec l'appareil suivant de protection contre les surintensités en amont jusqu'au courant de défaut maximal disponible sur le fusible de sectionnement;
- b) permettre que le circuit soit chargé au maximum de charge pratiqué par l'utilisateur;
- c) assurer la coordination appropriée avec les appareils de protection contre les surintensités en aval du circuit principal.

5.2.1.4 Utilisation de fusibles dans des systèmes de répartition

Voici quelques caractéristiques souhaitables de protection à prendre en compte lors du choix des fusibles dans ces applications:

- a) protéger les jeux de barres de la sous-station des défauts sur ou dans le transformateur de la sous-station de distribution et assurer la coordination avec tous les appareils de protection contre les surintensités en amont jusqu'au courant de défaut maximal disponible sur les jeux de barres de la sous-station;
- b) fournir une protection maximale au transformateur contre les défauts traversants. Le niveau de protection du transformateur est déterminé en comparant la courbe caractéristique maximale temps-courant de fonctionnement pour le fusible choisi et la tenue de courte durée appropriée du transformateur. Les deux courbes doivent être correctement ajustées pour tenir compte des différences entre les courants de phase primaire et secondaire et les courants d'enroulement associés à la liaison spécifique du transformateur concernée et les types de défauts éventuels dans le circuit secondaire;
- c) permettre de détecter et d'isoler des défauts internes du transformateur, de réduire l'éventualité de rupture de cuve de transformateur;
- d) permettre de charger le transformateur à la charge maximale que pratique l'utilisateur;
- e) résister à la fois au courant d'appel magnétisant du transformateur et à l'intensité de reprise de charge après une brève coupure (jusqu'à 1 min) sur des jeux de barres de la sous-station;
- f) assurer une coordination appropriée avec les appareils de protection contre les surintensités sur le secondaire du transformateur.

5.2.1.5 Déterminer la zone de protection des fusibles (portée)

Les fusibles fondent et interrompent des situations de surintensité en fonction de leurs courbes TTC. Il est recommandé que le courant minimal qui réussit à provoquer la fusion du fusible et la coupure soit inférieur au courant de défaut minimal qui résulterait d'un défaut à l'extrémité de la zone à protéger (extrémité de la phase ou appareil de protection suivant en aval). Il faut donc déterminer le courant de défaut minimal à chaque point sectionneur et à l'extrémité de chaque zone de protection.

"Portée" est un terme usité dans le domaine de la coordination et de la protection contre les surintensités. La portée mesure la capacité d'un appareil de protection à détecter une condition de défaut dans sa zone de protection. Elle a été mise au point pour des appareils, comme des disjoncteurs à réenclenchement, qui ont une valeur de déclenchement bien définie – l'appareil ne fonctionnera pas si un courant suffisant n'est pas disponible. Le terme a d'abord servi à décrire la capacité d'un disjoncteur à réenclenchement à dépasser la portée du fusible suivant et à fonctionner sans faire fondre le fusible (voir 5.1.4.3). On l'utilise désormais aussi pour des fusibles, il est particulièrement adapté aux fusibles dont le pouvoir minimal de coupure est défini. Font partie de ces fusibles les fusibles limiteurs de courant à usage général et les fusibles à expulsion de type "B" (fusibles à acide borique). Il est recommandé de ne pas soumettre les fusibles à usage général à des courants compris entre leur courant assigné et leur courant de préarc d'une heure; les fusibles à acide borique peuvent subir des dommages suite à une surcharge prolongée.

On se reportera à la Figure 19 pour des précisions sur la notion de portée. On considérera un appareil A comme celui pour lequel on souhaite calculer la portée. Les méthodes pour calculer le courant de défaut sont exposées dans les normes IEEE 141 [4], IEEE 399[5] et CEI 60909-0.

La zone de protection de l'appareil "A" est représentée en ligne pointillée. Elle se termine à l'endroit des autres appareils de protection ("B", "C", etc.) et à l'extrémité des embranchements radiaux (lignes secondaires). On suppose que le courant souhaité de fonctionnement (valeur minimale de déclenchement) de l'appareil "A" est de 100 A. C'est un courant qui donne une durée exigée de fonctionnement – pour un fusible à usage général il pourrait s'agir du courant minimal de préarc d'une heure. Alors qu'un fusible peut fondre en

plusieurs heures (par exemple un fusible limiteur de courant à coupure intégrale), il n'est normalement pas souhaitable de permettre que le défaut dure aussi longtemps. On peut donc choisir une durée maximale appropriée pour le courant minimal de fonctionnement de l'appareil, par exemple 300 s (tous les fusibles ont des courbes TCC à 300 s). Un utilisateur pourrait aussi vouloir que la durée maximale de défaut soit plus courte. Le courant est calculé pour plusieurs points dans la zone de protection du fusible. Dans l'exemple donné, le courant présumé le plus faible dans la zone se trouve au point 10 auquel 300 A traversent le fusible "A".

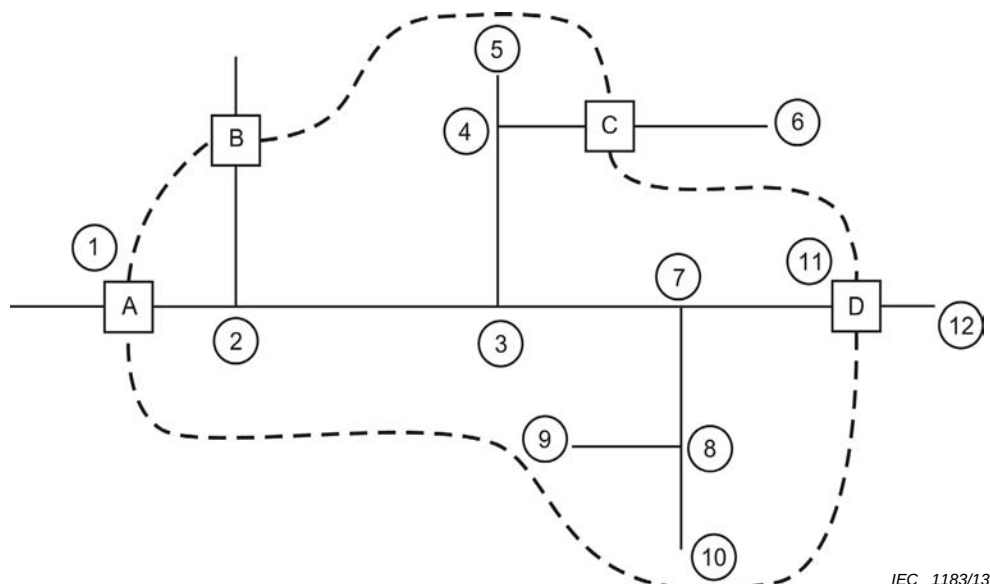


Figure 19 – Exemple de portée

En d'autres termes, avec 300 A le fusible fonctionnerait en moins que la durée maximale souhaitée (300 s dans cet exemple). Les courants de défaut sur les circuits de distribution sont cependant typiquement calculés pour des défauts francs (défauts de résistance relativement faible). En fait, plus de 90 % de tous les défauts constatés sur des circuits de distribution aériens sont de nature temporaire (par exemple des branches d'arbre qui touchent des conducteurs) et la plupart de ces défauts ont une résistance élevée, ce qui réduit significativement la valeur du courant de défaut. Il faut prendre en compte que le courant de défaut peut prendre des valeurs réduites quand on détermine la taille d'un appareil de protection pour que l'extrémité de sa zone de protection fasse partie de sa portée. Un utilisateur peut donc se fonder sur son expérience pour déterminer le minimum de courant possible et introduire dans le calcul un "facteur de sécurité". Il est courant d'utiliser des facteurs de 3 ou moins. Dans l'exemple ci-dessus, la marge de "portée" est:

Marge de portée = $\frac{\text{courant de défaut minimal qui traverse l'appareil dans la zone de protection}}{\text{courant minimal pour assurer le fonctionnement de l'appareil de protection}}$

dans cet exemple il serait de

$$\frac{300 \text{ A}}{100 \text{ A}} \text{ ou } \frac{3}{1}$$

C'est là une marge normalement acceptable (elle permet aussi certaines erreurs lors du calcul du courant présumé).

L'expérience montre que les défauts sont normalement soit de faible impédance, ce qui donne des courants comparables aux valeurs calculées, soit d'une impédance si élevée qu'il est très difficile de les détecter par des fusibles en amont. Du fait de cette expérience, on a donc tendance à utiliser d'assez faibles marges de portée pour ces appareils.

5.2.1.6 Fusibles limiteurs de courant

5.2.1.6.1 Choisir le courant assigné minimal des fusibles

Il est recommandé que la taille des fusibles soit liée à la somme des puissances nominales en kVA des appareils branchés, au courant d'appel magnétisant et aux conditions de charge maximale prévues comme traité en 5.2.1.1.

Comme le courant d'appel magnétisant est un courant élevé de courte durée, si on ne choisit pas correctement l'élément de remplacement, un ou plusieurs éléments fusibles peuvent fondre et s'ouvrir dans une zone de section minimale. La fusion partielle d'un élément fusible ou la fusion totale d'un certain nombre d'éléments montés en parallèle peut réduire la capacité du courant permanent du fusible et son aptitude à résister à des chocs supplémentaires. Il peut en résulter un fonctionnement perturbé pour des fusibles à percuteur qui déclenchent un appareil de coupure en série. Mais pour des fusibles de conceptions différentes, il peut en résulter une surchauffe et éventuellement un défaut du fusible, ou encore le fusible peut fondre sous l'effet d'un courant qui ne lui permet pas d'interrompre le circuit avec succès. C'est pourquoi il est très important de déterminer correctement la taille d'un fusible limiteur de courant pour qu'il résiste au courant d'appel magnétisant.

Pour évaluer la capacité de charge des fusibles qu'on utilise pour protéger une ligne, il est recommandé de comparer chaque courbe minimale de préarc du fusible au courant d'appel magnétisant et aux caractéristiques de reprise de charge du circuit qu'il protège. On peut porter dans un tableau la valeur du courant à laquelle la courbe minimale de préarc du fusible se trouve complètement à droite de chacun de ces points dans chaque cas, c'est-à-dire la reprise de charge et le courant d'appel de magnétisation.

Comme la forme de la courbe minimale de préarc est différente pour chaque fusible, certains fusibles sont plus susceptibles de résister à la reprise de charge qu'au courant d'appel magnétisant et inversement. Il est par conséquent nécessaire de considérer individuellement chaque fusible et non d'utiliser une méthode empirique comme de déterminer la taille d'un fusible pour 1,5 fois à 2 fois le courant effectif de charge.

5.2.1.6.2 Au sujet de la zone de protection

On utilise depuis de nombreuses années les fusibles limiteurs de courant pour protéger un embranchement radial (ligne ou dérivation secondaire) de circuits de distribution aériens ou souterrains. Outre leurs aspects limiteurs de courant, ces fusibles sont aussi utilisés parce qu'ils fonctionnent sans bruit et qu'ils ont un pouvoir de coupure élevé. Quand on utilise des fusibles limiteurs de courant pour protéger une ligne secondaire, on doit prendre en compte des aspects qui se ne rencontrent pas typiquement pour d'autres appareils de protection contre les surintensités. Dans la plupart des appareils de protection contre les surintensités, une mauvaise coordination provoque seulement un fonctionnement perturbé de l'appareil côté source. Mais la mauvaise coordination des fusibles limiteurs de courant ne provoque pas seulement un fonctionnement perturbé du fusible mais peut aussi entraîner une défaillance du fusible. Le Paragraphe 5.2.1.6.2 présente les remarques particulières concernant les fusibles limiteurs de courant pour protéger des lignes secondaires.

a) Fusibles limiteurs de courant à usage général

Il est évident qu'un fusible à usage général sera soumis à un courant de défaut à l'extrémité de sa zone de protection; on recommande cependant qu'il soit aussi en mesure de couper la valeur minimale du courant de défaut prévu. Certains fusibles limiteurs de courant à usage général peuvent subir des dommages s'ils sont soumis à un courant permanent supérieur à leur courant assigné et inférieur à leur courant de préarc d'une heure (indication du fabricant). Soit le fusible peut fondre à un courant trop faible pour qu'il coupe le circuit, soit le courant de surcharge fait chauffer le fusible en endommageant ses composants ou son porte-fusible avant que le fusible puisse fondre et couper le courant. La portée d'un fusible à usage général dépend donc en grande partie de sa conception. Il faut prendre en compte toute limitation de la surcharge quand il s'agit de déterminer la portée de ces fusibles.

Le fabricant d'un fusible limiteur de courant à usage général indique par exemple que le fusible supporte 100 % du courant assigné en permanence sans subir de dommage. Mais pour fondre et interrompre correctement, la surintensité doit être d'au moins 220 % de la caractéristique du fusible. Si ce fusible est soumis à un courant permanent au-delà de sa caractéristique (jusqu'à 220 %), le corps du fusible pourra subir des dommages et le fusible être hors d'usage avant que l'élément fusible puisse fondre et couper le circuit. C'est pourquoi le courant de défaut minimal admissible à l'extrémité de la zone de protection, pour obtenir une portée de 3/1 à l'aide de ce fusible limiteur de courant à usage général, serait égal à: $I_r \times 2,2 \times 3,0$ ou $I_r \times 6,6$, I_r étant le courant assigné du fusible.

b) Fusibles limiteurs de courant à coupure intégrale

Pour les fusibles limiteurs de courant à coupure intégrale, la notion de portée (5.2.1.5) devient en grande partie arbitraire si on prend en compte la capacité du fusible à couper un courant faible. Il est cependant recommandé de voir si le fusible coupera de faibles valeurs du courant de défaut avant que d'autres appareils du système subissent des dommages.

Pour déterminer la portée, on devra déterminer le courant auquel le fusible fond en une durée acceptable (par exemple 300 s ou moins). En partant de la courbe TCC minimale de préarc pour le fusible de 100 A d'un fabricant, on constate qu'un courant d'environ 220 A fera fondre le fusible en 300 s. Pour obtenir une portée de 3/1, le courant de défaut minimal acceptable à l'extrémité de la zone que protège ce fusible serait le suivant: 220 A (courant pour une fusion à 300 s) fois 3 soit 660 A. Encore une fois, le fusible à coupure intégrale coupera de façon suffisante des courants assez faibles; le critère ci-dessus limitera cependant la durée de préarc.

5.2.1.7 Fusibles à expulsion

Les fusibles à expulsion sont le type le plus répandu de fusibles pour la protection des lignes et pour les applications de sectionnement. Ce sont normalement des fusibles à ouverture automatique, il est donc facile de voir qu'un fusible a fonctionné. Il est recommandé que la taille des fusibles soit liée à la somme des puissances nominales en kVA des appareils branchés, au courant d'appel magnétisant et aux conditions de charge maximale prévues comme traité en 5.2.1.1.

Comme le courant d'appel magnétisant est un courant élevé de courte durée, l'élément fusible peut fondre et s'ouvrir à l'endroit de sa plus petite section transversale. Une fusion partielle d'un élément fusible peut réduire la capacité de courant permanent du fusible et son aptitude à résister aux chocs supplémentaires. Il peut en résulter un fonctionnement perturbé.

Les questions concernant la zone de protection (portée) d'un fusible à expulsion sont traitées en 5.2.1.5.

5.2.1.8 Combinaison des fusibles à expulsion et des fusibles limiteurs de courant

Si le courant de défaut disponible à l'endroit d'un fusible à expulsion est supérieur au courant maximal assigné de coupure du fusible, trois possibilités se présentent. La première consiste à remplacer le fusible à expulsion par un autre dont le courant maximal de coupure est plus élevé. Si l'appareil est un fusible de distribution, il est possible qu'un autre porte-fusible ou qu'un autre ensemble porteur soit nécessaire (porte-fusible et socle de fusible, c'est-à-dire tout le fusible sauf l'élément de remplacement). Au lieu de cela, il est possible qu'un fusible à expulsion de classe B soit nécessaire puisqu'il tend à avoir des caractéristiques de coupure plus élevées. La deuxième possibilité consiste à remplacer le fusible à expulsion par un fusible limiteur de courant. Il se peut cependant que la coordination avec les fusibles et les interrupteurs côté source (en amont) soit plus difficile puisque les fusibles limiteurs de courant ont tendance à avoir d'autres courbes TCC. Il existe en outre moins de fusibles limiteurs de courant qui ont un effet d'ouverture automatique (ce qui est habituellement souhaitable pour des circuits aériens, à la fois pour l'isolation et pour la visibilité). La troisième possibilité consiste à ajouter un fusible limiteur de courant au fusible à expulsion et à combiner les fusibles (ce qu'on appelle parfois méthode "à deux fusibles"). Dans ce cas, le fusible limiteur de courant est habituellement un fusible Associé. Il est alors nécessaire

d'assurer une coordination correcte entre les deux fusibles (voir 5.2.2.5 et 5.2.2.6.2). Cette méthode a pour avantage que si les courants de défaut ont augmenté en dépassant le pouvoir d'un fusible à expulsion économique, il est souvent possible de modifier les installations existantes de fusibles en les équipant de fusibles limiteurs de courant. L'ajout d'un fusible limiteur de courant contribue aussi à la sélectivité, c'est-à-dire à réduire l'étendue d'une interruption. Cela tient à ce que le I^2t du fusible limiteur de courant relativement fixe rend plus facile la coordination avec les fusibles en amont (côté source) et les disjoncteurs qu'avec un fusible à expulsion. Il est évident qu'on utilise largement la méthode de combinaison dans de nouvelles installations puisque c'est une solution économiquement intéressante pour des circuits dont le courant de défaut est élevé et/ou le facteur de puissance est faible (X/R élevé). Si on prend en compte la zone de protection (5.2.1.5), il faut prendre en compte les caractéristiques du fusible à expulsion puisque c'est le fusible à expulsion qui permet le fonctionnement à faible courant.

5.2.2 Applications aux transformateurs de distribution

5.2.2.1 Généralités

5.2.2.1.1 Usage des fusibles

Il convient de rappeler que dans cette application un fusible a pour but principal de retirer un transformateur défectueux du réseau et de minimiser les risques d'une défaillance importante. Il est donc particulièrement important de protéger le système et de minimiser l'étendue de la zone touchée par une défaillance. Une défaillance d'un transformateur est "importante" quand elle provoque des dommages extérieurs qui pourraient mettre en danger des personnes ou du matériel. Outre ces avantages principaux, les fusibles peuvent aussi dans certaines conditions protéger le transformateur contre les surcharges ou les court-circuits au secondaire. Même si c'est normalement la protection secondaire qui en est chargée, les fusibles primaires assument parfois cette tâche (parfois comme "solution de secours" pour une protection secondaire). Voici quelques caractéristiques souhaitables de la protection à envisager quand on choisit des fusibles dans une application de transformateur; il convient cependant de se rappeler que ces exigences peuvent être contradictoires et dans ce cas de prendre en compte les priorités de l'utilisateur

- a) protéger le système de distribution des effets de défauts sur le transformateur ou à l'intérieur de celui-ci, et assurer la coordination avec l'appareil de protection contre les surintensités suivant en amont jusqu'au courant de défaut maximal disponible sur le fusible du transformateur;
- b) protéger au mieux le transformateur de défauts traversants (le courant qui traverse le transformateur dû à un défaut secondaire, à l'extérieur du transformateur). Le niveau de protection du transformateur est déterminé en comparant la courbe temps-courant de fonctionnement pour le fusible en question et la courbe de tenue de courte durée du transformateur. Les deux courbes doivent être correctement ajustées pour tenir compte des différences entre les courants de phase primaire et secondaire et les courants d'enroulement associés au couplage spécifique du transformateur et le type des défauts éventuels dans le circuit secondaire, voir 5.2.2.1.5;
- c) détecter et isoler les défauts internes du transformateur, réduire l'éventualité que la cuve du transformateur se rompe;
- d) permettre de charger le transformateur à la charge maximale que pratique l'utilisateur;
- e) résister à la fois au courant d'appel magnétisant du transformateur et à l'intensité de reprise de charge après une brève coupure (jusqu'à 1 min) et après une interruption durable (30 mn et davantage).
- f) assurer une coordination appropriée avec les appareils de protection contre les surintensités sur le côté secondaire du transformateur.
- g) résister aux décharges transitoires à travers un transformateur ayant un enroulement primaire mis à la terre dont le circuit magnétique subit la saturation par une surtension, due à la foudre, à forme d'onde de longue durée (surtout sur de petits transformateurs de 25 kVA et moins);

- h) résister aux courants de choc qui peuvent être déchargés par un parafoudre placé côté charge du fusible et en amont du transformateur protégé. Ce choc peut s'ajouter à celui dont il est question en 5.2.2.1.1 g).

5.2.2.1.2 Au sujet du courant d'appel

Les fusibles peuvent subir des dommages si les courants d'appel font fondre en partie le ou les éléments fusibles. Les courants d'appel dus à la mise sous tension du transformateur peuvent être élevés et exigent une vérification dans le cadre de la procédure normale de sélection et de coordination.

Quand on met un transformateur sous tension, des courants d'appel relativement élevés peuvent apparaître en fonction du flux résiduel dans le noyau et de la tension au moment où le circuit est fermé. Un ensemble de règles de choix des fusibles généralement acceptées est issu d'essais sur des transformateurs typiques ainsi que de nombreuses années d'expérience à utiliser les fusibles limiteurs de courant et les fusibles à expulsion dans des applications de transformateur. Ces règles prennent en compte la valeur typique du courant de la première boucle ainsi que de la valeur efficace sur la durée d'un courant d'appel typique. Les règles se présentent sous forme de deux points temps-courant et sont exprimées en multiples du courant assigné à pleine charge du transformateur. Il est recommandé de suivre les directives fournies par le fabricant du transformateur quand elles sont disponibles, mais les valeurs utilisées représentent typiquement 25 fois le courant assigné pour 0,01 s (usage en Amérique du Nord) et/ou 12 fois le courant assigné pour 0,1 s (usage universel). On peut utiliser des valeurs différentes en fonction de la taille et du modèle du transformateur. On compare ces points au TCC minimal de préarc du fusible. Si en ces points les caractéristiques du fusible se trouvent au-dessus et sur la droite, on considère que le fusible est en mesure de résister correctement au courant d'appel magnétisant du transformateur.

5.2.2.1.3 Au sujet de la reprise de charge

La reprise de charge est une condition de courant transitoire qui apparaît quand on met un circuit sous tension après qu'il soit resté hors tension pendant 2 min ou davantage. Les fusibles qu'on utilise dans certaines applications comme la protection de pompes peuvent être soumis à des courants élevés après une interruption de 6 s seulement. Les essais ont montré que de grands ventilateurs peuvent absorber six fois le courant assigné pendant 60 s. Sur des circuits domestiques, les courants de reprise de charge peuvent poser problème parce que le foisonnement de charge a été perdu. Les réfrigérateurs, les ventilateurs à circulation d'air, les compresseurs de climatisation et/ou les pompes à chaleur, les pompes à eau, etc. sont tous prêts à démarrer. Les courants combinés de démarrage de ces appareils peuvent aussi contribuer à créer un problème de courant d'appel, appelé reprise de charge. Comme les compresseurs ont une pression de refoulement faible ou nulle, leur moteur est en mesure de parvenir rapidement à une vitesse suffisante pour amoindrir ce problème.

Un autre problème, souvent appelé déclenchement sympathique, se produit quand la tension baisse momentanément à cause d'un défaut dans une autre partie du système qui disparaît ensuite en quelques cycles, ce qui permet que la tension revienne à la normale dans la zone en question. Pendant la chute de tension, la tension dans certaines parties du système baisse à tel point que les moteurs de compresseur s'immobilisent. Lorsque la tension redevient normale, les gros moteurs de compresseur ne peuvent pas reprendre leur fonctionnement parce que la pression de refoulement est élevée. Le courant de rotor bloqué perdure jusqu'à ce que la surcharge thermique sur le moteur du compresseur déclenche. Les essais sur des circuits où ce phénomène apparaît montrent qu'on a pendant à peu près 7 s environ 2,7 fois le courant d'avant le défaut. On obtient le multiplicateur 2,7 du fait que tous les moteurs sont remis sous tension instantanément (certains contacteurs n'ont pas pu s'ouvrir), avec une perte de foisonnement. Les situations de rotor bloqué à faible facteur de puissance s'ajoutent à l'inductance dans le secondaire, le transformateur, la dérivation, le câble d'alimentation principal et la sous-station et entraînent une faible tension sur les bornes du moteur et une surintensité. Il faut environ sept secondes aux protections thermiques de surcharge sur des moteurs à rotor bloqué pour déclencher.

La distinction entre déclenchement sympathique et reprise de charge provient en partie de la durée de fonctionnement des relais de contrôle et des contacteurs. Dans la plupart des cas, la fermeture est suffisamment aléatoire pour permettre à des moteurs monophasés de conditionnement d'air relativement petits de se remettre à fonctionner en beaucoup moins d'une seconde, à une tension normale, puisqu'il n'y a pas de pression de refoulement.

Il n'y avait pas de valeur normalisée dans les normes CEI de fusibles puisque ces exigences de reprise de charge dépendent entièrement des pratiques de l'utilisateur. De plus, comme ces exigences peuvent entrer en conflit avec le souhait que le fusible fonctionne dans la plage de 2 à 10 s à un courant aussi faible que possible (voir 5.2.2.1.4), il est recommandé que les exigences de reprise de charge fassent l'objet d'un accord entre le fabricant et l'utilisateur. Mais en l'absence d'informations particulières, la règle empirique qu'on suit habituellement dans la plupart des régions du monde consiste à choisir le fusible de telle manière que la courbe minimale TCC de préarc se trouve sur la droite des points qui correspondent à six fois le courant assigné à pleine charge pendant une seconde, trois fois le courant assigné à pleine charge pendant 10 s et deux fois le courant assigné à pleine charge pendant 15 min. Il est souvent possible de réduire ces exigences sur des transformateurs de plus grande taille.

Des courants répétés de démarrage provenant de moteurs à forte charge peuvent provoquer des sollicitations inhabituelles sur un élément fusible limiteur de courant; on a développé des conceptions spéciales pour des applications de démarreur de moteur pour prendre en compte cette application particulière. Il en est question en 5.2.3.

5.2.2.1.4 Au sujet de la charge et de la surcharge du transformateur

La CEI 60076-7 et la CEI 60076-12 indiquent comment charger des transformateurs en toute sécurité. Ces normes mentionnent les pertes potentielles que subit la durée de vie du transformateur à divers niveaux et diverses durées de charge. Ces informations sont données dans une série d'équations et sous forme de tableau. Il est aussi possible de représenter sous forme graphique les données du tableau et de les exprimer sous forme de courbe de charge en toute sécurité. Il est recommandé que les TCC du fonctionnement des fusibles se trouvent sur la gauche de la courbe de charge en toute sécurité afin d'assurer la protection appropriée. Dans la plupart des cas, la protection de surcharge du transformateur est réalisée par un dispositif au secondaire (fusibles ou disjoncteur). Les fusibles primaires peuvent cependant devoir fournir une protection contre la surcharge, notamment pour des transformateurs d'assez petite taille selon la méthode en usage en Amérique du Nord (voir 5.2.2.4).

En général, le fabricant du transformateur ou du fusible recommande la taille appropriée des fusibles pour faire face à des courants de pleine charge et à certains courants de surcharge sans faire fonctionner ou sans endommager le fusible. La température ambiante à laquelle le fusible est exposé pendant la surcharge dépend de l'endroit où se trouve le fusible.

5.2.2.1.5 Au sujet du défaut traversant

Le courant qui traverse un transformateur à cause d'un défaut sur le côté secondaire est souvent appelé "défaut traversant". Le courant maximal apparaît quand le défaut apparaît sur les bornes du secondaire du transformateur (ce qu'on appelle alors défaut "boulonné au secondaire") quand il est seulement limité par l'impédance du transformateur (et aussi dans une faible mesure par l'impédance du système en amont). La CEI 60076-1 exige qu'un transformateur ait la capacité thermique de résister à un court-circuit pendant 2 s (sur des transformateurs jusqu'à 2 500 kVA en négligeant l'impédance du système si elle est égale ou inférieure à 5 % de l'impédance de court-circuit du système. Les courbes TCC de fonctionnement du fusible primaire doivent se trouver sur la gauche du point qui correspond à 2 s. D'autres normes de transformateurs reconnaissent qu'une composante mécanique intervient dans les dommages occasionnés par des défauts traversants et leurs exigences peuvent être plus rigoureuses. Il est alors possible que les courbes TCC de fonctionnement du fusible primaire doivent se trouver sur la gauche d'une caractéristique supplémentaire qui est définie pour des durées supérieures à 2 s et reposent sur des valeurs de I^2t constantes à

partir du point de court-circuit à 2 s. Les défauts au secondaire, répercutés sur l'enroulement primaire que le fusible doit protéger, ont typiquement une intensité qui fait fonctionner le fusible en 0,02 s à 1,0 s: c'est pourquoi il n'y a pas ou peu d'effet limiteur de courant. Le fusible doit donc être en mesure de couper un faible courant pour prendre en charge cette fonction. Il convient de remarquer que dans des conditions de défaut le couplage de l'enroulement du transformateur aura un effet sur le courant dans les phases primaires (et donc les fusibles) par rapport au courant dans une phase secondaire. Pour un transformateur connecté en étoile à la terre – étoile à la terre, un courant de 1 p.u. dans une phase secondaire est fourni par un courant de 1 p.u. dans une phase primaire. Mais pour un transformateur connecté en triangle – étoile à la terre, un courant de 1 p.u. dans une phase secondaire soumise à un défaut à la terre correspond à seulement 0,58 p.u. de courant de ligne au primaire.

On peut dans certaines conditions négliger la situation de défaut traversant quand on utilise un combiné interrupteur-fusibles (voir 5.2.7.2)

5.2.2.2 Fusibles limiteurs de courant

5.2.2.2.1 Généralités

Les fusibles limiteurs de courant sont d'un usage courant pour protéger les transformateurs pour les raisons qui sont présentées en 4.1.5. Il existe deux méthodes courantes pour protéger les transformateurs, inspirées au sens large de l'usage "européen" et de l'usage "nord-américain" quoique dans bien des parties du monde on ait recours à l'un, à l'autre ou aux deux usages. Les normes de la CEI reconnaissent un "usage européen" et un "usage nord-américain" pour ce qui est des tensions privilégiées et des niveaux d'isolement; on utilisera donc aussi ces termes en liaison avec les usages de protection des transformateurs, tout en sachant que cet usage n'est pas propre à ces régions.

