

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Series capacitors for power systems –
Part 2: Protective equipment for series capacitor banks**

**Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux –
Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateurs série**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2012 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 Varembe
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It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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.



IEC 60143-2

Edition 2.0 2012-12

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Series capacitors for power systems –
Part 2: Protective equipment for series capacitor banks**

**Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux –
Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateurs série**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE **XA**
CODE PRIX

ICS 29.240.99; 31.060.70

ISBN 978-2-83220-546-4

**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.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	9
4 Quality requirements and tests	15
4.1 Overvoltage protector.....	15
4.2 Protective spark gap.....	16
4.2.1 Purpose.....	16
4.2.2 Classification of triggering principles	16
4.2.3 Tests	16
4.3 Varistor	21
4.3.1 Purpose.....	21
4.3.2 Classification.....	21
4.3.3 Tests	22
4.4 Bypass switch	26
4.5 Disconnectors and earthing switches.....	26
4.5.1 Purpose.....	26
4.5.2 Classification.....	27
4.5.3 Tests	27
4.6 Discharge current-limiting and damping equipment (DCLDE).....	28
4.6.1 Purpose.....	28
4.6.2 Classification.....	28
4.6.3 Tests	28
4.7 Voltage transformer.....	32
4.7.1 Purpose.....	32
4.7.2 Classification.....	32
4.7.3 Tests	32
4.8 Current sensors.....	33
4.8.1 Purpose.....	33
4.8.2 Classification.....	33
4.8.3 Current transformer tests.....	33
4.8.4 Electronic transformer tests.....	33
4.8.5 Optical transducer tests	33
4.9 Coupling capacitor.....	34
4.9.1 Purpose.....	34
4.9.2 Tests	34
4.10 Signal column.....	34
4.10.1 Purpose.....	34
4.10.2 Tests	34
4.11 Fibre optical platform links.....	34
4.11.1 Purpose.....	34
4.11.2 Tests	35
4.12 Relay protection, control equipment and platform-to-ground communication equipment	35
4.12.1 Purpose.....	35
4.12.2 Classification.....	35

4.12.3 Tests	35
5 Guide	36
5.1 General	36
5.2 Specification data for series capacitors	36
5.3 Protective spark gap.....	37
5.4 Varistor	38
5.4.1 General	38
5.4.2 Varistor voltage-current characteristic	39
5.4.3 Varistor current and voltage waveforms during a system fault.....	40
5.4.4 Comments on varistor definitions and type tests	41
5.5 Bypass switch	44
5.6 Disconnectors	44
5.7 Discharge current-limiting and damping equipment.....	44
5.7.1 Purpose of the Discharge Current-Limiting and Damping Equipment	44
5.7.2 Location of the DCLDE	45
5.7.3 Configuration of the DCLDE.....	47
5.7.4 Miscellaneous comments regarding the DCLDE.....	48
5.8 Voltage transformer.....	49
5.9 Current transformer.....	49
5.10 Relay protection, control equipment and platform-to-ground communication equipment	49
5.11 Protection redundancy.....	51
5.12 Commissioning tests	52
5.13 Energization tests.....	52
Bibliography.....	54
Figure 1 – Typical nomenclature of a series capacitor installation	7
Figure 2 – Classification of overvoltage protection	16
Figure 3 – Illustration of waveforms in recovery voltage test	19
Figure 4 – Typical voltage-current characteristics of one specific metal oxide varistor element (95 mm diameter)	40
Figure 5 – Current, voltage and energy waveforms for a phase-to-earth fault.....	41
Figure 6 – Conventional location in the bypass branch.....	45
Figure 7 – DCLDE in series with the capacitor and the parallel connected MOV.....	45
Figure 8 – DCLDE in series with the capacitor and parallel to the MOV.....	45
Figure 9 – Only a discharge current-limiting reactor	47
Figure 10 – Discharge current-limiting reactor connected in parallel with a damping resistor. A varistor is connected in series with the resistor	47
Figure 11 – Discharge current-limiting reactor connected in parallel with a damping resistor. A small spark gap is connected in series with the resistor	47
Figure 12 – Current-limiting and damping equipment with and without damping resistor	48
Table 1 – Summary of varistor energy absorption design criteria (example)	38
Table 2 – Overview of typical series capacitor bank protections	51

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SERIES CAPACITORS FOR POWER SYSTEMS –

Part 2: Protective equipment for series capacitor banks

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.

International Standard IEC 60143-2 has been prepared by IEC technical committee 33: Power capacitors and their applications.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1994. It constitutes a technical revision. The main changes with respect to the previous edition are:

- updated with respect to new and revised component standards;
- updates with respect to technology changes. Outdated technologies have been removed, i.e. series capacitors with dual self-triggered gaps. New technologies have been added, i.e. current sensors instead of current transformers;
- the testing of spark gaps has been updated to more clearly specify requirements and testing procedures. A new bypass making current test replaces the old discharge current test;
- Clause 5, Guide, has been expanded with more information about different damping circuits and series capacitor protections

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
33/517/FDIS	33/521/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard 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.

A list of all the parts in the IEC 60143 series, under the general title *Series capacitors for power systems*, can be found on the IEC website.

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.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

SERIES CAPACITORS FOR POWER SYSTEMS –

Part 2: Protective equipment for series capacitor banks

1 Scope

This part of IEC 60143 covers protective equipment for series capacitor banks, with a size larger than 10 Mvar per phase. Protective equipment is defined as the main circuit apparatus and ancillary equipment, which are part of a series capacitor installation, but which are external to the capacitor part itself. The recommendations for the capacitor part are given in IEC 60143-1:2004. The protective equipment is mentioned in Clause 3 and 10.6 of IEC 60143-1:2004.

The protective equipment, treated in this standard, comprises the following items listed below:

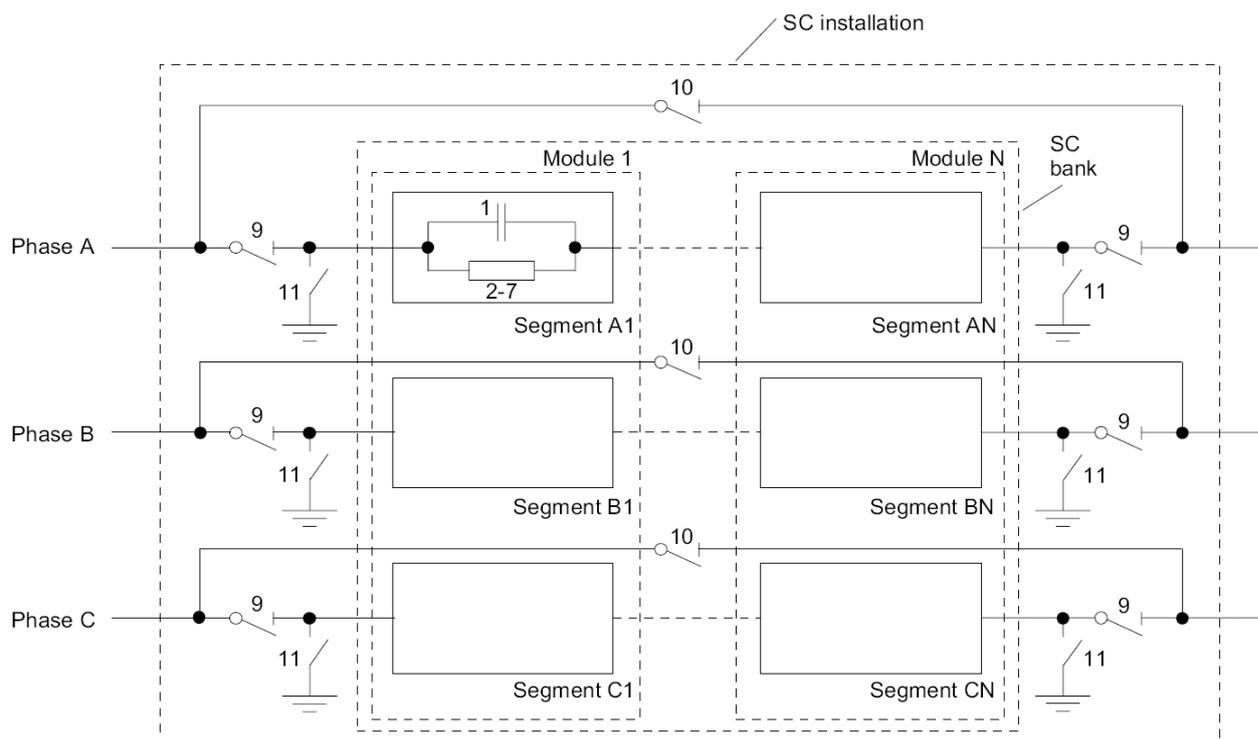
- overvoltage protector,
- protective spark gap,
- varistor,
- bypass switch,
- disconnectors and earthing switches,
- discharge current-limiting and damping equipment,
- voltage transformer,
- current sensors,
- coupling capacitor,
- signal column,
- fibre optical platform links,
- relay protection, control equipment and platform-to-ground communication equipment.

See Figure 1.

Principles involved in the application and operation of series capacitors are given in Clause 5.

Examples of fault scenarios are given in Clause 5.

Examples of protective schemes utilizing different overvoltage protectors are given in 4.1.



IEC 2904/03

Key

- 1 assembly of capacitor units
- 2-7 main protective equipment
- 9 isolating disconnector
- 10 bypass disconnector
- 11 earth switch

Figure 1 – Typical nomenclature of a series capacitor installation

NOTE Most series capacitors are configured with a single module, unless the reactance and current requirements result in a voltage across the bank that is impractical for the supplier to achieve with one module. Normally each module has its own bypass switch but a common bypass switch can be used for more than one module. See 10.2.3 of IEC 60143-1:2004 for additional details.

The object of this standard is:

- to formulate uniform rules regarding performance, testing and rating,
- to illustrate different kinds of overvoltage protectors,
- to provide a guide for installation and operation.

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 60044 (all parts), *Instrument transformers*

IEC 60044-1, *Instrument transformers – Part 1: Current transformers*

IEC 60044-8, *Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers*

- IEC 60060 (all parts), *High-voltage test techniques*
- IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*
- IEC 60076-6:2007, *Power transformers – Part 6: Reactors*
- IEC 60099-4:2009, *Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*
- IEC 60143-1:2004, *Series capacitors for power systems – Part 1: General*
- IEC 60255-5, *Electrical relays – Part 5: Insulation coordination for measuring relays and protection equipment – Requirements and tests*
- IEC 60255-21, *Electrical relays – Part 21: Vibration, shock, bump and seismic test on measuring relays and protection equipment – Section One – Vibration tests (sinusoidal)*
- IEC 60270, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*
- IEC 60358-1, *Coupling capacitors and capacitor dividers – Part 1: General rules*
- IEC 60358-2, *Coupling capacitors and capacitor dividers – Part 2: AC or DC single-phase coupling capacitor connected between line and ground for power line carrier frequency (PLC) application¹*
- IEC 60794-1-1, *Optical fibre cables - Part 1: Generic specification – General*
- IEC 60794-2, *Optical fibre cables - Part 2: Indoor cables – Sectional specification*
- IEC 61000-4-29, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-29: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations on d.c. input port immunity tests*
- IEC 61109, *Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria*
- IEC 61300-3-4, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-4: Examinations and measurements – Attenuation*
- IEC 61869-3, *Instrument transformers – Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers*
- IEC 61869-5, *Instrument transformers – Part 5: Additional requirements for capacitor voltage transformers*
- IEC 62271-1, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications*
- IEC 62271-102:2001, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches*
- IEC 62271-109:2008, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 109: Alternating current series capacitor bypass switches*

¹ To be published.

NOTE No standard exists for varistors for series capacitors (SC). The relevant tests for series capacitors varistors are therefore dealt with in this standard.

3 Terms and definitions

For the purpose of this document, the following terms and definitions apply:

NOTE The definitions of capacitor parts and accessories in this standard are in accordance with IEC 60143-1:2004.

3.1

back-up gap

supplementary gap which may be set to spark over at a voltage level higher than the protective level of the primary protective device, and which is normally placed in parallel with the primary protective device

3.2

bank protection

general term for all protective equipment for a capacitor bank, or part thereof

3.3

bypass current

current flowing through the bypass switch or spark gap in parallel with the series capacitor

3.4

bypass switch

device such as a switch or a circuit-breaker used in parallel with a series capacitor and its overvoltage protector to shunt line current for a specified time, or continuously

Note 1 to entry: Besides bypassing the capacitor, this device may also have the capability of inserting the capacitor into a circuit and carrying a specified current.

Note 2 to entry: This device shall also have the capability of bypassing the capacitor during specified power system fault conditions. The operation of the device is initiated by the capacitor control, remote control or an operator. The device may be mounted on the platform or on the ground near the platform.

3.5

bypass disconnecter

device to short-circuit the series capacitor after it is bypassed by the bypass switch

Note 1 to entry: Installed to keep the line in service while the bypass switch or series capacitor bank are maintained.

3.6

bypass fault current

current flowing through the bypassed series capacitor bank caused by a fault on the line

Note 1 to entry: See also “through fault current” and “partial fault current”.

3.7

bypass gap (protective gap)

gap, or system of gaps, to protect either the capacitor (type K) against overvoltage or the varistor (type M) against overload by carrying load or fault current around the protected parts for a specified time

3.8

bypass interlocking device

device that requires all three poles of the bypass switch to be in the same open or closed position

3.9

capacitor unbalance protection

device to detect unbalance in capacitance between capacitor groups within a phase, such as that caused by blown capacitor fuses or faulted capacitor elements, and to initiate an alarm or the closing of the bypass switch, or both

3.10

capacitor platform

structure that supports the capacitor/rack assemblies and all associated equipment and protective devices, and is supported on insulators compatible with phase-to-earth insulation requirements

3.11

continuous operating voltage

COV

MCOV of a varistor

(maximum) continuous operating voltage, COV is the designated permissible r.m.s. value of power frequency voltage that may be applied continuously between the varistor terminals

Note 1 to entry: COV of the series capacitor varistor is usually equal to the rated voltage of the series capacitor. This definition is different from the definition of COV (U_c) for a ZnO arrester according to IEC 60099-4:2009.

Note 2 to entry: In IEC 60099-4:2009 U_c is used to designate “continuous operating voltage”. However, in this standard, COV is used to designate “continuous operating voltage”. The reason is that U_c is used to designate “capacitor voltage” in the IEC 60143 series.

Note 3 to entry: Consideration of short-time overvoltages of the series capacitor, such as voltages produced by swing currents and overload currents, should be taken into account when the protective level of the varistor is determined.

3.12

discharge current-limiting and damping equipment

reactor or reactor with a parallel connected resistor to limit the current magnitude and frequency and to provide a sufficient damping of the oscillation of the discharge of the capacitors upon operation of the bypass gap or the bypass switch

3.13

external fault

line fault occurring outside the protected line section containing the series capacitor bank

3.14

fault-to-platform protection

device to detect insulation failure on the platform that results in current flowing from normal current-carrying circuit elements to the platform and to initiate the closing of the bypass switch

3.15

forced-triggered bypass gap

bypass gap that is designed to operate on external command on quantities such as MOV energy, current magnitude, or rate of change of such quantities

Note 1 to entry: The sparkover of the gap is initiated by a trigger circuit. After initiation, an arc is established in the power gap. Forced-triggered gaps typically operate only during internal faults.

3.16

insertion

opening of the bypass switch to place the series capacitor in service

3.17

insertion current

r.m.s. current that flows through the series capacitor bank after the bypass switch has opened

Note 1 to entry: This current may be at the specified continuous, overload or swing current magnitudes.

3.18

insertion voltage

peak voltage appearing across the series capacitor bank upon the interruption of the bypass current with the opening of the bypass switch

3.19

internal fault

line fault occurring within the protected line section containing the series capacitor bank

3.20

isolating disconnecter

devices to connect or disconnect the bypassed series capacitor from the line

SEE: Figure 1.

3.21

leakage current (of a varistor)

continuous current flowing through the varistor when energized at a specified power-frequency voltage

Note 1 to entry: At COV, and at a varistor element temperature equal to normal ambient temperature, the leakage current is usually mainly capacitive.

3.22

limiting voltage

maximum peak of the power frequency voltage occurring between capacitor unit terminals immediately before or during operation of the overvoltage protector, divided by $\sqrt{2}$

Note 1 to entry: This voltage appears either during conduction of the varistor or immediately before ignition of the spark gap. See IEC 60143-1:2004 for details.

3.23

loss-of-control power protection

means to initiate the closing of the bypass switch upon the loss of normal control power

3.24

main gap

part of the protective spark gap, that shall carry the fault current during a specified time, comprising two or more heavy-duty electrodes

3.25

minimum reference voltage (of a varistor)

U_{MRef}

minimum permissible reference voltage for a complete varistor or varistor unit measured at a specified temperature, typically $(20 \pm 15) ^\circ\text{C}$

Note 1 to entry: See Figure 4 and comments in Clause 5.

3.26

module

capacitor switching step

three-phase function unit, that consists of one capacitor segment (possibly several) per phase with provision for interlocked operation of the single-phase bypass switches

SEE: Figure 1.

Note 1 to entry: The bypass switch of a module is normally operated on a three-phase basis. However, in some applications for protection purposes, the bypass switch may be required to temporarily operate on an individual phase basis.

3.27**overvoltage protector**

quick-acting device (usually MOV or voltage triggered spark gap) which limits the instantaneous voltage across the series capacitor to a permissible value at power-system faults or other abnormal network conditions

3.28**platform**

structure that supports one or more segments of the bank and is supported on insulators compatible with phase-to-ground insulation requirements

3.29**platform control power**

energy source(s) available at platform potential for performing operational and control functions

3.30**platform-to-ground communication equipment**

devices to transmit operating, control and alarm signals between the platform and ground level, as a result of operation or protective actions

3.31**protective level** U_{pl}

maximum peak of the power frequency voltage appearing across the overvoltage protector during a power system fault

Note 1 to entry: The protective level may be expressed in terms of the actual peak voltage across a segment or in terms of the per unit of the peak of the rated voltage across the capacitor segment. This voltage appears either during conduction of the varistor or immediately before ignition of the spark gap.

3.32**rated short-time energy (of a varistor)**

maximum energy the varistor can absorb within a short period of time, without being damaged due to thermal shock

Note 1 to entry: The short time energy is usually expressed in J, kJ or MJ.