Alors qu'il y a de nombreuses raisons à avoir recours à l'un ou à l'autre des usages, une des principales raisons du choix tient à la densité de l'utilisation. Quand il y a beaucoup de clients dans une région donnée, il est souvent économique d'utiliser des transformateurs d'assez grande taille utilisés avec des appareillages de boucle de type "ring main unit" (intégrant des combinés interrupteurs-fusibles, l'interrupteur étant déclenché par un percuteur de fusible associé, ou intégrant des disjoncteurs). C'est là l'usage "européen". Quand les clients sont plus disséminés, il est plus courant d'équiper un petit nombre de ménages (souvent un seul) d'un transformateur particulier. Cela rend inadapté le combiné interrupteur-fusible. Au lieu de cela, soit on utilise un fusible à coupure intégrale, soit on obtient la coupure intégrale par une combinaison fusible associé et fusible à expulsion. C'est là l'usage "nord-américain"; une telle combinaison de fusibles exige une coordination particulière dont il est question en 5.2.2.4.

5.2.2.2.2 Caractéristiques temps-courant des éléments de remplacement

Il convient de définir comme suit les caractéristiques temps-courant des éléments de remplacement à haute tension destinés à être utilisés dans des circuits comprenant des transformateurs:

- a) un courant de fonctionnement relativement élevé dans la partie 0,1 s de façon à supporter le courant d'appel du transformateur et à assurer une bonne coordination avec les appareils de protection au secondaire (si de tels appareils sont installés), voir 5.2.2.1.2;
- b) un courant de fonctionnement relativement faible dans la partie 10 s de façon à:
 - assurer une élimination rapide des défauts d'enroulement du transformateur, des défauts au secondaire (voir 5.2.2.1.5) et, s'il y a lieu, des défauts à la terre au primaire;
 - fournir une bonne coordination avec les appareils de protection contre les surintensités en amont (côté source).

Il convient donc que les caractéristiques temps-courant de préarc des éléments de remplacement destinés à être utilisés dans des circuits comprenant des transformateurs se situent dans les limites suivantes:

$$I_{f10} / I_r \leq 6$$

- pour satisfaire à la condition b)

$$I_{f0,1} / I_r \geq 7(I_r / 100)^{0,25}$$

- pour satisfaire à la condition a)

où, toutes les valeurs de courant étant exprimées en ampères,

I_r est le courant assigné de l'élément de remplacement;

I_{f10} et $I_{f0,1}$ sont les courants de préarc correspondant respectivement à 10 s et 0,1 s exprimés en valeurs moyennes avec les tolérances indiquées dans la norme CEI 60282-1:2009, 4.11.

Le terme $(I_r / 100)^{0,25}$ est introduit pour tenir compte du fait que sur une gamme d'éléments de remplacement les caractéristiques temps-courant de préarc divergent au voisinage de la zone des temps courts.

5.2.2.2.3 Coordination

La Figure 20 illustre une application caractéristique de protection transformateur comportant un ou des éléments de remplacement à haute tension, un transformateur et d'éventuels appareils de protection du côté source et du côté charge.

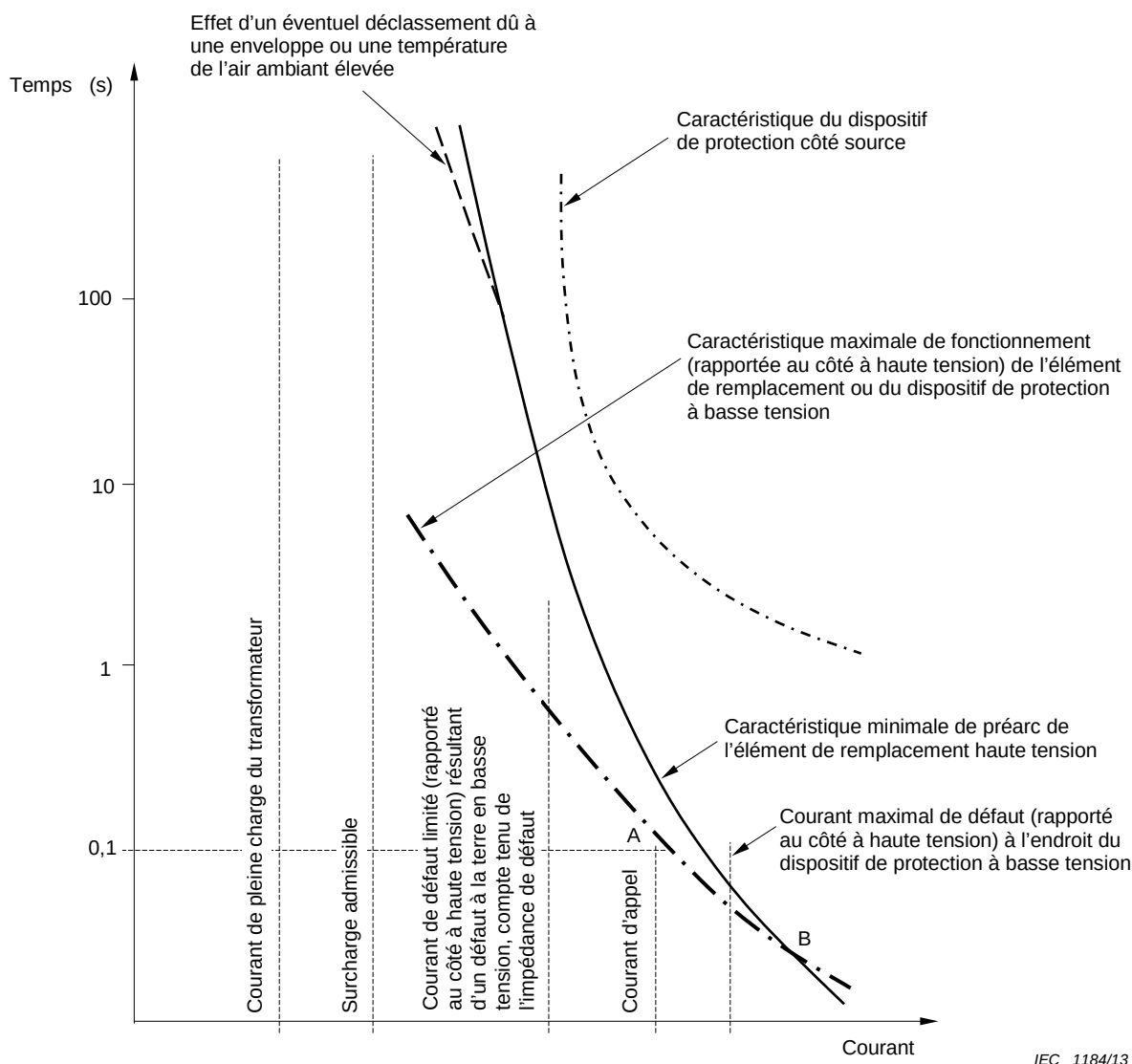


Figure 20 – Courbes caractéristiques pour la protection d'un circuit comprenant un transformateur HT/BT

Le transformateur sera choisi d'abord en fonction de ses conditions de service. Cela détermine alors son courant assigné, les surcharges admissibles (si applicable) ainsi que le courant d'appel à la mise sous tension. Le ou les éléments de remplacement à haute tension sont alors choisis de manière à assurer au circuit la protection optimale tout en gardant à l'esprit les facteurs des points a) à d) énumérés ci-après.

En se rapportant à la Figure 20, il convient de noter que:

- il est recommandé que la caractéristique temps-courant de préarc minimale de l'élément de remplacement à haute tension au primaire soit à droite du point A définissant le courant d'appel du transformateur. En pratique, on peut prendre environ 12 fois le courant assigné du transformateur pendant 0,1 s.
- il est recommandé que le courant assigné de l'élément de remplacement à haute tension, au primaire, dépasse le courant assigné du transformateur:
 - d'une valeur suffisante pour tenir compte des surcharges admissibles du transformateur dans les conditions de service (se reporter aux CEI 60076-7 et CEI 60076-12);

- 2) d'une valeur supplémentaire lorsque le ou les éléments de remplacement sont montés dans une enveloppe de façon à s'assurer que les limites de température spécifiées pour les éléments de remplacement ne sont pas dépassées et de sorte qu'une température excessive de l'élément fusible ne conduise pas à un fonctionnement prématuré du fusible. Voir l'Annexe A;
- 3) d'une valeur supplémentaire lorsque la température de l'air ambiant est susceptible de dépasser celle qui est spécifiée à l'Article 2 de la CEI 60282-1:2009.
- c) le courant de préarc de l'élément de remplacement, au primaire, soit aussi faible que possible, dans la partie 10 s de la caractéristique temps-courant, de façon à assurer le maximum de protection au transformateur (voir 5.2.2.1.5);
- d) pour une coordination complète entre les éléments de remplacement au primaire et au secondaire ou d'autres appareils de protection du côté charge, l'intersection B de la caractéristique temps-courant de préarc minimale au primaire et de la caractéristique de fonctionnement total maximale de l'appareil au secondaire (cette dernière étant rapportée au primaire en tenant compte du rapport approprié) corresponde à une valeur de courant supérieure à celle du défaut maximal du côté charge de l'appareil de protection au secondaire.

S'il apparaît, en fin de compte, que le degré souhaité de coordination n'a pas été atteint par ce moyen, le choix ou le réglage de l'appareil de protection contre les surintensités, côté source, peut être réexaminé. De même et pour les mêmes raisons, il peut être nécessaire de réduire les caractéristiques assignées maximales du ou des éléments de remplacement au secondaire.

5.2.2.2.4 Tension assignée

Les exigences de tension de coupure (tension maximale d'arc) pour des éléments de remplacement limiteurs de courant (voir 4.2.4.5) sont spécifiées dans la norme CEI 60282-1, elles ont des valeurs qui ne devraient pas poser de problème au niveau du transformateur ou de l'isolation du système. Dans certains pays, il est courant d'utiliser des transformateurs "à tension double", c'est-à-dire des transformateurs qui renferment des dispositifs internes de connexion qui permettent de les utiliser avec plus d'une tension primaire normalisée. Le fusible limiteur de courant doit avoir une tension assignée égale ou supérieure à la tension choisie. Quand le fusible limiteur ne sera pas remplacé en fonction de la tension réelle de service ou si on utilise un fusible à montage interne, typique de l'usage nord-américain, qu'il est difficile de remplacer (voir 5.2.2.4), alors son courant assigné doit être adapté au réglage à la faible tension, et sa tension assignée adaptée au réglage dont la tension est la plus élevée. Dans ce cas, si la faible tension est inférieure à environ 50 % de la tension assignée du fusible, il est recommandé de vérifier la tension de coupure (réglée de manière appropriée pour la tension inférieure du système) pour s'assurer qu'il n'y aura pas de problème lié à la rupture de l'isolation du système.

5.2.2.2.5 Classe de fusible et courant minimal de coupure

Il convient de choisir des éléments de remplacement dont la valeur du courant minimal de coupure correspond à l'application particulière considérée. Il convient de souligner que l'utilisation d'un élément de remplacement ayant une valeur trop élevée de courant minimal de coupure peut conduire dans certaines circonstances à une destruction de l'élément de remplacement suivie de détériorations (voir 4.2.3.4). Pour ce qui concerne les fusibles à usage général, il est recommandé de ne pas les exposer à des courants de surcharge inférieurs à un courant qui les ferait fondre en une heure (voir 4.1.2.1).

5.2.2.2.6 Fusibles associés utilisés en combinaison ou en association avec d'autres appareils de coupure

Quand on utilise un fusible associé en liaison avec un appareil de coupure monté en série capable de couper un faible courant (interrupteur, disjoncteur ou autre fusible), son courant minimal de coupure doit seulement être assez faible pour assurer une coordination correcte avec l'appareil de coupure monté en série. Noter que le terme "combinaison", appliqué à un fusible et à un appareil de coupure mécanique montés en série, désigne des appareils qui

sont traités en détail dans la norme CEI 62271-105; dans ce rapport, la relation entre les fusibles et les appareils de coupure qui ne sont pas traités dans la norme CEI 62271-105 est appelée "association" (voir 5.2.7 qui donne des explications complètes à ce sujet).

a) Utilisation dans des combinés interrupteurs-fusibles (à déclenchement par percuteur):

Dans des applications où le fonctionnement du percuteur du fusible assure le fonctionnement du mécanisme de déclenchement combiné, le transfert automatique de la coupure est assuré du fusible à l'interrupteur combiné dans des conditions de faible défaut. Il est possible d'utiliser des fusibles associés pour cette application pour laquelle il est nécessaire de s'assurer que la fonction transférée à l'interrupteur combiné reste inférieure à son pouvoir de coupure maximal (critères de courant de transition, voir 5.2.7).

Si le mécanisme de déclenchement de l'interrupteur est intentionnellement retardé (voir la norme CEI 62271-105:2012, 3.7.119) c'est le fabricant du combiné interrupteur-fusible qui est responsable d'assurer que la durée d'arc du fusible reste au-dessous de sa durée vérifiée de tenue à l'arc, laquelle est au moins de 100 ms, voir aussi 5.2.7.2.4.

b) Utilisation dans un appareillage déclenché par relais

Dans de telles applications, on peut utiliser des fusibles associés et il est seulement nécessaire de s'assurer que les caractéristiques temps-courant du fusible et du relais de l'appareil de coupure associé se coupent à une valeur de courant supérieure au courant minimal de coupure du fusible et inférieure au pouvoir de coupure maximal de l'appareillage (courant maximal d'intersection pour un combiné).

c) Utilisation avec des fusibles à expulsion montés en série: (voir 5.2.2.4).

Se reporter à la norme CEI 62271-105, *Combinés interrupteurs-fusibles à haute tension*, à la CEI 62271-107, *Circuits-switchers fusibles de tension assignée supérieure à 1 kV et jusqu'à 52 kV inclus*, et à la CEI 62271-106, *Contacteurs pour courant alternatif à haute tension, contrôleurs à contacteurs et démarreurs de moteurs*, pour les applications normalisées du a) et b) ci-dessus.

En principe, les lignes directrices de a) et b) s'appliquent également aux fusibles utilisés sous d'autres formes d'association avec des appareils de coupure non couverts par des normes de la CEI (voir 5.2.7).

5.2.2.2.7 Fusibles limiteurs de courant utilisés comme seule protection sur le côté haute tension du transformateur

En Europe, pour les applications dans lesquelles on peut montrer par le calcul ou par expérience en service que de faibles valeurs de courant de défaut sont improbables, des fusibles associés appropriés peuvent être utilisés. Dans ce cas, il est nécessaire de s'assurer que le courant minimal de coupure assigné de l'élément de remplacement est inférieur au plus petit courant de défaut HT susceptible de se produire en cas de défaut situé entre les fusibles à haute tension et le (les) appareil(s) de protection à basse tension. Cette méthode est rarement utilisée dans l'usage nord-américain, à la fois parce que la protection secondaire peut être à une certaine distance du transformateur, ce qui entraîne potentiellement des courants de défaut plus faibles, et parce que les fusibles limiteurs de courant sont souvent montés dans le liquide du transformateur, de sorte que le fusible qui fondrait en dessous de son courant minimal de coupure entraînerait une défaillance grave.

Dans le cas d'applications pour lesquelles l'expérience ou le calcul indique qu'il peut y avoir de très faibles surintensités (c'est-à-dire inférieures au courant minimal de coupure des fusibles associés), il convient d'utiliser des fusibles à usage général ou à coupure intégrale.

Les fusibles à coupure intégrale sont particulièrement recommandés pour les applications où les surintensités de courant peuvent être aussi faibles que le courant minimal de fusion du fusible ou lorsque le fusible doit être déclassé pour être utilisé dans une enveloppe.

Pour un fusible à usage général, il convient de vérifier que le courant de fusion d'une heure (ou le courant de coupure minimal s'il est assigné par le constructeur), et pour un fusible à

coupure intégrale que le courant minimal de fusion, du fusible choisi n'est pas supérieur à la valeur de la surintensité à prendre en compte.

5.2.2.2.8 Fusibles limiteurs de courant utilisés pour la protection contre les courts-circuits conjointement avec des éléments de remplacement à expulsion

Il suffit que le courant minimal de coupure soit inférieur au courant d'intersection des éléments de remplacement montés en série. Les valeurs de courant minimal de coupure assigné varient largement selon la conception de cet ensemble. Des fusibles associés sont normalement utilisés pour cette application. Voir 5.2.2.4.

5.2.2.2.9 Choix des courants assignés des éléments de remplacement destinés à des circuits comprenant des transformateurs

Il convient que le constructeur d'éléments de remplacement destinés à la protection des circuits de transformateurs donne des recommandations concernant les courants assignés des éléments de remplacement correspondant à des puissances données de transformateurs exprimées en kVA. Dans la plupart des cas, le courant assigné de l'élément de remplacement est significativement supérieur au courant assigné du transformateur, parce qu'il faut choisir avant tout un fusible d'après sa TCC et qu'il doit satisfaire aux critères exposés en 5.2.2.2.

NOTE Les tableaux de sélection existants ne prennent généralement pas en compte une application qui comporte un appareil de coupure associé.

Il convient de prendre en considération les tolérances de fabrication et les variations entre les caractéristiques à l'état froid et à l'état chaud des différents composants du circuit.

5.2.2.3 Fusibles à expulsion

Les fusibles à expulsion sont fréquemment utilisés pour protéger les transformateurs sur poteaux (unités plus petites montées sur poteaux, normalement monophasées, mais souvent triphasées). Une combinaison de fusibles à expulsion et de fusibles limiteurs de courant est souvent utilisée (voir 5.2.2.4). Dans ce cas, les fusibles à expulsion sont normalement des fusibles-déconnecteurs de distribution, bien que les fusibles à expulsion remplis de liquide soient très répandus. La plupart de ceux-ci sont de type "immergés" (fusibles à cartouche, voir 4.3.2.1.5), mais des "fusibles liquides" externes (voir 4.3.2.1.6) ont été utilisés dans des lieux présentant un danger d'incendie. Les fusibles liquides externes tendent toutefois à être remplacés par des fusibles à coupure intégrale pour cette application, en partie en raison du faible courant maximal de coupure des premiers. De même, les transformateurs sur socle reprenant la pratique "nord-américaine" utiliseront souvent des fusibles à expulsion immergés montés de façon interne. Tandis que de nombreuses unités n'utiliseront qu'un fusible à expulsion (normalement, là où les courants présumés sont très faibles), l'utilisation d'une combinaison d'un fusible à expulsion et d'un fusible limiteur de courant associé devient de plus en plus fréquente pour ces applications.

Les procédures de sélection pour les fusibles à expulsion sont très semblables à celles qui valent pour les fusibles limiteurs de courant qui sont décrites en 5.2.2.2. La principale différence avec les fusibles immergés dans l'huile est que l'effet de la température de l'huile du transformateur sur les caractéristiques TCC de préarc du fusible prend une importance particulière. Si un matériau d'élément fusible à haute température est utilisé (par ex., le cuivre ou un alliage de cuivre sont très communs), la température de l'huile aura très peu d'effet sur les caractéristiques de fusion lente (généralement moins de 5 %). Cependant, des matériaux à point de fusion très bas sont souvent employés pour rendre le fusible plus sensible à la température de l'huile et, donc, à la surcharge du transformateur. Si l'utilisateur recherche une protection en cas de surcharge, celle-ci peut être assurée en choisissant un matériau d'élément fusible approprié. La protection contre les surcharges est définie en examinant le courant de fusion minimum de l'élément fusible à 20 °C ou 25 °C (courbe publiée selon la norme CEI 60282-2 ou selon l'IEEE C37.41 [6]) et en appliquant un "décalage" dans la caractéristique en fonction de la température de l'huile. Par exemple, une température de l'huile de 120 °C peut réduire un courant de préarc minimum à un temps de fusion long dans une mesure allant jusqu'à 60 %. Si le niveau de surcharge produisant une température

particulière de l'huile et la valeur de courant requise pour faire fondre un fusible particulier dans des conditions stabilisées sont toutes deux connues, il est possible d'établir quel niveau de surcharge un fusible en particulier autorisera. Le fabricant du transformateur et/ou celui du fusible doivent faire ce calcul, de telle sorte que des tableaux d'application sont généralement fournis afin de permettre aux utilisateurs de retenir la fusion appropriée qui satisfait à leurs besoins.

Lorsque des fusibles-déconnecteurs de distribution sont utilisés avec des transformateurs sur poteaux, il est important que les surtensions dues à la foudre passant par le fusible ne provoquent pas de perturbations du fonctionnement (voir 5.1.4.4). A partir de l'Edition 3 de la norme CEI 60282-2:2008, un "essai de tenue au courant de choc de foudre" est inclus dans l'article "essais spéciaux". Tout type d'élément peut être utilisé – l'essai consiste à soumettre trois échantillons à une impulsion de courant 8/20 standard ayant une valeur de crête de 15 kA. Les éléments fusibles ne doivent pas être endommagés. Des éléments fusibles avec faible courant assigné qui satisferont toujours à l'essai de tenue au choc sont disponibles pour équiper des transformateurs de faibles puissances.

Il convient que le courant de coupure maximal assigné d'un fusible à expulsion choisi pour utilisation avec un transformateur soit égal ou supérieur au courant de défaut présumé qui peut se présenter à l'emplacement du transformateur. Du fait que les fusibles à expulsion ont des courants de coupure maximaux assignés inférieurs aux fusibles limiteurs de courant (parfois très inférieurs), un fusible Associé est communément ajouté au fusible à expulsion pour les applications transformateur (voir 5.2.2.4).

5.2.2.4 Fusibles limiteurs de courant combinés aux fusibles à expulsion

Comme il a été dit dans 5.2.2.3, tandis que les fusibles à expulsion sont communément utilisés pour la protection des transformateurs en utilisant la pratique "nord-américaine", leur courant de rupture maximal limité et l'absence d'action de limitation de courant font que des fusibles Associés limiteurs de courant sont souvent "accouplés" avec eux. Le fait que les fusibles Associés ont un courant de coupure minimal (voir 4.2.3.4) fait d'eux des partenaires idéaux des fusibles à expulsion (de fait, certains types de fusibles limiteurs de courant à coupure intégrale appartiennent les deux appareils dans le même corps). Le principe de coordination générale devient donc que chaque fusible doit protéger l'autre dans sa zone de non-fonctionnement, autrement dit le fusible à expulsion doit fonctionner pour des courants inférieurs au courant minimal de coupure assigné du fusible Associé et ce dernier doit fonctionner à des courants supérieurs au courant maximal de coupure assigné du fusible à expulsion. Des informations détaillées de coordination seront données pour les applications typiques en protection transformateur; cependant, les principes de coordination de base s'appliqueront aux autres applications, notamment la combinaison fusible Associé limiteur de courant/fusible à expulsion utilisée pour la protection de ligne. De même, bien que les fusibles à expulsion soient les appareils les plus communs pour application en transformateur en association à des fusibles Associés, des disjoncteurs HT sont également disponibles pour montage dans l'huile de transformateur. Cependant, les mêmes principes de coordination s'appliquent.

5.2.2.5 Coordination d'un fusible limiteur de courant et d'un fusible-déconnecteur de distribution

Un fusible associé utilisé en extérieur en série avec un fusible-déconnecteur de distribution représente un cas spécial de coordination. Généralement, les fusibles associés utilisés dans cette application sont dimensionnés par l'élément fusible à expulsion le plus gros susceptible d'être utilisé tout en restant conforme aux règles de coordination. Par exemple, un type de fusible associé qui peut être utilisé avec un élément fusible à expulsion de type K 12 V est désigné comme fusible de coordination 12 K. La méthode de coordination est une "coordination de fusible à fusible" ("matched melt coordination"), présentée dans 5.2.2.6.2. Cette méthode assure que le fusible-déconnecteur s'ouvrira également même si le fusible associé est responsable de l'interruption de courant. L'action d'ouverture du circuit assure deux avantages. Le premier avantage patent est que l'on peut voir que le fusible a fonctionné. Le deuxième avantage est que la contrainte diélectrique est levée du fusible associé actionné. Cela donne aux utilisateurs la possibilité de choisir, pour cette application, des

fusibles associés particulièrement compacts qui ne conviennent pas à une exposition prolongée aux conditions extérieures difficiles (par ex. la pollution) tout en restant sous tension après coupure. Dans la plupart des cas, les fusibles ne restent pas sous tension pendant des périodes de temps prolongées en raison de la réaction rapide de l'utilisateur; cependant, le déclenchement du fusible peut ne pas être détecté pendant de longues périodes dans certaines applications (par ex. les batteries de condensateurs). Bien que le fusible-déconnecteur de distribution soit le plus fréquemment utilisé en extérieur, des fusibles associés limiteurs de courant sont également utilisés avec les fusibles à expulsion de type "B", normalement à des courants assignés plus élevés.

5.2.2.6 Coordination entre un fusible limiteur de courant et un fusible à expulsion immergé

5.2.2.6.1 Coordination de base

La première étape dans la sélection du fusible approprié est de choisir le fusible à expulsion en fonction des détails d'application dans 5.2.2.3. Le choix du fusible associé est ensuite abordé en prenant en compte quatre points fondamentaux afin de veiller à ce qu'une bonne coordination existe entre un fusible associé et une série de fusibles à expulsion raccordés en série:

- a) chaque fusible doit protéger l'autre dans sa zone de non-fonctionnement;
- b) à moins que le fusible associé ne doive être remplacé après chaque déclenchement du fusible à expulsion, il ne doit pas être endommagé par un tel déclenchement;
- c) les courants de surcharge ne doivent pas endommager le fusible associé;
- d) le fusible associé, comme celui à expulsion, ne doit pas être endommagé par les courants transitoires: les règles appliquées pour sélectionner un fusible à expulsion pour cette exigence valent également pour le fusible associé et cette question ne sera donc pas discutée davantage. Cependant, il peut être noté que, si le fusible à expulsion a été choisi correctement, un fusible associé en bonne coordination avec lui répondra normalement aux mêmes spécifications pour les surtensions.

La coordination primaire entre le fusible à expulsion en série et le fusible associé limiteur de courant (point a) plus haut) assure que ces deux éléments opéreront ensemble pour supprimer tous les courants, à commencer par le courant le plus faible susceptible d'entraîner la fusion de l'élément du fusible à expulsion et jusqu'au courant correspondant au courant de coupure maximal assigné du fusible limiteur de courant. Obtenir cette coordination primaire requiert que, lorsque les courbes de la caractéristique temps-courant appropriée pour les deux appareils sont superposées, la courbe TCC de fonctionnement maximal du fusible à expulsion croise la courbe TCC de préarc minimale du fusible associé à un courant égal ou supérieur au courant de coupure minimal assigné du fusible associé et à un courant inférieur ou égal au courant de coupure maximal assigné du fusible à expulsion. Les deux dispositifs en série offrent alors une protection complète et chaque fusible protège l'autre dans sa zone de "vulnérabilité". Ce deuxième critère (croisement en dessous d'un courant de coupure maximal assigné du fusible à expulsion) est parfois assoupli pour les applications pour gros transformateur, lorsque certaines conditions de fonctionnement et de coordination s'appliquent. Cette coordination est observée dans la Figure 21.

Selon l'emplacement relatif des deux courbes, l'un des deux types différents de coordination subsistera. Ces deux méthodes de coordination sont communément appelées "coordination de fusible à fusible" ("matched-melt") et "coordination par croisement de courbes temps-courant", même s'il convient que la première soit en fait considérée comme une forme de la seconde avec quelques conditions supplémentaires. La Figure 21 et la Figure 22 illustrent les principes impliqués.

5.2.2.6.2 Coordination de fusible à fusible ("matched-melt")

Pour cette méthode de coordination, un autre critère doit être observé en sus des règles de coordination de base décrites dans 5.2.2.6.1. Le but est que le fusible à expulsion fonde et s'ouvre à chaque fois que la combinaison des deux fusibles interrompt une surcharge ou une

anomalie. En général, la coordination de fusible à fusible ("matched melt") aura pour résultat que la caractéristique temps-courant préarc minimal du fusible à expulsion se trouve à gauche de la caractéristique TCC préarc du fusible associé pour tous les temps supérieurs à 0,01 s, comme le montre la Figure 21. Il ne s'agit toutefois pas d'une méthode fiable de s'assurer que le fusible à expulsion fond dans des temps inférieurs à 0,01 s. Pour être sûr que le fusible à expulsion s'ouvre à tous les courants déclenchant le fonctionnement du fusible limiteur de courant, il convient que la valeur minimale du I^2t de fonctionnement que le fusible limiteur de courant laisse passer soit égale ou supérieure à la valeur maximale du I^2t de préarc du fusible à expulsion en série, à 0,01 s et moins. La méthode tire son nom de ce critère.

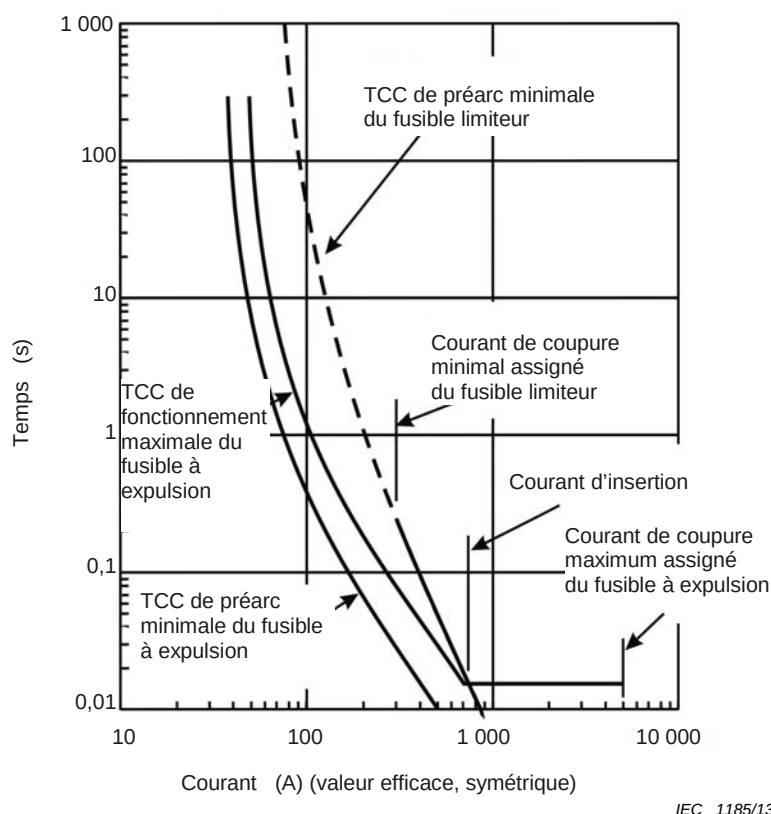


Figure 21 – Un exemple de coordination de fusible à fusible

Une approche conservatrice destinée à veiller à ce que le fusible limiteur de courant laisse passer suffisamment d'énergie pour ouvrir le fusible à expulsion consiste à choisir un fusible limiteur de courant ayant une valeur de I^2t de préarc minimale supérieure à la valeur de I^2t de préarc maximale du fusible à expulsion utilisé en série avec le premier. Une approche plus pratique consiste cependant à prendre en compte le fait que le fusible limiteur de courant laissera passer, dans presque toutes les situations, plus de I^2t que sa valeur minimale de I^2t de préarc. Les valeurs minimales de I^2t de préarc correspondent à des temps très courts de préarc et aux tolérances de fabrication dans le pire des cas. Par conséquent, non seulement la valeur réelle du I^2t provoquant le préarc sera probablement supérieure aux valeurs minimales publiées, mais une valeur de I^2t supplémentaire sera autorisée à passer en raison du courant pendant la production de l'arc qui a lieu après la fusion et qui continue jusqu'à ce que le fusible ait coupé. L'expérience a démontré qu'une excellente coordination peut être réalisée du moment que la valeur maximale du I^2t de préarc du fusible à expulsion ne dépasse pas environ deux fois la valeur minimale du I^2t de préarc du fusible limiteur de courant. Les seules circonstances dans lesquelles une telle approche peut entraîner l'incapacité du fusible à expulsion à s'ouvrir est lorsqu'une impulsion de courant de très courte durée (par ex., une surtension due à la foudre) se présente et qu'il se trouve que sa amplitude est suffisante pour que la valeur du I^2t d'impulsion dépasse la valeur du I^2t de préarc du fusible limiteur de courant, mais qu'elle est inférieure à la valeur du I^2t de préarc du

fusible à expulsion. Evidemment, une telle situation se présentera très rarement; par conséquent, elle peut ne pas être prise en compte prioritairement dans le choix du meilleur fusible limiteur de courant pour une application particulière.