3.33**reference current (of a varistor)**

peak value of the resistive component of a power-frequency current used to determine the reference voltage of the varistor

Note 1 to entry: The reference current is chosen in the transition area between the leakage current and the conduction current region, typically in the range 1 mA to 20 mA for a single varistor column (see Figure 4).

3.34**reference voltage (of a varistor)**

peak value of power-frequency voltage divided by $\sqrt{2}$ measured at the reference current of the varistor

Note 1 to entry: Measurement of the reference voltage is necessary for the selection of correct test samples in the type testing.

3.35**reinsertion**

restoration of line current through the series capacitor from the bypass path

3.36**reinsertion current**

transient current flowing through the series capacitor after the opening of the bypass path during reinsertion

3.37**reinsertion voltage**

transient voltage appearing across the series capacitor after the opening of the bypass path during reinsertion

3.38**residual voltage (of a capacitor)**

voltage remaining between terminals of a capacitor at a given time following disconnection of the supply

3.39**residual voltage (of a varistor)**

peak value of voltage that appears between the terminals of a varistor during passage of current

3.40**section (of a varistor)**

complete, suitably assembled part of a varistor necessary to represent the behaviour of a complete varistor with respect to a particular test

Note 1 to entry: A section of a varistor is not necessarily a unit of a varistor.

3.41**segment**

single-phase assembly of groups of capacitors which has its own voltage-limiting devices and relays to protect the capacitors from overvoltages and overloads

SEE: Figure 1.

3.42**subharmonic protection**

device that detects subharmonic current of specified frequency and duration and initiates an alarm signal or corrective action, usually bypassing the capacitor bank

3.43**sustained bypass current protection**

means to detect prolonged current flow through the overvoltage protector and to initiate closing of the bypass switch

3.44**sustained overload protection**

device that detects capacitor voltage above rating but below the operating level of the overvoltage protector and initiates an alarm signal or corrective action

3.45**swing current**

highest value of the oscillatory portion of the current during the transient period following a large disturbance

Note 1 to entry: The swing current is measured in A r.m.s. and is characterized by a specified amplitude, frequency and decay time-constant. The swing current is propagated from electromechanical oscillations of the synchronous machines in the actual power system. The frequency of these oscillations is typically in the range 0,5 Hz to 2 Hz.

3.46

temporary overvoltage

temporary power-frequency voltage across the capacitor higher than the continuous rated voltage U_N of the series capacitor

3.47

thermal section (of a varistor)

section assembled in a suitable housing with the same heat transfer capability as the actual varistor

3.48

thermal runaway (of a varistor)

varistor condition when the sustained power losses of the varistor elements steadily increase due to increased temperature, while the varistor is energized

Note 1 to entry: The heat generated by the power losses of the varistor elements exceeds the cooling capability of the varistor housing, which causes further temperature rise and finally leads to a varistor failure if the process is not interrupted, e.g. the voltage is decreased or the varistor is bypassed.

3.49

thermal stability (of a varistor)

varistor condition after a temperature rise, due to an energy discharge and/or temporary overvoltage, when the varistor is energized at its COV under specified ambient conditions and the temperature of the varistor elements decreases with time

Note 1 to entry: This is the opposite of a "thermal runaway".

3.50

through fault current

partial fault current

component of the fault current that flows through the SC bank and not the total fault current (bus fault current)

Note 1 to entry: The component of the fault current which flows through the SC bank is called "through fault current" or "partial fault current".

Note 2 to entry: See IEC 60909.

3.51

trigger circuit

device to ignite the main gap at a specified voltage level or by external command

3.52

varistor

metal oxide varistor

non-linear resistor

device to act as overvoltage protection of the capacitor consisting of resistors with a non-linear voltage-dependent resistance (normally metal-oxide varistors)

Note 1 to entry: The term varistor is used when it is not necessary to distinguish between varistor element, varistor unit or varistor group.

3.53

varistor element

metal-oxide varistor element

dense ceramic cylindrical body, with metallized parallel end surfaces, constituting the smallest active component used in larger varistor assemblies

3.54

varistor column

metal-oxide varistor column

column comprising "n" varistor elements connected in series

3.55**varistor unit****metal-oxide varistor unit**

assembly of varistor elements, comprising one or several varistor columns mounted in a suitable housing

3.56**varistor group****metal-oxide varistor group**

single-phase group of varistor units connected in parallel and/or in series, carefully matched together, to form an overvoltage-limiting device for a series capacitor

3.57**varistor coordinating current**

magnitude of the maximum peak of power frequency varistor current associated with the protective level

Note 1 to entry: The varistor coordinating current waveform is considered to have a virtual front time of 30 μ s to 50 μ s. The tail of the waveform is not significant in establishing the protective level.

3.58**voltage triggered bypass gap**

bypass gap that is designed to spark over on the voltage that appears across the gap terminals

Note 1 to entry: The spark over of the gap is normally initiated by a trigger circuit set at a specified voltage level. A voltage-triggered bypass gap may be used for the primary protection of the capacitor and may spark over during external as well as internal faults.

4 Quality requirements and tests**4.1 Overvoltage protector**

The purpose and classification of an overvoltage protector are as follows.

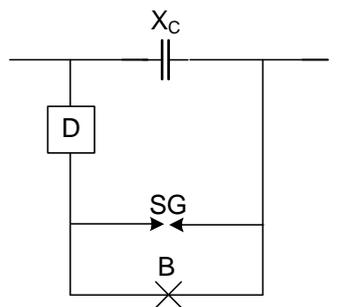
a) Purpose

The overvoltage protector is a quick-acting device which limits the instantaneous voltage across the series capacitor to a permissible value when that value would otherwise be exceeded as a result of a power-system fault or other abnormal network condition.

b) Classification

Three common alternatives of overvoltage protectors are listed below:

- single-protective spark gap (type K1). See Figure 2a).
- varistor (gapless) (type M1). See Figure 2b).
- varistor with bypass gap (type M2). See Figure 2c).



IEC 2336/12

2a) Single gap (type K1)

4.2.3.2.2 Type tests

Type tests are as follows.

a) Fault current test

A fault current test shall be performed to demonstrate that the main gap will withstand the rated power frequency bypass through fault current. The magnitude of the test current shall correspond to the maximum specified bypass through fault current (partial fault current) at the location of the series capacitor. The first peak of the applied test current shall correspond to the specified short-circuit current value including peak asymmetrical.

The duration of the test current shall conform with the maximum specified duration of the through fault current at the series capacitor bank location. Fault scenarios and maximum back-up line circuit breaker fault-clearing time shall be taken into account. Typical fault scenarios are given in Clause 5.

The test shall be performed once.

Criteria for acceptance of the test:

Self-triggered spark gap

No significant mechanical damage or excessive erosion, nor significant change in spark over voltage of the gap shall occur. This shall be verified by a power frequency spark over voltage test. The power frequency spark over voltage test shall be performed before and after the bypass making current test. The mean value of at least 10 subsequent tests shall be calculated and the ratio of single and mean values shall not exceed $\pm 10\%$.

Forced triggered spark gap

No significant mechanical damage or excessive erosion, nor significant change in spark over voltage of the gap shall occur. This shall be verified by:

- 1) A power frequency voltage withstand test with a voltage peak corresponding to 1,2 times the protective level voltage. The voltage wave form shall be purely sinusoidal with a duration of 60 seconds. This test is not needed if the bypass making current test is performed on the same test object after the fault current test. If the spark gap design contains auxiliary gaps the test is limited to the main gap only. Auxiliary gaps shall not be mounted to avoid self-triggering.
- 2) Functional test to verify correct triggering within claimed limits.

b) Bypass making current test

A test shall be performed to demonstrate that the main gap will withstand the combination of the capacitor discharge current and the power frequency fault current the gap will be exposed to during normal bypassing of the capacitor.

The magnitude of test current first peak shall be equal to the simulated maximum instantaneous sum of the capacitor discharge current at the maximum protective level and the power frequency fault current including offset. The simulation shall be performed on a power system model of the actual power system including a model of the actual series capacitor.

For each application the current peak shall not be less than 95 % of the required magnitude and the average of the peaks for all 20 applications shall not be less than the required magnitude. For each application the mean value of the symmetrical current during the specified test duration shall not be less than the maximum symmetrical series capacitor through the fault current.

The duration of the test current shall conform with the normal line circuit breaker fault clearing time.

The test current may be either a combination of a 50 Hz (60 Hz) current and a high frequency capacitor discharge current or a pure 50 Hz (60 Hz) current.

- If a combined test current is used then the damping of the capacitor discharge current shall correspond to the minimum expected damping in installation.
- If a pure 50 Hz (60 Hz) current is used, then the required magnitude of the first peak may be obtained by using an unsymmetrical current.

The test shall be performed 20 times.

Criteria for acceptance of the test:

Self-triggered spark gap

No significant mechanical damage or excessive erosion, nor significant change in spark over voltage of the gap shall occur. This shall be verified by a power frequency spark over voltage test. The power frequency spark over voltage test shall be performed before and after the bypass making current test. The mean value of at least 10 subsequent tests shall be calculated and the ratio between single and mean values shall not exceed $\pm 10\%$.

Forced triggered spark gap

No significant mechanical damage or excessive erosion, nor significant change in spark over voltage of the gap shall occur. This shall be verified by:

- 1) Either a recovery voltage test or a power frequency voltage withstand test with a peak corresponding to 1,2 times the protective level voltage. The voltage wave form shall be purely sinusoidal with a duration of 60 seconds. If the spark gap design contains auxiliary gaps the test is limited to the main gap only. Auxiliary gaps shall not be mounted to avoid self-triggering.
- 2) Functional test to verify correct triggering within claimed limits.

c) Recovery voltage test (forced triggered gaps only)

The test shall demonstrate that the gap has sufficient recovery voltage withstand taking into account the trigger circuit, to allow the capacitor to be reinserted after a successful line auto reclosure.

The test shall be performed on a test object that has been exposed to at least 10 applications in the bypass making current test.

The gap shall be exposed to the current described in the bypass making current test, followed by a test voltage which is applied, after the current is disconnected, for a time equal to the specified series capacitor reinsertion time.

The prospective 50 Hz (60 Hz) test voltage shall have a peak value of 1,5 times the protective level voltage of the series capacitor. The actual voltage across the gap shall be limited to not less than the protective level voltage by a varistor giving the appropriate voltage wave form (see Figure 3).

The duration of the test voltage shall be 100 ms.

Criteria for acceptance of the test: 1 out of 1 or 2 out of 3 successful applications.

In order to verify different combinations of protective levels and reinsertion times, the test may be combined with the bypass making current test. However, at least 10 applications in the bypass making current test shall be performed before verification of the recovery voltage.

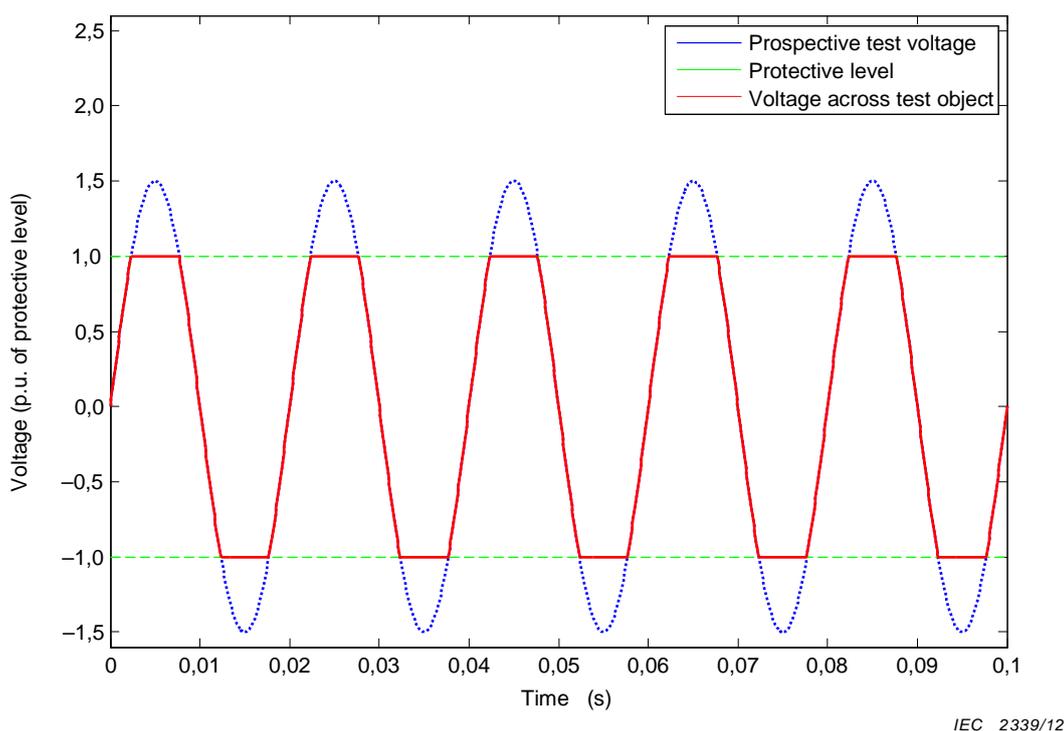


Figure 3 – Illustration of waveforms in recovery voltage test

d) Recovery voltage test (self-triggered gaps only)

The test shall demonstrate that the gap has sufficient recovery voltage withstand, taking into account the trigger circuit, to allow the capacitor to be reinserted after a successful line auto reclosure.

The test shall be performed on a test object that has been exposed to at least 10 applications in the bypass making current test.

The gap shall be exposed to the current described in the bypass making current test, followed by a test voltage which is applied when a time equal to the specified series capacitor reinsertion time has passed after the test current.

The 50 Hz (60 Hz) prospective test voltage shall have a peak value corresponding to the maximum expected series capacitor voltage (including offset) at reinsertion.

The test shall be carried out once.

Criteria for acceptance of the test: 1 out of 1 or 2 out of 3 successful applications.

e) Mechanical endurance test

This test is only applicable for designs that contain moving parts. The test shall be made at the ambient air temperature of the test location. The ambient air temperature shall be recorded in the test report. Auxiliary equipment forming part of the operating devices shall be included.

The test shall consist of 500 operating sequences where each sequence consists of a close operation followed by an open operation.

The operating times and the contact resistance (if applicable) shall be recorded before and after the test.

Criteria for acceptance of the test:

- The contact resistance (if applicable) measured before and after the test shall not exceed a value claimed by the manufacturer.
- The closing time, measured at the first and last application shall not exceed a value claimed by the manufacturer.

4.2.3.3 Trigger circuit

4.2.3.3.1 Self-triggered circuit routine test

Routine tests and type tests for a trigger circuit are as follows.

- a) Power-frequency spark over voltage test or power-frequency reference voltage test, whichever is applicable.
- b) Measurement of grading current or leakage current (if applicable).
- c) Check of internal corona (if applicable).
- d) For trigger units with sealed housings a leakage test shall be made on each unit by any sensitive method adopted by the manufacturer.

4.2.3.3.2 Self-triggered circuit type tests

A routine test shall be performed before the type test is carried out.

- a) Spark over voltage test
The test shall demonstrate that spark over occurs within the specified tolerance range.
- b) Environmental test
The test shall demonstrate that spark-over of the main gap occurs within the specified tolerance range, for the specified ambient conditions, such as temperature, air pressure, etc. (see IEC 60060-1).

4.2.3.3.3 Forced-triggered circuit routine test

Routine tests for a forced-triggered circuit are as follows.

- a) Functional test (can be performed at commissioning).
- b) Spark over voltage test of precision gap (if applicable).
- c) Measurement of grading current or leakage current (if applicable).
- d) Check of internal corona (if applicable).
- e) For trigger units with sealed housings a leakage test shall be made on each unit by any sensitive method adopted by the manufacturer.
- f) Measurement of component values.

4.2.3.3.4 Forced-triggered circuit type test

See 4.2.3.4.2.

4.2.3.4 Special tests (type test)

4.2.3.4.1 Complete gap test of self-triggered gap (optional)

The test shall verify that the complete gap, comprising the main gap and the trigger gap operates correctly. The test circuit shall comprise the complete gap. Oscillographic recordings shall be made.

4.2.3.4.2 Complete gap test of forced-triggered gap

The complete test sequence is as follows.

- a) Test of total bypass time at 0,95 times the protective level
The purpose of the test is to verify the total delay time from the instant when the varistor current reaches the high current threshold until gap conduction is not longer than claimed by the manufacturer. The test circuit shall comprise the main gap, trigger circuit and varistor overload protection.

A d.c. voltage with a magnitude not exceeding 0,95 times the protective level voltage is applied across the equipment. A bypass order is generated by subjecting the varistor overload protection to a current with a magnitude (considering CT ratios) that exceeds the threshold. The test shall be performed with any redundant system disabled.

The test shall be performed 5 times for both polarities of the applied d.c. voltage.

Criteria for acceptance of the test: Triggering of the main gap shall occur for all applications and the maximum delay time shall not exceed the time claimed by the manufacturer.

b) Verification of triggering and bypass time at minimum voltage

The purpose of the test is to verify the minimum voltage for triggering and the associated delay time from the instant a bypass is ordered until gap conduction. The test circuit shall comprise the main gap and trigger circuit.

An a.c. voltage with a crest value equal to the guaranteed minimum voltage for triggering is applied across the equipment. The test shall be performed with any redundant system disabled. The bypass order shall be generated in a cyclic manner at phase position 0, 30, 60 ... 330 with respect to the applied voltage.

Criteria for acceptance of the test: Bypass for all applications shall occur within the time specified by the manufacturer.

NOTE 1 This test is only applicable if the gap is able to bypass the series capacitor via an external bypass order, for example to mitigate high TRV on line circuit breakers.

c) Power frequency voltage withstand test

The test shall demonstrate that the complete gap including trigger circuits has sufficient voltage strength to withstand external faults without bypassing the series capacitor under the specified ambient conditions, such as temperature, air pressure, etc.

The test circuit shall comprise the complete overvoltage protector consisting of the main gap, the forced trigger circuit, and a varistor.

The gap shall be exposed to a 50 Hz (60 Hz) voltage that is limited by a varistor. The prospective test voltage shall have a peak value of at least 1,5 times the protective level voltage. The varistor shall limit the voltage across the equipment to the protective level voltage.

The duration of the test voltage shall be 0,5 seconds.

The test shall be carried out once.

NOTE 2 The test is applicable for forced triggered gaps only.

NOTE 3 The test voltage and the varistor protective level are adjusted to consider the influence of ambient conditions such as air pressure, altitude etc.

NOTE 4 The test duration is based on the transmission line fault clearing time and limited to 0,5 seconds in order to avoid excessive varistor energy.

4.3 Varistor

4.3.1 Purpose

The main purpose of the varistor is to act as overvoltage protector for the capacitor (type M1 and M2).

4.3.2 Classification

The varistors can be classified as follows, with regard to the working principle:

- varistor without a bypass gap (type M1);
- varistor with a bypass gap (type M2).

The tests for the two types are the same.

4.3.3 Tests

4.3.3.1 Routine tests

4.3.3.1.1 General

The routine tests are not described in detail, since many different test methods can ensure the same energy capability, protection performance and service reliability. The test programme given here, therefore, shall be seen as an example.

4.3.3.1.2 Energy withstand test

All varistor elements shall be subjected to an energy withstand test including repeated sequences of energy injections with cooling time in between. Each test sequence shall expose the varistor element to an energy injection higher than or equal to the rated short-time energy.

4.3.3.1.3 Residual voltage test

In order to verify that a given protective level is fulfilled a residual voltage test shall be performed on all individual varistor elements or complete assembled varistor units. The test should preferably be performed with a current amplitude of the same order of magnitude as the maximum prospective fault current for the varistor taking the current scale factor, n_C , into account. The waveshape may have any front time from μs to ms.

The protective level for the varistor group at the actual current waveshape and amplitude is then determined by the type test and the ratio between the residual voltage at routine test current and the residual voltage of the type test sections at the same current wave.

4.3.3.1.4 Leakage test

Completely assembled units with sealed housings shall be subjected to a suitable leakage test.

4.3.3.1.5 Reference voltage test

The reference voltage shall be measured on each varistor unit. The measured values shall be within a range specified by the manufacturer.

4.3.3.1.6 Measurement of power losses

The power losses shall be measured at a power-frequency voltage equal to the COV for each varistor unit and the power losses shall be within limits specified by the manufacturer.

A power-frequency voltage equal to the COV for each varistor unit shall be applied and the leakage current checked to be within guaranteed data. (At this voltage level the leakage current is almost purely capacitive.)

4.3.3.1.7 Partial discharge test

A satisfactory absence from internal partial discharges shall be demonstrated in all assembled varistor units by a sensitive method. The test shall be performed with an applied power-frequency voltage equal to at least 1,05 times the COV of the varistor unit. The measured value for the internal partial discharge shall not exceed 10 pC.

4.3.3.1.8 Current-sharing test

A maximum accepted deviation in current sharing between parallel columns of varistor elements within a complete varistor has to be specified by the manufacturer. Further, the

manufacturer shall present the routine test procedure to demonstrate that the current sharing will be within given tolerances.

4.3.3.2 Type tests

4.3.3.2.1 Test samples

Unless otherwise stated all type tests shall be performed on three sections of new varistor elements which have not been subjected to any previous tests except for evaluation purposes.

The scale factors in voltage, current and energy used to determine representative stresses to be applied on the test samples are further described in Clause 5.

4.3.3.2.2 Residual voltage test

The purpose of the measurement of residual voltage is to obtain the maximum residual voltage for a given design for all specified currents. This is derived from type test data and from the maximum residual voltage at an impulse current used for routine tests as specified and published by the manufacturer.

The maximum residual voltage of a given varistor design for any current amplitude is calculated from the residual voltage of sections tested during type tests multiplied by a specific scale factor. This scale factor is equal to the ratio of the declared maximum residual voltage, as checked during routine tests, to the measured residual voltage of the sections at the same current and waveshape.

4.3.3.2.3 Switching impulse residual voltage test

The test shall be performed on sections with a reference voltage of at least 3 kV. The sections shall consist of one single column of varistor elements, which need not be encapsulated in any form and shall be exposed to open air at an ambient temperature of $(20 \pm 15) ^\circ\text{C}$.

The sections are subjected to a switching current impulse as per IEC 60099-4:2009 with a virtual front time greater than $30 \mu\text{s}$ but less than $100 \mu\text{s}$ and a virtual time to half-value on the tail of roughly twice the virtual front time. The current amplitude is chosen to be approximately 0,5, 1,0 and 1,5 times the maximum prospective current of the varistor group divided by the current scale factor n_c . The residual voltage for the complete varistor is determined according to 4.3.3.2.2 for the section with highest residual voltage.

If the current magnitudes are the same and the virtual front time of the routine test waveform within $30 \mu\text{s}$ to $100 \mu\text{s}$ the routine test is sufficient and the type test is not required.

4.3.3.2.4 Accelerated ageing procedure

The test shall be performed in accordance with 8.5.2 of IEC 60099-4:2009 to determine if a correction factor has to be applied to continuous operating voltage COV in the energy withstand and power-frequency voltage stability test of 4.3.3.2.6.

4.3.3.2.5 Repeated energy withstand test

The purpose of this test is to verify that the varistor can withstand the current and energy duties for which it is designed, keeping any possible changes of the characteristic within tolerable limits.

The test shall be performed on varistor elements of each height and diameter of a design.

The energy withstand test shall be made on three new samples of sections which have not been subjected previously to any test except that specified above for evaluation purposes.

The sections shall consist of individual varistor elements either in still air or in the actual surrounding medium of the design (the choice is up to the manufacturer) and shall be exposed to open air at an ambient temperature of $(20 \pm 15) ^\circ\text{C}$.

A long-duration current impulse of approximately (2 to 4) ms virtual duration shall be applied to the section giving an energy injection equal to maximum prescribed varistor energy taking into account the energy scale factor, n_w .

The test shall be performed 20 times with a time interval between operations sufficiently long to permit the section to cool to ambient temperature.

Prior to the repeated energy withstand test the following measurements shall be made:

- reference voltage measurement;
- residual voltage measurement with current amplitude 500 A and waveshape 30/60 μs .

These measurements shall be repeated after the test and it shall be demonstrated that no significant changes have occurred. The reference voltage shall not have decreased by more than 5 % and the residual voltage shall not have changed by more than 5 %.

Furthermore there shall be no indication of mechanical damage (puncture, flashover or cracking).

NOTE Work performed and published by Cigré WG A3.17 has shown that the energy capability of varistor elements for events in the time range 200 μs to 10 s practically is independent of the application time. Therefore, in order to simplify the test procedure, rectangular current impulses have been selected for the energy application.

4.3.3.2.6 Energy withstand and power-frequency voltage stability test (thermal recovery test)

The purpose of this test is to verify that the varistor is able to withstand the maximum specified energy, followed by a possible temporary overvoltage sequence and thereafter show thermal stability energized at COV and at the highest ambient temperature.

The test shall be made on three new samples of sections which have not been subjected previously to any test except that specified above for evaluation purposes. The sections shall consist of varistor elements encapsulated in such a way that the section represents a true thermal model of the varistor group.

If the varistor group contains units with several parallel columns of varistor elements the prorated sections shall have the same number of parallel columns.

Further, if the reference voltage in the repeated energy withstand test in 4.3.3.2.5 has decreased for any of the test samples, the same varistor elements shall be used in this test. Otherwise new varistor elements shall be selected.

Prior to the test the following measurements shall be made:

- reference voltage measurement;
- residual voltage measurement with current amplitude 500 A and waveshape 30/60 μs .

These measurements shall be repeated after the test and it shall be demonstrated that no significant changes have occurred. The reference voltage shall not have decreased by more than 5 % and the residual voltage shall not have changed by more than 5 %.

The energy withstand and power-frequency voltage stability test starts with a preheating of the test sections to $(60 \pm 3) ^\circ\text{C}$ in an oven.

Within 5 min after removing the test section from the heat source the test shall be performed with the start temperature of the active parts at (60 ± 3) °C, measured by a temperature sensor. The energy shall be injected within 3 min by one or more long-duration current impulses with (2 to 4) ms virtual duration (number not specified). The current amplitude and number of the impulses shall be chosen such that the total energy discharged is not less than the maximum prescribed varistor energy taking into account the energy scale factor, n_w .

As soon as possible and in less than 5 s after the energy injection a power-frequency voltage equal to continuous operating voltage of the varistor group taking into account the voltage scale factor, n_v , shall be applied and maintained for 30 min. During the 30 min thermal stability shall be demonstrated i.e. resistive component of the leakage current and/or the temperature of the varistor elements and/or the power losses shall be measured and show a steady decrease.

If a temporary overvoltage sequence is specified for the varistor group after an energy absorption, the same or equivalent sequence shall be applied to the test sections taking the voltage scale factor into account.

If the temporary overvoltage is very high, the temperature may increase during this period. However, when the voltage is reduced to continuous operating voltage or a level which can be maintained during hours thermal stability shall be proved. For example after a fault sequence the capacitor voltage can be 35 % higher than continuous operating voltage for 30 min followed by an overload of 17 % for an additional 24 h. The varistor shall then be thermally stable after maximum energy and 35 % overload during 30 min. i.e. the varistor shall be able to cool down when subjected to the 24 h overload voltage.

NOTE 1 The COV can, if necessary, be adjusted according to the result of the accelerated ageing procedure of 4.3.3.2.4.

NOTE 2 If the same varistor elements as in the energy withstand test are used due to decreased reference voltage the voltage scale factor will be calculated from the initial measurement of reference voltage i.e. before the energy withstand test.

4.3.3.2.7 Verification of thermal sections

The test shall be performed in accordance with Annex B of IEC 60099-4:2009. In order to prove that the section is a true thermal model of the varistor group, the cooling curve of the section shall be compared to the cooling curve of the longest unit in the varistor.

The cooling curves shall be determined either as mean value or by checking the temperature of single varistor elements.

If it is chosen to check the temperature of one single varistor element, an element located between 1/2 to 1/3 of the unit length from the top shall be chosen.

Finally to prove thermal equivalency, the test section shall for all instants during the cooling period have a higher or equal temperature than the varistor unit.

NOTE Differences between the cooling curve of the thermal model and that of the real varistor (faster cooling of the thermal model) during the first 15 minutes are acceptable but can be compensated by a higher start temperature in the tests. The increase of the start temperature corresponds to the biggest temperature difference between the thermal model and the real varistor during the first 15 minutes.

4.3.3.2.8 Short-circuit test

The test is applicable for all varistors, i.e. also for designs that do not have a pressure relief device. In IEC 60099-4:2009 short-circuit (pressure relief) test procedures valid for conventional arresters are prescribed. The intention of these tests is to show that an internal short-circuit of the arrester will not cause explosive shattering of the housing which might cause accidental damage to surrounding or personnel equipment.

Since the varistor is connected across the capacitor bank, due regard has to be taken, that the test also covers the discharge of the capacitor bank from the protective level, i.e. that the capacitor will discharge through the varistor.

In the absence of an alternative procedure, pressure-relief tests with both high and low current shall be performed as per IEC 60099-4:2009.

For varistor units of the same type differing from each other only in insulator length, a successful test on the longest unit is regarded as valid also for all the shorter ones.

4.4 Bypass switch

The purpose of the bypass switch is to bypass and insert the series capacitor. Capacitor insertion is accomplished by opening of the bypass switch. It may also be used for automatic bypassing in case of faults and disturbances. Due regard shall be taken to the high-frequency inrush current when the capacitor is being bypassed. In some cases the bypass switch is connected in series with a protective spark gap, and used for insertion only (type K with two gaps). See IEC 60143-1:2004, 5.1.3. The bypass switch shall fulfil the requirements in IEC 62271-109:2008.

It is important to observe, that the breaking element(s) shall be rated to switch the actual capacitor segment, while the insulation to earth shall correspond to that of the power system.

The operation cycle shall be reversed, for example (O)-C-O-C and it is recommended that the bypass switch be equipped with two closing coils.

With regard to the required mechanical duty, IEC 62271-109:2008 defines two classes.

- Bypass switch class M1: Bypass switch with normal mechanical endurance (mechanically type tested for 2 000 operating sequences). This is the normal case.
- Bypass switch class M2: Frequently operated bypass switch for special service requirements and designed so as to require only limited maintenance as demonstrated by specific type tests (bypass switch with extended mechanical endurance, mechanically type tested for 10 000 operating sequences). This type of bypass switch is normally used on multi-segmented series capacitors where the control of the capacitor reactance is a frequent duty. This is the extended case.

4.5 Disconnectors and earthing switches

4.5.1 Purpose

4.5.1.1 Bypass disconnector

The purpose of the bypass disconnector is to bypass the series capacitor bank, provided that the series capacitor bank is already bypassed by the bypass switch. The purpose of the bypass disconnector is also to connect the series capacitor bank into the transmission system by opening the bypass disconnector. The isolating disconnectors and the bypass switch shall be closed when opening the bypass disconnector.

The opening of the bypass disconnector is difficult especially if the current-limiting damping circuit is connected in parallel with the capacitor and the reactor's inductance is high, see 5.7.

4.5.1.2 Isolating disconnector

The purpose of the isolating disconnector is to deliberately disconnect the series capacitor bank from the line.

Both bypass and isolating disconnectors enable the disconnection of the series capacitor bank without interrupting the operation of the line, for example at maintenance of the SC bank.

4.5.2 Classification

Disconnectors can be classified in different ways.

- a) With regard to their operating principle: centre-break, double-break, horizontal break, vertical break, pantograph, semi-pantograph, etc.
- b) With regard to operating mechanism: motor-driven, pneumatic, hydraulic, etc.

4.5.3 Tests

4.5.3.1 General

The following tests shall be performed. Coordination shall be made with IEC 62271-102:2001 and IEC 62271-1.

4.5.3.2 Routine tests

The routine test sequence is as follows:

- a) Dielectric test on the main circuit
7.1 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- b) Dielectric test on auxiliary and control circuits
7.2 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- c) Measurement of the resistance of the main circuit
7.3 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- d) Tightness test
7.4 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- e) Design and visual checks
7.5 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- f) Mechanical operating tests
7.101 of IEC 62271-102:2001 is applicable.

4.5.3.3 Type tests

6.1 of IEC 62271-102:2001 is applicable.

- a) Dielectric tests
6.2 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- b) Radio interference voltage (r.i.v.) tests
6.3 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- c) Measurement of the resistance of circuits
6.4 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- d) Temperature-rise tests
6.5 of IEC 62271-102:2001 is applicable.

- e) Short-time withstand current and peak withstand current tests
6.6 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- f) Verification of the protection
6.7 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- g) Tightness test
6.8 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- h) Electromagnetic compatibility test (EMC)
6.9 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- i) Test to prove the short-circuit making performance of earthing switches
6.101 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- j) Operating and mechanical endurance tests
6.102 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- k) Operation under severe ice conditions
This test may only be made on special request by the user. 6.103 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- l) Operation at the temperature limits
6.104 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- m) Test to verify the proper functioning of the position indicating device
6.105 of IEC 62271-102:2001 is applicable.
- n) Bus-transfer current switching tests
6.106 and Annex B of IEC 62271-102:2001 are applicable.
- o) Induced current switching tests
6.107 and Annex C of IEC 62271-102:2001 are applicable.

4.6 Discharge current-limiting and damping equipment (DCLDE)

4.6.1 Purpose

The purpose of the discharge current-limiting and damping equipment is to limit the current magnitude and frequency and to provide a sufficient damping of the capacitor discharge oscillations upon operation of the protective spark gap or closing of the bypass switch.

4.6.2 Classification

The damping equipment consists of a discharge current-limiting reactor and in some applications it may also include a damping resistor connected in parallel with the reactor. The reactor is almost exclusively of a dry type air core design. The resistor is also almost exclusively of a dry type design. The damping resistor may be connected continuously into the circuit or may be connected only during the operation of the bypass device.

The discharge current-limiting and damping equipment may be located in the bypass branch of the capacitor bank or in the capacitor branch. See 5.7.

4.6.3 Tests

4.6.3.1 General

Tests shall be performed on the reactor and the resistor separately.

4.6.3.2 Discharge current-limiting reactor

4.6.3.2.1 General

The routine, type and optional tests for the discharge current-limiting reactor shall be carried out in accordance with Clause 9 of the reactor standard IEC 60076-6:2007.

4.6.3.2.2 Routine tests

The following routine tests shall be performed:

- a) Measurement of winding resistance.
The d.c. and a.c. resistance (at 50 Hz or 60 Hz) shall be measured. IEC 60076-6:2007, 9.10.2 and IEC 60076-1 are applicable
- b) Measurement of inductance
IEC 60076-6:2007, 9.10.5 is applicable
- c) Measurement of loss and quality factor
IEC 60076-6:2007, 9.10.6 is applicable
- d) Winding overvoltage test
IEC 60076-6:2007, 9.10.7 is applicable. The test shall be performed three (3) times.

The impulse voltage test value shall be determined taking the protective voltage level into account. See IEC 60143-1:2004, 6.1.3.4.

A power frequency withstand voltage test can normally not be carried out on a discharge current-limiting reactor due to the low impedance of the reactor. A corresponding impulse voltage test is therefore used. Due to the low inductance value of the discharge current-limiting reactor, the wave shape of the impulse may be shorter than $1,2/50 \mu\text{s}$ and the wave may be distorted. This should be accepted.

4.6.3.2.3 Mandatory type tests

Mandatory type tests are as follows.

a) Short-circuit current test

A short-circuit current test shall be performed to demonstrate that the discharge current-limiting reactor will withstand the rated power frequency bypass through fault current (existing/future fault current). The magnitude of the test current shall correspond to the maximum specified bypass through fault current (partial fault current) at the location of the series capacitor. The first peak of the applied test current shall correspond to the specified mechanical short-circuit current value.

The duration of the test current shall conform with the maximum specified duration of the through fault current at the series capacitor bank location. Fault scenarios and maximum back-up line circuit breaker fault-clearing time shall be taken into account. Typical fault scenarios are given in Clause 5. The test shall be performed twice.

IEC 60076-6:2007, 9.10.10 is applicable.

b) Bypass making current test

A bypass making current test shall be performed to demonstrate that the discharge current limiting reactor will withstand the combination of the capacitor discharge currents and the power frequency fault currents the reactor will be exposed to during bypassing of the capacitor.