Comme constaté précédemment, pour utiliser la méthode de coordination de fusible à fusible, il faut connaître la valeur maximale du I^2t de préarc à courte durée et la valeur minimale du I^2t de préarc pour le fusible limiteur de courant. Même si cette dernière est ordinairement publiée par le fabricant de fusible limiteur de courant, le fabricant du fusible à expulsion ne publie normalement pas la première valeur. Elle peut toutefois être calculée à partir de la courbe des caractéristiques temps-courant de préarc minimale du fusible à expulsion. Une méthode de calcul consiste d'abord à déterminer le courant correspondant à la valeur de temps représentant le nombre entier le plus petit de quart de cycles. Pour de nombreuses courbes publiées, cela peut être le courant correspondant à trois (3) quart de cycles (0,0125/0,015 s pour 60/50 Hz). Une fois que le courant a été établi à partir de la courbe de préarc minimal du fusible d'expulsion, il convient de l'augmenter d'un facteur approprié afin de prendre en compte les variations issues des tolérances de fabrication. Dans le cas où les fusibles à expulsion ont des éléments fusibles en argent, ce facteur est de 10 %. Pour les fusibles avec des éléments faits en d'autres matériaux, ce facteur peut s'élever jusqu'à 20 %. Après que le courant a été corrigé afin de prendre en compte les tolérances de fabrication, la valeur maximale du I^2t de préarc du fusible à expulsion peut être calculée en élevant d'abord au carré ce courant, puis en multipliant cette valeur par le temps (exprimé en secondes) qui a servi pour calculer le courant. Evidemment, dans le cas où le fabricant du fusible à expulsion publie une valeur du I^2t maximale de préarc pour le fusible, il convient que cette valeur soit utilisée à la place de celle qui obtenue selon la procédure précédemment décrite.

L'avantage principal de la méthode de fusible à fusible est que le fusible à expulsion s'ouvrira même si le fusible limiteur de courant se charge de la coupure effective. Il s'agit de la méthode utilisée avec les fusibles-déconnecteurs (voir 5.2.2.5).

Un autre avantage de cette méthode de coordination est que, dans certaines applications triphasées non reliées à la terre, la tension assignée du fusible associé limiteur de courant doit tout simplement être égale à la tension phase-neutre du système, pourvu que la tension assignée du fusible à expulsion soit égale à la tension entre phases. Du fait que cela requiert de faire certaines suppositions quant à certains scénarios de défaut possibles, en pratique, cela n'est pas fait habituellement si un fusible de tension assignée entre phases est disponible. Cependant, pour certaines applications, il s'agissait de la seule option de fusion disponible et il s'agit de la principale raison pour laquelle cette méthode de coordination est parfois utilisée avec le fusible associé limiteur de courant immergé dans l'huile.

5.2.2.6.3 Coordination par croisement de courbes temps-courant

La deuxième méthode pour coordonner les fusibles associés limiteurs de courant est désignée comme coordination par croisement de courbes temps-courant. Cette méthode de coordination est fréquemment utilisée avec des fusibles associés limiteurs de courant immergés dans l'huile et est illustrée dans la Figure 22. Dans l'exemple montré, la courbe TCC de préarc minimale des fusibles à expulsion croise la courbe TCC de préarc minimale du fusible à expulsion pour un temps supérieur à 0,01 s, ce qui diminue la probabilité que la combinaison satisfasse aux conditions requises pour la coordination de fusible à fusible. Lorsqu'un courant de défaut est supérieur à ce point de croisement, le fusible limiteur de courant peut fondre et interrompre sans laisser passer suffisamment d'énergie pour faire fondre le fusible à expulsion. La coordination par croisement de courbes temps-courant est rarement utilisée pour appliquer des fusibles associés limiteurs de courant externes parce qu'il n'existe aucune garantie qu'un fusible-déconnecteur de distribution en série fondrait et s'ouvrirait avec cette méthode. Si le fusible-déconnecteur de distribution ne s'ouvre pas, une pleine tension peut être appliquée sur un fusible Associé externe érodé par les intempéries qui peut alors ne plus avoir la capacité de résister à une telle tension.

En raison de l'emplacement de l'intersection ou du point de croisement entre la courbe TCC de fonctionnement du fusible à expulsion et la courbe TCC de préarc minimale du fusible associé, il n'est pas nécessaire de se préoccuper des valeurs du I^2t de fusion des deux

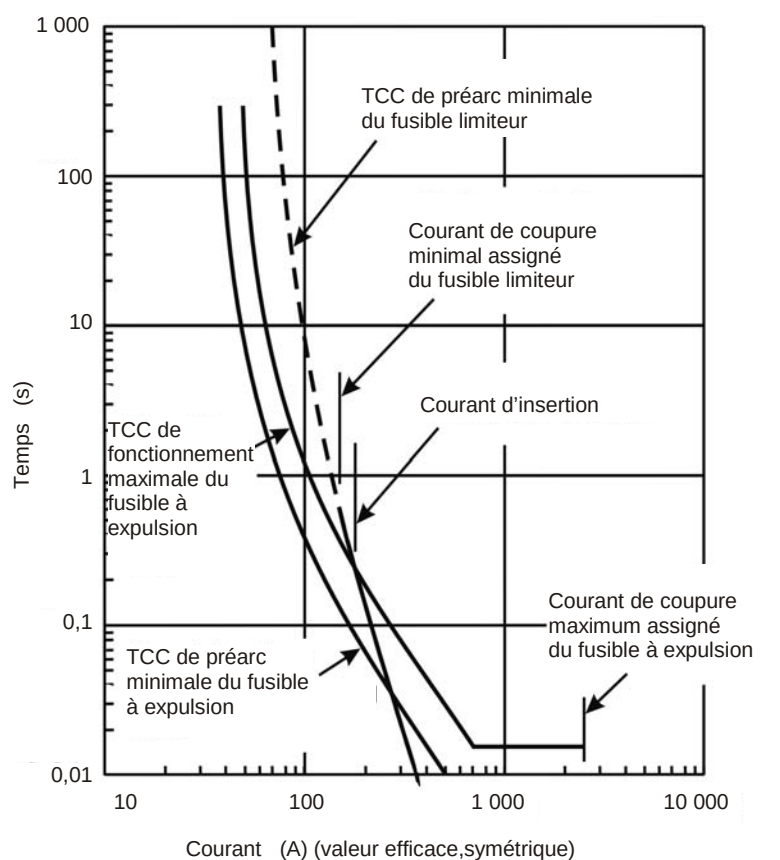
fusibles lorsque cette méthode de coordination est utilisée. Le critère principal à satisfaire est que le point de croisement dont il est question plus haut doit correspondre à un courant qui est supérieur au courant minimal de coupure assigné du fusible limiteur de courant, mais inférieur au courant maximal de coupure assigné du fusible à expulsion. Il est demandé aux fabricants du fusible à expulsion et du fusible limiteur de courant de publier les valeurs pour ces caractéristiques de performance.

L'avantage principal de la méthode du croisement des courbes temps-courant- par rapport à la coordination de fusible à fusible est que, normalement, elle permet l'utilisation d'un fusible limiteur de courant ayant un courant assigné plus petit. Cela peut être important à plusieurs égards.

Tout d'abord, plus le courant assigné du fusible limiteur de courant est faible, plus faible sera la quantité d'énergie passant en condition de défaut. Evidemment, moindre est l'énergie que le fusible limiteur de courant laisse passer, meilleure sera la protection contre toute défaillance éventuelle n'importe où sur le circuit protégé par le fusible limiteur de courant. De plus, le défaut aura un effet moindre sur le reste du circuit de distribution du fait que les chutes de tension sont minimisées.

Par ailleurs, moindre sera le courant assigné du fusible limiteur de courant, plus il pourra être petit et moindre sera l'espace d'installation dont il pourra avoir besoin.

Enfin, lorsque cette méthode de coordination est utilisée au lieu de la méthode de la coordination de fusible à fusible, souvent le calibre le plus élevé disponible pour le fusible associé peut être utilisé pour protéger des transformateurs plus gros.



IEC 1186/13

Figure 22 – Un exemple de coordination à croisement de courbes temps-courant

5.2.2.6.4 Prévention des dommages au fusible Associé limiteur de courant

Pour les applications pour fusibles Associés limiteurs de courant avec fusibles à expulsion sur les primaires des transformateurs, il existe un autre critère de sélection qui est particulièrement important en pratique. Lorsque le fusible associé limiteur de courant est à l'intérieur du transformateur, il est possible d'arranger la coordination de sorte qu'elle ne fonctionnera qu'en cas de défaut interne du transformateur. De cette façon, le fusible associé ne doit pas être obligatoirement remplaçable. Les concepts à discuter sont illustrés dans la Figure 23 et concernent des courants s'élevant jusqu'à la valeur correspondant à une défaillance sur les bornes secondaires du transformateur (soit un défaut limité seulement par l'impédance du transformateur – souvent désigné sous le terme de "courant de défaut secondaire boulonné" ou dans le cas d'essai du transformateur, "courant de court-circuit"). Il convient de choisir un fusible limiteur de courant de sorte que ce courant soit inférieur d'une marge appropriée au courant correspondant au point de croisement entre la courbe de fonctionnement maximal du fusible à expulsion et la courbe de préarc minimale du fusible associé. Cela assure que le fusible associé ne fond pas avec un défaut externe du transformateur et, plus important encore, qu'il n'est pas endommagé par un tel défaut. Dans ce cas, "dommage" désigne toute fusion partielle des éléments de fusible et/ou une détérioration lors de temps de fusion prolongé d'autres composants par surchauffe du fusible. Un fusible associé endommagé peut fondre plus tard à un courant inférieur à son courant de coupure minimal et échouer à interrompre ce courant. La "marge appropriée" sera donc abordée ici.

Bien que non publiée par le fabricant du fusible, une courbe de caractéristiques "sans dommage" qui se trouve légèrement en-dessous et à gauche de la courbe de préarc minimal d'un fusible associé limiteur de courant peut être visualisée. L'écart entre la courbe de préarc minimale publiée et la courbe sans dommage imaginaire représente une marge de sécurité et a pour but de compenser les divers facteurs associés avec les applications réelles (pratiques). Certains facteurs affectent la précision du calcul du courant de défaut secondaire boulonné. Ceux-ci incluent les tolérances sur l'impédance du transformateur, les fluctuations de tension sur la phase du circuit et l'utilisation de prises de réglage. D'autres facteurs impliquent des dommages réels aux éléments de fusible résultant d'une fusion partielle et d'une contrainte mécanique qui peuvent survenir avant la coupure complète de l'élément. La production de l'arc ne peut pas commencer tant que les éléments n'ont pas fondu et ne sont complètement ouverts; ce temps est utilisé pour tracer la courbe de caractéristique TCC.

Si le fabricant du fusible a une marge recommandée, il convient de l'utiliser. En l'absence de cette information, une méthode communément utilisée consiste à régler le courant sans dommage à 80 % du courant montré sur la courbe de préarc minimale pour n'importe quel temps de préarc en particulier. Du fait qu'une bonne coordination entre le fusible associé limiteur de courant et le fusible à expulsion en série requiert que le premier ne soit pas endommagé par un courant inférieur ou égal au courant de défaut secondaire boulonné, cette méthode requiert que le courant de défaut secondaire boulonné calculé ne soit pas supérieur à 80 % du courant de préarc minimal du fusible limiteur de courant à un temps correspondant au temps de fonctionnement maximal du fusible à expulsion (avec un courant égal au courant de défaut secondaire boulonné). Inversement, le courant de préarc minimal du fusible Associé doit être au moins égal à 125 % du courant de défaut secondaire boulonné calculé à un temps correspondant au temps de fonctionnement maximal du fusible à expulsion sur ce courant.

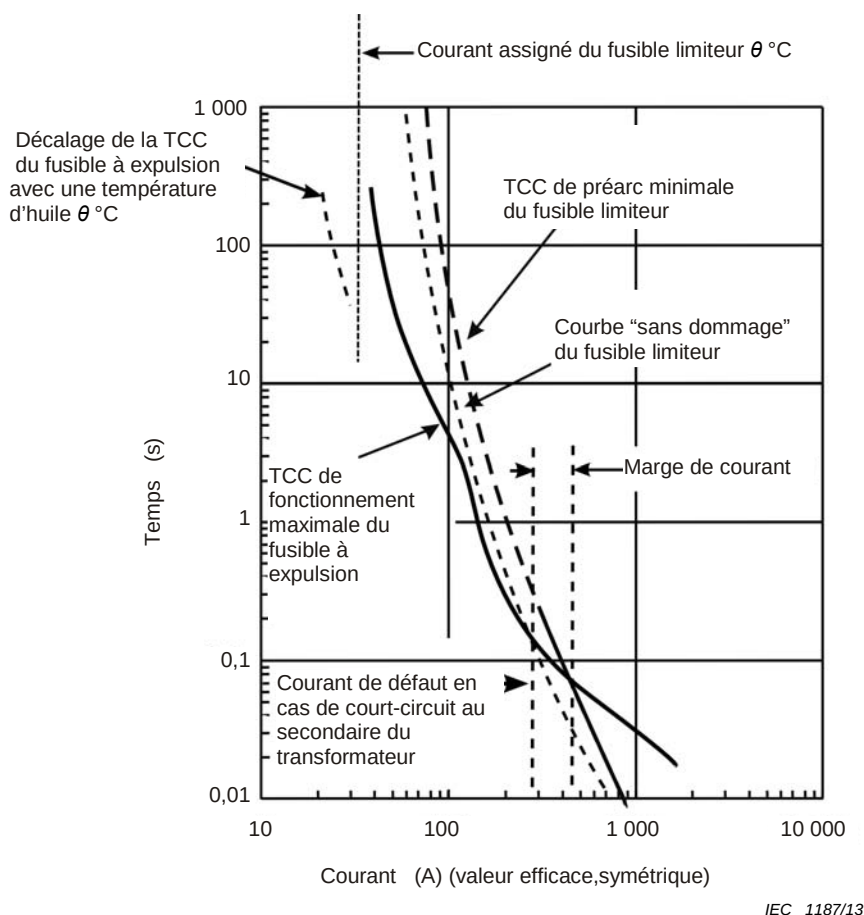


Figure 23 – Marge de fusible "sans dommage"

Lorsqu'un fusible associé limiteur de courant a été choisi en utilisant la coordination de courant de défaut secondaire boulonné appropriée, il n'est pas nécessaire d'assurer l'accès afin de permettre à un fusible limiteur de courant situé à l'intérieur du transformateur d'être remplacé "sur le terrain". Si une coordination de courant de défaut secondaire boulonné n'est pas assurée, alors le fusible associé doit également être remplacé chaque fois que le fusible à expulsion entre en action.

5.2.2.6.5 Protection contre la surcharge pour le fusible limiteur de courant

Un autre aspect de la coordination doit être pris en compte avant de pouvoir être sûr qu'un fusible associé est bien coordonné. Cet aspect requiert que des contrôles soient faits pour montrer que le fusible associé limiteur de courant ne fondra pas ou ne sera pas endommagé suite à des surcharges. Cela est également illustré à la Figure 23. Tout d'abord, lorsque le fusible associé est utilisé pour protéger un transformateur, il convient que la courbe de fonctionnement maximale du fusible à expulsion ne croise pas la courbe sans dommage présentée dans 5.2.2.6.4, ce pour tous les courants inférieurs au courant de défaut secondaire boulonné du transformateur. Autrement dit, pour tous les temps de fonctionnement du fusible à expulsion à partir de la valeur correspondant au temps de fonctionnement sur le courant de défaut secondaire boulonné et jusqu'à 1 000 secondes ou plus, il convient que le courant correspondant sur la courbe de fonctionnement maximale du fusible à expulsion ne dépasse pas les 80 % du courant correspondant sur la courbe de préarc minimale du fusible limiteur de courant (à moins que le fabricant du fusible ne spécifie un autre critère sans dommage). Il convient que la précharge n'affecte pas cette coordination parce que tout décalage vers la gauche des courbes de caractéristique résultant du chauffage ohmique (I^2R) des éléments de fusible ou de l'augmentation de température du liquide

environnant sera identique ou plus pour le fusible à expulsion ou pour le fusible limiteur de courant.

La deuxième condition à satisfaire est que, sous conditions de précharge, le courant maximal que le fusible à expulsion peut conduire sans fondre pour une période de temps relativement longue (soit plus de cinq minutes) doit être inférieur au courant assigné du fusible limiteur de courant. Lorsque le fusible à expulsion est situé à l'intérieur de l'équipement, comme un transformateur, il convient de prendre en compte tout décalage de la courbe résultant des températures produites par des conditions de surcharge lorsque ce critère est examiné. Par exemple, certains types de fusibles à expulsion voient un décalage significatif de leur courbe TCC de fonctionnement maximal à des températures élevées. Un fusible à élément "double" dans de l'huile à 120 °C peut enregistrer un décalage de sa caractéristique de préarc à temps long, en termes de courant, d'environ 40 % des valeurs publiées à 20 °C. La protection de surcharge pour le fusible associé peut également être assurée par une protection secondaire.

Voir 5.2.2.6.4 en ce qui concerne les techniques de coordination afin de prévenir les dommages au fusible associé et 5.3.5.5 pour une discussion sur les dommages au fusible résultant du fonctionnement d'un appareil en série.

5.2.3 Applications pour des circuits comprenant des moteurs

5.2.3.1 Généralités

Les fusibles pour applications sur des circuits comprenant des moteurs sont principalement utilisés avec des moteurs à démarreurs directs sur des circuits à courant alternatif de 50 Hz et 60 Hz. Il existe généralement des fusibles associés limiteurs de courant spécifiquement conçus pour l'application et utilisés normalement en association avec un contacteur qui interrompt les courants inférieurs à leur courant de coupure minimal. Leur fonction est d'assurer une protection contre les courts-circuits pour le système d'alimentation suite à des défaillances sur ou dans le moteur et des défaillances du câble entre le moteur et son démarreur dépassant le point d'intersection de l'appareil associé assurant une protection contre les faibles surintensités. La caractéristique primaire des fusibles est leur capacité à résister aux courants de démarrage répétés du moteur en raison de leurs éléments fusibles spécialement conçus. A cette fin, le fabricant peut spécifier un facteur "K" (voir 5.2.3.3) qui indiquera à l'utilisateur le degré de surcharges cycliques auquel l'élément fusible est capable de résister sans détérioration. Le facteur "K" repose sur les conditions d'essai spécifiées dans la norme CEI 60644 et le fabricant spécifiera si le facteur "K" est relatif à la caractéristique temps-courant préarc minimale ou moyenne.

5.2.3.2 Caractéristiques temps-courant des éléments fusibles

Les fusibles conformes à la norme CEI 60644 auront les caractéristiques détaillées ci-dessous.

Un courant de fonctionnement relativement élevé (fonctionnement lent) est souhaitable dans la région des 10 s de la caractéristique temps-courant de préarc pour donner la résistance maximale contre le courant de démarrage du moteur.

Un courant de fonctionnement relativement bas (fonctionnement rapide) est souhaitable dans la région inférieure à 0,1 s pour donner une protection maximale contre les courts-circuits aux appareils de coupure, câbles et moteurs associés ainsi qu'à leurs boîtes à bornes.

Les caractéristiques temps-courant de préarc des fusibles destinés à être utilisés dans des circuits comprenant un moteur se situent donc dans les limites suivantes:

$$I_{f10}/I_r \geq 3 \text{ pour } I_r \leq 100 \text{ A}$$

$$I_{f10}/I_r \geq 4 \text{ pour } I_r > 100 \text{ A}$$

$$I_{f0.1}/I_r \leq 20(I_r/100)^{0.25} \text{ pour tous les courants assignés}$$

où:

I_r est le courant assigné du fusible;

I_{f10} et $I_{f0,1}$ sont les courants de préarc correspondant à 10 s et 0,1 s respectivement, exprimés comme valeurs moyennes avec les tolérances spécifiées dans la norme CEI 60282-1:2009, 4.11.

Le terme $(I_r / 100)^{0,25}$ est introduit pour tenir compte du fait que, sur une gamme d'éléments fusibles, les caractéristiques temps-courant de préarc divergent au voisinage de la zone des temps courts.

5.2.3.3 Facteur K

5.2.3.3.1 Généralités

Il s'agit d'un facteur définissant une caractéristique de surcharge à laquelle le fusible peut être soumis de façon répétée, sans détérioration, dans des conditions spécifiées de démarrage du moteur et d'autres surcharges de fonctionnement du moteur.

Aux fins de la norme CEI 60644, la valeur de K est établie à 10 s. Sauf si spécifié par le fabricant du fusible, ladite valeur est valable de 5 s à 60 s, pour une fréquence de démarrages allant jusqu'à six par heure et pour un maximum de deux démarrages consécutifs. Pour des conditions autres que celles spécifiées ci-dessus, par exemple lorsque les conditions de service impliquent la marche par à-coups, le freinage par inversion ou des démarrages plus fréquents, il convient que le fabricant soit consulté.

La caractéristique de surcharge est obtenue en multipliant le courant sur la caractéristique de préarc par K (inférieur à l'unité). Cela définit ensuite la limite de la courbe de surcharge pour un nombre donné de démarrages de moteur par heure.

5.2.3.3.2 Conditions requises de résistance

La performance d'un fusible pour les applications sur circuits comprenant un moteur est généralement déterminée par les critères qui suivent:

- résister sans détérioration aux impulsions de démarrage en succession rapide, par exemple dans des conditions anormales du type de celles se présentant pendant la mise en service de l'équipement;
- résister sans détérioration à un grand nombre de démarrages de moteur en conditions normales de service.

La norme CEI 60644 spécifie ainsi deux séquences d'essais représentatifs de ces conditions: 100 cycles correspondant à des conditions anormales de service, et 2 000 cycles correspondant à des conditions normales de service. Il est présumé que, si un fusible passe ces essais, il se comportera bien pendant une durée de vie opérationnelle satisfaisante.

5.2.3.4 Sélection des fusibles pour application sur des circuits comportant un moteur et corrélation des caractéristiques d'un fusible avec celles des autres composants du circuit

5.2.3.4.1 Sélection des fusibles

Le fusible est inséré dans le circuit avec moteur qu'il est censé protéger. Certaines valeurs assignées des fusibles (par ex., tension assignée et courant maximal de coupure assigné) dépendent donc du système tandis que d'autres (par ex., courant assigné) dépendent du moteur.

Il convient que le courant maximal de coupure assigné des fusibles du démarreur de moteur soit égal ou supérieur au cycle maximal de court-circuit disponible au point où les fusibles sont montés dans le système. En principe, il suffit que le courant minimal de coupure assigné

soit assez faible pour assurer une coordination correcte avec le relais à maximum de courant de l'appareil de connexion. Cependant, lorsqu'une sécurité majeure est requise, il convient que le courant minimal de coupure du fusible soit au moins aussi bas que le courant du moteur protégé en condition de rotor bloqué.

La capacité de résister à des conditions de démarrages répétitives est un facteur important. Lorsque vous sélectionnez un fusible pour une application donnée de circuit comportant un moteur, il convient de faire attention au facteur K qui doit être appliqué à la caractéristique temps-courant de préarc du fusible afin de prendre en compte ces conditions de démarrage.

Le principe habituel du courant assigné qui repose sur la capacité d'un fusible de conduire un courant donné de façon continue sans dépasser une augmentation donnée de température est normalement d'importance secondaire lorsque le moteur est à démarrage direct. Le fusible pour ces applications est normalement choisi par référence aux alinéas ci-dessus.

Cependant, il convient de vérifier que le courant assigné du fusible dépasse le courant de marche du moteur dans les conditions de service d'une quantité suffisante pour prendre en compte les effets de la température de l'air environnant lorsque les fusibles sont enveloppés dans les équipements de démarrage et de commande du moteur.

Lorsqu'un démarrage assisté est utilisé et les courants de démarrage sont ainsi réduits, la méthode de sélection ci-dessus est généralement applicable, mais il convient parfois de prendre en compte les courants transitoires élevés qui, dans certaines méthode de démarrage, circulent pendant la transition entre une connexion et une autre. De plus, du fait que le démarrage assisté permet généralement l'utilisation de fusibles avec des courants assignés plus faibles, l'augmentation de température en état de marche sera probablement d'importance majeure.

Aucun courant assigné n'est spécifié pour certains fusibles de démarreur de moteur qui utilisent la pratique "nord américaine", mais ceux-ci sont plutôt identifiés par une valeur "R" assignée (par ex., 2R, 4R, etc.). Selon la norme IEEE C37.46 [8], il convient qu'un fusible avec valeur "R" assignée fonde dans un intervalle de 15 à 35 secondes à une valeur de courant égale à 100 fois le nombre R. La norme IEEE C37.46 [8] spécifie également les valeurs minimales pour le courant permanent assigné admissible (voir 5.1.1.1.3) des fusibles assignés R à des températures ambiantes de 40 °C et 55 °C (par ex., les courants pour un fusible 2R sont de 70 A et 63 A, et de 130 A et 115 A pour un fusible 4R à 40 °C et 55 °C respectivement). Il convient de noter que cette exigence TCC est approximativement en ligne avec les exigences données dans 5.2.3.2. Pour le côté historique, le chiffre "R" se référait au départ au nombre de "rubans" parallèles (éléments de fusible) dans un fusible de démarreur de moteur, mais ce n'est pas nécessairement le cas avec les fusibles modernes.

5.2.3.4.2 Coordination avec d'autres composants du circuit

La Figure 24 illustre une application typique de circuit comportant un moteur avec donc un moteur, un ou plusieurs relais (assurant au moins l'une des fonctions suivantes: protection contre les surintensités à temps inverse, protection contre les surintensités instantanée, protection contre les défauts à la terre instantanée), un contacteur ou autre appareil de connexion mécanique, le câble et le fusible lui-même.

Le moteur sera choisi pour sa fonction particulière, fixant ainsi les valeurs du courant de pleine charge et du courant de démarrage. La durée et la fréquence des démarrages sera également fixée. La caractéristique du relais de surintensité à temps inverse associé sera ensuite choisie pour assurer une protection thermique adéquate au moteur. L'appareil de connexion est sélectionné en conjonction avec le fusible pour coordonner le moteur déjà sélectionné.

Notamment:

- a) Il convient que la caractéristique temps-courant de préarc du fusible, lorsqu'elle est multipliée par le facteur K approprié, se trouve à droite du courant de démarrage du moteur au point A;
- b) Il convient que l'appareil de connexion mécanique soit capable de résister aux conditions définies par les caractéristiques de fonctionnement combinées dBCE;
- c) Il convient de choisir le courant assigné du fusible de sorte que, lorsque le fusible est monté dans sa position de service, il est capable de conduire de façon continue le courant de marche du moteur sans surchauffer. Cela est particulièrement important lorsqu'un démarrage assisté est utilisé;
- d) Il convient que le courant correspondant au point d'intersection B entre la courbe du fusible et celle du relais de surintensité soit inférieur au courant de coupure maximal de l'appareil de connexion mécanique;
- e) Il convient que le courant de coupure minimal du fusible ne dépasse pas le courant d'intersection "B";
- f) Si une protection instantanée est assurée, le point d'intersection se déplacera de B à C. Il convient de tenir compte de la possibilité que l'appareil de connexion mécanique puisse s'ouvrir à un courant supérieur au courant de coupure maximal assigné;
- g) Il convient que le courant de coupure du fusible au courant de défaut maximal du circuit ne dépasse pas la tenue au courant traversant de l'appareil de connexion mécanique pour le temps de fonctionnement du fusible, normalement un demi-cycle ou moins;
- h) Il est souhaitable que le courant de coupure minimal du fusible soit aussi bas que possible et il convient si possible qu'il soit au moins aussi bas que le courant du moteur rotor bloqué.
- i) Comme illustré dans la Figure 24, il convient que l'intégralité de la courbe de résistance du câble se trouve à droite de la caractéristique de fonctionnement dBCE. Lorsque des spécifications élevées du fusible sont nécessaires en raison de la nature de la fonction de démarrage de moteur (par ex., temps prolongés de démarrage et démarrages fréquents), la section BCE se déplace vers la droite et peut requérir une augmentation appropriée de la taille du câble.