The magnitude of the test current shall be the simulated maximum instantaneous sum of the capacitor discharge current at maximum protective level and the power frequency fault current including offset. The simulation shall be performed on a power system model of the actual power system including a model of the actual SC.

The frequency of the test current shall correspond to the discharge current frequency of the actual series capacitor bank. However, a 50 Hz or 60 Hz half-cycle current wave with the same amplitude supplied from a short-circuit generator may also be used.

The duration of the test current shall be selected in order to give the same thermal stress on the reactor as expected during service conditions. Consideration shall be taken to whether the reactor may be exposed to multiple capacitor discharges within a few seconds time due to high speed auto-reclosing of the transmission line.

The bypass making current test shall be performed 20 times.

Criteria for acceptance of the test: there shall not be any evidence of excessive heating, nor mechanical nor electrical damage.

c) Temperature rise test

During the temperature rise test, the damping resistor, if any, shall also be installed in its place, if it is located inside the reactor.

IEC 60076-6:2007, 9.10.8 is applicable.

4.6.3.2.4 Mandatory type tests, where applicable.

The following special tests shall be performed when specifically requested by the purchaser.

a) Modified short-circuit/bypass making current test

As an alternative to the tests in items a) and b) of 4.6.3.2.3, a modified short-circuit/bypass making current test may be performed. This test will include both the requirements in the bypass making current test and the fault current test.

IEC 60076-6:2007, 9.10.15 is applicable.

b) Mechanical resonance test

IEC 60076-6:2007, 9.10.16 is applicable.

c) Measurement of winding resistance and inductance versus frequency

Measurement of the winding resistance and inductance as a function of frequency, in a specified frequency interval above power frequency, shall be carried out with an approved bridge method at reduced voltage. The frequency range shall be the frequency interval specified by the series capacitor manufacturer.

4.6.3.3 Damping resistor

4.6.3.3.1 Routine tests

Routine tests to be carried out are as follows.

a) Resistance measurement

The resistance shall be measured at a.c. at the discharge frequency as well as at d.c.

A low-voltage d.c. measurement is sufficient, if the ratio between this d.c. measurement and the actual a.c. resistance is known from the discharge type test at high voltage.

b) Leakage test

If applicable to the actual resistor design.

c) Reference voltage test

If the resistor contains a series varistor, a reference voltage test shall be carried out.

d) Sparkover voltage test

The auxiliary spark gap, if any, shall be subjected to a spark over voltage test.

e) Partial discharge test (internal corona test)

The test shall be carried out in accordance with IEC 60270. The test is only relevant to the part of the damping resistor which contains a varistor if applicable.

4.6.3.3.2 Type tests

The resistor shall be tested to verify that the energy withstand, the high-frequency current withstand and the power-frequency fault current withstand are according to the specification.

For practical reasons, the test can be carried out on a smaller model of the damping resistor. The design of the model shall be similar to the design of the actual resistor.

a) Energy absorption capability test

The energy absorption capability of the resistor shall be tested by discharging a capacitor bank through the resistor. The energy shall be based on the expected resistor short time energy accumulation during in service conditions also considering multiple capacitor discharges within a short period of time due to high speed auto-reclosing of the transmission line (see Clause 5). The test shall be performed 10 times. The test sample shall be allowed to cool down to ambient temperature between the tests.

Before and after the test the resistance of the test sample shall be checked. It shall be demonstrated that no significant changes have occurred. The resistance shall not have changed by more than $\pm 5\%$.

Furthermore there shall be no indication of mechanical damage (puncture, flashover or cracking).

b) Discharge current test

A discharge current withstand test shall be performed to demonstrate that the resistor will withstand the discharge current that the resistor will be exposed to during bypassing operations of the capacitor. Injection of current with the correct amplitude into the resistor shall be made from a charged capacitor bank. The current amplitude shall not be less than 1,05 times the maximum discharge current in service and the time to current crest shall not be less than in actual service. The test shall be performed 2 times. The test sample shall be allowed to cool down to ambient temperature between the tests.

Before and after the test the resistance of the test sample shall be checked. It shall be demonstrated that no significant changes have occurred. The resistance shall not have changed by more than $\pm 5\%$.

Furthermore there shall be no indication of mechanical damage (puncture, flashover or cracking).

c) Power-frequency fault current withstand test

The test shall verify that the resistor can withstand the power-frequency current which follows after the high-frequency capacitor discharge current (if applicable). A power-frequency current with correct magnitude and duration shall be injected into the resistor. The test shall be performed once.

Before and after the test the resistance of the test sample shall be checked. It shall be demonstrated that no significant changes have occurred. The resistance shall not have changed by more than $\pm 5\%$. Since the resistance is related to the temperature of the resistor element, it shall be taken into account in the evaluation of results.

Furthermore there shall be no indication of mechanical damage (puncture, flashover or cracking).

NOTE If the resistor includes a series varistor this test is not applicable, since the varistor will prevent power frequency currents to flow.

d) Impulse voltage test of enclosure

The resistor enclosure shall be subjected to an impulse voltage test. The impulse voltage amplitude shall be calculated based on the protective voltage level and applying a safety factor of 1,2. See IEC 60143-1:2004, 6.1.3.4.

15 impulses of both polarities shall be applied. A maximum of 2 external flashovers are allowed for each polarity.

The impulse generators of high voltage laboratories may not be able to provide 1,2 /50 μ s impulse voltage with correct wave shape due to the low resistance of the damping resistor. The 'tail' may be shorter than 50 μ s.

e) Extinguishing of the spark gap of the damping resistor

In some cases there is a small spark gap connected in series with the damping resistor, which connects the resistor into the circuit only during the discharge oscillation. The extinguishing of the spark-gap current, against the power frequency voltage across the parallel connected reactor, after the high frequency discharge current has ceased, shall be demonstrated by testing, otherwise the power-frequency test according to c) shall be performed and the resistor be rated for continuous power losses.

4.7 Voltage transformer

4.7.1 Purpose

Voltage transformers in series capacitor banks may have different purposes:

- For series capacitors connected to low-voltage systems, magnetic voltage transformers may be used to measure the voltage across the capacitor segment (two high-voltage terminals) or the phase-to-earth voltage, (one high-voltage terminal and one low-voltage or earthed terminal). Magnetic voltage transformers may also be used as a discharge device.
- For series capacitors connected to high-voltage systems, capacitive voltage transformers (CVTs) may be used to measure phase-to-earth voltage. CVTs can also be used to supply auxiliary power to protection and control equipment located on the platform (inverted CVT). See Clause 5.

4.7.2 Classification

Voltage transformers can be classified in different ways.

a) With regard to where they are located:

- voltage transformer placed at earth potential. The insulation level shall correspond to the power-system voltage;
- voltage transformers placed on platform potential. The insulation level shall be according to Clause 6 of IEC 60143-1:2004.

b) With regard to design:

- inductive (magnetic) voltage transformers. Inductive voltage transformers are generally oil insulated and equipped with an iron core;
- capacitor voltage transformers (CVT). A CVT consists of a capacitive voltage divider (CVD) and an inductive (magnetic) output transformer.

4.7.3 Tests

4.7.3.1 General

Tests (routine/type) of the voltage transformer, shall be made in accordance with IEC 61869-3 or IEC 61869-5.

4.7.3.2 Additional type tests for inductive voltage transformers

If the service conditions are such, that an inductive voltage transformer forms a closed circuit with a capacitor, the following type tests shall be carried out.

a) Discharge current test

The purpose of the test is to verify, that the voltage transformer can electrically and mechanically, withstand the dynamic current at a capacitor discharge.

The test shall preferably be carried out by charging a capacitor with a d.c. voltage, and then discharging the capacitor through the voltage transformer. The amplitude of the discharge current shall be 110 % of the actual discharge current of the installation, when the capacitor is charged to at least the protective level. The test shall be performed 10 times.

No damage to the winding and the terminals of the voltage transformer shall occur.

b) **Energy dissipation capability test**

The purpose of the test is to verify, that the voltage transformer can absorb the specified energy at consecutive capacitor discharges. The energy per discharge and the number of consecutive capacitor discharges shall be specified. See further clarifications in Clause 5.

The test shall preferably be carried out by charging a capacitor with d.c. voltage, and then discharging the capacitor through the voltage transformer. Each shot shall have an energy which is the sum of the energies of the specified number of the consecutive capacitor discharges. The test shall be performed five times with a cooling period in between tests consistent with actual operating practice.

No excessive temperature rise nor any damage to the voltage transformer shall occur.

4.8 Current sensors

4.8.1 Purpose

The main purpose of current sensors, is to supply measurements for protection, see Clause 5.

Current transformers may also be used to supply auxiliary power to protection and control equipment located on the platform.

4.8.2 Classification

Three types of sensors can be used to measure current flow on the platform. These sensors include iron core current transformers, electronic transformers which integrate electronics with the current transformer, and optical current transducers.

Current sensors may be classified with regard to the potential where they are located:

- current sensors placed on ground potential. The insulation level shall correspond to the power-system voltage;
- current sensors placed on platform potential. The insulation level shall be according to Clause 6 of IEC 60143-1:2004.

Information about different CTs feeding the different SC protections is given in Clause 5 and IEC 60143-1:2004.

4.8.3 Current transformer tests

Routine and type tests of the current transformers shall be made in accordance with IEC 60044-1.

4.8.4 Electronic transformer tests

Routine and type tests of the current transformers shall be made in accordance with IEC 60044-8.

4.8.5 Optical transducer tests

Routine and type tests of the current transformers shall be made in accordance with applicable parts of the IEC 60044 series.

4.9 Coupling capacitor

4.9.1 Purpose

The purpose of a coupling capacitor in a series capacitor installation is to supply auxiliary power to protection and control equipment located on the platform.

The insulation level shall correspond to the system voltage.

4.9.2 Tests

Tests (routine/type) of coupling capacitors shall be made in accordance with IEC 60358-1 and IEC 60358-2.

4.10 Signal column

4.10.1 Purpose

The purpose of the signal transmission system is to feed information and/or commands from the platform level down to the control cabinet inside the control building. Also the commands from the control cabinet up to the platform level (for instance forced triggering command) are sent through the signal transmission system.

The signal transmission system typically consists of three main sub-components: platform electronics, fibre optic signal column and fibre optic cable. The platform electronics is treated in 4.12. Optical fibre cables are covered by IEC 60794-1-1 and IEC 60794-2.

The signal column to which 4.10 refers is specifically a high voltage insulated fibre optic link which may be subject to operational voltages greater than 1 000V.

4.10.2 Tests

The signal column has both insulation and optical test requirements.

Dielectric tests

For the purpose of electrical testing and visual insulation checks the signal column shall be tested in accordance with IEC 61109, and to this end, as well as in this standard, it is defined as a “hybrid” insulator, which is not normally designed to support mechanical loads.

The type test voltage withstand levels shall match those of the platform, and the signal column may be tested in such a way as to simulate its position under or next to the platform.

Optical tests

For the purpose of optical testing the signal column shall be tested in accordance with IEC 61300-3-4. Exactly which method from this standard is to be employed shall be determined between the customer and the supplier, based on the length of the fibres, fibre type and the optical connectors (if any) used.

4.11 Fibre optical platform links

4.11.1 Purpose

The purpose of the fibre optical platform links is to provide a path for transmission of optical signals between the current sensors located at different locations on the platform and the fibre optical signal column. In addition the fibre optical platform links provide insulation between the current sensors and the platform.

4.11.2 Tests

4.11.2.1 General

The dielectric tests shall be carried out in general accordance with IEC 61109 and IEC 60143-1:2004.

4.11.2.2 Routine tests

Routine tests are as follows.

- a) visual inspection;
- b) continuity test and light attenuation test of each optical fiber.

4.11.2.3 Type tests

Dielectric tests, wet.

4.12 Relay protection, control equipment and platform-to-ground communication equipment

4.12.1 Purpose

The purpose of the relay protection equipment is to supervise all functions of the series capacitor installation as well as self-supervision methods for signal transmission from platform to earth and provide protective action in the event of faults such as capacitor unbalance, sustained gap arcing, flashover to platform etc. The protections normally initiate bypassing of the series capacitor, by closing the bypass switch and/or by triggering a spark gap followed by closing of the bypass switch.

The purpose of the control equipment is to provide control functions for the series capacitor installation, such as insertion and bypassing.

The purpose of the platform-to-ground communication equipment is to provide communication between the equipment mounted on the platform and the equipment located on the ground and vice versa.

The communication can be accomplished by mechanic, pneumatic, magnetic or optic signal transfer. At present, optic signal transfer by means of optical fibres is the predominant method in use.

4.12.2 Classification

Information about different protections and control functions is provided in Clause 5.

4.12.3 Tests

4.12.3.1 General

Testing of the SC protection and control system consists of routine tests, type tests and operational tests. The purpose of the type tests is to verify proper design of the equipment that it is capable of operating in specified ambient conditions and meet the specified performance and electromagnetic compatibility requirements.

Coordination shall be made with IEC 60068-2 for environmental conditions, IEC 60255-21 for mechanical tests, IEC 60255-5 for dielectric tests, IEC 61000-4-11 and IEC 61000-4-29 for auxiliary power voltage variations and IEC 61000-4 for electromagnetic compatibility requirements unless otherwise stated.

4.12.3.2 Routine tests

4.12.3.2.1 General

The following tests shall be carried out as a minimum. The listed tests shall apply to the platform located part of the equipment, to the platform-to-earth communication equipment and to the ground located part of the equipment.

- a) Visual examination.
- b) Dielectric withstand test (IEC 60255-5).
- c) 100 h burn-in test.
- d) Operational test (4.12.3.2.2).

The objective of the tests is to verify the manufacturing quality of all components and of the complete assembly.

4.12.3.2.2 Operational test

The procedure consists of injecting signals that simulate conditions requiring protective action into each control input. Each output is monitored during these tests. All hardware and software settings are verified. Software settings may be verified by software techniques.

If optical platform-to-ground communication is used, the output power of the transmitters shall be checked.

An optical loss test shall be performed on each fibre of the platform-to-ground communication insulators.

4.12.3.3 Type tests

The following type tests shall be carried out as a minimum.

- a) Environmental tests: Dry heat test and Damp heat test (IEC 60068-2).
- b) Dielectric test (IEC 60255-5).
- c) Electromagnetic compatibility tests (IEC 61000-4).
- d) Mechanical test (IEC 60255-21).

The listed test shall apply to the platform located part of the equipment, to the platform-to-ground communication equipment and to the ground located part of the equipment.

NOTE The pre-commissioning tests at site, on relay protection, control equipment and platform-to-earth communication equipment, are normally specified. These tests are performed before the bank is energized to the high-voltage network. See Clause 5.

5 Guide

5.1 General

A brief summary of some principles involved in the application and operation of series capacitors is presented here.

5.2 Specification data for series capacitors

The following data should be supplied to the manufacturer by the purchaser:

- initial and ultimate capacitive reactance per phase (Ω /phase);
- initial and ultimate rated current per phase (A/phase);
- maximum emergency current magnitude (A) and duration (s, min, h);

- swing current (A, s);
- maximum protective voltage level (kV peak);
- minimum protective voltage level (kV peak);
- maximum reinsertion current (A);
- maximum fault current through the series capacitor bypass circuit, with the series capacitor bypassed (initial/ultimate) (kA). Note that this current is smaller than the total fault current to earth;
- speed of reinsertion following clearing of system fault (external) when a gap is used (ms);
- line length (km);
- line parameters (r/km, x/km, b/km) (positive and zero sequence components);
- series capacitor location²;
- type of line protection relays;
- normal and highest phase-to-phase voltage of system (kV);
- insulation level between capacitor platform and ground: LIWL, SIWL, short-duration power-frequency withstand voltage (kV peak-kV peak-kV r.m.s. respectively);
- altitude above sea level (m);
- maximum wind speed (m/s);
- maximum ice load (N/m²);
- seismic requirements;
- ambient temperature range (°C);
- station supply voltages available at ground level (V a.c., V d.c.);
- maximum permissible fault-current duration (ms);
- minimum permissible line circuit-breaker reclosing time after clearing fault and number of reclosing operation (ms);
- required number and function of control and alarm channels required to ground level;
- minimum number and functions of operation signals to be monitored, if requested.

5.3 Protective spark gap

Spark gaps are used in series capacitor banks in order to protect the capacitor units against overvoltages (self-triggered gaps) or to protect the metal oxide varistor against overload (forced-triggered gaps).

The spark gaps can be self-triggered or forced-triggered.

Self-triggered spark gap

The spark gap used for the conventional series capacitor without varistors, is the self-triggered (voltage triggered) type spark gap. It sparks over when the voltage across its terminals reaches the spark over setting.

The self-triggered spark gap shall have an accurate spark over voltage tolerance in the order of $\pm 3\%$ to $\pm 6\%$.

Forced triggered spark gap

² One line diagram of the actual power system is preferable.

In the varistor scheme, the self-triggering voltage of the spark gap is adjusted to be higher than the protective level voltage U_{PL} . The spark gap is triggered by a forced triggering control circuit in case the thermal capability of the metal oxide varistor is exceeded.

5.4 Varistor

5.4.1 General

The purpose of the varistor is to limit the transient overvoltage across the capacitor by conducting the excess transmission line current, usually due to power-system faults, that would otherwise cause excessive capacitor voltage. This condition occurs on each half-cycle during the duration of the overcurrent condition. See Figure 5. The maximum voltage that results across the series capacitor is dependent upon the non-linear voltage-current characteristics of the varistor and the magnitude of the excess-current. Because the varistor voltage increases with current, the maximum protective level is usually defined at the maximum expected varistor current during a power-system fault. See Figure 4

Selection of the protective level of the varistor shall consider the voltages associated with non-fault currents through the series capacitor such as:

- normal and rated current
- emergency currents (magnitude/duration)
- swing currents

The varistor shall withstand these voltages, after having been exposed to rated short-time energy injection. Maximum ambient temperature shall be considered.

The varistor shall be designed for the maximum energy it will be exposed to during a defined fault situation in the network. The fault-situations for which the varistor shall be designed is usually specified in a fault duty cycle stating types of faults, fault duration and pause time between successive faults. The length of the pause time may be a decisive factor on the design of the varistor. An example of a fault duty cycle is shown in Table 1.

Table 1 – Summary of varistor energy absorption design criteria (example)

Fault type	Time duration
External phase-to-earth	5 cycles, 0,5 s open – 12 cycles
Phase to phase	5 cycles, 0,5 s open – 12 cycles
Three-phase	12 cycles
Internal phase-to-earth	5 cycles ^a , 0,5 s open – 12 cycles ^a
Phase to phase	5 cycles ^a , 0,5 s open – 12 cycles ^a
Three-phase	12 cycles ^a
NOTE It is most common to study single-phase and three-phase faults.	
^a The varistor may be bypassed by the back-up gap during the 5 cycles and 12 cycles period of internal faults.	

The energy which is developed during a specified fault duty cycle in a varistor protecting a series capacitor depends mainly on the factors listed below:

- varistor current magnitude;
- voltage-current characteristics of the varistor;
- total fault duration;
- instant of fault inception.

The energy development process is illustrated in the waveforms shown in Figure 5.

Current, voltage and energy waveforms for an internal phase-to-earth fault are shown.

A commonly used philosophy to reduce the energy requirements and hence the cost of a varistor is to allow fast bypassing of the varistor by means of the triggered gap for faults on the compensated line section (internal faults). However, the varistor shall be designed to withstand the energy from specified fault duty cycles outside the compensated line section (external faults) without fast bypassing. See Table 1.

An electromagnetic transients computer study based on system short-circuit equivalents, transmission line parameters (positive and zero sequence) and varistor characteristics is generally required to determine the proper size and ratings of the varistors. The energy absorption shall correspond to the worst possible combination of fault type, fault duration and reclosing practices for example two phase-to-earth faults or one three-phase fault.

Required system information

- equivalent system positive and zero-sequence impedances;
- system load flows;
- maximum primary fault-clearing time;
- reclosing time after primary fault clearing;
- number of reclosures;
- maximum total back-up clearing time;
- reclosing time after back-up clearing.

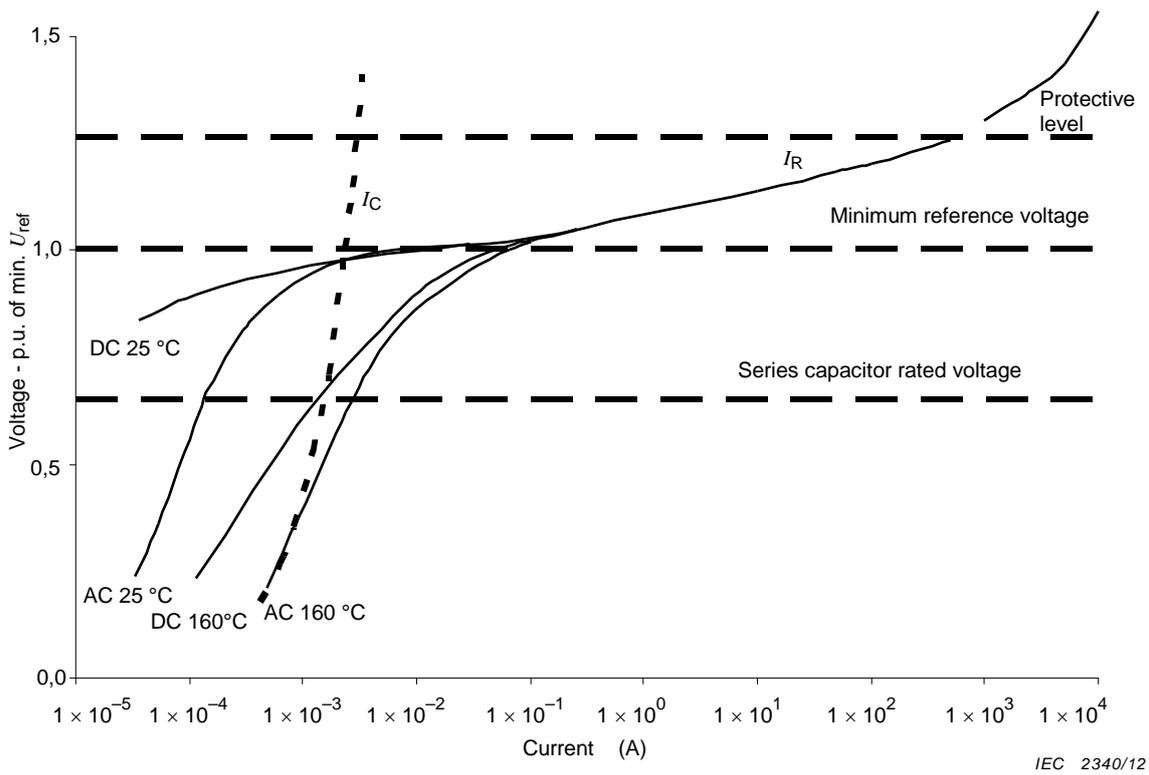
5.4.2 Varistor voltage-current characteristic

Typical voltage-current characteristics of one specific metal-oxide varistor element is shown in Figure 4. Series capacitor rated voltage, reference voltage and protective level of the varistor are indicated.

Historically, the U - I -characteristics of a varistor have been described by a formula

$$I = kU^\alpha$$

where k and α are constants for a specific material. If such a formula is used for the resistive component of the current through metal oxide discs, it shall be emphasized that a single exponent cannot describe the complete characteristic. The applicable exponents depend on the conduction region and can vary between 3 and 50. Even in a specific region generalized numbers are not applicable and the actual varistor characteristic shall be used for the determination of the constants.



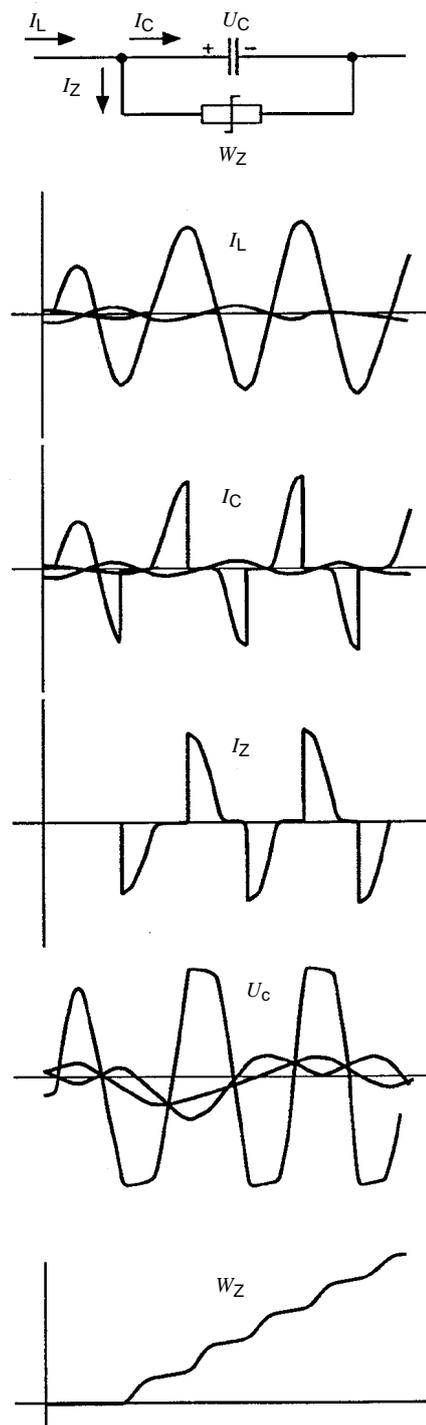
I_R = Resistive component

I_C = Capacitive component

Figure 4 – Typical voltage-current characteristics of one specific metal oxide varistor element (95 mm diameter)

5.4.3 Varistor current and voltage waveforms during a system fault

Current, voltage and energy waveforms for a phase-to-earth fault are shown in the diagrams in Figure 5.



IEC 2341/12

Figure 5 – Current, voltage and energy waveforms for a phase-to-earth fault

5.4.4 Comments on varistor definitions and type tests

5.4.4.1 General

Hereafter important clarifications and comments to the varistor definitions and type tests of Clause 2 are given.

5.4.4.2 Comment on minimum reference voltage (U_{MRef})

U_{MRef} is used in the designation of the varistor. In the routine test of all assembled varistor units it should be checked that the reference voltage is equal to or higher than U_{MRef} in order to secure that no varistor unit with too high power losses is accepted.

NOTE 1 The ratio U_{Ref}/U_{MRef} is used to determine the scale factor of a section used for type testing. U_{Ref} is the reference voltage of the section and U_{MRef} is the minimum permissible reference voltage given for the complete varistor.

NOTE 2 This definition of U_{MRef} means, depending on the choice of reference current, that U_{MRef} will almost be equal to the term "duty cycle voltage rating" (ANSI³) or "rated voltage" (IEC) for surge arresters. However, these definitions are not straightforward and defined by test procedures. As the "rated voltage" of a varistor intended for the protection of an EHV series capacitor could easily be mixed up with the rated voltage of the series capacitor, this term has been avoided here.

5.4.4.3 Selection of test samples for type tests

Unless otherwise stated all type tests shall be performed on three sections of new varistor elements which have not been subjected to any previous tests except for evaluation purposes.

The scale factors in voltage, current and energy used to determine representative stresses to be applied on the test samples shall be determined as follows:

a) *The voltage scale factor n_v*

The ratio between the minimum-volume of the varistor elements used in the complete varistor for the same number of parallel columns as in the test sample and the volume of the varistor elements used as test samples, is defined as n_v .

The reference voltage of the test section U_{Ref} should be equal to U_{MRef}/n_v . In case $U_{Ref} > U_{MRef}/n_v$ for an available test sample the factor n_v has to be reduced correspondingly.

b) *The current scale factor n_c*

is determined as the ratio between the total number of parallel columns of the complete varistor and the number of parallel columns of the test sample.

c) *The energy scale factor n_w*

It is determined as $n_v \times n_c \times$ the maximum permissible tolerance in current sharing between parallel columns.

5.4.4.4 Comment on residual voltage type test

The purpose of the measurement of the residual voltage is to obtain the maximum residual voltage for a given design for all specified currents, i.e. to verify that a given protective level is fulfilled.

The routine test procedure to control residual voltage shall allow for measurements of residual voltage on complete varistors, varistor units or individual varistor elements. In the latter case the sum of the residual voltages measured on units (if several units in series) or on elements shall be added to constitute the residual voltage for the complete varistor.

The maximum residual voltage at an impulse current used for routine tests shall be specified and published in the manufacturer's type test data.

The measured residual voltages of the test sections at any specified current and waveshape are then multiplied by the ratio of the maximum residual voltage at the routine test current to the measured residual voltage for the section at the same current to obtain maximum residual voltages for the complete varistor.

³ American National Standards Institute.

Example

All varistor elements for a specific varistor are classified at 500 A with a current pulse of 8/20 μs (virtual front time 8 μs , time to half value 20 μs). A specified number of varistor elements are then stacked in series. As many stacks of elements as required to obtain the number of parallel column of the varistor are built. The maximum residual voltage at the routine test current of 500 A to 8/20 μs for any column, given by the sum of the residual voltages of the individual varistor elements, is prescribed to a certain value (U_M).

A test section chosen for residual voltage tests is at first tested at the same current of 500 A to 8/20 μs , giving a residual voltage of U_{TM} .

The ratio U_M/U_{TM} is then used to recalculate the measured residual voltages of the test section at specified currents and waveshapes to representative figures for the complete metal oxide varistor.

5.4.4.5 Comment on accelerated ageing procedure

Regarding the accelerated ageing procedure there is an agreement between the IEC and IEEE⁴ working groups preparing standards for the testing of a.c. arresters, about the main principles of the testing procedure. Since there are no other essential differences these main principles can also be applied for varistors in series capacitor applications. For a.c. arresters the voltage distribution along the arresters due to stray capacitances to earth is considered. This is done by using a formula in which the height of the arrester is included. However, most of the varistors for series capacitors are short. Further, the great number of parallel units will secure a linear voltage distribution. Therefore this consideration of arrester height is omitted for metal oxide varistors.

5.4.4.6 Comment on current sharing

To meet high energy requirements parallel columns of varistor elements may have to be used in surge arresters. For the application as protection of series capacitors this is the usual case. Metal oxide varistors with as many as 400 parallel columns have been commissioned. Of greatest importance is to secure a good current and energy sharing to avoid an uneconomical design. Taking into account the extreme non-linearity of the material, even rather small differences in residual voltages between parallel columns may prevent almost completely a satisfactory current sharing.

Due to production tolerances a typical maximum spread in residual voltage to a current of 100 A to 1 000 A per varistor element is about 5 %. With a factor of non-linearity α equal to 30 in the equation $I = kU^\alpha$, this will correspond to a current ratio of 1:4.

The required energy capability for varistors usually means that the decisive currents per varistor element will fall within this interval. For higher currents due to lightning, which have to be considered for surge arresters, the factor α is smaller, about 11 at a current of 10 kA. Because the residual voltage is usually routinely measured at this current, the spread is smaller, about 1 % to 2 %, and thus the current sharing is better even if no special steps are undertaken. With α equal to 11 and a 2 % difference in discharge voltages a current ratio of 1:1,24 is obtained.

5.4.4.7 Spare varistor units

Another conclusion which shall be drawn from the current-sharing tests is that considering the extreme non-linearity even small changes in residual voltages within normal measuring tolerances may affect the current distribution between parallel columns. It is therefore recommended to always install and energize possible spare varistor units right from the

⁴ Institute of Electrical and Electronics Engineers.

commissioning date among the other units. This will assure uniform ageing of all varistor units including the spare units, and the current-sharing tolerances will be maintained. Note that each phase will have its own electrical history, and therefore it is not recommended to mix spare units from different phases. Each phase shall have its own spare units.

Due to the reasons stated in 5.4.4.7, it is not recommended to upgrade existing varistor banks by adding newly manufactured varistor columns.

5.5 Bypass switch

The bypass switch is normally ground mounted on its own support structure with each breaking unit in parallel with the series capacitor and protective equipment in each phase or segment.

The bypass switch shall be capable of opening to insert the capacitors in the circuits when the system conditions are such that the capacitors would load to their emergency 1/2 h overload rating and when these loadings may result in a transient insertion voltage across the poles equal to the protective level.

The bypass switch shall be restrike free and shall withstand inrush current from frequent capacitor discharges from rated voltage (crest value) and rare discharges from a voltage equal to the protective level.

The bypass switch shall be able to perform this duty at a frequency no less than the frequency determined by the capacitance discharge current-limiting damping equipment (e.g. 500 Hz to 1 500 Hz).

Further information is given in IEC 62271-109:2008.

5.6 Disconnectors

Upon energizing the capacitor, for example after maintenance, the isolating disconnectors are closed, the bypass disconnector is opened and finally the bypass switch is opened.

Upon de-energizing the capacitor, the opposite switching sequence is followed.

When opening the bypass disconnector the current has to commute to the bypassed capacitor bank (see Figure 1). Opposite to the usual use of a disconnector (i.e. opening of a line which means interrupting a capacitive current), in this case an inductive current has to be switched off.

The bypass disconnector shall have sufficient interrupting capability to perform this duty at high-line loading and possibly several segments.

In addition to the normal function, the bypass disconnector may be used as an emergency closing device, as back-up for the bypass switch. Due to the fact that disconnectors usually are closing slowly, pre-arcing and heavy welding of the contacts is to be expected. Especially chosen contact materials may minimize damages.

5.7 Discharge current-limiting and damping equipment

5.7.1 Purpose of the Discharge Current-Limiting and Damping Equipment

The purpose of the Discharge Current-Limiting and Damping Equipment (DCLDE) is to limit and damp the high frequency discharge current which is produced at spark-over of the protective spark gap or closure of the bypass switch. The amplitude (particularly the first current peak) as well as the frequency of the high frequency current, produced at a capacitor discharge, shall be limited. The amplitude, frequency and damping of the capacitor discharge

current shall be limited to acceptable values for the fused capacitor units, the bypass switch and the spark gap.

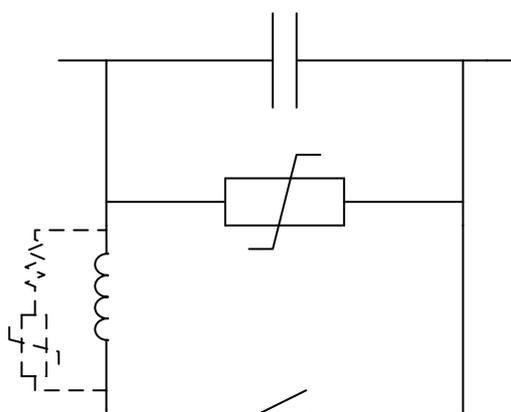
5.7.2 Location of the DCLDE

5.7.2.1 General

The location of the DCLDE is determined by the specified requirements.

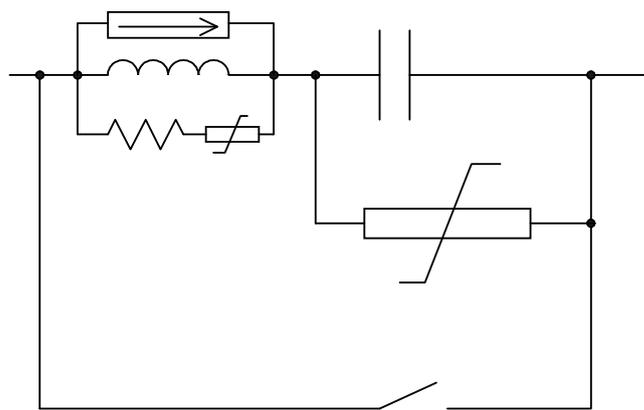
The present praxes for the location of the DCLDE are listed below:

- conventional location in the bypass branch according to Figure 6;
- location in series with the capacitor according to Figure 7 or Figure 8.