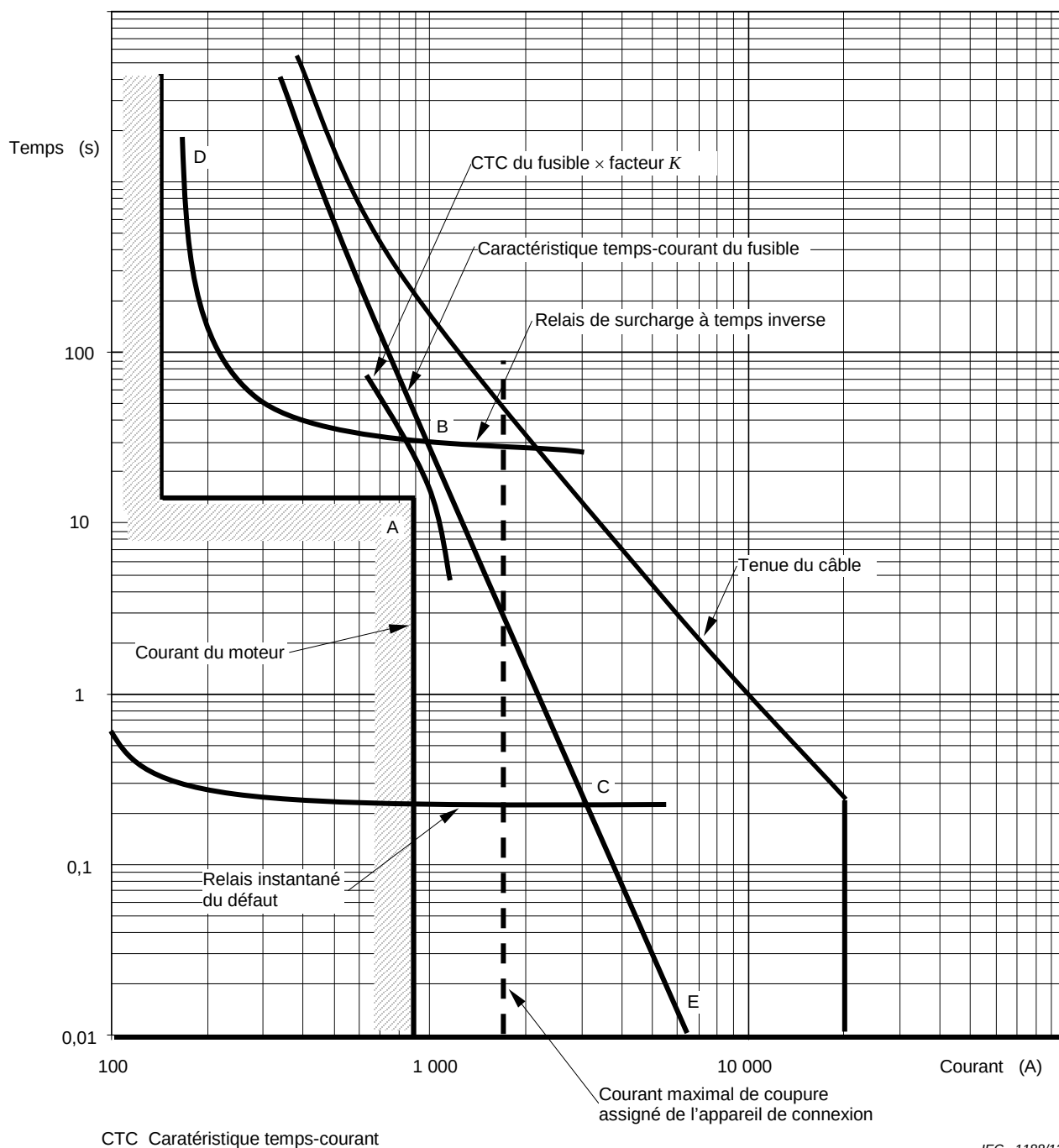


Figure 24 – Caractéristiques relatives à la protection d'un circuit comportant un moteur

5.2.4 Applications de protection de condensateur

5.2.4.1 Renseignements généraux sur l'application pour fusibles externes destinés à des bancs de condensateurs en dérivation

Le Paragraphe 5.2.4 contient les directives d'application pour des fusibles qui sont montés en externe sur des condensateurs et qui sont destinés à la protection des condensateurs contre les surintensités. Les fusibles de condensateur sont normalement soumis à des essais de conformité aux normes CEI 60549 ou IEEE C37.41 [6]. Bien que, au moment où le présent rapport a été produit, ces normes présentaient des différences dans les méthodes d'essai, ces différences étaient en cours de résolution avec des modifications aux deux normes.

Un fusible externe pour la protection du banc de condensateurs en dérivation, dans les limites de ses spécifications, minimise les dommages au circuit et au banc de condensateurs ou au condensateur individuel, résultant d'un défaut. Le fusible de condensateur ne peut pas empêcher la défaillance d'un condensateur. Pour de nombreuses installations, réduire le risque d'une rupture de la cuve du condensateur est une préoccupation fondamentale. En théorie, il convient également que le fusible intervienne avant que les appareils de protection en amont ne fonctionnent ou ne soient endommagés. Des performances appropriées du fusible dépendront de la correction de l'application.

Il existe deux types de fusibles externes de condensateur: les fusibles de ligne de condensateurs et les fusibles de condensateur unitaire. Les fusibles de ligne de condensateur (communément désignés comme des fusibles de "groupe") sont utilisés pour la protection de toute l'installation du banc de condensateurs, tandis que les fusibles de condensateur unitaire (souvent désignés comme "fusibles individuels") servent pour la protection des condensateurs individuels. Certaines installations intègrent côte à côte des fusibles de ligne de condensateurs et des fusibles de condensateur unitaire. Les types de courant de défaut relevés par les deux types de fusibles tendent à différer et des essais de coupure différents sont donc spécifiés pour chacun d'eux. Dans la plupart des cas, des modèles différents de fusibles sont utilisés pour les deux types de fusibles tandis que, dans d'autres cas, le même fusible peut servir de fusible de ligne ou de fusible unitaire, mais il faudra qu'il se soit tout d'abord démontré capable de couper les courants de défaut associés aux deux types d'application. Souvent, de petits bancs de condensateurs de distribution ne sont protégés que par des fusibles de ligne de condensateurs.

Normalement, la fusion du fusible commence par une surintensité à fréquence industrielle et/ou, pour les fusibles de condensateurs unitaires, sous l'effet de l'énergie accumulée dans le condensateur se déchargeant à travers le fusible.

Les facteurs usuels de courant à fréquence industrielle et d'énergie accumulée qu'il convient de prendre en compte dans l'établissement de la protection appropriée pour un banc de condensateurs sont: le courant de défaut du circuit disponible là où se trouve le banc de condensateurs, le type de connexion du banc de condensateurs (par ex., en triangle ou en étoile, avec ou sans connexion neutre à la terre (mis à la masse ou non), la spécification du condensateur unitaire ou du banc de condensateurs en termes de puissance réactive (normalement divisé par 1 000 et exprimé en kVAr) et le nombre de condensateurs unitaires en parallèle.

Une protection de déséquilibre est fréquemment utilisée pour la protection du banc de condensateurs. Le réglage de la protection de déséquilibre peut affecter la tension sur un fusible de condensateur individuel lorsque celui-ci coupe et il convient de le prendre en compte dans la détermination de la spécification de la tension du fusible. Certains bancs de condensateurs avec des groupes de condensateurs en série connectés en étoile neutre à la terre sur des systèmes en étoile raccordés à la terre, et certains bancs de condensateurs avec des groupes de condensateurs en série raccordés en triangle (indépendamment de la mise à la terre du système) peuvent ne pas requérir de protection de déséquilibre pour une protection fiable du banc de condensateurs.

Pour des applications dans lesquelles les fusibles de ligne de condensateurs ou de condensateurs unitaires sont utilisés dans des enveloppes ou des cuves de transformateur, il convient d'envisager l'utilisation de fusibles à expulsion avec aération contrôlée ou des fusibles limiteurs de courant.

Dans le cas où les fusibles sont utilisés pour protéger des condensateurs unitaires, des valeurs de courant minimal de coupure très faibles peuvent être souhaitables pour tenir compte des faibles accroissements de courant qui se produisent lorsqu'il y a rupture d'un ou de plusieurs éléments de condensateur montés en série. Dans le cas où des fusibles ne sont utilisés que pour la protection de ligne (lorsque les unités individuelles sont protégées séparément par d'autres moyens), des fusibles ayant une valeur de courant minimal de coupure plus élevée peuvent alors être utilisés (voir CEI 60549).

Tandis que les condensateurs sont considérés comme des appareils à courant constant, ils sont assujettis à des surintensités en fonctionnement normal sur un système. Celles-ci sont provoquées par la surcapacité (tolérance de fabrication), par un fonctionnement à une tension supérieure à la tension assignée et par des courants harmoniques du système.

La surtension entraîne une augmentation du courant dans un condensateur de façon linéaire avec changement de la tension. Une tension excessive peut aussi provoquer une augmentation du courant de troisième harmonique provenant des transformateurs surexcités. Certaines normes permettent un fonctionnement à une surtension de 10 % et une surcapacité de 15 %. Les courants harmoniques dépendent de l'état du système et sont difficiles à prévoir. Les tolérances en regard de ces augmentations du courant de service sont désignées sous l'appellation de "facteur de tolérance" et sont discutées dans 5.2.4.5.1.

5.2.4.2 Buts de l'application du fusible de condensateur

5.2.4.2.1 Fusibles de ligne (de groupe) de condensateur

Normalement, lorsque de petits bancs de condensateurs de distribution, connectés en étoile ou en triangle de groupes série simples, sont protégés par des fusibles, seuls des fusibles de ligne de condensateur sont utilisés. Pour des bancs plus gros, un fusible de ligne peut être utilisé pour protéger le banc avec des fusibles protégeant chaque condensateur unitaire.

Certaines caractéristiques souhaitables pour les fusibles de ligne de condensateur peuvent être les suivantes:

- a) protéger le système de distribution ou le jeu de barres de sous-station contre les défauts majeurs sur ou dans le banc de condensateurs et assurer la coordination avec l'appareil de protection de surintensité en amont jusqu'au courant de défaut maximal disponible sur le banc de condensateur;
- b) assurer l'isolation la plus précoce possible d'une ou plusieurs phases d'un banc de condensateurs ayant un condensateur unitaire en rupture, si aucun fusible de condensateur unitaire n'est utilisé;
- c) permettre un courant de charge plus élevé associé à: la tolérance de capacité côté plus dans des condensateurs unitaires, la tension de fonctionnement dépassant la spécification de la plaque signalétique et la présence de courants harmoniques (un fusible est souvent choisi pour avoir un courant permanent admissible de 135 % du courant de condensateur nominal, voir 5.2.4.5.1);
- d) Lorsqu'une phase d'un banc en étoile non connecté à la terre est en défaut sur le neutre, fonctionner dans une fourchette de temps qui minimisera la probabilité d'endommager les condensateurs unitaires dans les phases non en défaut suite à une surtension.
- e) résister au courant transitoire de mise sous tension provenant du système et des autres bancs de condensateurs sous tension dans le voisinage;
- f) résister au, ou fonctionner sur (au choix de l'utilisateur), le courant de décharge du banc de condensateurs dans le défaut sur le système à proximité du banc de condensateurs. On peut relever qu'une caractéristique de préarc de fusible qui peut être requise si le banc devait rester connecté pendant un tel défaut peut entraîner une protection du banc moins favorable que celle obtenue avec un fusible ayant une caractéristique qui entraînerait un fonctionnement avec un défaut à proximité du banc.

Quelques observations lorsque seuls des fusibles de ligne de condensateur sont utilisés:

- a) Il est important que le fusible ait une caractéristique temps-courant de fonctionnement maximale en accord avec le degré de risque associé avec la rupture du condensateur unitaire acceptable pour le type d'installation et pour le lieu envisagés pour le banc de condensateurs;
- b) lorsque des fusibles de ligne sont utilisés sur un banc connecté en étoile et non raccordé à la terre, les condensateurs unitaires sur les phases non en défaut sont soumis à des surtensions d'un facteur allant jusqu'à 1,73, jusqu'à ce que le défaut soit éliminé par le fusible de ligne;

- c) lorsque les fusibles de ligne sont connectés hors du triangle sur un banc connecté en triangle, un condensateur unitaire en défaut n'est pas déconnecté du circuit si un fusible seulement est entré en fonction.

5.2.4.2.2 Fusibles de condensateur unitaire (individuel)

Certaines caractéristiques souhaitables pour les fusibles de ligne de condensateur peuvent être les suivantes:

- a) assurer l'isolation d'un condensateur unitaire en défaut le plus tôt possible;
- b) permettre la charge normale maximale associée à:
 - 1) la capacité du condensateur unitaire supérieure à la capacité nominale;
 - 2) la tension sur le condensateur unitaire supérieure à la tension nominale en raison d'une tension de fonctionnement du système au-dessus de la tension nominale et/ou accrue sur les condensateurs restants dans un groupe résultant de l'isolation des condensateurs unitaires parallèles;
 - 3) la présence d'harmoniques dans le courant de condensateur;
- c) résister au courant transitoire de décharge d'un condensateur unitaire individuel dans un condensateur unitaire en défaut dans un même groupe de série.

5.2.4.3 Observations sur courant d'appel de condensateur pour fusibles de ligne

A la mise sous tension, les bancs de condensateurs peuvent tout d'abord apparaître comme un court-circuit. Le courant de chargement du banc de condensateurs (ou courant d'appel) sera limité par l'impédance des circuits et dépend du déphasage de la tension du système à laquelle le banc est tout d'abord soumis.

La valeur du I^2t de préarc minimale du fusible doit être plus élevée que la valeur du I^2t du courant d'appel. La valeur du I^2t du courant d'appel peut être estimée avec un bon degré de précision. L'ordre de grandeur initial du courant d'appel I , sans prendre en compte l'amortissement dû à la résistance du système, peut être calculé à l'aide de l'équation (1):

$$I = U(CL)^{1/2} \quad (1)$$

qui est basée sur le rapport $(L/2)I^2 = (C/2)U^2$

où

U est la tension de crête,

C est la capacité,

L est l'inductance du circuit de source.

Le courant d'appel pénètre dans le condensateur sous forme d'un courant sinusoïdal amorti à haute fréquence dont l'ordre de grandeur initial est déterminé par la tension du système, l'inductance et l'impédance caractéristique. La résistance haute fréquence, une valeur bien supérieure à la résistance de circuit de 60 Hz et qui ne peut être déterminée que de façon empirique, provoque un amortissement du courant d'appel haute fréquence. Un courant d'appel particulièrement important et, donc, conservatoire, est un courant d'appel ayant une première crête à 90 % de celle d'un courant non amorti; il convient que les crêtes subséquentes de 1/2 cycle soient à 81 % de chacune des crêtes précédentes. L'équation 2 présente la valeur du I^2t résultant de ce courant:

$$I^2t = 3,74 E^2 C^{3/2} L^{-1/2} \text{ A}^2\text{s} \quad (2)$$

où:

E est la tension de crête phase-terre en volts,

C est la capacité de phase du banc en farads,
 L est l'inductance du circuit de source en henrys.

Un condensateur sans charge initiale (n'ayant pas été mise sous tension au cours des 5 min. précédentes) provoque un courant d'appel instantané initial non affecté par une charge existante. Ce courant transitoire diminue au fur et à mesure que le condensateur se charge jusqu'à ce que le courant soit égal à $V\omega C$. Le courant transitoire a une fréquence transitoire f proportionnelle à l'inverse de la racine carrée du produit de la capacité et de l'inductance du court-circuit (Equation 3).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Des manœuvres excessives peuvent dégrader les caractéristiques d'un fusible du fait que des courants d'appel répétés peuvent provoquer un réchauffement localisé et déplacer les fusibles. Les observations relatives aux conditions du courant d'appel dans des applications à banc simple sont les suivantes:

- la mise sous tension d'un condensateur pendant les opérations de réenclenchement de disjoncteurs avec des temps "ouvert" brefs (mesurés en cycles) peut provoquer des courants d'appel plus élevés si la charge emprisonnée dans le condensateur est d'une polarité opposée à la tension du circuit au moment de mise sous tension;
- la mise sous tension d'un banc de condensateur sur un circuit ayant un banc sous tension déjà en service a pour effet que le courant instantané est fonction de l'impédance entre les deux bancs ainsi que du courant de court-circuit provenant de la source. La fréquence du courant d'appel a deux composantes, l'une résultant des caractéristiques du courant d'appel du banc et l'autre des caractéristiques de court-circuit du circuit. Les équations suivantes expriment leurs rapports:

$$f_{\text{appel}} \text{ est proportionnel à } \{(L_{\text{entrebancs}}) \times [(C1C2)/(C1 + C2)]\}^{-1/2} \quad (4)$$

$$f_{\text{composante court-circuit}} \text{ est proportionnel à } \{(L_{\text{court-circuit}}) \times (C1 + C2)\}^{-1/2} \quad (5)$$

5.2.4.4 Sélection de la tension assignée du fusible

5.2.4.4.1 Généralités

La tension assignée U_r du fusible est sa tension maximale assignée, soit la tension efficace à fréquence industrielle maximale (incluant toute surtension ou tout déséquilibre du système) prévue pour son application.

La sélection de la spécification de tension du fusible requiert d'obtenir un bon fonctionnement du fusible à la tension de service permanente maximale du système. Cette base pour la sélection de la spécification de tension n'inclut aucune disposition pour le fonctionnement pendant les surtensions transitoires ou temporaires associées avec le rétablissement des fusibles, des défauts du système, etc.

La tension assignée des fusibles à expulsion peut excéder celle requise par l'application de toute valeur souhaitée.

Lorsqu'un condensateur en dérivation est utilisé dans un système d'alimentation, le courant en avance (capacitif) qu'il attire a pour effet d'augmenter la tension du système au point où il est raccordé. La raison en est que le courant produit une hausse de tension tandis qu'il traverse la réactance du circuit. Bien que ce phénomène soit normalement souhaitable afin de maintenir un niveau satisfaisant de tension de fonctionnement (justifiant souvent l'utilisation des condensateurs en dérivation), un courant capacitif excessif peut provoquer une augmentation inopportune de la tension. Un courant capacitif excessif se présente

normalement suite à une défaillance des éléments de condensateurs ou condensateurs unitaires qui sont en série avec d'autres éléments de condensateurs ou condensateurs unitaires (et/ou à l'entrée en fonction des fusibles unitaires). Une défaillance produit une augmentation significative de la tension sur les éléments en série ou unitaires restants, avec pour résultat qu'un courant capacitif accru les traverse. Ce courant plus élevé que le courant normal peut produire une augmentation de la tension du système. Il est normalement demandé aux condensateurs de fonctionner de façon satisfaisante à des valeurs allant jusqu'à 10 % au-dessus de leur tension assignée, de sorte que les bancs de condensateurs utilisent normalement une protection limitant la surtension à 10 %. Les essais de conformité à la norme CEI 60549 limitent l'augmentation admissible de la tension du circuit due à la connexion de la capacité produisant le courant potentiel capacitif souhaité. Cette limite est fixée à 10 % au-dessus de la tension de rétablissement du circuit d'essai. Il n'existe toutefois aucune garantie qu'un fusible donné a été soumis à des essais dans un circuit qui donne une augmentation de tension de 10 % (cette limite peut être moindre). Par conséquent, la "spécification de tension capacitive" n'est pas fixée à une valeur supérieure à la tension de rétablissement à fréquence industrielle (la même tension que si l'essai avait été exécuté avec un courant inductif). La tension maximale de circuit ou la tension interne au banc qu'un fusible doit, pour cela, être à même de couper, même en cas de défaillance du condensateur, doit être connue afin de choisir la bonne tension assignée du fusible de condensateur. La tension assignée du fusible doit être égale ou supérieure à cette tension maximale. La norme CEI 60549 requiert qu'un fusible soit spécifié à 1,1 fois la tension assignée du condensateur. Ce n'est toutefois la tension assignée correcte du fusible que si le courant de défaut maximal produit par les condensateurs défaillants ne peut résulter qu'en une augmentation de tension de 10 % au-dessus de la spécification de tension nominale du condensateur avant que la protection du banc de condensateur ne fonctionne.

5.2.4.4.2 Fusibles de ligne de condensateurs

Les fusibles limiteurs de courant peuvent produire des tensions de coupure qui sont notablement supérieures à la crête de tension normale à fréquence industrielle du système. La sélection des fusibles limiteurs de courant dont la tension maximale assignée est considérablement supérieure à la tension de la fréquence de puissance du système peut provoquer des tensions de coupure pouvant entraîner des dommages d'isolation ou une panne du limiteur de surtension. L'utilisation du fusible limiteur de courant avec tension assignée la plus faible disponible répondant à l'exigence de tension applicable est donc recommandée. Si des fusibles limiteurs de courant à tension assignée plus élevée sont utilisés, consultez le fabricant.

Pour les bancs de condensateurs non raccordés à la terre (configuration en étoile non mise à la terre ou en triangle), la tension sur le deuxième fusible de ligne à rétablir est la tension entre phases du système, indépendamment de la mise à la masse du système sur le banc de condensateur (systèmes non raccordés à la terre, y compris systèmes uni-raccordés à la masse, ou systèmes en étoile raccordés à la terre, y compris les systèmes mis à la terre par impédance). Pour les bancs de condensateurs en étoile non raccordés à la terre ou raccordés en triangle, il convient d'avoir soumis les fusibles à un essai à une tension égale ou supérieure à la tension maximale entre phases du système. Pour cela, une condition requise peut être que le fusible ait une tension maximale assignée égale à au moins 115 % de la tension maximale entre phases (voir 5.1.3).

Pour les bancs de condensateurs raccordés en étoile raccordés à la terre appliqués sur des systèmes effectivement mis à la terre (mise à la terre multiple, quatre fils), il convient que les fusibles soumis à des essais à 100 % de leur tension maximale assignée aient une tension maximale assignée supérieure ou égale à la tension phase-terre maximale du système. Certains fusibles à expulsion de classe B et certains fusibles limiteurs de courant peuvent être soumis à des essais comme appareils triphasés avec certains essais à tension réduite. Pour cela, une condition requise peut être que le fusible ait une tension maximale assignée égale à au moins 115 % de la tension maximale phase-terre (voir 5.1.3). Cette information relative à l'application repose sur une application normale dans laquelle les fusibles sont situés à proximité du banc de condensateurs et un défaut triphasé n'impliquant pas la terre est peu probable. Pour les applications dans lesquelles les fusibles sont situés à distance du banc de condensateurs ou la construction dudit banc est telle qu'un défaut triphasé

n'impliquant pas la terre doit être envisagé, il convient d'appliquer les conditions de rétablissement pour ce défaut pour sélectionner le fusible approprié. Pour ces applications, il convient d'utiliser des fusibles dont toutes les tensions d'essai sont supérieures ou égales à la tension entre phases maximale du système.

Il convient de noter que, en cas de défaut triphasé non mis à la terre, le premier fusible de ligne de condensateur à rétablir verrait une tension de rétablissement de 1,5 fois la tension phase-terre après élimination du courant de défaut dans sa phase. Comme indiqué plus haut, la probabilité de l'occurrence de tels défauts aura un effet sur la détermination de la tension assignée du fusible sélectionnée pour l'application.

Il convient que le niveau d'isolement (tension de tenue de choc, tensions à fréquence industrielle, cheminement) du montage utilisé pour le fusible de ligne soit conforme au niveau d'isolement du système.

5.2.4.4.3 Fusibles de condensateurs unitaires

Il convient qu'un fusible à expulsion ou un fusible limiteur de courant ait une tension maximale assignée supérieure ou égale à la tension de fréquence de puissance maximale qui apparaîtra sur le fusible après avoir été mis en fonction. Des tensions du banc de condensateurs supérieures à la tension nominale peuvent être provoquées par des tensions de système nominales supérieures à la normale ou par des déséquilibres de tension à l'intérieur du banc. Les formules de calcul de la tension sur un groupe de condensateurs en fonction du nombre de condensateurs unitaires isolés, du nombre de groupes série et de la connexion du banc de condensateurs sont disponibles dans la norme IEEE Std C37.99 [10]. Par exemple, pour un petit banc opérant à la tension assignée, le fonctionnement du premier fusible peut provoquer une tension de 109 % sur le groupe série affecté (avec une alarme) et le fonctionnement du deuxième fusible peut provoquer une tension de 120 % sur le groupe série affecté, jusqu'à ce que la protection de tension de déséquilibre soit déclenchée et entre en fonction. Dans ce cas, il convient que la tension assignée du fusible soit d'au moins 1,2 fois la spécification inscrite sur la plaque signalétique du condensateur unitaire. Si le banc de condensateur fonctionnera à une tension supérieure à celle assignée, la spécification du fusible peut avoir à être relevée en conséquence.

Il convient que la protection de déséquilibre dans un banc de condensateur soit suffisamment rapide pour éviter que le dernier fusible dans un groupe série n'ait jamais à entrer en fonction sans un condensateur en parallèle et avec une tension de rétablissement très élevée. Reportez-vous à la norme IEEE Std C37.99 [10] pour tout renseignement sur la protection de déséquilibre.

Un fusible à expulsion peut avoir une tension maximale assignée supérieure d'une certaine quantité à la tension du circuit à fréquence industrielle. Si le banc est équipé avec des fusibles limiteurs de courant et si un fusible est susceptible d'être soumis à un défaut de courant inductif, il convient de prendre garde dans l'application de fusibles avec des spécifications de tension bien supérieures à la tension maximale de système. Il convient de consulter le fabricant du fusible à ce sujet.

5.2.4.5 Sélection du courant assigné du fusible

5.2.4.5.1 Facteur de tolérance

En général, il convient de sélectionner un fusible de condensateur en fonction du courant prévu le plus élevé du banc de condensateurs ou du condensateur unitaire. Il convient que le fusible sélectionné, en particulier, dispose d'une capacité sous tension permanente maximale tolérable qui se distingue de son intensité nominale, supérieure à ce niveau de courant prévu le plus élevé.

Par conséquent, il convient donc que le courant maximal du banc de condensateur ou du condensateur unitaire soit connu avec exactitude. Ce courant maximal peut être estimé en calculant d'abord le courant nominal, puis en appliquant les facteurs de correction.

Le courant nominal de la phase de condensateur ou du condensateur unitaire (I_{nominal}) pour les bancs de condensateurs ou les condensateurs monophasés peut être calculé en appliquant l'équation (6):

$$I_{\text{nominal}} = \frac{kVAr}{kV} \text{ A} \quad (6)$$

où

$kVAr$ est la spécification monophasée nominale du banc de condensateurs ou du condensateur unitaire (en kVAr) et

kV est la tension assignée monophasée nominale du banc de condensateurs ou du condensateur unitaire (en kilovolts).

Le courant nominal du fusible de ligne du condensateur est égal au courant nominal de phase du banc de condensateur. Ce courant de phase nominal (I_{nominal}) pour les bancs de condensateurs triphasés peut être calculé avec l'Equation (7):

$$I_{\text{nominal}} = \frac{kVAr_{3\phi}}{\sqrt{3} kV_{\phi-\phi}} \text{ A} \quad (7)$$

où

$kVAr_{3\phi}$ est la spécification triphasée nominale du banc de condensateurs ou du condensateur unitaire mesurée en voltampères réactifs divisés par 1000 (kVAr) et

$kV_{\phi-\phi}$ est la tension assignée nominale entre phases du banc de condensateurs ou du condensateur unitaire en kilovolts

Les équations (6) et (7) fournissent une méthode de calcul du courant de phase nominal pour les bancs de condensateurs monophasés ou triphasés ou du courant nominal des condensateurs unitaires lorsque la tension prévue de fonctionnement est égale à la spécification de tension nominale du banc de condensateurs ou du condensateur unitaire. Lors de la fusion des branches individuelles d'un banc de condensateurs raccordé en triangle, le courant dans chaque branche (soit le courant perçu par le fusible de ligne du condensateur) peut être établi en multipliant le courant nominal de phase du banc de condensateurs par 0,58. Pour les systèmes fonctionnant à une tension prévue inférieure à leur tension nominale assignée, le courant de phase ajusté du banc (I'_{nominal}) peut être calculé avec l'Equation (8):

$$I'_{\text{nominal}} = I_{\text{nominal}} \frac{kV_{\text{système}}}{kV_{\text{nominal}}} \text{ A} \quad (8)$$

où

I_{nominal} est le courant nominal de phase du condensateur,

$kV_{\text{système}}$ est la tension nominale du système en kilovolts et

kV_{nominal} est la tension assignée nominale du banc de condensateurs ou du condensateur unitaire en kilovolts.

Pour les condensateurs unitaires à une tension prévue inférieure à leur tension nominale assignée, le courant ajusté du condensateur unitaire (I'_{nominal}) peut être calculé à l'aide de l'équation (9):

$$I'_{\text{nominal}} = I_{\text{nominal}} \frac{kV_{\text{de fonctionnement}}}{kV_{\text{nominal}}} \text{ A} \quad (9)$$

où

I_{nominal}	est le courant nominal du condensateur unitaire,
$kV_{\text{de fonctionnement}}$	est la tension prévue de fonctionnement du condensateur unitaire (en kilovolts) et
kV_{nominal}	est la tension nominale assignée du condensateur unitaire (en kilovolts).

La même référence de base sert pour tous les paramètres de tension (par ex., référence de tension entre phases ou phase-terre).

Une fois que le courant nominal du banc de condensateurs a été calculé à partir de la tension du système, la tension du banc de condensateurs et la spécification kVAr du banc de condensateurs, le courant anticipé le plus élevé du banc de condensateurs est ensuite calculé en prenant en compte la possibilité d'une tension système supérieure à la tension nominale, les tolérances de fabrication du condensateur et la présence d'harmoniques. Les normes passées relatives aux condensateurs admettaient une tension système plus élevée de 6 % (harmoniques exclues), une tolérance de capacité +15 % et un courant plus élevé de $1,06 \times 1,15 \times 1,1 = 1,34$. Cette valeur était normalement arrondie à 35 % au moment de sélectionner de façon conservatoire un fusible de ligne de condensateur. Les normes récentes relatives aux condensateurs ont modifié les variations admissibles présentées plus haut. Cette nouvelle tolérance entraîne une valeur de tolérance de $1,06 \times 1,10 \times 1,1 = 1,29$. Du fait que l'âge des condensateurs utilisés dans une installation n'est, généralement parlant, pas connu, l'utilisation de l'ancienne tolérance de 35 % est normalement prudente.

Lorsque le courant anticipé le plus élevé d'un condensateur unitaire est estimé, celui-ci peut fonctionner pendant un certain temps à une tension supérieure de 10 % par rapport à sa tension assignée. La tolérance sur le condensateur et les harmoniques étant pris en compte, le courant nominal du condensateur unitaire, calculé sur la base de la tension assignée et de la valeur kVAr, peut être augmentée par ajout d'une tolérance allant jusqu'à $1,1 \times 1,15 \times 1,1 = 1,39$.