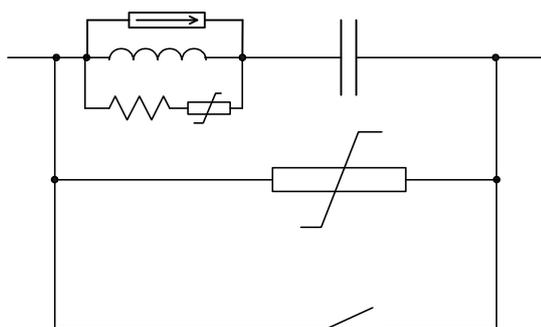
IEC 2342/12

Figure 6 – Conventional location in the bypass branch



IEC 2343/12

Figure 7 – DCLDE in series with the capacitor and the parallel connected MOV



IEC 2344/12

Figure 8 – DCLDE in series with the capacitor and parallel to the MOV

If no requirements on the location of the DCLDE are specified, the DCLDE may be located in the conventional way according to Figure 6. If there is a requirement that the voltage across the capacitor shall be very low, when the series capacitor is operated with the bypass switch in the closed position, the DCLDE should be located in series with the capacitor according to Figure 7 or Figure 8. Note that series connected DCLDE will increase the total losses of the SC installation, due to the fact that the reactor is continuously exposed to the line current when the SC is in service, i.e. not bypassed.

With the DCLDE in series with the capacitor according to Figure 7 and Figure 8, a parallel damping resistor is required also in the case when a damping resistor is not specified in the customer specification. The reason is, that the reactor shall be designed with low continuous losses because it is exposed to the service current when the SC is in operation. The low

losses correspond to a high q -value of the reactor which means that the damping of the capacitor discharge current will be very low. To improve the damping of the capacitor discharge current a parallel damping resistor should be installed.

With the DCLDE located according to Figure 7 and Figure 8, the reactance of the capacitor has to be increased in order to compensate for the series connected reactor.

NOTE 1 When the DCLDE is located according to Figure 7 and Figure 8, it will attenuate carrier-frequency transmission over the line. In some cases, the associated coupling devices of the carrier-frequency transmission are installed on the line side of the series capacitors (line end located series capacitors).

5.7.2.2 Location of the DCLDE in parallel with the capacitor

The advantage with the location of the DCLDE in parallel according to Figure 6 is that continuous reactor losses are avoided when the SC is in service, i.e. not bypassed. This means that the reactor can be designed with a low q -value in order to obtain the required damping of the capacitor discharge current. The consequence is that the damping resistor can be omitted in many cases, e.g. if strong requirements on the damping are not specified. .

The disadvantages with the location of the DCLDE in parallel according to Figure 6 are:

- a) When the bypass switch of a series capacitor is in the closed position, the capacitor and the reactor will form a parallel-resonant circuit. If the bypass switch is in the closed position and if there is significant harmonic current in the transmission line, a high circulating harmonic current can result in the reactor/capacitor circuit. It is possible that this harmonic current can overheat the reactor.

The inductance of the reactor must be selected in such a way, that the resonance frequency of the parallel-resonant circuit does not coincidence with harmonic frequencies of the following orders:

- (i) $6 \times n \pm 1$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (converter harmonics)
- (ii) $3 \times k$, $k = 1, 3, 5, \dots$

- b) When the bypass disconnecter is opened (bypass switch in the closed position) a voltage appears across the reactor. The magnitude of the reactor voltage depends on the inductance of the reactor and the actual magnitude of the line current at opening of the bypass disconnecter. The bypass disconnecter shall be capable of opening against the reactor voltage.

5.7.2.3 Location of the DCLDE is series with the capacitor

The advantages with the location of the DCLDE in series according to Figure 7 and Figure 8 are:

- a) The voltage across the SC at opening of the bypass disconnecter (bypass switch in the closed position) is very low. This fact puts low requirements on the opening capability of the bypass disconnecter. The bypass disconnecter can be opened without problems, independently of the magnitude of the actual line current.
- b) There is no risk of a parallel resonant condition for harmonic frequencies if the reactor is connected in series with the capacitor.

The disadvantages with the location of the DCLDE according to Figure 7 and Figure 8 are:

- a) The total losses of the SC installation with the SC in service will be higher compared to the losses with the location according to Figure 6.
- b) The installation cost for a damping resistor in parallel to the reactor has to be added.
- c) The attenuation of the carrier frequency transmission over the transmission line will be increased.
- d) The reactance of the capacitor has to be increased to compensate for the inductive reactance of the reactor.

- e) With the location of the DCLDE located according to Figure 7 and Figure 8, an additional surge arrester may have to be installed across the reactor in order to protect the reactor from overvoltages caused by travelling waves travelling along the transmission line, unless the damping resistor resistance is low enough to limit the maximum reactor overvoltage.
- f) With the location of the DCLDE located according to Figure 8, the capacitor shall be designed for a higher protective level compared to a location of the DCLDE according to Figure 6 and Figure 7. The reason is that voltage spikes will appear across the capacitor during line fault conditions when the line current is commutated between the MOV and the capacitor. See IEC 60143-1:2004, 10.5.2.

5.7.3 Configuration of the DCLDE

The configuration and design of the DCLDE depends on the specified requirements. The following standard configurations are in use:

- a) Only a discharge current-limiting reactor. See Figure 9.
- b) A discharge current-limiting reactor connected in parallel with a damping resistor. A varistor is connected in series with the resistor. Figure 10.
- c) A discharge current-limiting reactor connected in parallel with a damping resistor. A small spark gap is connected in series with the resistor. See Figure 11.



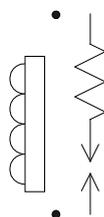
IEC 2345/12

Figure 9 – Only a discharge current-limiting reactor



IEC 2346/12

Figure 10 – Discharge current-limiting reactor connected in parallel with a damping resistor. A varistor is connected in series with the resistor



IEC 2347/12

Figure 11 – Discharge current-limiting reactor connected in parallel with a damping resistor. A small spark gap is connected in series with the resistor

The parallel connected damping resistor is needed when the DCLDE is located in series with the capacitor according to Figure 7 and Figure 8. The parallel connected damping resistor is also needed when the specified damping requirement is $< 0,9$ pu, i.e. if a heavy damping of the capacitor discharge current is required. This is valid for all locations according to Figure 6 through Figure 8.

The purpose of having a varistor or a spark gap connected in series with the damping resistor is to avoid continuous losses in the resistor during steady state operation of the SC bank. The arrangement implies that the damping resistor is in operation and exposed to high voltage and high current only during transient discharge oscillations of the capacitor.

Examples of waveforms of capacitor – DCLDE discharge oscillations are shown in Figure 12 for two different configurations of the DCLDE.

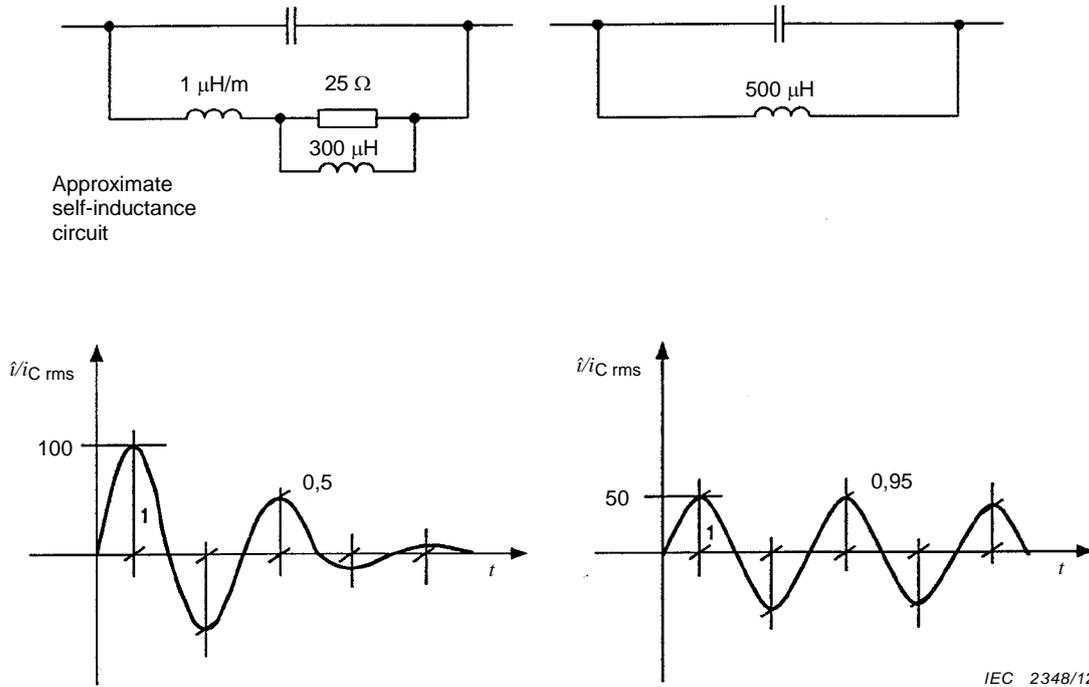


Figure 12 – Current-limiting and damping equipment with and without damping resistor

5.7.4 Miscellaneous comments regarding the DCLDE

As the discharge current limit damping equipment is in series with the line, when the capacitor bank is bypassed, it shall be designed to carry regular and overload line currents, and withstand the thermal and mechanical stresses at discharge and short-circuit currents.

Since the discharge frequency usually lies between 500 Hz and 1 500 Hz it is generally not possible to provide such current values for testing the device (except if a whole segment of the capacitor bank is erected).

In practice the performance of the discharge current-limiting damping equipment with regard to electromagnetic forces is proven by a 50 Hz or 60 Hz short-circuit test, provided that the equipment is free from mechanical resonances when exposed to current at discharge frequency. This is of particular concern for the current-limiting reactor without a damping resistor.

The number of consecutive discharges during the tests is determined in connection with the fault scenarios, so that the discharge current-limiting damping equipment is able to withstand the total energy applied to it at the worst case of the faults.

The measurement of the losses of a current-limiting damping reactor requires special care due to the low-power factor. It is customary to require measurement of the reactor loss resistance at the fundamental power-frequency and at the discharge frequency, for example

at 500 Hz to 1 500 Hz. An appropriate method (wattmeter, bridge or other) shall be adopted by the manufacturer. Since these reactors usually do not contain any magnetic material the measurement may be made at any current and corrected to rated continuous current. For temperature corrections refer to IEC 60076-1.

As an alternative the losses may be calculated from the a.c. resistance.

An unshielded air core reactor generates a magnetic stray field which occupies a space around the reactor. This alternating magnetic field can induce currents in nearby metallic geometries, causing heating effects during continuous current loading and forces on them during discharge current or short-circuit current flow.

There are some simple rules of thumb for estimating magnetic clearances around the reactor:

Clearance to small metallic parts not forming closed loops should be at least one half the coil diameter from the edges of the reactor. Larger geometries or closed loops should be located at least one coil diameter from all the surfaces of the reactor. For more detailed information it is advisable to consult the manufacturer of the reactors.

The insulation level on the platform of a segment is determined by both the maximum voltage during normal operation and the maximum overvoltages limited by the overvoltage protection during line fault conditions. The platform-to-earth insulation level corresponds to the phase-to-earth insulation. As is stated for the bypass switch the insulation level of the discharge current-limiting damping equipment corresponds to that of the actual capacitor segment, if it is mounted on the platform (which is usually done). Otherwise the phase-to-earth insulation level shall be considered for this equipment.

The reactor shall be designed in such a way that mechanical resonance at $2 \times f_0$ is avoided.

5.8 Voltage transformer

It is essential, that the voltage transformer (magnetic type) is designed to withstand the mechanical and thermal stresses that occur during a series capacitor discharge. The insulation level of the voltage transformer shall be coordinated with that of the series capacitor installation.

5.9 Current transformer

Each current transformer in the series capacitor installation (see Annex B in IEC 60143-1:2004) shall be specified and designed for its individual duty. It is important to consider not only the fault current (thermal stress) but also the large surge current stresses (dynamic stress) that may occur during series capacitor discharges. For instance, the platform transformer shall be designed to withstand the high-amplitude, high-frequency discharge current resulting from a flashover to the platform.

The insulation level of the current transformer shall be coordinated with that of the series capacitor installation.

5.10 Relay protection, control equipment and platform-to-ground communication equipment

Protection and control functions that should be considered for a fixed series capacitor include the following.

Protection of SC equipment against overstress from system conditions:

- a) Capacitor overload – the purpose of the capacitor overload protection is to protect the capacitor units against excessive overload caused by overcurrent through the series capacitor.

- b) Varistor overload – the purpose of the varistor overload protection is to protect the varistor against high temperature and high short time energy exceeding the rated values.
- c) Subharmonic protection (optional) – the purpose of the subharmonic protection is to detect sub-harmonic oscillations on the line current and bypass the series capacitor to avoid possible disturbances on the network.
- d) Subsynchronous resonance (SSR) protection (optional) – the purpose of the subsynchronous resonance protection is to detect subharmonic currents of specified frequencies and prevent the SSR phenomenon.
- e) Line current supervision – the purpose of this protection is to block the insertion of the series capacitor when there is a fault current on the line. Typically the insertion of the series capacitor under line fault current could occur when high-speed auto-reclosing of the line circuit breakers is activated.
- f) SSR are torsional interactions of the rotor shaft of turbine-generators together with the electrical transmission system that may fatigue or damage of the rotor shaft. SSR does not present a risk to series capacitors and therefore the series capacitor does not need to be protected against SSR. Due to the complexity of the SSR-phenomenon as well as its dependency on the grid topology and system operating conditions a common approach is to conduct a screening study in order to evaluate whether certain turbine generators in a power system are at risk of experiencing SSR. A detailed study will inform at what system and operating conditions SSR occur, whether or not they cause fatigue or damage to the rotor shaft and what protection measures are required to efficiently prevent the phenomenon (SSR frequencies and magnitude, protection strategy, time delays for protection reaction). The screening study shall be agreed upon between purchaser and manufacturer.

Protection functions associated with SC equipment failure:

- a) Capacitor unbalance – the purpose of the capacitor unbalance protection is to detect element failures leading to harmful stress within the capacitor units.
- b) Flashover to platform – the purpose of the flashover to platform protection is to detect current through the platform due to breakdown of the insulation of any platform mounted equipment.
- c) Varistor failure – the purpose of the varistor failure protection is to detect failure within a varistor unit.
- d) Bypass gap failure – the purpose of the bypass gap protection is to detect unintended conduction of the bypass gap (applicable only to forced triggered gaps) and mis-operation of the bypass gap: i) fail to conduct when a bypass order has been sent; ii) prolonged conduction time when conduction was supposed to be extinguished
- e) Bypass switch failure – the purpose of the bypass switch failure protection is to detect failure to close after a bypass order and failure to open after an open order.
- f) Pole disagreement – the purpose of the pole disagreement protection is to detect discrepancy between the phases of the bypass switch.
- g) Protection and control system failure – the purpose of the protection and control system protection is to supervise the operational status of protection and control systems of the series capacitor.

NOTE Bypass switch failure protection is usually based on the position indicating auxiliary contacts of the bypass switch.

SC control functions:

- a) Capacitor discharge function – the purpose of the capacitor discharge function is to discharge the series capacitor via the bypass circuit when the transmission line circuit breakers are opened.
- b) Bypassing – bypassing of the series capacitor due to protective operation and manual action.

- c) Insertion (automatic or manual) and reinsertion – insertion of the series capacitor by operation action, expiring of temporary block insertion and high speed auto-reclosing function.
- d) Lockout – permanent lockout caused by corresponding protective operation.
- e) Temporary block insertion – temporary lockout caused by corresponding protective operation.
- f) Operation of disconnect switches – the disconnect switches are commanded by operation action.
- g) Interlocking – disconnect switches and bypass switch commands are executed as long as the interlocking conditions are fulfilled.

Table 2 presents an overview of typical series capacitor bank protections and corresponding actions during their operation.

Table 2 – Overview of typical series capacitor bank protections

Function	Alarm level	Bypass	Lockout	Temporary block insertion	Reinsertion
Capacitor overload	X	X		X	X
Varistor overload		X		X	X
Sub-harmonic protection	X	X		X	X
SSR protection	X	X			
Line current supervision				X	
Capacitor unbalance	X	X	X		
Flashover to platform protection		X	X		
Varistor failure		X	X		
Bypass gap failure		X	X		
Bypass switch failure protection: close failure		X	X		
Bypass switch failure protection: open failure		X	X		
Bypass switch pole disagreement protection		X	X		
Disconnecter pole disagreement protection		X	X		
Protection and control system failure		X	X		
Flashover to platform		X	X		

5.11 Protection redundancy

The amount of redundancy is usually specified indirectly in the form of overall reliability and availability requirements for the series capacitor. The purchaser may however specify those items that have redundancy, see examples from the following list. It may also be specified by

the purchaser that the two protection systems be physically separate, each in its own cabinet. The purchaser may specify if the protection system is to be operated from one or two station batteries and the degree of separation between the supplies that is required within the series capacitor bank protection and control system.

- Digital protection system and relays.
- Digital control system.
- I/O modules and relays.
- Power supplies.
- Platform-to-ground signal columns.
- Current transformers and current sensors.
- Circuits to trigger the forced –triggered bypass gap.
- Closing coils for the bypass switch.

5.12 Commissioning tests

When the series capacitor is installed, but before it is energized, the following procedure is recommended:

- capacitance measurement of capacitor groups;
- balance check at low voltage test;
- spark gap measurement and adjustment if necessary;
- triggering test of forced triggered spark gaps;
- impedance measurement of damping reactors and resistors;
- functional tests of relay protection, control equipment and platform-to-ground communication equipment;
- attenuation test of fibre optic system;
- functional test of bypass switch;
- functional test of disconnectors.

5.13 Energization tests

When a series capacitor bank is energized, some field tests are to be made before the bank is put into commercial operation:

- Energization of platform: the platform is energized for a 1/2 hour with the bypass switch closed. The currents are measured.
- Low-load test: the line is energized from one end, with the other end open. The bank is connected to the line for a 1/2 hour. Line current and voltage are measured.
- High-load test: the series capacitor is inserted with the line loaded to 50 % to 100 % of the rated line current during a 1/2 hour. Transient and stationary capacitor current and voltage are recorded, at opening and closing of the bypass switch.

Additional tests indicated below may be agreed upon between the manufacturer and the purchaser:

- Thermovision control: temperatures of connections of capacitor units and apparatus are observed by a thermovision camera, at as high line current as possible.
- Sub-harmonic test: the line, with the series capacitor included, is energized from one end. A reactor or an unloaded power transformer is connected to the other end. Line current and voltage are recorded by an oscillograph, and content of sub-harmonic components is observed.
- Line fault test: it may be useful to perform a staged fault test (phase-to-earth fault) to prove that the series capacitor protective equipment and the line protection relays operate correctly.

- Energization of a parallel or adjacent line: to take out and place in service a parallel or adjacent line to the series capacitor bank and observe the behaviour of the series capacitor bank following the power swing.
- Fault to provoke a bypass of the SC bank: the SC banks can be placed in service initially and faulted. The objective of this test is to verify the complete response and operation from the detection/measurement to the bypass of the SC bank in presence of a fault. The test shall help to validate the speed of operation including the time when the transmission system is energized and the closing of the bypass switch from the detection of the disturbance. Examples of this test are a platform insulation fault or a capacitor unbalance. This test could include the shorting of a capacitor unit prior to insertion of the series capacitor bank.
- Opening and closing of disconnecter: the objective of this test is to verify the series capacitor control immunity to the noise that is created by the operation of a disconnecter. A disconnecter near the SC bank should be selected for this test. The risk associated to this test is limited to an immediate bypass of the SC bank.

Bibliography

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org>)

IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

IEC 60068-2-2, *Environmental Testing – Part 2-2: Tests — Tests B: Dry Heat*

IEC 60068-2-78, *Environmental testing – Part 2-78: Tests – Test Cab: Damp heat, steady state*

IEC 60068-2-30, *Environmental testing – Part 2: Tests – Test Db: Damp heat, cyclic (12 + 12 hour cycle)*

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

IEC 60071-2, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

IEC 60143-3, *Series capacitors for power systems – Part 3: Internal fuses*

IEC 60255-1, *Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements*

IEC 60273, *Characteristics of indoor and outdoor post insulators for systems with nominal voltages greater than 1 000 V*

IEC 60383 (Parts 1 and 2), *Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1 000 V*

IEC 60507, *Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems*

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

IEC 60654 (Parts 1 to 4), *Industrial-process measurement and control equipment – Operating conditions*

IEC/TS 60815-1, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles*

IEC/TS 60815-2, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems*

IEC/TS 60815-3, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems*

IEC 60871-1, *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V – Part 1: General*

IEC 60909 (all parts), *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*

IEC 61000-4-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*

IEC 61000-4-11, *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-11 – Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests*

IEC 62217, *Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use – General definitions, test methods and acceptance criteria*

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

IEC 62223, *Insulators – Glossary of terms and definitions*

Cigré-Publication 411, *Protection, Control and Monitoring of Series Compensated Networks. ISBN: 978-2-85873-098-8. Cigré Working Group B5-10*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	58
1 Domaine d'application	60
2 Références normatives.....	61
3 Termes et définitions	63
4 Exigences de qualité et essais	70
4.1 Protection contre les surtensions.....	70
4.2 Éclateur de protection	71
4.2.1 But	71
4.2.2 Classification des principes de déclenchement	71
4.2.3 Essais	71
4.3 Varistance	77
4.3.1 But	77
4.3.2 Classification.....	77
4.3.3 Essais	77
4.4 Disjoncteur shunt	81
4.5 Sectionneurs et sectionneurs de mise à la terre	82
4.5.1 But	82
4.5.2 Classification.....	82
4.5.3 Essais	83
4.6 Matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge (MALCD).....	84
4.6.1 But	84
4.6.2 Classification.....	84
4.6.3 Essais	84
4.7 Transformateur de tension.....	88
4.7.1 But	88
4.7.2 Classification.....	88
4.7.3 Essais	88
4.8 Sondes de courant	89
4.8.1 But	89
4.8.2 Classification.....	89
4.8.3 Essais des transformateurs de courant.....	89
4.8.4 Essais des transformateurs électroniques.....	90
4.8.5 Essais des capteurs optiques	90
4.9 Condensateur de couplage.....	90
4.9.1 But	90
4.9.2 Essais	90
4.10 Colonne de signal.....	90
4.10.1 But	90
4.10.2 Essais	90
4.11 Liaisons de plate-forme par fibre optique.....	91
4.11.1 But	91
4.11.2 Essais	91
4.12 Protection par relais, matériel de commande et matériels de liaison entre la plate-forme et le sol.....	91
4.12.1 But	91
4.12.2 Classification.....	92
4.12.3 Essais	92

5	Guide	93
5.1	Généralités.....	93
5.2	Données spécifiques pour les condensateurs série	93
5.3	Éclateur de protection	94
5.4	Varistance	94
5.4.1	Généralités.....	94
5.4.2	Caractéristique «tension-courant» d'une varistance	96
5.4.3	Formes d'ondes du courant et de la tension d'une varistance pendant un défaut en réseau.....	97
5.4.4	Commentaires sur les définitions relatives aux varistances et sur les essais de type	98
5.5	Disjoncteur shunt	100
5.6	Sectionneurs	100
5.7	Matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge	101
5.7.1	But du matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge	101
5.7.2	Emplacement du MALCD	101
5.7.3	Configuration du MALCD	103
5.7.4	Divers commentaires sur le MALCD.....	105
5.8	Transformateur de tension.....	106
5.9	Transformateur de courant	106
5.10	Protection par relais, matériel de commande et matériels de liaison entre la plate-forme et le sol.....	106
5.11	Redondance de la protection	109
5.12	Essais de mise en service	109
5.13	Essais de mise sous tension	109
	Bibliographie.....	111
	Figure 1 – Nomenclature typique d'une installation de condensateurs série	61
	Figure 2 – Classification des systèmes de protection contre les surtensions	71
	Figure 3 – Illustration des formes d'onde dans un essai de tension de rétablissement	74
	Figure 4 – Caractéristiques typiques «tension-courant» d'un disque particulier d'oxyde métallique (95 mm de diamètre).....	96
	Figure 5 – Formes d'ondes du courant, de la tension et de l'énergie pour un défaut entre phase et terre	97
	Figure 6 – Emplacement conventionnel dans la branche du disjoncteur shunt.....	101
	Figure 7 – MALCD en série avec le condensateur et le MOV en parallèle	101
	Figure 8 – MALCD en série avec le condensateur et parallèle au MOV	102
	Figure 9 – Seulement une bobine de limitation du courant de décharge	104
	Figure 10 – Bobine de limitation du courant de décharge reliée en parallèle avec une résistance d'amortissement. Une varistance est reliée en série avec la résistance.....	104
	Figure 11 – Bobine de limitation du courant de décharge reliée en parallèle avec une résistance d'amortissement. Un petit éclateur est relié en série avec la résistance	104
	Figure 12 – Matériel d'amortissement et de limitation de courant avec et sans résistance d'amortissement.....	105
	Tableau 1 – Sommaire des critères de conception d'une varistance pour absorber l'énergie (exemple)	95
	Tableau 2 – Aperçu des protections habituelles des batteries de condensateurs série	108

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CONDENSATEURS SÉRIE DESTINÉS À ÊTRE INSTALLÉS SUR DES RÉSEAUX –

Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateurs série

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 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 et 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) Tous les utilisateurs doivent s'assurer 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 Norme internationale CEI 60143-2 a été établie par le comité d'études 33 de la CEI: Condensateurs de puissance et leurs applications.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition publiée en 1994. Elle constitue une révision technique. Les modifications par rapport à l'édition précédente sont les suivantes:

- mises à jour conformément aux nouvelles normes et aux normes révisées relatives aux composants;
- mises à jour relatives aux évolutions technologiques. Les technologies obsolètes ont été retirées: condensateurs série à double éclateurs autodéclenchés. De nouvelles

technologies ont été ajoutées: sondes de courant à la place des transformateurs de courant;

- les essais des éclateurs ont été mis à jour pour décrire de manière plus claire les exigences et les procédures d'essai. Un nouvel essai au courant établi du shunt remplace l'ancien essai au courant de décharge;
- L'Article 5, Guide, a été élargi avec plus d'information concernant les différents circuits d'amortissement et les protections de condensateurs série.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
33/517/FDIS	33/521/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60143, publiées sous le titre général *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

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.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

CONDENSATEURS SÉRIE DESTINÉS À ÊTRE INSTALLÉS SUR DES RÉSEAUX –

Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateurs série

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60143 concerne les matériels de protection pour les batteries de condensateurs série, de puissance supérieure à 10 Mvar par phase. Le matériel de protection est défini comme étant l'appareillage du circuit principal et du matériel auxiliaire, qui font partie de l'installation des condensateurs série, mais qui sont à l'extérieur de la partie constituée par les condensateurs eux-mêmes. Les recommandations pour la partie condensateur sont fournies dans la CEI 60143-1:2004. Les matériels de protection sont mentionnés aux 3 et 10.6 de la CEI 60143-1:2004.

Le matériel de protection, visé par la présente norme, comprend les matériels indiqués ci-dessous:

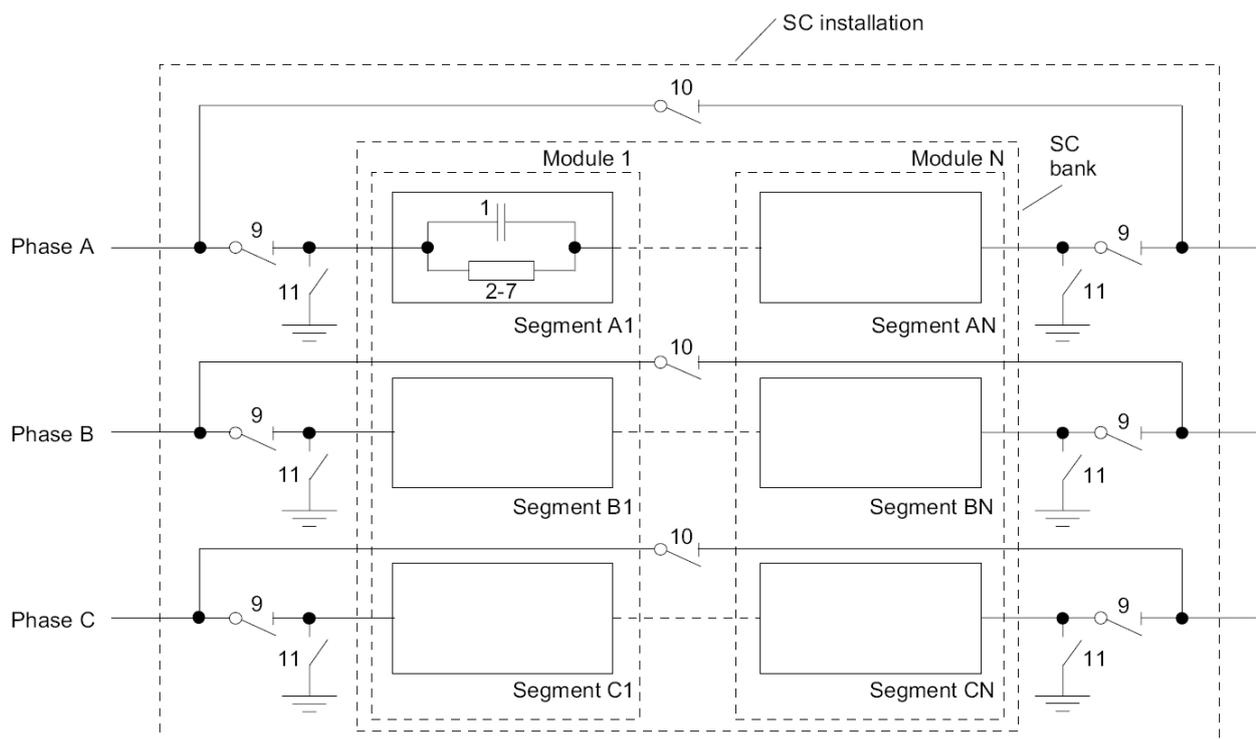
- appareil de protection contre les surtensions,
- éclateur de protection,
- varistance,
- disjoncteur shunt,
- sectionneurs et sectionneurs de terre,
- matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge,
- transformateur de tension,
- capteurs à courant,
- condensateur de couplage,
- colonne de signal,
- liens de plate-forme à fibre optique,
- protection par relais, matériel de commande et matériels de liaison entre la plate-forme et le sol.

Voir Figure 1.

Les principes impliqués par l'utilisation et l'exploitation des condensateurs série sont donnés dans l'Article 5.

Des exemples de scénarios de défauts sont donnés dans l'Article 5.

Des exemples de schémas utilisant différents moyens de protection contre les surtensions sont donnés à 4.1.



IEC 2904/03

Légende

- 1 ensemble de condensateurs unitaires
- 2-7 matériel de protection principal
- 9 sectionneur d'isolation
- 10 sectionneur shunt
- 11 sectionneur de terre
- SC bank = batterie de condensateurs série
- SC installation = installation de condensateurs série

Figure 1 – Nomenclature typique d'une installation de condensateurs série

NOTE La plupart des condensateurs série sont configurés avec un module simple, à moins que les exigences liées à la réactance et au courant n'aboutissent à une tension aux bornes de la batterie qui n'est pas réalisable pour le fournisseur avec un seul module. Normalement, chaque module a son propre disjoncteur shunt mais il est possible d'utiliser une dérivation commune pour plus d'un module. Voir 10.2.3 de la CEI 60143-1:2004 pour plus de détails.

L'objet de la présente norme est de:

- formuler des règles uniformes concernant les performances, les essais et les valeurs assignées,
- d'illustrer les différentes sortes de matériels de protection contre les surtensions,
- de proposer un guide pour l'installation et l'exploitation.

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 60044 (toutes les parties), *Transformateurs de mesure*

CEI 60044-1, *Transformateurs de mesure – Partie 1: Transformateurs de courant*

CEI 60044-8, *Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers* (disponible en anglais seulement)

CEI 60060 (toutes les parties), *Technique des essais à haute tension*

CEI 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

CEI 60076-6:2007, *Transformateurs de puissance – Partie 6: Bobines d'inductance*

CEI 60099-4:2009, *Parafoudres – Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour réseaux à courant alternatif*

CEI 60143-1:2004, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 1: Généralités*

CEI 60255-5, *Relais électriques – Partie 5: Coordination de l'isolement des relais de mesure et des dispositifs de protection – Prescriptions et essais*

CEI 60255-21, *Relais électriques – Vingt et unième partie: Essais de vibrations, de chocs, de secousses et de tenue aux séismes applicables aux relais de mesure et aux dispositifs de protection – Section un – Essais de vibrations (sinusoïdales)*

CEI 60270, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

CEI 60358-1, *Condensateurs de couplage et diviseurs capacitifs – Partie 1: Règles générales*

CEI 60358-2, *Coupling capacitors and capacitor dividers – Part 2: AC or DC single-phase coupling capacitor connected between line and ground for power line carrier frequency (PLC) application* (disponible en anglais seulement)¹

CEI 60794-1-1, *Optical fibre cables – Part 1: Generic specification – General* (disponible en anglais seulement)

CEI 60794-2, *Câbles à fibres optiques – Partie 2: Câbles intérieurs – Spécification intermédiaire*

CEI 61000-4-29, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-29: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension sur les accès d'alimentation en courant continu*

CEI 61109, *Isolateurs pour lignes aériennes – Isolateurs composites de suspension et d'ancrage à courant alternatif de tension nominale supérieure à 1 000 V – Définitions, méthodes d'essai et critères d'acceptation*

CEI 61300-3-4, *Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Méthodes fondamentales d'essais et de mesures – Partie 3-4: Examens et mesures – Affaiblissement*

CEI 61869-3, *Transformateurs de mesure – Partie 3: exigences supplémentaires concernant les transformateurs inductifs de tension*

¹ A paraître.

CEI 61869-5 – *Transformateurs de mesure – Partie 5: exigences supplémentaires concernant les transformateurs condensateurs de tension*

CEI 62271-1, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes*

CEI 62271-102:2001, *Appareillage à haute tension – Partie 102: Sectionneurs et sectionneurs de terre à courant alternatif*

CEI 62271-109:2008, *Appareillage à haute tension – Partie 109: Interrupteurs de contournement pour condensateurs série à courant alternatif*

NOTE Aucune norme n'existe sur les varistances pour les condensateurs série (SC). Les essais correspondant pour les varistances des condensateurs série sont donc traités dans la présente norme.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent:

NOTE Les définitions des parties constituées par les condensateurs et accessoires de la présente norme sont conformes à la CEI 60143-1:2004.

3.1

éclateur de secours

éclateur supplémentaire qui peut être réglé pour s'amorcer à un niveau de tension supérieur à celui du dispositif de protection principal et qui est normalement mis en parallèle avec celui-ci

3.2

protection de batterie

terme général concernant tous les matériels de protection relatifs à une batterie de condensateurs, ou à une partie de celle-ci

3.3

courant de shunt

courant circulant dans le ou les dispositifs de shuntage installés en parallèle avec les condensateurs série

3.4

disjoncteur shunt

dispositif tel qu'un interrupteur, ou un disjoncteur, mis en parallèle avec un condensateur série et son dispositif de protection contre les surtensions, pour dériver le courant du réseau, pendant une durée spécifiée, ou de façon permanente

Note 1 à l'article: Outre le fait de shunter le condensateur, ce dispositif peut aussi permettre d'insérer le condensateur dans un circuit et transiter un courant spécifié.

Note 2 à l'article: Ce dispositif doit également être capable de shunter le condensateur dans des conditions spécifiées de défaut du système électrique. Le fonctionnement du dispositif est déclenché par la commande du condensateur, la commande à distance ou un opérateur. Le dispositif peut être monté sur la plate-forme ou sur le sol près de la plate-forme.

3.5

disjoncteur shunt

dispositif pour court-circuiter le condensateur série après que celui-ci ait été shunté par le dispositif de shuntage

Note 1 à l'article: Installé pour garder le réseau en service pendant l'entretien du disjoncteur shunt ou la batterie de condensateurs série.

3.6

courant de défaut dérivé

courant circulant dans la batterie de condensateurs série shuntée et provoqué par un défaut sur le réseau

Note 1 à l'article: Voir aussi "courant de défaut traversant" et "courant de défaut partiel".