Cependant, dans la pratique, les variables de fonctionnement ci-dessus atteignent rarement les valeurs maximales mentionnées et il est encore moins probable qu'elles seront à leur valeurs maximales simultanément. Par conséquent, certaines tolérances du fusible de ligne actuellement appliquées descendent jusqu'à 17 % pour les bancs non mis à la terre et à 25 % pour les bancs raccordés à la terre. Lorsque des fusibles de type à expulsion sont appliqués, le recours à de telles tolérances résultera généralement en la sélection d'une intensité nominale de fusible susceptible de résister aux courants d'appel se présentant pendant la connexion du banc de condensateurs, même lorsque d'autres bancs sous tension sont présents dans le voisinage. Pour les fusibles individuels, certaines tolérances descendent jusqu'à 22 % pour les bancs non mis à la terre et à 31 % pour les bancs raccordés à la terre. Les bancs de condensateurs pour certains types d'utilisateurs industriels, par contre, peuvent avoir des courants à haute teneur en harmoniques. Une tolérance suffisante doit donc être prise en compte dans ces cas.

Pour de petits fusibles à expulsion à courant assigné (moins de 25 A) ou pour des fusibles de type limiteur de courant, une classe de vitesse moindre et/ou un courant assigné plus grand peuvent être requis en raison des transitoires du système provoqués par la foudre, des défauts à proximité ou la connexion différentielle de plusieurs bancs.

Lorsque des fusibles de type limiteurs de courant sont appliqués, des tolérances plus importantes peuvent être nécessaires même avec des fusibles à intensité assignée plus élevée de sorte que les fusibles puissent résister à ces courants transitoires. Pour ces types d'application, il est recommandé de consulter le fabricant du fusible de ligne de condensateur sélectionné.

De plus, les bancs de condensateurs pour certains types d'utilisateurs industriels peuvent être soumis à des courants à teneur élevée en harmoniques. Une tolérance suffisante doit donc être prise en compte dans ces cas.

5.2.4.5.2 Observations supplémentaires relative au fusible unitaire

Un autre facteur doit être pris en compte dans la sélection du calibre de courant d'un fusible de condensateur unitaire. Lorsque des condensateurs unitaires sont montés en parallèle dans un banc de condensateurs et un défaut franc se présente dans l'un des condensateurs unitaires, une décharge se produit en sortie de l'autre condensateur unitaire raccordé en parallèle vers le condensateur en défaut. La décharge consiste en un courant amorti à haute fréquence dont les caractéristiques dépendent de facteurs tels que la construction du banc de condensateurs (nombre, spécification et espacement entre les condensateurs unitaires) et l'emplacement du condensateur unitaire. Il convient que les fusibles des condensateurs unitaires raccordés en parallèle avec le condensateur en défaut soient à même de résister à ce courant de décharge sans fondre et sans dommages susceptibles d'altérer leurs caractéristiques temps-courant (TCC). Certains fabricants limitent parfois l'application de certains fusibles afin d'éviter ce type de dommages.

Pour certains fusibles limiteurs de courant, le calibre en courant peut être fonction du niveau des courants d'appel et de fuite pendant le fonctionnement du banc de condensateurs et de la fréquence de connexion du banc de conducteurs. Consultez les données d'application du fabricant du fusible pour le choix des fusibles destinés à des applications en bancs de condensateurs dos-à-dos fréquemment connectés ou à des applications en bancs de condensateurs pour lesquels un grand nombre de défauts sont à prévoir à proximité.

5.2.4.5.3 Ajustement relatif à la température ambiante

Certains fabricants communiquent une valeur maximale de courant permanent admissible pour l'intensité nominale de chaque fusible (supérieure au courant assigné) pour un fonctionnement avec une température ambiante de 25 °C ou 30 °C. Il convient que les capacités de charge de crête soient réduites selon les recommandations des fabricants afin de refléter le fonctionnement à des températures ambiantes s'élevant jusqu'à 40 °C (plus, si l'installation le permet). La correction pour un environnement supérieur reconnaît que la correction du facteur de puissance et que la régulation de tension assurées par les bancs de condensateurs en dérivation sont essentielles dans les journées pendant lesquelles la charge est à son plus haut. Une telle situation peut coïncider avec des pics de charge estivaux et/ou des vagues de chaleur.

5.2.4.5.4 Courant assigné maximal du fusible sélectionné

Les observations ci-dessus guident la sélection du courant assigné minimal d'un fusible approprié. Le courant assigné maximal d'un fusible pour l'application est déterminé par les considérations relatives à la rupture de cuve.

Pour des bancs raccordés en étoile non mis à la terre, il convient de prendre en compte la capacité des condensateurs unitaires dans les phases sans défaut à résister à la surtension décrite dans 5.2.4.2.1 jusqu'à ce que le défaut soit supprimé.

Le fusible de courant assigné le plus petit répondant aux directives formulées dans 5.2.4.5.1, 5.2.4.5.2 et 5.2.4.5.3 est généralement préféré en présence de considérations de ruptures de cuve et afin de minimiser le temps pendant lequel les condensateurs dans les phases non en défaut d'un banc de condensateurs neutres non mis à la terre sont exposés à une surtension.

5.2.4.6 Sélection d'un courant maximale de coupure

5.2.4.6.1 Fusibles de ligne de condensateurs

Généralement, les fusibles de ligne des condensateurs servant à la protection des petits bancs de condensateurs doivent être capables d'interrompre les courants de défaut de type

capacitif et ceux de type inductif. Il convient que les pouvoirs de coupure de courant de défaut capacitif et inductif pour les fusibles de ligne de condensateur soient supérieurs ou égaux au courant de défaut maximal de chaque type disponible à l'emplacement du banc. Les pouvoirs de coupure des deux types de courant de défaut sont spécifiés en ampères symétriques et sont directement comparables aux valeurs de courant de défaut calculées pour chaque type disponible sur l'emplacement du banc de condensateurs.

Les défauts de courant capacitif se présentent lorsqu'une certaine somme de capacité reste en série avec le fusible lorsque celui-ci coupe le circuit. Le courant minimal typique de type capacitif que le fusible peut être amené à couper peut se présenter en cas de défauts de pack progressifs dans le condensateur unitaire et le fusible est dimensionné de sorte à répondre avant la défaillance complète du condensateur unitaire. Un courant maximal typique de type capacitif que le fusible peut être amené à interrompre peut se présenter avec un banc de condensateurs ayant un neutre non mis à la terre et un seul groupe série de condensateurs par phase. Ce courant est trois fois le courant de banc normal et se présente si une phase est entièrement en défaut.

Pour des bancs plus gros, un fusible de ligne peut être utilisé pour protéger le banc avec des fusibles protégeant chaque condensateur unitaire. Selon l'application et la configuration du banc de condensateurs, le fusible de ligne peut ne pas avoir à satisfaire aux conditions requises d'interruption du courant capacitif associées à un fusible de ligne de condensateur. Par exemple, dans un banc en étoile raccordé à la terre avec un groupe série simple, les fusibles de condensateur unitaire individuel répondront normalement aux défaillances dans un condensateur unitaire, bloquant l'entrée en fonction du fusible de ligne. Du fait que chaque condensateur unitaire individuel est déconnecté par son fusible, le fusible de ligne voit le courant en diminution; il convient qu'il n'entre en fonction qu'en cas de défaillance catastrophique ou de défaut externe au banc. Dans ce cas, le fusible de ligne verra le courant de défaut franc de type inductif disponible. Un autre exemple dans lequel un fusible de ligne peut ne pas avoir à satisfaire aux conditions requises d'interruption du courant capacitif pour un fusible de ligne de condensateur est un banc de condensateurs en étoile mis à la terre avec des groupes série multiples protégés par un interrupteur et un fusible associé. Des condensateurs unitaires individuels successifs dans un groupe série étant isolés du banc par leurs fusibles respectifs, les unités qui survivent sont protégées contre la contrainte de surtension par la protection de déséquilibre du condensateur. Dans ce plan de coordination sélectif, le fusible de ligne ne répondra que dans les cas où un défaut phase-terre, entre phases ou triphasé de type inductif se présente. D'autres exemples encore illustrent ce point, notamment les bancs raccordés en triangle dans un groupe série unique. Un fusible de ligne de condensateur assigné pour l'interruption du courant capacitif doit être utilisé pour la protection des bancs dans lesquels la configuration du banc est telle que l'interruption des courants capacitifs par le fusible de ligne ne peut pas être exclue.

Les courants de défaut inductifs sont toujours possible dans les bancs de condensateurs protégés par les fusibles de ligne de condensateur du fait que les courants de défaut inductifs peuvent se présenter dans les fils menant au banc de condensateur (interrupteurs, parafoudres, etc.) pour certains types de défaillance de condensateur unitaire ou en cas de défaut majeur dans le banc.

Si le courant de défaut inductif présumé sur le banc de condensateur dépasse le pouvoir de coupure d'un fusible de ligne de condensateur de type à expulsion ou la capacité de l'équipement raccordé, un fusible limiteur de courant peut être utilisé. Il peut s'agir d'un fusible à usage général ou à coupure intégrale pour remplacer le fusible à expulsion ou l'ajout d'un fusible associé limiteur de courant en série avec le fusible à expulsion. Il convient que le courant qu'un fusible de ligne limiteur de courant laisse passer en condition de court-circuit soit inférieur à la tenue des interrupteurs associés, des fusibles à expulsion et des condensateurs unitaires.

Pour des applications dans lesquelles les fusibles de ligne de condensateurs sont utilisés dans des enveloppes ou des chambres de transformateur, il convient d'envisager l'utilisation de fusibles à expulsion avec aération contrôlée ou des fusibles limiteurs de courant.

5.2.4.6.2 Fusibles de condensateurs unitaires

Les fusibles de condensateurs unitaires peuvent être nécessaires pour interrompre les courants de défaut de type capacitif. Avec certaines configurations de banc et dans certaines situations de défaut, ils peuvent aussi avoir à interrompre des courants de défaut de type inductif. Il convient que les pouvoirs de coupure de courant de défaut capacitif et inductif pour les fusibles de condensateur unitaire soient supérieures ou égales au courant de défaut maximal de chaque type disponible à l'emplacement du banc. Les pouvoirs de coupure des deux types de courant de défaut sont spécifiées en ampères symétriques et sont directement comparables aux valeurs calculées de chaque type disponible sur l'emplacement du banc de condensateurs.

Les défauts de courant capacitif se présentent lorsqu'une certaine somme de capacité reste en série avec le fusible lorsque celui-ci coupe le circuit. Le courant minimal typique de type capacitif que le fusible peut être amené à couper peut se présenter en cas de défauts de pack progressifs dans le condensateur unitaire et le fusible est dimensionné de sorte à répondre avant de rétablir la défaillance du condensateur unitaire. Un courant maximal typique de type capacitif que le fusible peut être amené à interrompre peut se présenter avec un banc de condensateurs ayant un neutre non mis à la terre et un seul groupe série de nombreux condensateurs raccordés en parallèle. Ce courant est trois fois le courant de banc normal et se présente si un condensateur unitaire défaillant est entièrement en défaut. Ce courant maximal capacitif à interrompre peut s'élever jusqu'à 50 fois le courant du condensateur unitaire normal s'il s'agit d'un gros banc avec de nombreux condensateurs parallèles.

Sur des systèmes sur lesquels des courants de défaut inductif peuvent se présenter (comme les bancs de condensateurs de groupe série simple raccordés en étoile avec un neutre mis à la terre et/ou un bâti de banc de condensateurs mis à la terre), le courant de défaut inductif maximal disponible à l'emplacement du banc doit être évalué. Pour les bancs raccordés en étoile mentionné ci-dessus, le courant de défaut sera le courant de défaut phase-neutre disponible et, pour les bancs en triangle, il s'agira du courant de défaut entre phases disponible. Les fusibles sont assignés pour leur capacité d'interruption en ampères symétriques.

Si le courant de défaut inductif disponible à l'emplacement du fusible de condensateur dépasse le pouvoir de coupure d'un fusible unitaire de type à expulsion, un fusible limiteur de courant peut être nécessaire.

Pour les applications dans lesquelles des condensateurs unitaires sont utilisés dans des enveloppes ou des chambres de transformateurs et des fusibles de condensateurs unitaires sont requis, il convient d'utiliser des fusibles limiteurs de courant.

5.2.4.7 Protection contre rupture de condensateur unitaire

5.2.4.7.1 Généralités

En sus de considérer le courant d'interruption maximal assigné du fusible, le choix du fusible de ligne de condensateur et du fusible unitaire appropriés prendra également en compte le courant de défaut maximal auquel le condensateur unitaire peut résister sans rupture.

Les condensateurs unitaires sont constitués de packs en série et en parallèle dans une cuve métallique rempli d'un liquide diélectrique. Ces packs sont normalement constitués d'une électrode en aluminium et d'un film isolant. La défaillance du condensateur unitaire commence normalement par celle d'un pack simple. Lorsque ce pack fait défaut et entre en court-circuit, la tension sur les packs restants et le courant les traversant augmentent. Cette contrainte accrue entraîne la défaillance d'autres packs et, si rien n'est fait pour mettre fin à ce processus de défaillances, cela débouchera sur un court-circuit de tous les packs en série du condensateur unitaire. D'autres défaillances du condensateur unitaire peuvent résulter de mauvaises connexions internes ou de défaillances diélectriques vers la cuve. Un défaut de condensateur peut entraîner une rupture de cuve.

Pour définir la protection de rupture de cuve, la courbe TCC de fonctionnement maximal pour le fusible ou l'élément de remplacement est comparée à celle de rupture de la cuve du condensateur unitaire. Pour des courbes typiques de rupture de cuve, voir la Figure 25. Les courants pour ces deux courbes sont exprimés en valeurs symétriques. Le degré de protection de rupture de cuve dépendra du calibre en courant du fusible et de la forme de sa courbe de caractéristique temps-courant. La protection est assurée si la courbe TCC de fonctionnement maximal du fusible est à gauche et en-dessous de celle de rupture de la cuve du condensateur unitaire.

Pour les fusibles à expulsion ou autres types de fusibles limiteurs de courant, la partie inférieure de la courbe TCC de fonctionnement maximal tourne et devient asymptotique avec la ligne de 0,8 période (0,16 s pour 50 Hz, 0,013 s pour 60 Hz). Par conséquent, une courbe de fusible se trouvant sinon à gauche de la courbe de rupture de la cuve de condensateur croquera toujours la courbe de rupture de la cuve à ce moment. Cette intersection définit le courant de défaut symétrique disponible le plus élevé pour lequel le fusible protégera le condensateur unitaire de la rupture de la cuve. Pour éviter la rupture de la cuve lorsque vous utilisez ces types de fusibles, il convient que le courant capacitif ou le courant inductif disponible à l'emplacement du banc soit inférieur à cette valeur.

Pour les courants de défaut inductif, il convient d'utiliser le courant symétrique disponible sur le banc au lieu du courant asymétrique disponible. Il s'agit d'une pratique acceptable pour les comparaisons de protection de rupture du fait que les condensateurs dégèneront en une défaillance totale de l'unité à une crête de tension, ou proche, produisant de la sorte un défaut de courant symétrique.

Il convient que les fabricants de condensateurs soient capables de fournir les courbes de rupture de cuve mentionnées plus haut et/ou les renseignements supplémentaires ou l'assistance relativement à la protection des condensateurs unitaires. Les courbes TCC de fonctionnement maximum sont disponibles auprès du fabricant du fusible.

5.2.4.7.2 Bacs protégés par les fusibles de ligne seulement

Si le courant de défaut inductif présumé à l'emplacement du banc dépasse le niveau de résistance du condensateur unitaire, le courant de défaut du système peut être limité par l'utilisation de fusibles limiteurs de courant de type usage général, à coupure intégrale ou associé. Lorsqu'une combinaison fusible à expulsion/fusible associé limiteur de courant sert de fusible de ligne du condensateur, il convient que le fusible à expulsion en série assure la coordination avec le fusible limiteur de courant de sorte que tous les courants inférieurs au courant d'interruption minimum assigné du fusible associé soit éliminés par le fusible à expulsion avant que le fusible associé ne fonde et ne s'ouvre.

Sur ces systèmes avec des défauts inductifs élevés, l'utilisation d'un fusible limiteur de courant réduira la probabilité de rupture de la cuve. La protection dans la zone dans laquelle le temps de fonctionnement du fusible limiteur de courant est supérieur à 0,010 s est déterminée en comparant la courbe TCC de fonctionnement maximal du fusible à la courbe de rupture de la cuve du condensateur. La protection est assurée dans cette zone si la courbe TCC de fonctionnement maximal du fusible est à gauche et en-dessous de celle de rupture de la cuve du condensateur unitaire. Généralement parlant, lorsqu'un fusible limiteur de courant est sélectionné de façon appropriée pour la protection de la cuve du condensateur pour des niveaux de courant inférieurs au courant de fonctionnement maximal de 0,010 s du fusible limiteur de courant, l'action de limitation du fusible limiteur de courant assurera également une protection adéquate contre la rupture de la cuve à des courants plus élevés. Dans le cas où l'extrapolation des courbes jusqu'au courant de court-circuit maximal disponible à l'emplacement du banc du condensateur indique une intersection possible – consultez les fabricants du condensateur et du fusible. Un exemple des caractéristiques d'une courbe de rupture de cuve de condensateur est fourni en Figure 25.

Au fur et à mesure que la taille du banc augmente par l'utilisation de condensateurs unitaires parallèles multiples, la taille du fusible de ligne du condensateur augmentera également. Au fur et à mesure que la taille du fusible augmente, sa courbe de fonctionnement total se

déplacera vers la droite tandis que la courbe de rupture de cuve restera constante. Il en résulte que la taille du banc qui peut être protégé avec un fusible de ligne est limitée. Si le système exige une telle capacité en cet emplacement, une solution consiste à utiliser des condensateurs unitaires plus gros (kVAr) dans le banc du fait que ces condensateurs unitaires peuvent avoir une plus grande tenue. Une autre solution peut consister à utiliser plusieurs bancs semblables au même emplacement de base en les espaçant par un nombre donné de poteaux.

5.2.4.7.3 Bancs de condensateurs protégés par des fusibles de condensateur unitaire

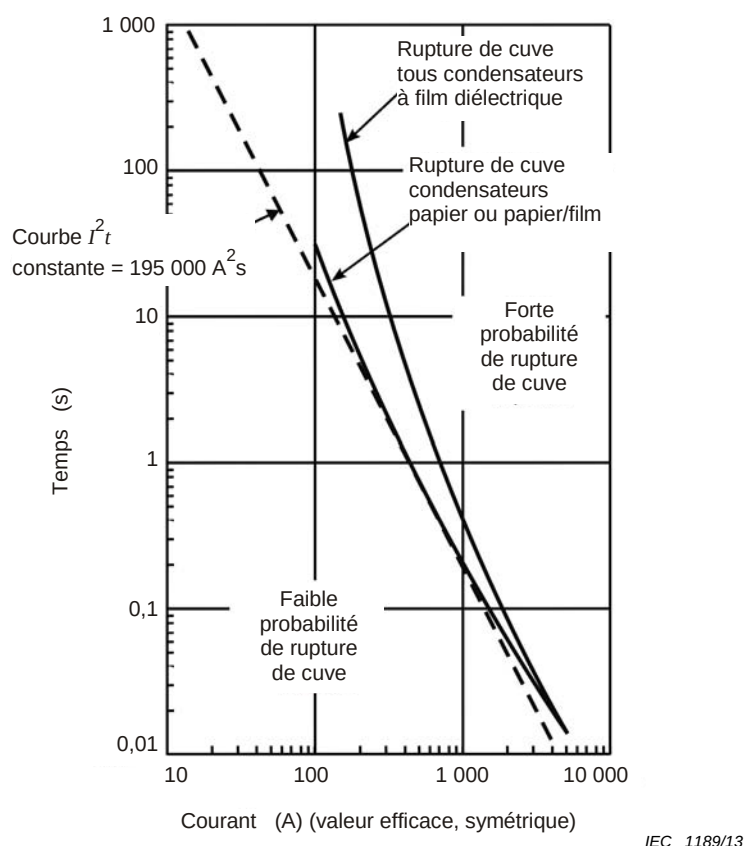
Lorsque le condensateur unitaire est complètement en court-circuit, le courant à fréquence industrielle le traversant dépend de divers facteurs. Par exemple, dans un groupe série raccordé à la terre, avec un banc en étoile appliqué sur un système effectivement raccordé à la terre ou un banc en triangle de groupe série simple, il s'agira du courant de défaut inductif du système disponible à l'emplacement du banc. Avec des bancs de condensateur à groupes série multiples ou des bancs raccordés en étoile non mis à la terre, le courant à fréquence industrielle sera le courant capacitif disponible admis par les condensateurs restant dans le circuit.

Si le banc peut être soumis à des courants de défaut de type inductif et ces courants de défaut dépassent le niveau de résistance du condensateur unitaire, le courant de défaut du système peut être limité par les fusibles limiteurs de courant. La protection dans la zone dans laquelle le temps de fonctionnement du fusible limiteur de courant est supérieur à 0,010 s est déterminée en comparant la courbe TCC de fonctionnement maximal du fusible à la courbe de rupture de la cuve du condensateur. La protection est assurée dans cette zone si la courbe TCC de fonctionnement maximal du fusible est à gauche et en-dessous de celle de rupture de la cuve du condensateur unitaire. Généralement parlant, lorsqu'un fusible limiteur de courant est sélectionné de façon appropriée pour la protection de rupture de la cuve du condensateur pour des niveaux de courant inférieurs au courant de fonctionnement maximal TCC de fonctionnement de 0,010 s du fusible limiteur de courant, l'action de limitation du fusible limiteur de courant assurera également une protection adéquate contre la rupture de la cuve à des courants plus élevés. Dans le cas où l'extrapolation des courbes jusqu'au courant de court-circuit maximal disponible à l'emplacement du banc de condensateurs indique une intersection possible, il convient de consulter les fabricants du condensateur et du fusible. Un exemple des caractéristiques d'une courbe de rupture de cuve de condensateur est donné en Figure 25.

De nombreux bancs de postes ont de multiples groupes série ou d'autres configurations telles que une capacité reste dans le circuit quand un unique condensateur unitaire fait défaut. Puisque ces courants de défaut sont relativement faibles par comparaison aux défauts inductifs du système, un fusible limiteur de courant n'est pas normalement requis pour limiter le courant de défaut disponible.

L'utilisation de fusibles limiteurs de courant en tant que fusible de condensateur unitaire est normalement limitée à:

- a) des bancs de condensateurs à groupes série uniques raccordés en étoile avec un neutre mis à la terre et/ou une structure de banc de condensateur mis à la terre, ou un banc raccordé en triangle de groupes série uniques.
- b) des bancs sous enveloppe métallique en raison de leur fonctionnement sans dégagement gazeux;
- c) des applications dans lesquelles la décharge de nombreuses unités parallèles a suffisamment d'énergie en excès de la capacité d'interruption de décharge des fusibles d'expulsion des cuves de condensateurs.



NOTE Caractéristiques typiques de rupture de cuve pour deux types de condensateurs. Les courbes varient par fabricant et construction d'unité; adressez-vous au fabricant pour les courbes.

Figure 25 – Exemple de caractéristiques de courbe de rupture de cuve de condensateur

5.2.4.8 Sélection du fusible de condensateur unitaire pour résistance à l'énergie de décharge

Si une défaillance du condensateur unitaire se présente dans un banc de condensateurs dans lequel les condensateurs unitaires sont protégés par des fusibles unitaires, l'énergie stockée dans les condensateurs non en défaut connectés en parallèle se déchargera à travers les fusibles unitaires sur ces unités et dans le condensateur unitaire en défaut et son fusible. L'énergie stockée dans un condensateur ou un groupe de condensateurs, mesurée en Joules à une valeur instantanée donnée de tension, est la suivante:

$$E = CU^2/2$$

où

E est l'énergie en Joules,

C est la capacité en microfarads,

U est la tension instantanée en kilovolts.

Le fusible d'un condensateur unitaire qui fait partie d'un groupe en parallèle avec d'autres condensateurs unitaires et qui se retrouve entièrement en défaut doit être à même de fonctionner et de résister, sans exploser pendant l'opération, au courant de fuite provenant des autres condensateurs sains en parallèle tandis que ceux-ci envoient une décharge dans

le condensateur en défaut. L'énergie stockée dans les condensateurs unitaires connectés en parallèle est disponible pour absorption par le fusible et le condensateur unitaire en défaut. Bien que le fusible lui-même peut n'absorber qu'une portion de l'énergie totale disponible dans les condensateurs unitaires connectés en parallèle, les exigences de résistance pour le fusible sont déterminées par l'énergie totale disponible pour cette décharge.

Les condensateurs unitaires ont également une capacité de résistance à l'énergie de décharge relative à leur construction. Si la conception du banc de condensateurs peut produire une énergie de décharge totale inférieure ou égale à la capacité de résistance des condensateurs unitaires, alors le fusible n'a pas à limiter la décharge. Il convient de sélectionner un fusible avec une spécification d'énergie de décharge supérieure ou égale à cette énergie totale de décharge sans tenir en compte de la limitation de courant.

Si le modèle de banc de condensateurs a la capacité de décharger plus d'énergie que celle à laquelle les condensateurs unitaires peuvent résister, alors il convient d'envisager d'utiliser des fusibles de limitation de courant. Les fusibles de limitation de courant sont capables de limiter l'énergie de décharge des condensateurs unitaires adjacents raccordés en parallèle vers le condensateur unitaire en défaut. Pour une protection appropriée du condensateur unitaire contre l'énergie de décharge des condensateurs unitaires en parallèle, il convient que la valeur maximale du I^2t de fonctionnement du fusible soit inférieure à la valeur de résistance au I^2t du condensateur unitaire. Pour des directives spécifiques dans ce domaine, il convient de consulter les fabricants du condensateur et du fusible.

D'autres méthodes peuvent être utilisées pour éliminer l'énergie de décharge en excès, notamment:

- a) utiliser plus de groupes en série et moins d'unités parallèles;
- b) utiliser deux bancs plus petits de condensateurs en parallèle.

L'énergie de décharge assignée d'un condensateur unitaire est l'énergie maximale stockée à la tension assignée à laquelle il est demandé au fusible d'entrer en action et d'interrompre effectivement le circuit. Les spécifications relatives à l'énergie de décharge pour les fusibles de condensateurs unitaires de type à expulsion vont de 10 à 30 kJ. La capacité de résistance du condensateur unitaire peut limiter l'application de ces fusibles à une valeur inférieure à l'énergie de décharge maximale assignée du fusible. La spécification pour les fusibles de condensateur unitaire limiteur de courant est normalement de 40 kJ ou plus.

5.2.4.9 Types de fusibles utilisés pour les applications de condensateur

5.2.4.9.1 Fusibles limiteurs de courant

Des fusibles limiteurs de courant peuvent être utilisés pour toutes les applications déjà présentées. Lorsqu'une interruption à faible courant est nécessaire, il convient d'utiliser un fusible à coupure intégrale (ou, dans certaines circonstances, un fusible à usage général). Il convient que les fusibles puissent résister aux courants d'appel répétés le cas échéant; des fusibles avec des éléments spécialement conçus ont été utilisés à cet effet. Des fusibles de condensateur unitaire avec une action de déconnexion sont disponibles. Dans certains cas, cela prend la forme d'une fibre amorce fixée au fond du fusible dont la déconnexion se fait au moyen d'une petite charge pyrotechnique. Cette charge est "mise à feu" lorsque les éléments principaux interrompent le courant. L'action de déconnexion élimine la tension sur tout le corps du fusible. Cela permet d'utiliser un fusible plus court que cela serait nécessaire si le fusible devait résister indéfiniment à une tension en plein air. La perte d'un condensateur dans un grand banc ne justifie pas forcément un remplacement immédiat. Les avantages de l'utilisation de fusibles limiteurs de courant pour la protection du condensateur sont leur courant maximal élevé de coupure et la réduction considérable de la valeur du I^2t de défaut, réduisant ainsi la possibilité d'une défaillance du condensateur. De même, aucune action d'expulsion n'est prévue, ce qui peut entraîner une réduction des distances.

5.2.4.9.2 Fusibles à expulsion

Les fusibles à expulsion sont communément utilisés pour les fusibles de ligne de condensateur et les fusibles de condensateur unitaire. Des fusibles-déconnecteurs de distribution soumis à des essais de coupure de courant capacitif sont souvent utilisés comme fusibles de ligne, en particulier sur de petits bancs de condensateurs en haut d'un poteau de circuit de distribution. Des fusibles à expulsion sous la forme d'un support fixe de fusible avec la fibre amorce de l'élément fusible mis sous tension par un bras de contact à ressort sont souvent utilisés pour des fusibles de condensateurs unitaires.

5.2.4.9.3 Combinaison de fusibles

Certains types de fusibles à coupure intégrale utilisent une combinaison d'un élément de fusible de type Associé en série avec un élément de fusible de type à expulsion. Cependant, ces fusibles ne sont pas normalement considérés comme des fusibles de "combinaison". Un fusible qui est normalement classé comme "fusible de combinaison" est un dispositif dans lequel un élément fusible a un fusible à expulsion fixé à une extrémité. Il est possible de remplacer l'élément fusible à expulsion sans remplacer l'élément fusible limiteur de courant. Du fait que la partie expulsion ne doit interrompre que les courants faibles, le tube d'expulsion peut être rendu plus court qu'un fusible-déconnecteur de distribution typique (normalement 75 mm de long ou moins). En plus d'assurer l'interruption à courant faible, le contact inférieur du fusible à expulsion a la forme d'une fibre amorce flexible. Celle-ci est fixée à un ressort et offre une méthode d'isolation après opération. Ces fusibles sont utilisés comme fusibles de condensateurs. Le fusible doit être de taille telle à assurer que la partie Associée ne soit pas endommagée par le fonctionnement du fusible à expulsion de série.

Lorsque le courant de défaut disponible est élevé, une méthode assurant la protection du condensateur consiste à combiner un fusible-déconnecteur et un fusible Associé. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un fusible standard "de combinaison", cette approche "deux fusibles" est commune pour les applications de ligne de condensateur. Du fait que le fusible Associé ne fonctionne qu'en cas d'un défaut phase-terre ou entre phases, il ne doit interrompre que des courants inductifs élevés, et non des courants capacitifs. De tels fusibles ne requièrent aucun essai capacitif additionnel. Les courants capacitifs sont interrompus par le fusible-déconnecteur qui peut être soumis à des essais en tant que fusible de condensateur.

5.2.5 Applications avec transformateur de tension

5.2.5.1 Généralités

Les fusibles limiteurs de courant servent normalement à protéger le système d'alimentation en isolant les transformateurs de tension en défaut du système. Du fait que les transformateurs de tension peuvent être installés sur le jeu de barres du poste et que leurs puissance, en kVA, sont inférieures à celles des transformateurs de puissance ou de distribution, ils requièrent des fusibles combinant de faibles courants permanents assignés et un courant maximal de coupure assigné élevé.

NOTE Certains documents (par ex., les normes IEEE) utilisent l'expression "transformateur de potentiel" pour les transformateurs de tension.

5.2.5.2 Tension assignée

Certains fabricants recommandent que la tension assignée du fusible soit de 100 % à 140 % de la tension entre phases maximale du système auquel le fusible doit être appliqué. Cette fourchette de tension d'application est recommandée; en effet, l'action de limitation du courant du fusible se caractérise par la production d'une tension de coupure et il convient de s'assurer de la coordination de celle-ci avec les niveaux d'isolement du système et du circuit. Du fait que les spécifications de courant sont basses et que des éléments de fusibles à fil sont souvent utilisés (voir 4.2.4.5), les tensions de coupure de certains modèles peuvent être élevées. D'autres fabricants pensent que l'application à une tension système plus basse est acceptable pour leur modèle de fusible. La tension maximale permise pour chaque fusible est basée sur sa tension assignée, spécifiée par le fabricant, et sur la méthode de mise à la terre du système (voir 5.1.3.3).

Pour des fusibles montés séparément dans lesquels l'isolation est requise pour une tension supérieure à la tension normalement spécifiée, le fusible est sélectionné sur la base de la tension réelle de service. Le fusible peut être monté avec des isolateurs avec une tension assignée plus élevée réalisant l'isolation supplémentaire vis-à-vis de la terre.

5.2.5.3 Courant assigné

Pour assurer une protection maximale contre tout dommage aux autres équipements en cas de panne du transformateur de tension, il est normalement nécessaire de sélectionner le fusible avec le calibre le plus faible non susceptible de perturber les opérations du fusible. Il convient que le fusible sélectionné résiste aux courants d'appel à effet magnétisant pour empêcher toute perturbation du fonctionnement du fusible ou tout dommage aux éléments fusibles qui peut entraîner une défaillance du fusible. Du fait que les charges du transformateur de tension sont plus faibles et que la construction de ces transformateurs est différente de celle des transformateurs de puissance, les fusibles sélectionnés sur la seule base des considérations d'appel protégeront rarement les transformateurs de tension contre les surcharges.

La capacité de tenue au courant d'appel du fusible est aisément disponible auprès du fabricant sous la forme de valeurs minimales du I^2t de préarc. Le courant d'appel du transformateur de tension peut être enregistré avec des systèmes électroniques de capture de données appropriés et la valeur du I^2t calculée, ou la valeur du I^2t , peut être obtenue auprès du fabricant du transformateur de tension. Pour une application satisfaisante du fusible et pour prévenir toute perturbation du fonctionnement du fusible, il convient clairement que la valeur du I^2t de fusion du fusible soit supérieure à la valeur du I^2t du courant d'appel magnétisant du transformateur avec une marge de sécurité raisonnable. Cette marge de sécurité, exprimée comme facteur de multiplication, dépend de la méthode utilisée pour raccorder le transformateur de tension au jeu de barres de système. Pour les transformateurs raccordés en triangle avec trois fusibles de ligne ou pour les transformateurs en triangle ouverts avec trois fusibles de ligne (dans lesquels la tension triphasée est obtenue à partir de seulement deux transformateurs de tension), le facteur de multiplication est établi à 4,5 par expérience. Autrement dit, il convient que la valeur du I^2t du fusible soit supérieure ou égale à 4,5 fois celle du I^2t du courant d'appel du transformateur. Pour les unités monophasées, les unités en triangles ouverts avec quatre fusibles ou les unités en triangle avec six fusibles, ce facteur de multiplication est de 1,5. Le I^2t du courant d'appel du transformateur de tension augmente rapidement avec augmentation de la tension appliquée. Lors de la demande des valeurs du I^2t aux fabricants du transformateur, il convient que la tension spécifiée soit la tension maximale prévue en service.

Dans certaines applications, en particulier dans les circuits à câbles souterrains, il est possible que la capacité inhérente du circuit donne lieu à un courant de décharge à travers les enroulements primaires du transformateur de tension raccordé au jeu de barres. L'ordre de grandeur et la durée des courants de décharge peuvent être calculés à partir des constantes de circuit. Il convient de veiller à ce que le fusible ne fonctionne pas dans ces conditions.

5.2.5.4 Courant de coupure maximal

Il convient que le courant maximal de coupure assigné du fusible soit supérieur ou égal au courant de court-circuit maximal du système au point de montage du fusible.

5.2.5.5 Décharge partielle

Une source de préoccupation liée aux fusibles d'un transformateur de tension est la possibilité de décharge partielle sur les éléments fusibles, dans ce cas communément désigné sous le terme de "effet couronne". Une décharge partielle se présente à partir des bords effilés des pièces sous tension de l'appareil. Dans le cas d'un fusible de transformateur de tension, le "bord effilé" est l'élément fusible à diamètre très petit qui est habituellement utilisé et l'isolant est l'air dans les espaces du matériau de remplissage. Des mesures de tension d'interférence sont effectuées pour déterminer l'étendue des interférences

provoquées par cet effet couronne. Le problème lié à l'effet couronne (hors les interférences radio) est normalement l'effet dommageable qu'il peut avoir sur l'isolation non cicatrisante. Dans le cas d'un fusible de transformateur de tension, l'isolation est auto-cicatrisante et aucun dommage n'est fait, mais ce qui préoccupe est l'effet sur l'élément fusible lui-même. En raison de la fragilité des éléments utilisés dans les fusibles à courant assigné très faible requis pour les transformateurs de tension (souvent moins d'un ampère), toute décharge partielle appréciable provoquera des dommages à l'élément (le matériau de l'élément est enlevé, ion par ion, et déposé sur le matériau de remplissage et le corps du fusible). De tels dommages peuvent résulter en des perturbations du fonctionnement (voire un fonctionnement incorrect) du fusible. Il est donc important d'assurer un montage approprié du fusible afin d'éviter l'apparition de décharges partielles; la préoccupation primaire est la disposition d'éléments mis à la terre à proximité du fusible.

5.2.6 Applications pour production d'énergie éolienne

5.2.6.1 Introduction

La production d'électricité en exploitant des sources d'énergie renouvelables autres que l'hydro-électricité est de plus en plus fréquente. L'une des méthodes les mieux développées est l'énergie éolienne qui offre de nouvelles opportunités et de nouveaux défis pour l'utilisation de protection à fusible. L'utilisation de transformateurs élévateurs de tension de distribution pour raccorder des générateurs d'énergie éolienne au réseau (transformateurs de parc éolien) est normale et les demandes croissantes en énergie ont entraîné le recours à des schémas innovants de systèmes de fusibles et au développement de fusibles de courants assignés plus élevés. Il existe plusieurs technologies de générateurs d'énergie éolienne, mais la sélection du fusible n'est pas, en général, affectée par ces diverses technologies.

Les transformateurs élévateurs de tension utilisés pour cette application peuvent être immergés (dans de l'huile ou d'autres liquides isolants) ou à surmoulés en résine. Les transformateurs peuvent être installés à l'intérieur ou à l'extérieur du mat, mais les transformateurs surmoulés, ou immergés avec des liquides "non inflammables" ou "moins inflammables", qui minimisent les risques d'incendie sont plus fréquemment utilisés en intérieur (dans la nacelle ou au pied du mat) tandis que les transformateurs à huile sont plus communément utilisés en plein air. Les transformateurs immergés présentent moins de pertes que les transformateurs surmoulés et sont plus faciles à utiliser avec des fusibles immergés. La connexion préférée du transformateur du côté HT est généralement en triangle et les tensions typiques vont d'environ 20 kV à 36 kV, selon les pratiques électriques en place dans la région du parc éolien.

Il existe plusieurs méthodes pour protéger les transformateurs d'un parc éolien du côté HT. La plupart des méthodes utilisent des fusibles limiteurs de courant en raison des courants de défaut élevés qui peuvent se présenter, en particulier lorsque des générateurs d'énergie éolienne sont utilisés dans un "parc éolien". Une méthode communément utilisée repose sur les combinés interrupteur-fusibles selon la norme CEI 62271-105. Généralement, cette méthode est bien adaptée pour protéger les plus petits transformateurs de parc éolien, généralement inférieur à 2 MVA. Dans ce cas, le fonctionnement du fusible CL libère un percuteur qui provoque l'ouverture de l'interrupteur en série, isolant ainsi le transformateur (voir 5.2.7).

Les fusibles CL sont également utilisés en association avec d'autres types d'appareils de connexion. Pour ces applications, l'appareil en série n'est pas déclenché par un percuteur de fusible. Ils utilisent normalement des ampoules à vide coordonnées, disponibles pour protéger les transformateurs jusqu'à hauteur de 3 MVA pour les transformateurs à sec et 3,8 MVA pour les transformateurs immergés. Dans ce cas, l'appareil en série utilise un système de déclenchement thermique ou électronique afin de provoquer l'ouverture.

L'utilisation d'appareils interconnectés placés en série avec des fusibles CL a pour résultat que les trois phases s'ouvrent effectivement simultanément, ce qui peut avoir certains avantages. Les plans de protection qui utilisent des interrupteurs peuvent donc éviter de placer le générateur en alimentation biphasée ou monophasée, et isoler le transformateur

élévateur de tension des courants de défaut provenant du réseau. Dans ce cas, les deux dispositifs utilisés ensemble doivent toujours résulter en une interruption du courant lorsqu'ils entrent en fonction.

Une autre approche à la protection des transformateurs de parc éolien implique l'utilisation de fusibles à expulsion immergés en série avec des fusibles Associés limiteurs de courant (comme exposé dans 5.2.2.6). Au moment où le présent document a été rédigé, des transformateurs en triangle allant jusqu'à 3,8 MVA et 34,5 kV peuvent être protégés de cette façon.

Laquelle des deux méthodes de base choisir pour la protection d'un transformateur, appareillage-fusible ou fusible-fusible, dépend d'une variété de considérations. Les fusibles à expulsion immergés sont relativement peu coûteux, mais leur utilisation est normalement limitée aux transformateurs immergés. Pour des applications allant jusqu'à 23 kV, les fusibles à expulsion qui sont facilement remplacés à partir de l'extérieur du transformateur (fusibles souvent dits "à baïonnette") sont disponibles. Cependant, pour des tensions plus élevées, les fusibles immergés doivent normalement être remplacés à travers un trou d'accès du transformateur. Par conséquent, si le fusible à expulsion entre souvent en fonction, il peut être préférable de recourir à l'approche plus coûteuse d'un appareillage plutôt que d'un fusible à expulsion.

5.2.6.2 Sélection du fusible pour transformateurs de parc éolien

Généralement parlant, les règles régissant le choix des fusibles pour les transformateurs de parc éolien obéissent à celles des applications normales de transformateur (voir 5.2.2). Bien qu'il existe des différences par rapport aux applications conventionnelles de transformateur, celles-ci ont principalement trait aux conditions additionnelles requises pour la protection résultant du fait que le transformateur est "alimenté" à la fois du côté haute tension et basse tension. Ces aspects seront abordés dans 5.2.6.3. Le dimensionnement des fusibles pour le courant d'appel magnétisant d'un transformateur est identique à celui des transformateurs alimentés de façon conventionnelle (soit les transformateurs alimentés du côté HT), mais la fonction de "reprise de charge" n'a aucun sens dans cette application. Cependant, l'expérience a montré que, en général, on obtient de bons résultats si la courbe TCC de préarc de l'élément fusible est en coordination avec les points de reprise de charge du transformateur communément utilisés (voir 5.2.1.1.2). Autrement dit, l'élément du fusible ne s'ouvrira pas aux valeurs conventionnelles du courant de reprise de charge et de durée correspondantes (normalement, le fusible à expulsion dans le cas d'une combinaison de fusible à expulsion et de fusible associé CL). Les fusibles sont effectivement assujettis aux surintensités associées avec les variations de régime du générateur et les fluctuations du flux de puissance. Ces fluctuations peuvent avoir des valeurs de crête supérieures au courant de pleine charge normal, selon le niveau de contrôle de charge obtenu par l'éolienne et l'équipement de commande associé. Ces variations peuvent être bien plus communes que les variations de reprise de charge typiques; il convient donc que le fabricant du fusible soit consulté avant de pouvoir utiliser ledit fusible pour cette application. Par exemple, l'expérience montre qu'il convient que les fusibles à expulsion, normalement disponibles dans toute une gamme de matériaux d'élément variés, soient choisis en utilisant un type d'élément moins susceptible à l'usure résultant des cycles de courant.

Les fusibles dimensionnés entre phases sont normalement utilisés pour des applications de fusibles en triangle triphasées (voir 5.1.3 qui inclut des avis de précaution sur les systèmes isolés et les systèmes résonants mis à la terre). Cependant, les fusibles limiteurs de courant dimensionnés phase-terre qui sont coordonnés fusible à fusible (voir 5.2.2.6.2) avec en série un fusible en série à expulsion dimensionné entre phases ont également été utilisés pour les applications en parc éolien, en particulier à des tensions plus élevées. L'observation clé est qu'une combinaison d'un fusible limiteur de courant appliqué en série avec un fusible à expulsion doit être capable d'interrompre n'importe quel courant produisant une fusion et, après interruption du courant, les fusibles doivent résister à la tension de rétablissement du système. Cependant, du fait que l'utilisation de cette technique requiert diverses assumptions quant au système d'alimentation et peut demander des essais spéciaux auxquels soumettre les fusibles, il convient de consulter le fabricant du fusible pour toute information avant d'utiliser cette technique. Tandis que cette technique permet l'utilisation de fusibles avec des

tensions assignées plus faibles, elle exige généralement l'utilisation de courants assignés plus élevés afin d'assurer une coordination fusible à fusible (et des valeurs plus élevées du I^2t traversant).

5.2.6.3 Aspects additionnels de la protection du parc éolien

Un autre aspect des applications en parc éolien qui doit être bien compris est que les fusibles du côté HT ne peuvent isoler le transformateur que du système d'alimentation. Un défaut du transformateur interne continuera d'être alimenté du côté BT (générateur) jusqu'à ce que le générateur soit également isolé du circuit. La protection du côté BT doit également isoler le générateur rapidement pour éviter une défaillance éventuelle du transformateur.

Une défaillance interne du transformateur du côté système des enroulements HT ne produira pas un courant HT très élevé en provenance du côté BT (avec une valeur maximale équivalente au courant de "défaut traversant" secondaire boulonné normal, provenant du côté HT). Cependant, la production de l'arc continuera d'apporter de l'énergie dans le transformateur jusqu'à ce que la protection BT se mette en fonction. Les relais de surtension, sous-tension, surintensité et sous-intensité communément utilisés pour provoquer le déclenchement du disjoncteur basse tension peuvent assurer cette protection.

Il est important que la protection BT fonctionne très rapidement pour une autre raison encore. Si le transformateur est isolé du circuit HT par la mise en action de la protection du fusible, une situation connue sous le nom d'ilotage peut se présenter (autrement dit, le générateur et le transformateur forment un circuit d'alimentation isolé). Il a été montré que, pour certaines applications, la sortie du générateur peut se déphaser avec le système en quelques cycles. Cela peut entraîner des tensions de rétablissement plus élevées que la normale sur les fusibles en l'absence d'appareil de connexion combiné/associé, tensions qui peuvent théoriquement s'approcher de deux fois la valeur de la tension nominale. Cependant, cela ne peut se présenter que si le transformateur continue de fonctionner presque normalement (autrement dit, ne présente pas de défaut interne permanent). Bien que cela serait le cas si les fusibles fonctionnaient suite à une surcharge, il convient que la prévention des surcharges soit assurée par des appareils qui limitent la sortie du générateur à la valeur de puissance assignée. Il existe une autre façon de perdre le synchronisme de tension sur la protection primaire. Il s'agit d'un défaut primaire transitoire dans le transformateur entraînant le fonctionnement du combiné interrupteur-fusible primaire, mais en laissant l'enroulement du transformateur HT sous la même tension, cette fois-ci en provenance du générateur BT. Si la protection basse tension répond pendant le défaut transitoire (lorsque le défaut est également alimenté à partir du générateur), cela ne se passera pas. Dans le cas d'applications en parc éolien à tension plus élevée (36 kV), les défauts transitoires devraient être rares du fait qu'un arc dans l'huile ne s'éteindra pas de lui-même à cette tension.

Dans le cas d'un combiné interrupteur-fusibles conforme à la norme CEI 62271-105, une surtension produite par ilotage peut être tenue par la combinaison de deux appareils différents de protection, l'interrupteur en position ouverte et le fusible lui-même. Dans le cas de fusibles limiteurs de courant sans interrupteur combiné ou autre appareil semblable, le fusible CL doit pouvoir résister à cette tension. Bien que la tension soit supérieure à celle à laquelle le fusible CL a dû intervenir pour couper le circuit, une fois que le fusible CL se refroidit après coupure du courant élevé, même pour une très brève période de temps, l'expérience a montré que le fusible CL à une tension de tenue qui est également supérieure à la tension que le fusible a dû interrompre. Si une coordination fusible à fusible est utilisée avec un fusible à expulsion dans l'huile raccordé en série, un grand intervalle d'isolation immergé dans l'huile est toujours généré si les fusibles limiteurs de courant dimensionnés phase-terre exécutent la fonction d'interruption. Après un fonctionnement à des courants n'entraînant pas d'action de limitation de courant, certains types de fusible à coupure intégrale peuvent ne pas être à même de résister à une tension considérablement supérieure à la tension contre laquelle leur action est survenue; il convient donc de ne pas les exposer à une situation d'ilotage pendant une durée significative. Il est donc très important de prendre soigneusement en compte la protection BT.

5.2.7 Fusibles limiteurs de courant utilisés en conjonction avec des appareils mécaniques de connexion

5.2.7.1 Généralités

Les fusibles limiteurs de courant et les appareils mécaniques de connexion sont communément utilisés ensemble de plusieurs façons différentes. Une application très commune utilise un fusible avec un percuteur (normalement un fusible Associé) en série avec un interrupteur. De tels arrangements, qui sont assujettis à la norme CEI 62271-105, sont appelés "combinés interrupteur-fusibles". Par définition, ils sont constitués d'un interrupteur tripolaire avec trois fusibles munis de percuteurs, le fonctionnement de n'importe lequel de ces percuteurs causant l'ouverture des trois pôles de l'interrupteur. Ces arrangements incluent les combinés interrupteur-fusibles dans lesquelles les fusibles constituent les contacts mobiles. L'arrangement des contacts et des fusibles constitue un bloc fonctionnel. Dans le présent rapport, lorsque les fusibles sont utilisés en conjonction avec d'autres appareillages de connexion mécaniques (par ex., circuit-switchers, ampoules à vide, contacteurs, etc.) ou sans déclenchement de percuteur, le terme "association" sera utilisé parce que le terme "combinaison" n'est utilisé dans les normes relatives aux appareillages de connexion que pour le type d'association couvert par la norme CEI 62271-105.

L'utilisation de fusibles limiteurs de courant et d'appareillages de connexion mécanique connectés en série combine les capacités positives des deux types d'appareils tout en éliminant en substance toutes les propriétés négatives que chacun d'eux peut avoir individuellement. La principale propriété positive d'un fusible limiteur de courant est sa capacité hors pair d'interrompre des courants élevés de court-circuit si rapidement, en quelques millisecondes, que le courant de crête asymétrique, et par conséquent les effets dangereux d'un défaut potentiel de court-circuit, en sera considérablement réduit. Aucun appareillage mécanique de connexion n'est capable d'obtenir cet effet. Cet effet de limitation, avec la capacité de coupure maximal très élevé du fusible CL qui augmente le pouvoir de coupure de la combinaison, sont les principales raisons pour les inclure avec les appareillages de connexion. Bien que des types d'appareillages de connexion différents présentent de grandes différences quant à leur pouvoir de coupure, presque tous les fusibles limiteurs de courant ont un courant maximal de coupure assigné suffisamment élevé pour éliminer théoriquement toute préoccupation quant à la valeur que le courant de défaut présumé peut avoir en tout point dans le système.

Lorsque des fusibles associés sont utilisés, la protection pour les courants en-deçà de leur courant minimal de coupure est nécessaire. Avec l'utilisation du dispositif de déclenchement du percuteur ou une fonction appropriée de relais/détection, l'appareil de connexion peut interrompre des courants que le fusible associé ne peut pas couper. Normalement, le courant de coupure minimal du fusible n'a donc besoin que d'être suffisamment bas pour garantir une coordination correcte avec l'appareil de connexion. Une autre caractéristique souvent importante de l'association qui ne peut pas être assurée par le seul fusible à pôle unique est la capacité d'isoler toutes les phases – en défaut ou non – en aval des fusibles.

L'association des fusibles et des appareillages de connexion fait usage, mais pas nécessairement, du dispositif de déclenchement de ces derniers sous l'action du percuteur du premier fusible à fondre. La caractéristique temps-courant du fusible – opération extrêmement rapide à courant élevé et lente à courant faible – peut ainsi être utilisée à la place du dispositif de déclenchement du relais temps-courant des appareillages de connexion. Dans le cas de l'appareil de connexion à déclenchement, un déclencheur de surcharge ou un déclencheur à émission sert à actionner l'appareil soit en addition au déclenchement du percuteur du fusible, soit en remplacement de celui-ci. Lorsque tant le contact que le fusible a des caractéristiques temps-courant de fonctionnement (par ex., un fusible et un interrupteur déclenché par relais), un courant d'intersection existe. Il s'agit du courant auquel les deux courbes TCC se croisent, avec le fusible entrant en action au-dessus du courant d'intersection et l'appareil de connexion interrompant le circuit en-deçà du courant d'intersection. Ce point d'intersection sert à des fins de coordination. Si l'appareil de connexion n'est pas déclenché par un percuteur, le courant d'intersection doit être supérieur au courant minimal de coupure assigné du fusible.

Il existe une "hiérarchie" des capacités des appareillages de connexion (voir CEI 62271-107 à ce sujet). Les interrupteurs ont tendance à avoir un pouvoir de coupure limité en termes à la fois de courant et de tension transitoire de rétablissement, les circuit-switchers viennent tout de suite après avec un pouvoir de coupure plus élevé et, enfin, les disjoncteurs qui tendent à avoir le pouvoir de coupure le plus élevé. En raison des différents pouvoirs de coupure des appareils en série, des observations différentes quant aux applications s'appliquent pour chacun d'eux.

5.2.7.2 Combinés Interrupteurs-fusibles (CEI 62271-105)

5.2.7.2.1 Généralités

Les combinés interrupteurs-fusibles sont assujettis à la norme CEI 62271-105 qui ne s'applique pas aux combinaisons fusible-disjoncteur ou fusible-contacteurs, aux combinaisons pour circuits comprenant un moteur ou aux combinaisons incluant des interrupteurs de banc de condensateurs. Bien qu'ils soient le plus fréquemment utilisés pour des applications en protection transformateur, ils sont assujettis à certaines restrictions en raison des caractéristiques de tension transitoire de rétablissement du défaut de transformateur. La fonction primaire des fusibles est d'augmenter le pouvoir de coupure de l'interrupteur du combiné au-delà de celui de l'interrupteur seul et de réduire considérablement la valeur *du I^2t* admise dans le défaut (voir 4.1.5.2). Le fusible à haute tension peut être monté du côté source de l'interrupteur ou du côté charge (lorsqu'il constitue une partie du mécanisme de connexion effectif, il est appelé fusible-contact) de sorte que, lorsque l'interrupteur est ouvert, les fusibles sont isolés électriquement, facilitant ainsi le remplacement. Les fusibles sont montés avec un percuteur qui se projette dans les quelques premières millisecondes après que les éléments fusibles aient fondu ou, dans le cas de percuteurs à fonctionnement thermique, lorsque la température a atteint une valeur préétablie. Le percuteur met en œuvre un mécanisme de déclenchement dans l'interrupteur, mécanisme conçu pour ouvrir les contacts de l'interrupteur. Cela a deux fonctions importantes:

- a) cela assure que, même si un ou deux fusibles seulement fondent, les trois phases sont déconnectées;
- b) si le fusible fond avec un courant inférieur à son courant minimal de coupure, le percuteur déclenche l'interrupteur, interrompant le courant et isolant le fusible de l'alimentation.

La norme CEI 60282-1:2009, 4.15, contient des essais spéciaux pour des fusibles associés pour des combinés interrupteurs-fusibles. Elle démontre que ces fusibles peuvent supporter un arc pendant un laps de temps suffisant (un minimum de 0,1 s), à un courant qu'ils ne peuvent pas couper, pour permettre la mise en action et l'ouverture de l'interrupteur et pour interrompre le courant sans que le fusible ne subisse de dommages externes. Le temps de tenue d'arc de 0,1 s dérive de la somme de 0,05 s (temps maximal admis pour le déclenchement du percuteur) et 0,05 s (temps de fonctionnement typique d'un combiné interrupteurs-fusibles). Cet essai de fusible n'est pas requis pour des fusibles à coupure intégrale ou des fusibles qui utilisent un percuteur thermique (s'il peut être démontré que, à des courants inférieurs à I_3 , le mécanisme thermique du percuteur du fusible fonctionne avant que l'arc ne puisse apparaître dans le fusible).

L'exigence principale et générale pour la coordination des fusibles et des interrupteurs est que le courant de transfert pour le fonctionnement du percuteur soit inférieur au pouvoir de coupure correspondant de l'interrupteur. Le courant de transfert est le courant auquel les fusibles et l'interrupteur échangent les fonctions de coupure – au-dessus de ce courant, seuls les fusibles assument la coupure tandis que, immédiatement en-dessous de ce courant, le fusible dans le premier pôle à rétablir assure la fonction d'interruption, mais le courant dans les deux autres pôles est interrompu soit par l'interrupteur, soit par les fusibles, selon les tolérances TCC du fusible. Voir l'Annexe B de la CEI 62271-105:2012 pour une explication plus complète. Le combiné se voit donc assigner un "courant de transfert assigné" sur la base des essais spécifiés dans la norme CEI 62271-105 (un fusible interrompt le courant dans un pôle tandis que les deux autres pôles sont dotés d'éléments solides au lieu de fusibles, requérant donc de l'interrupteur qu'il interrompe le courant). L'Annexe B de la norme CEI 62271-105:2012 offre une méthode pour déterminer le courant de transfert pour un combiné particulier sur la base de la forme de la courbe TCC et des tolérances du fusible et

du temps de fonctionnement de l'interrupteur déclenché par le fusible. Ce courant de transfert doit donc être inférieur au courant de transfert assigné pour le combiné. Le calcul du courant de transfert est complexe et il est conseillé aux utilisateurs de consulter le fabricant du fusible et/ou du combiné pour des conseils sur la bonne application des combinés interrupteurs-fusibles.

Pour un combiné interrupteur-fusibles qui utilise une bobine de déclenchement, les essais au courant maximal d'intersection (en prenant en compte les tolérances, etc.) sont requis. Si le courant maximal du courant d'intersection est supérieur ou égal au courant de transfert, alors le courant de transfert n'a pas à être soumis à un essai.

Il convient que des fusibles utilisés dans un combiné interrupteur-fusibles soient déclassés en termes de courant pour prendre en compte les effets d'échauffement de l'enveloppe, quand c'est applicable (voir Annexe A);

Les questions additionnelles suivantes doivent être abordées dans la coordination interdépendante entre fusible et interrupteur:

5.2.7.2.2 Résistance au courant de l'élément fusible

Les fusibles sont sensibles aux courants transitoires associés au courant d'appel d'un transformateur. Ce point mérite une attention particulière; en effet, le fait que des transitoires traversent un fusible mal dimensionné peut provoquer des détériorations locales ou la fusion d'un ou plusieurs éléments fusibles, une situation qu'il faut absolument éviter. De tels dommages peuvent provoquer la fusion dans des conditions normales de fonctionnement. Voir 5.2.2.1.2 pour des conseils sur le choix du fusible pour des applications en transformateur. Les considérations relatives au courant transitoire limitent souvent la mesure dans laquelle la taille du fusible peut être réduite pour une application donnée. Cependant, un fusible qui est plus gros que cela n'est nécessaire assurera une protection moindre et peut entraîner des problèmes avec le courant de transfert et le courant de court-circuit franc secondaire (boulonné) (voir 5.2.7.2.3).

5.2.7.2.3 Applications avec des transformateurs

L'application la plus répandue des combinés interrupteur-fusibles est dans le domaine de la protection des transformateurs de distribution. Cependant, le pouvoir de coupure de charge/défaut des interrupteurs utilisés dans les combinés interrupteurs-fusibles est limité non seulement en amplitude, mais aussi dans les conditions du circuit relatives au facteur de puissance et à la tension transitoire de rétablissement. Un interrupteur soumis à des essais de conformité à la norme CEI 62271-103 n'est pas spécifié pour l'interruption d'un court-circuit franc (défaut boulonné) sur les bornes secondaires générant une tension transitoire de rétablissement élevée et peut ne pas être à même d'assurer la fonction. Il est donc requis du fusible primaire qu'il interrompe un tel courant. Le courant de transfert pour la spécification de calibre du fusible choisi (le courant auquel le service d'interruption est transféré au contact) doit donc non seulement être inférieur au courant de transfert assigné (soumis à essai) du combiné interrupteur-fusibles, mais aussi inférieur au courant de court-circuit franc du transformateur. Dans les cas dans lesquels un prestataire de services considère que le modèle des connexions BT entre le transformateur et les appareillages de connexion (par ex., à l'intérieur de sous-stations préfabriquées selon la norme CEI 62271-202) empêche un court-circuit franc sur les bornes secondaires de transformateurs, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la condition anormale ci-dessus dans la sélection des éléments fusibles. Cependant, si aucun combiné interrupteur-fusibles approprié n'existe, il convient d'utiliser un autre type d'appareil de connexion, par ex. un circuit-switcher fusible (voir CEI 62271-107) ou un fusible et un disjoncteur. Dans les cas critiques, contactez le fabricant du fusible et/ou des appareils de connexion.