3.7

éclateur shunt (éclateur de protection)

éclateur ou système d'éclateurs, destiné à protéger le condensateur (de type K) contre les surtensions, ou la résistance non linéaire (de type M) contre les surcharges, en détournant des parties protégées, la charge transitée ou le courant de défaut, pendant une durée spécifiée

3.8

dispositif de verrouillage pour le shuntage

dispositif qui impose que les trois pôles du dispositif de shuntage soient dans la même position d'ouverture ou de fermeture

3.9

protection de déséquilibre des condensateurs

dispositif pour déceler un déséquilibre de capacité sur une phase, entre groupes de condensateurs, tels que ceux provoqués par le fonctionnement d'un fusible ou le défaut d'un condensateur, et qui déclenche une alarme ou qui ferme le dispositif de shuntage, ou les deux

3.10

plate-forme de condensateur

structure qui supporte les racks de condensateurs ainsi que tous les équipements associés et les dispositifs de protection, et qui est installée sur des isolateurs compatibles avec les exigences d'isolement entre phase et terre.

3.11

tension de service en régime permanent

COV

MCOV d'une varistance

tension de service en régime permanent (maximale), (COV) est la valeur efficace reconnue comme admissible de la tension à fréquence industrielle qui peut être appliquée en permanence aux bornes de la varistance

Note 1 à l'article: La COV d'une varistance pour batterie série est habituellement égale à la tension assignée de la batterie série. Cette définition diffère de celle de la COV (U_C) pour un parafoudre ZnO, conformément à la CEI 60099-4:2009.

Note 2 à l'article: Dans la CEI 60099-4:2009, U_C est utilisé pour désigner la "tension de service en régime permanent". Cependant, dans la présente norme, COV est utilisé pour désigner la "tension de service en régime permanent". C'est parce que U_C est utilisé pour désigner la "tension des condensateurs" dans les documents de la série de normes CEI 60143.

Note 3 à l'article: Il convient de tenir compte des surtensions de courte durée sur les condensateurs série, telles que les tensions produites par les courants d'oscillation et les courants de surcharge, pour déterminer le niveau de protection de la varistance.

3.12

matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge

bobine, ou bobine et résistance en parallèle, destinée à limiter l'amplitude du courant et sa fréquence et à produire un amortissement suffisant des oscillations de décharge des condensateurs pendant le fonctionnement de l'éclateur ou du dispositif de shuntage

3.13**défaut externe**

défaut survenant en dehors de la partie de réseau protégée contenant la batterie de condensateurs série

3.14**protection contre un défaut de plate-forme**

dispositif destiné à détecter un défaut d'isolement sur la plate-forme produisant la circulation d'un courant entre les éléments de circuit transportant normalement le courant et la plate-forme, et destiné à déclencher la fermeture du dispositif de shuntage

3.15**éclateur à déclenchement forcé**

éclateur qui est conçu pour fonctionner sur commande externe sur les quantités telles que l'énergie MOV, la magnitude de courant ou le taux de variation de telles quantités

Note 1 à l'article: L'amorçage de l'éclateur est déclenché par un circuit à déclenchement. Après déclenchement, un arc est établi dans l'éclateur du système électrique. Les éclateurs à déclenchement forcé fonctionnent typiquement seulement lors de défauts internes.

3.16**insertion**

ouverture du disjoncteur shunt pour mettre en service le condensateur série

3.17**courant d'insertion**

courant efficace (ou r.m.s.) qui passe à travers la batterie de condensateurs série après ouverture du disjoncteur shunt

Note 1 à l'article: Ce courant peut être à des magnitudes de courants spécifiées continues, de surcharge ou d'oscillation.

3.18**tension d'insertion**

tension de pic apparaissant aux bornes de la batterie de condensateurs série sur l'interruption du courant de dérivation pour l'ouverture du disjoncteur shunt

3.19**défaut interne**

défaut survenant dans la partie du réseau protégée contenant la batterie de condensateurs série

3.20**sectionneur d'isolation**

dispositif pour débrancher du réseau les condensateurs série shuntés

VOIR: Figure 1.

3.21**courant de fuite (de la varistance)**

courant circulant en permanence dans la varistance quand celle-ci est alimentée à la tension assignée à fréquence industrielle

Note 1 à l'article: Pour la COV, et pour une température d'élément de varistance égale à la température ambiante, le courant de fuite est habituellement capacitif.

3.22**tension limite**

crête maximale de la tension à fréquence industrielle se produisant entre les bornes du condensateur immédiatement avant ou pendant le fonctionnement du dispositif de protection contre les surtensions, divisé par $\sqrt{2}$

Note 1 à l'article: Cette tension apparaît soit lors de la conduction de la varistance, soit immédiatement avant l'allumage de l'éclateur. Voir CEI 60143-1:2004 pour les détails.

3.23

protection contre la perte de commande de puissance

moyen pour provoquer la fermeture du dispositif de shuntage dès la perte de commande normale de puissance

3.24

espace principal

partie de l'éclateur de protection qui doit supporter le courant de défaut pendant une durée spécifiée, comprenant deux électrodes ou plus, pour service intense

3.25

tension minimale de référence (d'une varistance)

U_{MRef}

tension minimale de référence admissible d'une varistance complète ou d'une unité de varistances, mesurée à une température spécifiée, typiquement $(20 \pm 15) ^\circ\text{C}$

Note 1 à l'article: Voir Figure 4 et les commentaires dans l'Article 5.

3.26

module

gradin de condensateurs

unité triphasée comprenant un segment de condensateurs (ou plusieurs) par phase avec la possibilité d'enclencher les dispositifs de shuntage monophasés

VOIR: Figure 1.

Note 1 à l'article: Le disjoncteur shunt d'un module est normalement actionné sur une base triphasée. Cependant, dans certaines applications à des fins de protection, le disjoncteur shunt peut être nécessaire pour agir temporairement sur une base à phase individuelle.

3.27

appareil de protection contre les surtensions

dispositif à action rapide (généralement MOV ou éclateur à déclenchement de tension) limitant la tension instantanée aux bornes des condensateurs série à une valeur admissible, en cas de défaut ou de conditions anormales du réseau

3.28

plate-forme

structure qui supporte un ou plusieurs segments de la batterie et est supportée sur des isolateurs compatibles avec les exigences d'isolement entre phase et terre

3.29

alimentation de commande de la plate-forme

source(s) d'énergie disponible(s) au potentiel de la plate-forme pour assurer les fonctions d'exploitation et de commande

3.30

équipements de communication entre la plate-forme et le sol

dispositifs destinés à transmettre les signaux d'exploitation, de commande et d'alarme entre la plate-forme et le sol lors de l'exploitation ou du fonctionnement des dispositifs de protection

3.31

niveau de protection

U_{pl}

la crête maximale de la tension à fréquence industrielle apparaissant aux bornes du dispositif de protection contre les surtensions lors d'un défaut du système électrique

Note 1 à l'article: Le niveau de protection peut être exprimé en termes de tension de crête réelle aux bornes d'un segment ou en termes par unité de la crête de tension assignée aux bornes du segment de condensateurs. Cette tension apparaît soit lors de la conduction de la varistance, soit immédiatement avant l'allumage de l'éclateur.

3.32 énergie assignée de courte durée (d'une varistance)

énergie maximale que la varistance peut absorber pendant une courte durée, sans subir de dommage par suite du choc thermique

Note 1 à l'article: L'énergie de courte durée s'exprime habituellement en J, kJ ou MJ.

3.33 courant de référence (d'une varistance)

valeur crête du courant de la composante résistive à fréquence industrielle, utilisée pour déterminer la tension de référence de la varistance

Note 1 à l'article: Le courant de référence est choisi dans la zone de transition entre le courant de fuite et le courant de conduction, typiquement dans la gamme 1 mA à 20 mA pour une colonne simple de varistances (voir Figure 4).

3.34 tension de référence (d'une varistance)

valeur crête de la tension à fréquence industrielle divisée par $\sqrt{2}$, mesurée pour le courant de référence de la varistance

Note 1 à l'article: La mesure de la tension de référence est nécessaire pour choisir correctement des échantillons pour l'essai de type.

3.35 réinsertion

rétablissement dans le condensateur série du courant de charge provenant du circuit de shuntage

3.36 courant de réinsertion

courant transitoire passant dans le condensateur série après l'ouverture du circuit de shuntage pendant la réinsertion

3.37 tension de réinsertion

courant transitoire apparaissant aux bornes du condensateur série après l'ouverture du circuit de shuntage pendant la réinsertion

3.38 tension résiduelle (d'un condensateur)

tension persistant entre les bornes d'un condensateur à un moment donné après la déconnexion de l'alimentation

3.39 tension résiduelle (d'une varistance) tension de décharge (d'une varistance)

valeur crête de la tension apparaissant entre les bornes d'une varistance pendant le passage du courant

3.40 fraction (d'une varistance)

partie complète d'une varistance, correctement assemblée, nécessaire pour représenter le comportement d'une varistance complète lors d'un essai particulier

Note 1 à l'article : Une fraction de varistance n'est pas nécessairement un élément de varistance.

3.41 segment

assemblage monophasé de groupes de condensateurs ayant ses propres dispositifs de limitation de tension et ses propres relais pour protéger les condensateurs des surtensions et des surcharges

VOIR: Figure 1.

3.42 protection contre les sous-harmoniques

dispositif détectant les courants sous-harmoniques de fréquence et de durée spécifiées, et déclenchant un signal d'alarme ou des actions correctrices, habituellement en shuntant la batterie de condensateurs

3.43 protection contre le maintien du courant de shunt

moyen détectant l'écoulement prolongé d'un courant dans le système de protection contre les surtensions et déclenchant la fermeture du dispositif de shuntage

3.44 protection contre le maintien des surcharges

dispositif détectant les tensions des condensateurs supérieures à la valeur assignée mais inférieures au niveau de fonctionnement du système de protection et déclenchant un signal d'alarme ou des actions correctrices

3.45 courant d'oscillation

valeur maximale de la portion oscillatoire du courant au cours de la période transitoire suivant une grande perturbation

Note 1 à l'article: Le courant d'oscillation est mesuré en A r.m.s. et caractérisé par une amplitude spécifiée, une fréquence et une constante de temps résiduelle. Le courant d'oscillation est propagé depuis les oscillations électromécaniques des machines synchrones dans le système électrique réel. La fréquence de ces oscillations est typiquement de l'ordre de 0,5 Hz à 2 Hz.

3.46 surtension temporaire

tension temporaire à fréquence industrielle, supérieure à la tension assignée permanente U_N du condensateur série

3.47 fraction thermique (d'une varistance)

fraction, assemblée dans une enveloppe adéquate, ayant la même dissipation thermique que la varistance réelle

3.48 emballement thermique (d'une varistance)

état d'une varistance lorsque les pertes en régime établi augmentent régulièrement en raison de l'augmentation de température, lorsque la varistance est sous tension

Note 1 à l'article: La chaleur générée par les pertes des éléments de la varistance dépasse les possibilités de refroidissement de l'enveloppe, ce qui provoque un échauffement supplémentaire et finalement conduit à la destruction de la varistance si le processus n'est pas interrompu, par exemple si la tension est baissée ou la varistance shuntée.

3.49 stabilité thermique (d'une varistance)

état d'une varistance après un échauffement provoqué par une décharge d'énergie et/ou une surtension temporaire, lorsque la varistance est alimentée à sa COV, dans des conditions de température ambiante spécifiées et quand la température des éléments de la varistance décroît avec le temps

Note 1 à l'article: Cela est le contraire de «l'emballement thermique».

3.50

courant de défaut traversant courant de défaut partiel

composante du courant de défaut parcourant la batterie de condensateurs série et non le courant de défaut total (courant de défaut bus)

Note 1 à l'article: La composante du courant de défaut parcourant la batterie de condensateurs série est appelée «courant de défaut traversant» ou «courant de défaut partiel».

Note 2 à l'article: Voir la CEI 60909.

3.51

circuit de déclenchement

dispositif pour déclencher l'amorçage de l'éclateur principal à un niveau de tension spécifié ou par une commande externe

3.52

varistance

varistance à oxyde métallique

résistance non linéaire

dispositif agissant comme protection d'un condensateur contre les surtensions, composé de résistances dont une a une valeur variant de façon non linéaire avec la tension (normalement varistances à oxyde métallique)

Note 1 à l'article: Le terme varistance est utilisé quand il n'est pas nécessaire de distinguer entre un élément de varistance, une unité de varistances ou un groupe de varistances.

3.53

élément de varistance

élément de varistance à oxyde métallique

corps cylindrique en céramique, avec des faces extérieures métallisées parallèles, constituant le plus petit composant actif utilisé dans des assemblages pour varistances plus importants

3.54

colonne de varistances

colonne de varistances à oxyde métallique

colonne comprenant «*n*» éléments de varistance raccordés en série

3.55

unité de varistances

unité de varistances à oxyde métallique

assemblage d'éléments de varistance, comprenant une ou plusieurs colonnes montées dans une enveloppe adéquate

3.56

groupe de varistances

groupe de varistances à oxyde métallique

groupe monophasé d'unités de varistances connectées en parallèle et/ou en série, soigneusement assemblées les unes aux autres, pour former un dispositif de limitation contre les surtensions, pour un condensateur série

3.57

courant de coordination de varistances

magnitude de la crête maximale du courant à fréquence industrielle de varistances associées au niveau de protection

Note 1 à l'article: La forme d'onde du courant de coordination de varistances est considérée comme ayant une durée de front conventionnelle de 30 μ s à 50 μ s. La queue de la forme d'onde n'est pas importante pour l'établissement du niveau de protection.

3.58

éclateur à déclenchement de tension

éclateur qui est conçu pour amorcer la tension apparaissant aux bornes

Note 1 à l'article: L'amorçage de l'éclateur est normalement déclenché par un circuit de déclenchement fixé à un niveau de tension spécifié. Un éclateur à déclenchement de tension peut être utilisé pour la protection primaire du condensateur et peut être amorcé lors de défauts externes comme internes.

4 Exigences de qualité et essais

4.1 Protection contre les surtensions

Le but et la classification d'un dispositif de protection contre les surtensions sont les suivants.

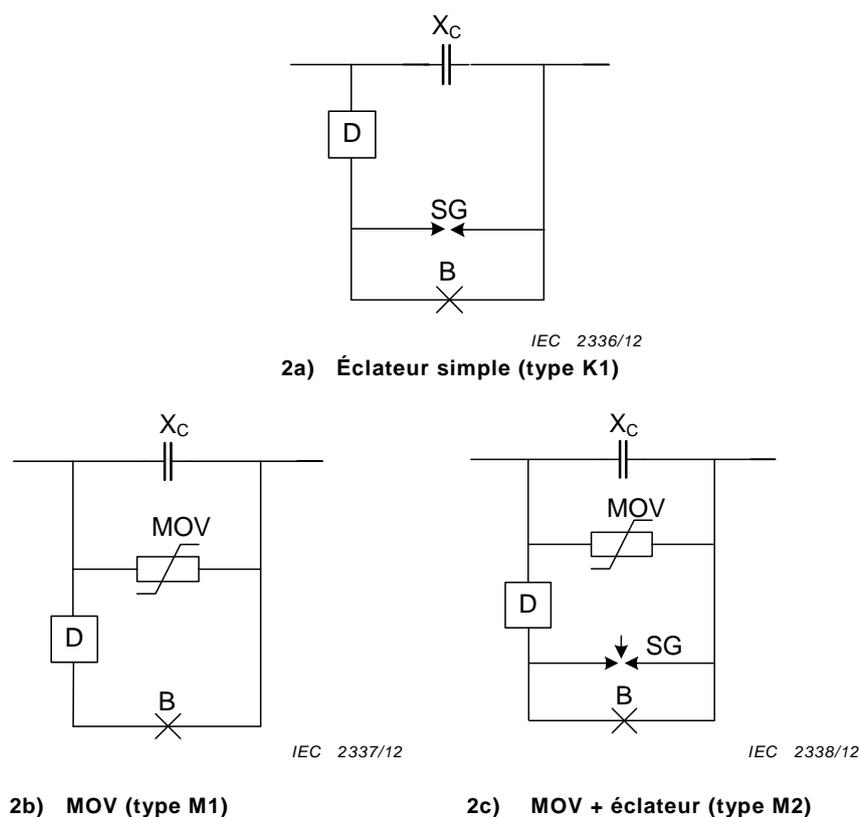
a) But

Le système de protection contre les surtensions est un dispositif qui limite rapidement la tension instantanée aux bornes de la batterie série à une valeur admissible, faute de quoi cette valeur serait dépassée par suite d'un défaut dans l'alimentation ou par suite de conditions inhabituelles dans le réseau.

b) Classification

Trois alternatives communes de dispositifs de protection contre les surtensions sont citées ci-dessous:

- éclateur à protection simple (type K1). Voir Figure .2a).
- varistance (sans éclateur) (type M1). Voir Figure 2b).
- varistance avec éclateur (type M2). Voir Figure 2c).



Légende

- X_c Condensateur
 SG Éclateur
 D Circuit d'amortissement et de limitation du courant
 B Sectionneur shunt

Figure 2 – Classification des systèmes de protection contre les surtensions

4.2 Éclateur de protection

4.2.1 But

Le but de l'éclateur de protection est d'agir comme protection des condensateurs contre les surtensions (schéma de protection K1) ou comme protection des varistances (schéma de protection M2), voir également 5.3.

4.2.2 Classification des principes de déclenchement

Les éclateurs de protection peuvent être classés comme suit:

- autodéclenchement (utilisé dans le type K1)
- déclenchement forcé (utilisé dans le type M2)

4.2.3 Essais

4.2.3.1 Généralités

Pour des raisons pratiques, on pourrait réaliser séparément certains essais sur l'éclateur principal et sur le circuit de déclenchement.

Pour les éclateurs à déclenchement forcé, un essai type sur l'ensemble des éclateurs est nécessaire. L'essai doit vérifier que le dispositif de protection contre les surtensions

comprenant la protection contre la surcharge de l'éclateur principal, du circuit de déclenchement et de la varistance fonctionne correctement. Voir 4.2.3.4.2 ci-dessous.

4.2.3.2 Eclateur principal

4.2.3.2.1 Essais individuels

Les essais individuels sont les suivants.

- a) vérification des dimensions,
- b) essai individuel et vérification des composantes de l'éclateur,

par exemple les électrodes, les enveloppes en porcelaine, les composants actifs, les traversées et les isolateurs support, conformément aux normes CEI appropriées.

4.2.3.2.2 Essais de type

Les essais de type sont les suivants.

- a) Essais au courant de défaut

Des essais au courant de défaut doivent être effectués pour démontrer que l'éclateur principal supportera le courant assigné de défaut