5.2.7.2.4 Vitesse de fonctionnement du contact

Un autre point à prendre en compte dans le contexte de la coordination est le fait que les interrupteurs modernes au SF₆ et à vide ont des temps de fonctionnement inhérents très

courts en raison de leurs mouvements de contact extrêmement court. Une telle vitesse n'est normalement pas requise pour leur fonctionnement dans le combiné, mais elle peut créer des situations de conflit en regard du fonctionnement plus lent des fusibles à courants modérés. Cela renforce encore les préoccupations exprimées dans 5.2.7.2.3. A des courants se situant entre le pouvoir de coupure de l'interrupteur et le courant maximal de coupure assigné du fusible, la tolérance pour le temps de fonctionnement entre les fusibles d'un circuit polyphasé peut être telle que le déclenchement des interrupteurs rapides, initié par le premier fusible à fondre, peut entraîner l'ouverture des contacts d'interrupteur avant que les autres fusibles n'aient eu le temps de couper le courant de défaut. Cela exposerait les interrupteurs à des courants qu'ils ne sont pas à même d'interrompre. Utiliser un fusible ayant un courant assigné plus faible peut être utile dans cette situation, mais les fusibles doivent être à même de résister aux surintensités transitoires, par exemple au courant d'appel de transformateur (voir 5.2.7.2.2). Dans ce cas, un fusible plus gros peut être utilisé si un léger retard intentionnel est inclus dans le déclenchement de l'interrupteur, un délai suffisant pour s'assurer que les derniers fusibles à fonctionner assure l'élimination de défaut dans tous les pôles avant que la séparation de contacts ne se fasse dans l'interrupteur. Cependant, il convient que tout retard introduit dans le déclenchement n'aboutisse pas à étendre le temps au-delà de 0,05 s assumé dans les conditions requises des essais de fusible (voir 5.2.7.2.1), à moins qu'un fusible à coupure intégrale, ou un percuteur thermique soit utilisé, ou qu'un fusible Associé avec un temps de résistance à l'arc plus élevé ne soit disponible.

5.2.7.3 Circuit-switchers fusibles

Les restrictions relatives aux combinés interrupteurs-fusibles discutées dans 5.2.7.2 requièrent parfois l'utilisation d'appareils de connexion ayant une capacité plus élevée d'interruption de courant. Un circuit-switcher est un appareil de ce type; l'association entre un circuit-switcher et un fusible est couverte par la norme CEI 62271-107 (également principalement conçu pour les applications en transformateur). En sus d'avoir généralement un pouvoir de coupure plus élevé que les interrupteurs, les circuit-switchers sont soumis aux essais avec une tension transitoire de rétablissement plus élevée. Etant donné que le déclenchement par bobine, et non le déclenchement par percuteur, est une exigence, aucun essai de courant de transfert n'est spécifié, mais le circuit-switcher doit démontrer l'interruption réussie à un courant plus élevé que le courant d'intersection maximal. Ce courant correspond au courant préarc maximal (fusion) du fusible maximal à utiliser avec l'association à un temps égal au temps d'ouverture minimal du circuit-switcher. Evidemment, ce courant d'intersection doit également être supérieur au courant minimal de coupure assigné du fusible. Tout fusible utilisé avec le circuit-switcher doit avoir une courbe TCC qui croise la courbe TCC du circuit-switcher à un courant supérieur au courant de coupure minimal assigné du fusible à moins que le circuit-switcher soit également déclenché par un percuteur. Un circuit-switcher fusible peut avoir un déclenchement entièrement assuré par un percuteur de fusible (remplaçant de fait un interrupteur par un circuit-switcher dans un combiné interrupteur-fusibles). Cependant, un circuit-switcher fusible soumis à des essais de conformité à la norme CEI 62271-107 ne requiert aucun autre essai de "courant de transfert" pour cette application.

Bien que les circuit-switchers soient soumis aux essais avec une tension transitoire de rétablissement plus élevée au courant d'intersection que les combinés interrupteur-fusibles soumis aux essais de conformité de la norme CEI 62271-105, la norme CEI 62271-107 spécifie tout de même que "La tension transitoire de rétablissement pour l'essai de type au courant d'intersection peut ne pas couvrir la situation d'un court-circuit boulonné du côté secondaire d'un transformateur MT-BT si le type de transformateur et les connexions MT offrent une capacité très faible." Dans ce cas, des essais de tension transitoire de rétablissement plus sévères sont nécessaires pour le circuit-switcher, selon l'Annexe M de la CEI 62271-100:2012 (ou il convient d'utiliser un autre type d'appareil de connexion).

5.2.7.4 Associations additionnelles entre fusible et appareil de connexion mécanique

Les fusibles peuvent également être utilisés avec des disjoncteurs. Aucune norme CEI ne décrit cette application, mais les règles de coordination de base des circuit-switchers s'appliquent; il convient que le courant d'intersection soit supérieur au courant minimal de

coupure assigné du fusible et qu'il soit inférieur au pouvoir de coupure maximal des disjoncteurs. Si un fusible à coupure intégrale est utilisé en conjonction avec n'importe quel appareil de connexion, la seule exigence est un courant d'intersection inférieur au pouvoir de coupure assigné de l'appareil de connexion parce que le fusible peut interrompre tout courant susceptible de le faire fondre.

Dans l'association des disjoncteurs, seule la caractéristique de limitation de courant des fusibles est exploitée (faible valeur de I^2t et courant de crête), plus leur pouvoir de coupure plus élevée afin d'augmenter celui de l'appareil de série. Toutes les classes de fusibles sont applicables dans ces associations.

Il peut être nécessaire que les fusibles utilisés avec les appareillages de connexion mécanique, mais n'utilisant pas de système de déclenchement à percuteur, soient des fusibles de type à coupure intégrale afin d'assurer l'élimination des faibles valeurs de courant de défaut, à moins que d'autres appareils de déclenchement ne soient employés. Lorsqu'un relais de protection et qu'un appareil de connexion sont utilisés, reportez-vous à 5.2.2.6 et à 5.2.3.

5.3 Observations relatives à l'installation, au fonctionnement, à l'entretien et au remplacement

5.3.1 Généralités

Un fusible disposé dans un circuit électrique est destiné à protéger en permanence ce circuit et les équipements qui lui sont reliés, dans les limites de ses caractéristiques. La façon dont le fusible fonctionnera dépend non seulement de la précision avec laquelle il a été fabriqué, mais également de son utilisation correcte et de l'attention dont il fait l'objet avant et après son installation. Si un fusible est endommagé à un moment ou à un autre, il peut ne plus être à même d'interrompre un courant provoquant sa fusion. Par conséquent, s'il n'est pas installé, utilisé et entretenu correctement, des dégâts considérables à des équipements coûteux peuvent se produire. Par exemple, les supports de fusible de remplacement qui restent longtemps en position ouverte peuvent accumuler de l'eau et de la pollution dans leurs parties internes, ce qui peut conduire à une dégradation de leurs propriétés d'usage (voir 5.3.3.3).

Il convient de manipuler les fusibles à haute tension avec au moins les mêmes précautions qu'un autre accessoire de précision (tel qu'un relais). Il convient que les fusibles soient stockés dans leur emballage d'origine jusqu'à utilisation. Si un fusible tombe ou est soumis à un choc mécanique important, il convient de consulter le fabricant quant aux procédures appropriées à suivre pour établir si le fusible peut encore être utilisé.

On ne peut pas assez insister sur le fait qu'il convient de se conformer aux règles de sécurité prescrites chaque fois que l'on déplace ou que l'on entretient des fusibles au voisinage d'appareils ou de conducteurs sous tension.

Il convient d'installer le fusible en respectant les instructions du constructeur. Pour les dispositions multipolaires de fusibles, lorsque la distance entre pôles n'est pas fixée par construction, il convient que les pôles soient montés à des distances au moins égales à celles spécifiées par le constructeur.

Il convient que le constructeur indique, le cas échéant, les précautions à prendre avec les fusibles usagés pour préserver l'environnement.

Il est de la responsabilité de l'utilisateur de prendre en compte tous les règlements locaux applicables à la mise au rebut des produits et de s'y conformer.

En tout usage, il convient que les caractéristiques d'un fusible donné (courant, tension, courant de coupure maximal, etc.) soient considérées comme des valeurs maximales à ne pas dépasser en service. La seule exception est le courant de coupure minimal d'un fusible Associé, ce qu'il convient de considérer comme une valeur minimale.

Fonctionnement normal des fusibles limiteurs de courant: le fonctionnement normal d'un fusible limiteur de courant ne produira pas de forces externes excessives sur le montage ou les pièces environnantes. De plus, le fonctionnement d'un fusible limiteur de courant produit relativement peu de bruit ou de réaction.

Il convient de prendre des précautions pour le choix du site d'installation des fusibles à expulsion à cause du fort niveau de bruit et de l'émission de gaz chaud pendant le fonctionnement de certains types. Il convient d'installer ces fusibles avec un espace de dégagement suffisant dans la direction d'évacuation des gaz; il convient également de prévoir des équipements pour s'assurer que les opérateurs ne sont pas exposés à l'échappement des fusibles pendant le remplacement ou les activités à proximité du fusible. Si cela n'est pas possible, il convient de commencer par mettre le circuit hors tension.

Il convient de noter que, lorsque les fusibles sont soumis aux effets d'un rayonnement solaire intense, ou sont utilisés dans une enveloppe qui soumet le fusible à une température environnante supérieure à 40 °C, certains aspects du fonctionnement de ces fusibles peuvent en être significativement affectés. En fonction de la conception du fusible, les caractéristiques affectées peuvent comprendre le courant admissible, les courbes temps-courant et leur capacité d'interruption de coupure. Certains types de fusibles doivent être conçus spécifiquement et soumis à des essais en fonction de ces applications (par exemple certains fusibles dits "organiques", voir CEI 60282-1 pour la définition correspondante). L'effet sur le courant admissible du fusible et les caractéristiques temps-courant est couvert dans 5.1.1.2 et 5.1.1.3. Les exigences d'essais supplémentaires concernant certains fusibles conçus pour être utilisés dans un environnement dont la température est supérieure à 40 °C sont traitées dans CEI 60282-1.

5.3.2 Directives relatives à l'installation

Il convient que les directives des constructeurs relativement à l'installation suivantes soient respectées. Pendant l'installation et le remplacement des fusibles, une manipulation négligente peut provoquer des dommages au fusible à installer. Les fusibles limiteurs de courant sont particulièrement sensibles à une telle négligence. Bien que certains dommages peuvent être clairement visibles, par exemple une capsule bosselée ou la fissuration ou rupture du tube du fusible, d'autres peuvent être invisibles, comme la rupture d'un ruban fusible à l'intérieur du fusible ou celle d'un joint dans un fusible immergé dans l'huile. Ces dommages peuvent interférer avec les exigences essentielles de performances associées au fusible, ce qui signifie qu'un fusible endommagé peut ne pas être à même de supporter son courant assigné ou de couper un circuit en défaut. Le dernier cas de figure peut entraîner des dommages à l'équipement, voire des blessures aux membres du personnel. Bien que les fusibles à expulsion tendent à être plus robustes que les fusibles limiteurs de courant, ils peuvent aussi contenir des éléments fragiles et être endommagés après une chute.

Les causes typiques de dommages incluent entre autres les suivantes:

- chute ou mauvaise manipulation d'un fusible;
- force excessive exercée pour la fermeture d'un fusible lors de son montage;
- mauvais alignement du fusible avec sa base pendant l'insertion ou le retrait;
- serrage excessif ou insuffisant des points de connexion;
- taille ou poids excessif du conducteur de connexion générant une force de porte-à-faux trop élevée sur un fusible;
- utilisation d'un fusible dans un environnement thermique excédant sa spécification.

Il convient de consulter le fabricant afin de connaître les orientations quant à la force appropriée à exercer pendant le montage, quant aux installations acceptables et quant à une manipulation adéquate. Si des dommages sont suspectés, il convient de retirer le fusible du service.

5.3.3 Directives de fonctionnement

5.3.3.1 Installation d'un embout non remplaçable sur des fusibles-déconnecteurs de distribution à embouts remplaçables

Cela entraîne une diminution du pouvoir de coupure du déconnecteur à embout remplaçable. Voyez les instructions du fabricant quant aux réductions de spécification.

5.3.3.2 Blocage ou verrouillage des fusibles, des lames ou des supports de fusible en position fermée

Il convient de faire faire particulièrement attention à ce que le fusible, la lame ou le support de fusible soit bien bloqué, verrouillé ou solidement maintenu en position fermée, comme recommandé par le fabricant.

5.3.3.3 Position de support de fusible

Il convient que certains types de fusibles d'extérieur ne restent suspendus en position ouverte pour isoler l'équipement du circuit; en effet, l'eau de pluie peut s'accumuler dans le tube du fusible et provoquer des gonflements ou autres dommages, ce qui entame la capacité d'interruption du fusible. Si l'installation d'un équipement ou un circuit doit rester hors service, les supports de fusible peuvent être suspendus en position droite sur une broche ou un crochet disposé sur le poteau.

5.3.3.4 Fonctionnement des fusibles sous tension

Il convient de ne pas se servir d'un fusible ou d'une pièce d'équipement non doté d'un moyen de coupure en charge pour ouvrir un circuit à moins de savoir qu'aucun courant ne passe (soit parce que le fusible a fondu, soit parce que le circuit a été mis hors tension). Lorsqu'un fusible ou une pièce d'équipement fusible doté d'un moyen de coupure en charge est utilisé (par ex., voir 4.3.2.3), il convient de ne pas l'ouvrir immédiatement une fois que le circuit a été mis sous tension. Le retard avant l'ouverture variera considérablement, selon le courant assigné du fusible; il convient toutefois de prévoir un temps suffisant pour permettre au fusible d'interrompre tout courant de défaut existant qui peut excéder le pouvoir de coupure en charge de l'appareil. Pour des éléments fusibles de grande taille au-dessus des 100 A, ce retard peut aller jusqu'à 10 min. Les combinés interrupteur-fusibles selon la norme CEI 62271-105 ne tombent pas dans l'objet du Paragraphe 5.3.3.

5.3.3.5 Fusibles à expulsion immergés dans des enveloppes

Le liquide fait partie intégrante de la conception de l'équipement et des performances du fusible; il convient d'observer les recommandations du fabricant. Le fonctionnement du fusible peut entraîner la formation de carbone dans le liquide. Le degré auquel cela affectera les caractéristiques de l'équipement dépend du nombre d'opérations ainsi que de leur ordre de grandeur et de leur durée. L'expérience acquise en service représentera d'habitude la meilleure base pour établir un calendrier de maintenance.

5.3.3.6 Compatibilité électromagnétique (CEM)

Les fusibles tombant dans le domaine d'application de ce rapport sont insensibles aux perturbations électromagnétiques et, par conséquent, aucun essai d'immunité n'est nécessaire. Toute perturbation électromagnétique qui peut être générée par le fusible se limite au moment de son fonctionnement.

5.3.4 Considérations relatives à la maintenance

5.3.4.1 Généralités

Dans des conditions de fonctionnement normales, les éléments internes des fusibles à haute tension correctement choisis en fonction de leur application particulière ne sont pas normalement sujets à des influences susceptibles de réduire leur fiabilité. Cependant, les

effets externes peuvent endommager le boîtier externe et la zone de contact d'un fusible et les contacts et isolants d'une base fusible dans des applications en plein air. Si le fabricant des fusibles donne des conditions spécifiques de maintenance, il convient de les suivre. En l'absence de directives spécifiques, les généralités relatives à la maintenance sont données dans 5.3.4.3. Etant donné que l'échelle de temps des dommages liés à l'environnement varie considérablement selon les conditions (en lieu clos dans un environnement propre ou à l'extérieur dans un environnement pollué représentant les deux extrêmes), aucune orientation ne peut être donnée quant à la fréquence des procédures de maintenance. Pour certains utilisateurs, la maintenance peut n'être requise que lors du remplacement d'un fusible "fondu" tandis que, pour d'autres, de fréquentes inspections peuvent être nécessaires en raison de conditions ambiantes particulièrement difficiles.

Lorsqu'un ou deux fusibles limiteurs de courant dans un arrangement triphasé sont remplacés, en sus du changement des fusibles "fondus", il convient de vérifier la base de tous les fusibles et il convient normalement de remplacer les fusibles des autres phases (voir 5.3.5.5). Il convient de remplacer les fusibles de tous types par des fusibles identiques à ceux installés au départ, à moins que le plan de protection ne soit étudié de sorte à assurer que les fusibles de remplacement assureront la même fonction. Dans un arrangement à deux ou trois phases, il convient que tous les fusibles aient le même courant assigné, qu'ils soient du même fabricant et qu'ils aient le même type de désignation du fabricant.

5.3.4.2 Précautions à observer

Il convient que l'examen et l'entretien de l'équipement raccordé à un circuit sous tension soient exécutés à une distance sûre de toute pièce d'équipement ou conducteur sous tension exposé ou le circuit et l'équipement doivent être mis hors tension. Dans le cas d'équipements sur des condensateurs, il convient de prendre des précautions pour décharger et mettre à la terre les condensateurs après leur mise hors tension. Des techniques de travail sous tension peuvent également être utilisées si elles peuvent adéquatement assurer la sécurité du personnel.

Une précaution très importante est nécessaire: il convient que le personnel fasse particulièrement attention lorsqu'il approche des équipements susceptibles de contenir un défaut actif (normalement détecté par un sifflement ou un bourdonnement) parce que cela peut être extrêmement dangereux. Dans un tel cas, il convient que l'alimentation soit interrompue en amont avant de procéder.

5.3.4.3 Inspection du fusible et de l'appareil de connexion

L'équipement compris dans l'objet du présent rapport est constitué de plusieurs parties dont certaines sont conductrices de courant et d'autres non, et qui sont toutes sujettes aux conditions atmosphériques et autres conditions ambiantes. L'équipement est également assujéti aux conditions de fonctionnement normales et anormales du système dans lequel il est connecté. La fréquence et l'exhaustivité de l'inspection sera nécessairement fonction de la fiabilité du service requis et des conditions en vigueur à l'emplacement précis de l'équipement et elles ne peuvent donc être déterminées que par l'utilisateur, en prenant toutefois en compte les instructions du fabricant. Certains des éléments qui peuvent être pris en compte sont les suivants:

- a) Examen général visant à relever les défauts évidents et à vérifier que les boulons, les écrous, les rondelles, les broches et les bornes sont solidement en place et serrés et qu'ils sont en bon état;
- b) Inspection des isolants et autres pièces en porcelaine ou en plastique pour détecter les cassures, fissures, brûlures ou contamination. Nettoyage des isolants et autres surfaces d'isolation pour éliminer les excès de contaminants, tels que les dépôts de sel et la poussière de béton ou de la route, afin d'éviter un amorçage résultant de l'accumulation de substances étrangères sur les surfaces. Il convient de remplacer les isolants et autres pièces d'isolation fissurés ou fracturés. Pour prévenir l'amorçage, il convient d'envisager de remplacer les pièces d'isolation brûlées;

- c) Examen des surfaces de contact du courant pour relever les traces de piqûres et de brûlures et pour vérifier l'alignement afin de s'assurer que les contacts sont maintenus avec une pression appropriée lorsqu'ils sont fermés. Le remplacement et l'ajustement peuvent être requis;
- d) Examen des orifices d'aération sur les équipements ainsi équipés pour vérifier que les trous ne sont pas bouchés par de la saleté ou d'autres substances et nettoyage si nécessaire;
- e) Selon l'équipement, examen du fusible ou du tube de fusible et de l'élément de fusible renouvelable pour relever les traces de corrosion sur l'élément fusible ou les conducteurs de connexion, d'érosion excessive ou de délaminage à l'intérieur des tubes de fusible, de traçage et saleté à l'extérieur du tube de fusible et pour repérer un défaut de montage susceptible d'empêcher le bon fonctionnement. Il convient de remplacer les composants montrant des signes significatifs de détérioration. Les tubes de fusible composés de matières organiques peuvent être remise en état selon les spécifications du fabricant.
- f) Examen des pièces porteuses de courant, comme les lames ou les éléments fusibles, afin de détecter les dommages thermiques résultant de gros courants de court-circuit ou de surcharges pesantes. Il convient de remplacer les éléments fusibles endommagés et les autres pièces considérablement déformées;
- g) Contrôle du fonctionnement mécanique selon les recommandations du fabricant.

5.3.4.4 Inspection des éléments de remplacement dans les fusibles-déconnecteurs de distribution

Les éléments de remplacement dans les fusibles déconnecteurs de distribution peuvent nécessiter des remplacements périodiques du fait que leur borne inférieure (généralement, un câble flexible) au niveau de l'extrémité ouverte inférieure du support de fusible peut provoquer des coupures ou une fusion à ce point plutôt qu'au niveau de l'élément fusible répondant au courant. Les déconnecteurs à rupture de lien sont plus particulièrement concernés par ce problème de contrainte mécanique agissant sur l'élément fusible par l'intermédiaire du mécanisme de rupture de lien.

5.3.4.5 Autres directives relatives à la maintenance pour appareils spécifiques

5.3.4.5.1 Fusibles de condensateur

Il convient de prendre garde de décharger et de mettre à la terre les condensateurs avant de réaliser les opérations de maintenance. Voir 5.3.5 pour plus d'informations.

5.3.4.5.2 Fusibles à expulsion immergés dans des enveloppes

Liquide: Le niveau et la qualité du liquide dans les équipements peuvent affecter la performance du fusible à expulsion. Il convient d'entretenir correctement tous les joints et garnitures d'étanchéité. Il convient que l'inspection inclut le contrôle du réservoir pour fuite de liquide et la recherche de tout signe externe de dommage ou détérioration. Il convient de contrôler le niveau du liquide afin de vérifier qu'il est conforme aux recommandations du fabricant des appareillages de connexion. Il convient que le liquide ne soit pas être retiré des ou ajouté aux appareillages de connexion tant que ceux-ci sont sous tension, à moins de moyens ou procédures appropriés à cette fin.

Inspection des composants: il convient de respecter les recommandations et les exigences du fabricant en matière d'inspection et de maintenance des composants du fusible. Il convient que les fusibles de remplacement utilisés soient ceux recommandés par le fabricant des appareillages de connexion. De nombreux utilisateurs ont établi des procédures pour permettre l'inspection et la maintenance des équipements sous tension. En l'absence de telles procédures, il convient que les équipements soient hors tension avant toute procédure d'inspection ou de maintenance.

Les orientations générales qui suivent s'appliquent à l'inspection et à la maintenance des composants de fusible:

- a) Il convient que tous les composants conducteurs de courant d'un support de fusible ou d'un support à baïonnette soient examinés. Il convient que tout composant qui présente des signes excessifs d'échauffement ou de dommage issu de la production d'un arc soit remplacé. Des dommages excessifs d'arc ou un trop grand échauffement des surfaces de contact peuvent indiquer la nécessité d'inspecter les contacts internes. Cela exige généralement de mettre l'unité hors service;
- b) Il convient de remplacer tout support de fusible ou toute cartouche présentant des signes de fractures, érosion, cheminement ou d'usure excessive;
- c) Il convient de vérifier tous les joints ou joints d'étanchéité et de remplacer ceux qui sont détériorés ou déformés. Il convient d'utiliser des pièces de remplacement approuvées par le fabricant;
- d) Il convient de contrôler les raccords électriques pour vérifier qu'ils sont propres et bien fermés;
- e) Il convient de vérifier que le fusible est dans un état satisfaisant, comme recommandé par le fabricant.

5.3.4.5.3 Mesures infrarouges

Une façon d'évaluer les fusibles limiteurs de courant et les fusibles à expulsion de calibre plus élevés tandis qu'ils sont en service et observables consiste à utiliser des équipements de mesure infrarouges. Cette approche devient de plus en plus fréquente.

Les fusibles étant nécessairement des appareils produisant de la chaleur et devenant souvent plus chauds que les équipements environnants, il est recommandé d'envisager les facteurs suivants lorsque vous utilisez cet équipement:

- a) un relevé de température de 30 °C au-dessus de la température ambiante est fréquent;
- b) dans certains cas, des températures mesurées totales s'élevant jusqu'à 105 °C peuvent être normales;
- c) il convient que, sur les installations triphasées, des lectures sur les trois phases soient proches si le charge est égale sur les trois phases.
- d) il convient que la mesure infrarouge se concentre sur les températures de contact du fusible parce que des températures de plus de 105 °C peuvent être observées si le corps du fusible est inclut dans les lectures de température.

5.3.5 Observations relatives au remplacement

5.3.5.1 Généralités

Il convient que le remplacement des fusibles soit exécuté avec le circuit hors tension, à moins que leur conception, les essais et les recommandations du fabricant ne permettent un remplacement sous tension. Dans le cas de fusibles contrôlés par un distributeur, il convient que le remplacement du fusible soit fait selon des pratiques du distributeur développées en collaboration avec le fabricant du fusible. Il convient toutefois de ne jamais remplacer les fusibles à expulsion dans la zone d'échappement avec le circuit sous tension.

Il convient que les fusibles de remplacement utilisés soient ceux recommandés par le fabricant. Il faut prendre particulièrement garde dans certaines applications (c'est-à-dire chaque fois qu'un fusible est en coordination avec d'autres appareils, voir plus bas). Les essais sont exécutés conformément aux normes CEI ne couvrant que les performances des fusibles en situation d'essai, lorsque le fusible est constitué d'une combinaison particulière de base, support et/ou élément de fusible. Ces essais ne peuvent pas permettre de conclure que d'autres combinaisons d'éléments de différents fabricants offrent des performances satisfaisantes.

Il convient de faire particulièrement attention pendant le remplacement d'un fusible associé ou de l'appareil de série avec lequel le fusible est coordonné (par ex., voir 5.2.2.5), après fonctionnement de l'un des deux ou des deux. La coordination entre les deux appareils est

essentielle afin de n'endommager ni l'un ni l'autre, ni même les appareils associés. Il convient donc que le remplacement de l'un ou l'autre des appareils de protection par un autre appareil avec des spécifications différentes ou fourni par un autre fabricant n'ait lieu qu'après un examen attentif du plan global de protection pour être sûr que la coordination est maintenue. Les fusibles Associés sont toujours coordonnés avec un autre appareil, il faut souvent prendre garde lorsque l'appareil de série a fonctionné.

Il est conseillé de repérer et de corriger la situation ayant provoqué le fonctionnement du fusible avant la remise sous tension. Il convient que l'opérateur soit conscient qu'un danger potentiel peut être présent si le circuit est remis sous tension sans avoir éliminé le défaut.

Le dispositif de contrôle d'échappement sur les fusibles à expulsion peut être réutilisé après qu'un fusible ait fonctionné. Cela dépend de l'ordre de grandeur du défaut et du nombre d'interruptions de courant de défaut passés. Il est conseillé, après l'activation d'un fusible, d'inspecter le dispositif de contrôle d'échappement et de suivre avec soin les instructions du fabricant afin d'établir si le dispositif peut encore être utilisé.

5.3.5.2 Stockage des éléments fusibles de remplacement et des pièces remplaçables

Il convient de stocker les éléments fusibles de remplacement, les unités de rechange et les parties remplaçables des fusibles de sorte à ne pas être endommagés et à être disponibles en cas de besoin. Il convient de stocker les fusibles à expulsion à acide borique, particulièrement sensibles à la pénétration d'humidité, dans leur emballage d'origine, dans un milieu sec. Si plusieurs types et spécifications de fusibles sont utilisés dans un endroit donné, il convient que les pièces de remplacement soient marquées, codées ou indexées de façon appropriée pour faire apparaître les montages, circuits ou équipements avec lesquels ils doivent être utilisés. Cela minimisera la possibilité d'un usage inapproprié. Consultez le fabricant pour les recommandations.

5.3.5.3 Remplacement du fusible de condensateur

Il convient de faire attention à décharger les condensateurs après leur mise hors tension et à raccorder à la terre l'intégralité du banc de condensateurs avant d'exécuter toute opération de maintenance. Il convient que les fusibles utilisés sur les condensateurs unitaires ne soient pas manipulés, démontés ou remplacés à moins que les précautions requises ne soient prises à l'avance pour mettre hors tension, décharger et raccorder à la terre les condensateurs unitaires. Il convient que le banc de condensateurs tout entier soit mis hors tension et qu'il soit raccorder à la terre tout en procédant au remplacement des fusibles du condensateur unitaire. Les fusibles de ligne de condensateur peuvent être manipulés à l'aide d'outils pour travaux sous tension.

Les condensateurs unitaires utilisés dans les applications de puissance ont normalement une résistance de décharge afin de réduire la tension du condensateur unitaire à une valeur spécifiée dans un laps de temps spécifié après avoir été mis sous tension. Il convient de ne pas considérer cet appareil de décharge interne comme un moyen de remplacer les pratiques recommandées de sécurité pour décharger manuellement l'énergie stockée résiduelle avant de travailler sur les condensateurs unitaires. Les condensateurs unitaires peuvent être endommagés s'ils sont déchargés trop tôt après avoir été mis hors tension. Il est recommandé d'attendre au moins 5 minutes pour une décharge adéquate à travers la résistance de décharge, puis il convient de mettre les bornes du condensateur en court-circuit ensemble et raccordées à la terre.

Lors de l'installation ou de la suppression des fusibles de condensateur unitaire avec des éléments fusibles qui ont une queue ou une amorce, il convient de débrancher l'amorce d'abord de la traversée du condensateur pour éviter la torsion de l'élément fusible.

Pendant le remplacement d'un fusible de condensateur unitaire, il peut être souhaitable de contrôler la continuité et l'état des fusibles et des éléments fusibles sur les condensateurs unitaires parallèles adjacents.

5.3.5.4 Fusibles à expulsion immergés dans des enveloppes

Pendant le retrait et le remplacement des fusibles, il convient de tenir compte du fait qu'une enveloppe scellée (réservoir) peut avoir une pression supérieure à la pression atmosphérique. Il convient que cette pression interne soit ramenée à la pression atmosphérique avant de retirer les fusibles.

5.3.5.5 Applications triphasées/fonctionnement du fusible de série

Certaines constructions de fusible sont sujettes à une fusion partielle ou à des dommages par courant qui ne sont pas d'un ordre de grandeur ou d'une durée suffisants pour provoquer la fusion totale du fusible.

Certaines considérations relatives au remplacement du fusible après un ou deux déclenchements du fusible sur des applications bi- ou triphasées incluent ce qui suit:

- a) si tous les fusibles d'un groupe bi- ou triphasé fonctionnent, il est possible qu'une autre phase ait été impliquée et, sans avoir effectivement fonctionné, son fusible peut tout de même être endommagé. Sauf si l'utilisateur peut effectivement exclure cette possibilité, il convient de remplacer tous les fusibles dans un groupe bi- ou triphasé lorsque l'un d'eux a fonctionné;
- b) un exemple de situation dans laquelle un défaut polyphasé peut être exclu est le cas dans lequel l'emplacement du défaut peut être effectivement identifié et seul les phases avec les fusibles qui ont fonctionné sont concernés par le défaut;
- c) pour les bancs de condensateurs qui utilisent des fusibles de ligne de condensateur (fusibles de groupe), les conditions suivantes sont applicables: Sur un banc de condensateurs en étoile lié à la terre, si un fusible a fonctionné, il n'est pas besoin de remplacer les deux autres fusibles. Sur un banc de condensateurs en étoile non mis à la terre, si un fusible a fonctionné, les deux autres fusibles peuvent être endommagés parce qu'ils ont été soumis à 3 fois le courant normal lorsque le condensateur a été mis en court-circuit (ayant déclenché le fonctionnement du premier fusible). Sur les bancs raccordés en triangle, deux fusibles fonctionnent normalement simultanément et il n'est pas nécessaire de remplacer le troisième. Si un deuxième fusible n'a pas fonctionné, il convient de remplacer le deuxième fusible sur l'autre traversée du condensateur unitaire en défaut après que le condensateur en défaut ait été identifié (et isolé).

Dans des applications dans lesquelles les fusibles sont utilisés en série avec d'autres fusibles ou des appareils d'interruption dans la même phase et de manière que leurs courbes de préarc et de fonctionnement se croisent, il est conseillé, après un déclenchement, de suivre soigneusement les instructions du fabricant afin d'établir si le ou les autres fusibles peuvent rester en service.

Il convient de faire attention au moment de remplacer les fusibles dans des circuits polyphasés s'il est assumé que, dans des conditions de défaut, deux fusibles seront effectivement en série et partageront la tension entre phases. Pour que deux fusibles partagent la tension, ils doivent produire un arc simultanément. Il convient donc que les fusibles aient la même spécification et soient du même modèle et/ou du même type dans toutes les phases, et ils doivent être du même fabricant; consultez le fabricant pour en savoir davantage.

5.4 Recyclage

Il convient que le constructeur indique, le cas échéant, les précautions à prendre avec les fusibles usagés pour préserver l'environnement.

Il est de la responsabilité de l'utilisateur de prendre en compte tous les règlements locaux applicables à la mise au rebut des produits et de s'y conformer.

Réutilisation des fusibles limiteurs de courant après interruption: il convient que les éléments fusibles limiteurs de courant ne soient pas réutilisés ou reconstruits (à moins que le travail ne soit effectué par le fabricant du fusible ou son agent agréé).

Annexe A (informative)

Conseils pratiques pour le déclassement thermique des fusibles limiteurs de courant

A.1 Objet

L'objet de cette annexe est d'aider à déterminer le déclassement thermique d'un fusible lorsque la température autour de ce dernier est supérieure à 40 °C. Cela peut être dû à une forte température ambiante dans une situation ouverte ou à l'utilisation dans une enveloppe.

Des méthodes sont donc proposées dans les cas suivants:

- a) déclassement pour utilisation à des températures ambiantes supérieures à 40 °C (type 1CL, voir 5.1.1.2.2);
- b) déclassement pour utilisation dans des enveloppes relativement grandes (type 1CL, voir 5.1.1.2.2);
- c) déclassement pour utilisation dans des enveloppes relativement petites (type 2CL, voir 5.1.1.2.2);
- d) déclassement pour utilisation dans des enveloppes avec un liquide isolant entourant les éléments fusibles (type 3CL, voir 5.1.1.2.2).

De plus, la méthode e) peut être utilisée à la place des méthodes a), b), c) ou d) ci-dessus.

NOTE D'autres méthodes de déclassement sont utilisées dans certains pays; voir Bibliographie.

A.2 Généralités

Les conseils sur l'utilisation de fusibles limiteurs de courant à des températures ambiantes élevées sont couverts dans 5.1.1. Les normes IEEE ont utilisé le terme "courant permanent admissible" pour décrire un courant supérieur ou inférieur au courant assigné qu'un fusible peut porter sans détérioration et sans excéder les températures autorisées à une température ambiante donnée (ou dans une enveloppe donnée ayant une certaine température ambiante). L'Annexe A utilise le terme "courant maximal permanent admissible" I_{encl} pour indiquer le courant assigné modifié produit par une enveloppe et les deux termes sont approximativement équivalents.

De plus, 5.1.1.2.1 indique que la convenance d'un élément fusible pour une application spécifique en enveloppe est de la responsabilité du fournisseur de l'ensemble du fusible sous enveloppe ou puits (FEP).

NOTE FEP désigne la combinaison du fusible et de son enveloppe.

Les résultats des essais de dissipation de puissance (voir 4.2.4.6 6,5 de la norme CEI 60282-1:2009) en combinaison avec une méthode de détermination de la température de l'enveloppe permettront au constructeur du FEP de déterminer le courant permanent maximal acceptable pour n'importe quel FEP, avant confirmation par essais. Cependant, des conseils spécifiques sont souvent nécessaires de la part du fabricant pour s'assurer du bon comportement d'un modèle particulier pour usage dans une enveloppe et la méthode à utiliser pour établir le déclassement approprié.

Beaucoup d'éléments fusibles HT sont utilisés pour des circuits de transformateurs pour lesquels 5.2.2 donne des conseils afin de mieux choisir les éléments appropriés. Comme spécifié dans 5.2.2.2.2, a), il convient que ces éléments fusibles disposent de courants de service relativement élevés dans la région des 0,1 s des caractéristiques temps-courant. Pour

satisfaire à une telle exigence, le courant assigné de l'élément fusible est généralement supérieur au courant à pleine charge du circuit et, par conséquent, le déclassement déterminé en utilisant cette annexe sera toujours déjà satisfait pour les fusibles associés, bien que les fusibles d'usage général et à coupure intégrale doivent souvent être déclassés.

La nécessité de déclasser l'élément fusible peut également se présenter pour l'une ou l'autre des raisons suivantes:

- limiter la température interne d'un point chaud à une valeur qui n'engendrera pas de détérioration. Cette valeur dépend de la conception particulière de l'élément fusible.
- assurer que les températures de contact ne dépasseront pas les valeurs maximales données dans la CEI 60282-1.

Le courant assigné de l'élément fusible est souvent déterminé par la première raison. Cependant, lorsque le refroidissement devient plus restrictif et que le déclassement du courant augmente, la différence de température entre les éléments fusibles et l'extérieur de l'enveloppe du fusible diminue. Cela conduit à déterminer le courant maximal en charge non plus à partir de la température des points chauds des éléments fusibles, mais à partir de la température des contacts.

a) Déclassement pour utilisation à une température de l'air ambiant supérieure à 40 °C

Une méthode prudente de calculer un courant qui générera les mêmes températures de contact à une température ambiante plus élevée assume que la perte de chaleur est proportionnelle à la différence entre la température de contact et la température ambiante. La Figure A.1 applique cette approche afin de donner le pourcentage de déclassement requis en fonction de la température ambiante pour des valeurs de température maximale des contacts et des bornes spécifiées au Tableau 6 de la norme CEI 60282-1:2009 (et rappelées dans le Tableau A.1). Cette méthode est de type conservatoire pour plusieurs raisons. Elle assume tout d'abord que, à un courant assigné, un fusible présente l'échauffement maximal admis. Ce n'est pas toujours vrai pour les courants assignés maximaux et cela est rarement vrai pour les courants assignés inférieurs. De plus, elle assume la même température de l'élément fusible au courant déclassé tandis que, dans la pratique, la température moyenne tombera généralement (comme expliqué à l'alinéa précédent). Un déclassement basé sur des températures de points chauds donnera généralement un facteur de déclassement autorisant un pourcentage plus élevé du courant assigné que ceux donnés dans la Figure A.1 et les valeurs données dans la Figure A.1 intègrent un facteur de sécurité: elles sont destinées à être appliquées lorsque qu'aucune information plus précise n'est disponible de la part du fabricant du fusible. Lorsque cette information existe, des facteurs de déclassement moins sévères peuvent être appliqués. Cette méthode est également applicable aux fusibles dans des chambres de transformateurs ou de grandes enveloppes dans lesquelles la chaleur produite par le fusible représente un apport négligeable comparé à celle produite dans l'enveloppe.

b) Déclassement pour utilisation sous enveloppes relativement grandes

Des exemples typiques de cette catégorie sont les enveloppes tripolaires où une bonne part de la dissipation de la chaleur produite par les éléments de remplacement se fait par convection. Les distances aux flancs de l'enveloppe (et aux éventuelles cloisons), quoiqu'elles ne soient pas forcément métalliques, sont de l'ordre de grandeur des distances d'isolement nécessaire dans le milieu entourant immédiatement les éléments de remplacement pour des enveloppes métalliques sans pare-effluve.

Pour ces enveloppes, la Figure A.1 peut être utilisée pour aider à déterminer le courant déclassé (I_{encl}) des éléments fusibles lorsqu'ils sont utilisés dans une enveloppe donnée. Si la température du support entourant les fusibles est connue, la Figure A.1 est utilisée pour vérifier si la valeur I_{encl} est correcte. Cependant, la difficulté à résoudre est que la chaleur dissipée par l'élément de remplacement a un effet direct sur la température ambiante interne à l'enveloppe.

La CEI 60890 donne une méthode de calcul de l'échauffement de l'air à l'intérieur d'une enveloppe et les mêmes principes peuvent être appliqués aux enveloppes contenant des fusibles HT.

Prenons l'exemple illustré dans la Figure A.2 et prenons des éléments fusibles de 100 A avec une dissipation de puissance de 85 W au courant assigné.

NOTE Les valeurs réelles de puissance dissipée sont données par le constructeur de l'élément fusible selon la norme CEI 60282-1:2009, 6.5.3.

Renseignez le tableau de la Figure A.3 (la norme CEI 60890 donne toutes explications sur la marche à suivre).

La Figure A.4 présente le tableau renseigné et une valeur I_{encl} de 80 A est supposée convenir. La première section conduit à une surface efficace de refroidissement de A_e . Les constantes K , d , $\times$ et c sont fournies par la CEI 60890. Quelques explications sont nécessaires pour la puissance dissipée réelle P .

Il faut supposer une valeur de I_{encl} et en déduire la puissance dissipée correspondante. Pour l'évaluation initiale dans cet exemple, une valeur de I_{encl} de 80 A est assumée, donnant une dissipation de puissance de $(80/100)^2 \times 85 = 54,4$ W. Le calcul de l'échauffement qui en résulte dans l'enveloppe à l'extrémité supérieure donne 37,5 K.

Si on examine la Figure A.1 pour déterminer le facteur de déclassement pour des contacts boulonnés (105 °C) et à une température ambiante de 40 °C + 37,5 °C = 77,5 °C, le facteur de déclassement qui en résulte est de 65 %. Donc, puisque le courant assigné sélectionné de 100 A, excède le produit courant assigné $\times$ facteur de déclassement (100 A $\times$ 0,65 = 65 A), une valeur de I_{encl} de 80 A est considérée comme excessive.

Il faut répéter l'exercice en supposant une valeur plus faible. Prenons donc 70 A avec une dissipation de puissance de $(70 \times 100)^2 \times 85 = 41,6$ W. Il s'ensuit un échauffement de l'enveloppe à l'extrémité supérieure de 30,3 K. Si maintenant nous examinons la Figure A.1 pour une température ambiante de 40 °C + 30,3 °C = 70,3 °C, le facteur de déclassement est de 73 %. Le courant admissible de $0,73 \times 100$ A = 73 A dépasse maintenant la valeur proposée I_{encl} de 70 A qui est néanmoins jugée acceptable.

Cet exemple montre comment les informations contenues dans la Figure A.1 et dans la norme CEI 60890 peuvent servir à juger acceptable la valeur I_{encl} pour un FEP. Lorsque d'autres appareils ou connexions à l'intérieur de l'enveloppe dissipent une puissance appréciable, il convient de l'ajouter à celle dissipée par les fusibles.

c) Déclassement pour utilisation sous enveloppes relativement étroites ou puits

Dans le contexte du déclassement des éléments fusibles, les principales remarques caractéristiques suivantes s'appliquent aux puits.

Le puits est une enveloppe monophasée type.

- La distance entre la surface extérieure de l'élément fusible et la surface intérieure du puits est faible, de l'ordre de 10 % à 25 % du diamètre de l'élément fusible.
- A cause de cet espace réduit, le refroidissement se fait moins par convection, mais plutôt par rayonnement et par conduction. L'élément fusible et le puits forment un ensemble intégré et le déclassement peut souvent être déterminé à partir de la puissance dissipée maximale que l'ensemble peut supporter.
- Selon la construction et les matériaux du puits, la température intérieure du puits peut être le facteur principal de déclassement dans certains cas.

Du fait de l'étroite interaction entre élément fusible et puits, le déclassement de cette combinaison ne peut normalement se faire que par mesurage.

d) Déclassement pour utilisation dans des enveloppes avec un liquide isolant autour des éléments fusibles

Les courants assignés des éléments fusibles destinés à être utilisés dans un liquide isolant sont déterminés par des essais dans des conditions relativement précises simulant les conditions de service (voir 6.5.1.2 dans la norme CEI 60282-1:2009). Le déclassement éventuel en enveloppe est en général minimal. Il convient toutefois de prendre en compte les températures ambiantes externes supérieures à 40 °C, en particulier dans le cas de fusible à coupure intégrale et avec les applications en transformateur (voir 5.2.2.2).

Les méthodes a) à d) fournissent un moyen de prédétermination et ne remplacent pas les essais réels que le constructeur de FEP est supposé effectuer. Les résultats de ces essais, lorsqu'ils existent, prévalent contre toute estimation faite en utilisant la présente annexe.

e) Autre méthode pour établir un déclassement

Si le constructeur du FEP ou l'utilisateur peut soumettre le matériel complet à des essais avec les fusibles concernés, il est permis d'adopter la méthode suivante pour déterminer la valeur I_{encl} pour le FEP:

- 1) s'adresser au fabricant du fusible pour lui demander la valeur de dissipation de puissance du fusible en watts (W_r), au courant assigné (I_r), dans les conditions normales d'essai. A partir de cette valeur, calculer la résistance thermique admissible maximale de l'élément fusible (W_r / I_r^2);
- 2) monter un ensemble de trois fusibles comme en service. Appliquer un courant d'essai croissant régulièrement jusqu'à ce que:
 - la résistance à chaud (obtenue en divisant la chute de tension aux bornes de chaque élément de remplacement par le courant) atteigne la valeur calculée en 1) ci-dessus, ou que
 - l'augmentation de température sur les contacts de fusible et les bornes atteignent les limites admissibles spécifiées par le fabricant du fusible ou dans le Tableau A1;
- 3) la valeur I_{encl} de l'élément fusible sera la plus faible parmi les valeurs suivantes:
 - la valeur qui donne la résistance à chaud maximale admissible;
 - la valeur résultant dans l'échauffement maximal approprié spécifié dans la CEI 60282-1:2009, 4.7.

Il convient de noter que la présente annexe se conjugue avec les exigences de courant permanent à pleine charge du matériel associé et/ou protégé tel que transformateur ou moteur. Il convient que l'utilisation dans des conditions de surcharge cyclique fasse l'objet d'un accord entre le constructeur et l'utilisateur.

**Tableau A.1 – Limites de température de contact tirées
du Tableau 6 de CEI 60282-1:2009**

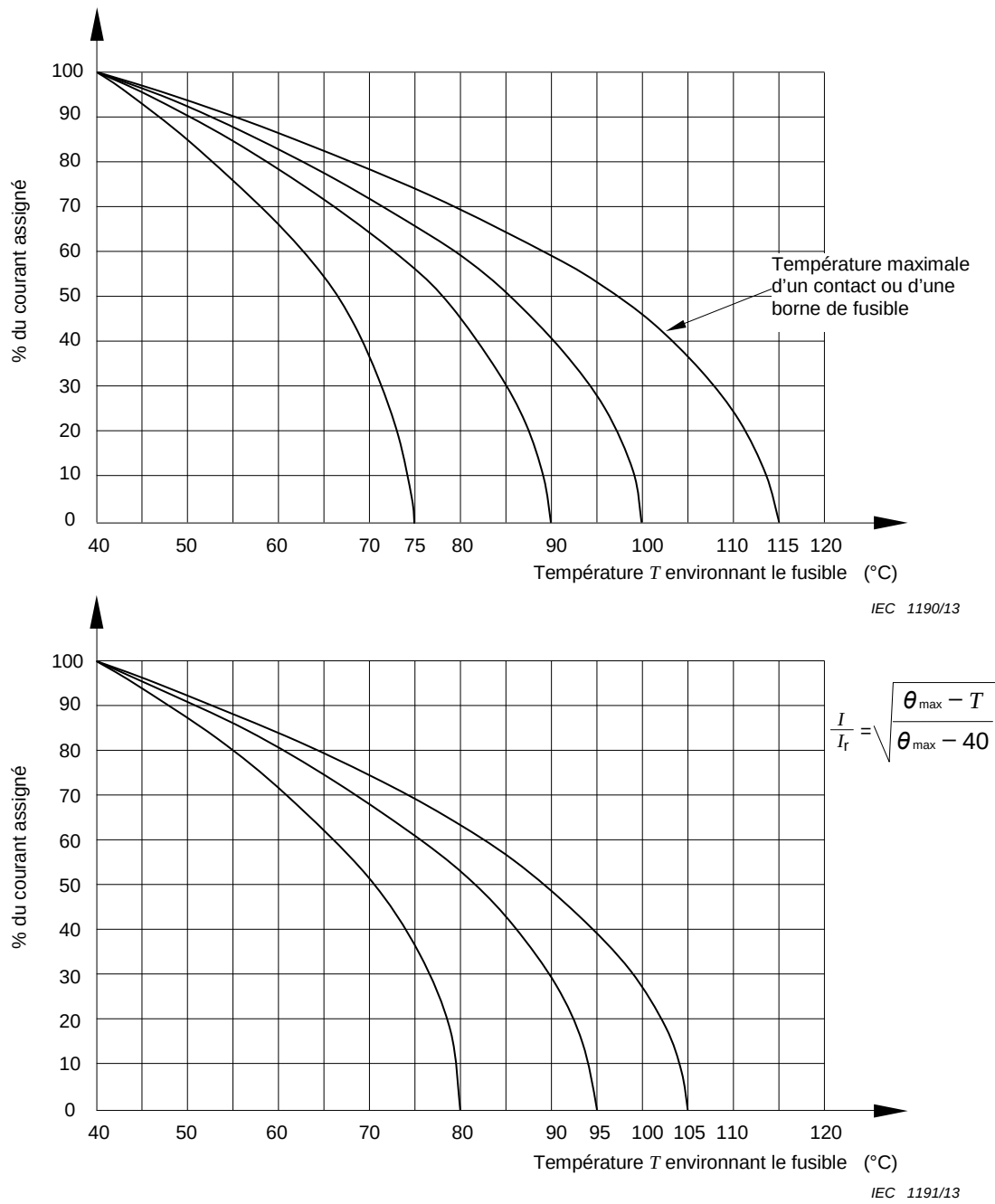


Figure A.1 – Courbe de déclassement pour certaines limites de température autorisées

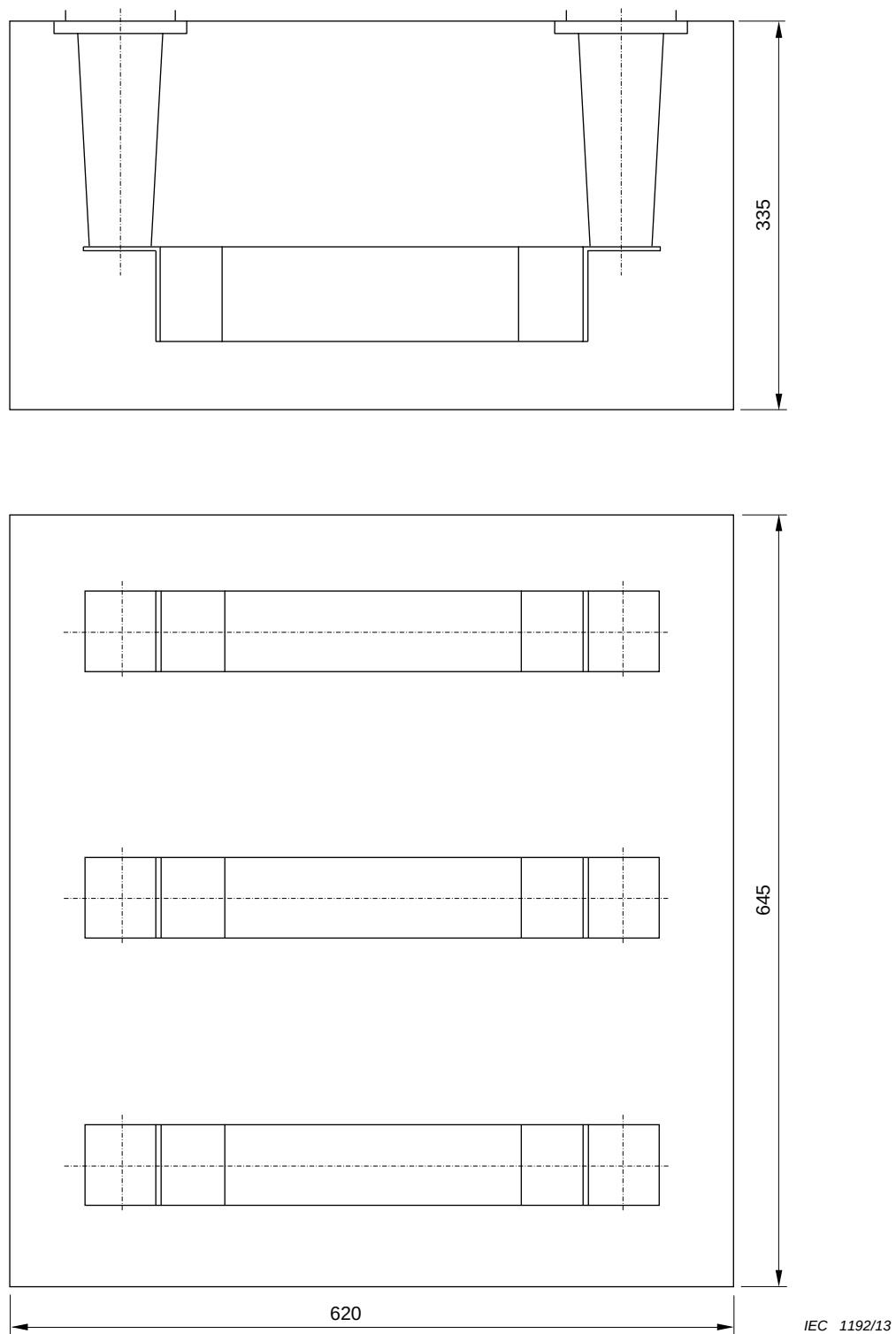
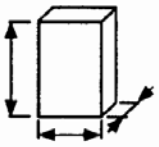
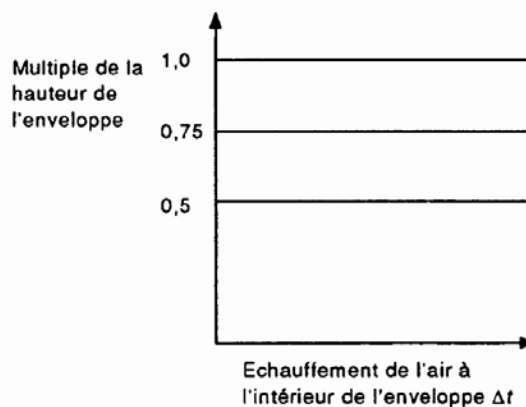


Figure A.2 – Exemple pratique: dimensions

Calcul de l'échauffement de l'air à l'intérieur d'enveloppes					
Client/Installation					
Type d'enveloppe					
Dimensions applicables pour la détermination de l'échauffement	hauteur	mm	Type d'installation:		
	largeur	mm	Orifices de ventilation: oui/non		
	profondeur	mm	Nombre de séparations horizontales:		
Sur- face effec- tive de refroi- disse- ment		Dimensions	A_o	Facteur de surface b suivant tableau 3	$A_o \times b$ (colonne 3) $\times$ (colonne 4)
		m $\times$ m	m ²		m ²
		2	3		4
	Partie supérieure				
	Façade				
	Arrière				
	Côté gauche				
	Côté droit				
$A_e = \Sigma (A_o \times b) = \text{Total}$					
Avec une surface effective de refroidissement A_e					
Supérieure à 1,25 m ²			Inférieure ou égale à 1,25 m ²		
$f = \frac{h^{1,35}}{A_b}$ (voir 5.2.3) _____			$g = \frac{h}{w}$ (voir 5.2.3) _____		
Orifices d'entrée d'air		cm ²			
Constante d'enveloppe k					
Facteur pour séparations horizontales d					
Puissance dissipée effective P		W			
$P^x = P^{***}$					
$\Delta t_{0,5} = k \cdot d \cdot P^x$		K			
Facteur de répartition de température c					
$\Delta t_{1,0} = c \cdot \Delta t_{0,5}$		K			

Courbe caractéristique:

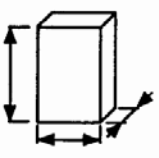


Extrait de la CEI 60890

IEC 1193/13

Figure A.3 – Extrait de la CEI 60890

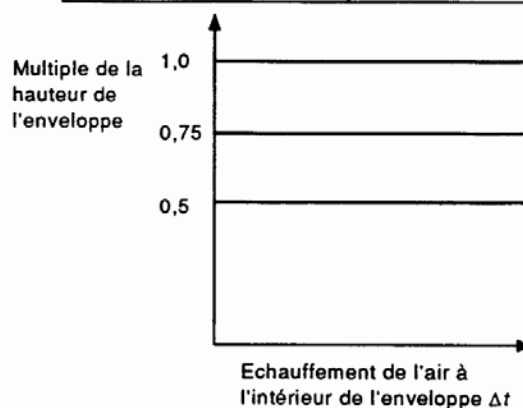
Calcul de l'échauffement de l'air à l'intérieur d'enveloppes			
Client/Installation	pour exemple seulement (voir figure 2)		
Type d'enveloppe	triphasée		
Dimensions applicables pour la détermination de l'échauffement	hauteur	620 mm	Type d'installation:
	largeur	645 mm	Orifices de ventilation:
	profondeur	335 mm	Nombre de séparations horizontales:
			oui/non non
			aucun

Surface effective de refroidissement		Dimensions	A_o	Facteur de surface b suivant tableau 3	$A_o \times b$ (colonne 3) $\times$ (colonne 4)
		m $\times$ m	m ²		m ²
		2	3		5
	Partie supérieure	0,645 $\times$ 0,335	0,216	1,4	0,3024
	Façade	0,645 $\times$ 0,620	0,400	0,9	0,3600
	Arrière	0,645 $\times$ 0,620	0,400	0,9	0,3600
	Côté gauche	0,335 $\times$ 0,620	0,208	0,9	0,1869
	Côté droit	0,335 $\times$ 0,620	0,208	0,9	0,1869
		$A_o - \Sigma (A_o \times b) = \text{Total}$			1,396

Avec une surface effective de refroidissement A_o	
Supérieure à 1,25 m ²	Inférieure ou égale à 1,25 m ²
$f = \frac{h^{1,35}}{A_o} \quad (\text{voir 5.2.3 de la CEI 60890})$ $\frac{0,620^{1,35}}{0,645 \times 0,335} = 2,43$	$g = \frac{h}{w} \quad (\text{voir 5.2.3 de la CEI 60890})$ 1^{er} essai Final

Orifices d'entrée d'air	cm ²	–	–
Constante d'enveloppe k		0,48	0,48
Facteur pour séparations horizontales d		1	1
Puissance dissipée effective P	W	54,4 $\times$ 3 = 163	41,6 $\times$ 3 = 124,8
$P^x = P^{0,804}$		60,1	48,5
$\Delta t_{0,5} = k \cdot d \cdot P^x$	K	28,85	23,3
Facteur de répartition de température c		1,3	1,3
$\Delta t_{1,0} = c \cdot \Delta t_{0,5}$	K	37,5	30,3
		à 80A	à 70A

Courbe caractéristique:



Exemple d'application

IEC 1194/13

Figure A.4 – Exemple pratique d'application

Bibliographie

Les entrées bibliographiques sont constituées de documents auxquels il est fait référence dans le corps du rapport ou de références à des informations concernant les fusibles susceptibles d'être utiles pour l'utilisation desdits fusibles.

- [1] AS1033.1, *High voltage fuses (for rated voltages exceeding 1000 V) – Part 1 Expulsion type* (disponible en anglais uniquement)
 - [2] Electric Fuses, Wright and Newbery; *IEE power and energy series*; 49. ISBN: 0-86341-379-X & 978-0-86341-379-7. www.iet.org (disponible en anglais uniquement)
 - [3] IEEE Std 18, *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors* (disponible en anglais uniquement)
 - [4] IEEE Std 141, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants* (disponible en anglais uniquement)
 - [5] IEEE Std 399, *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis* (disponible en anglais uniquement)
 - [6] IEEE Std C37.41, *IEEE Standard Design Tests for High-Voltage (> 1000 V) Fuses, Fuse and Disconnecting Cutouts, Distribution Enclosed Single-Pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Fuse Links and Accessories Used with These Devices* (disponible en anglais uniquement)
 - [7] IEEE C37.42, *IEEE Standard Specifications for High Voltage (> 1000 V) Expulsion-Type Distribution-Class Fuses, Fuse and Disconnecting Cutouts, Fuse Disconnecting Switches and Fuse Links and Accessories Used with These Devices* (disponible en anglais uniquement)
 - [8] IEEE C37.46, *IEEE Standard Specifications for High-Voltage (> 1000 V) Expulsion and Current-Limiting Power Class Fuses and Fuse Disconnecting Switches* (disponible en anglais uniquement)
 - [9] IEEE Std C37.47, *IEEE Standard Specifications for High Voltage (> 1000 V) Distribution Class Current-Limiting Type Fuses and Fuse Disconnecting Switches* (disponible en anglais uniquement)
 - [10] IEEE C37.48, *IEEE Guide for the Application, Operation, and Maintenance of High-Voltage Fuses, Distribution Enclosed Single-Pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Accessories* (disponible en anglais uniquement)
 - [11] IEEE Std C37.48.1-2011, *IEEE Guide for the Application, Operation, and Coordination of High-Voltage ($\geq$ 1000 V) Current-limiting Fuses (ANSI)* (disponible en anglais uniquement)
 - [12] IEEE Std C37.99, *IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks (ANSI)* (disponible en anglais uniquement)
 - [13] NFPA 70: *National Electrical Code, 1999 Ed.* (disponible en anglais uniquement)
 - [14] Rau, C., Leconte, C-J., Gibert, T., "Resistance of Transformers to Internal Faults: Synthesis of Experimental Results", CIREN 1989, Proceedings 10th International Conference on Electricity Distribution, Brighton, 8-12 May 1989 (disponible en anglais uniquement)
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch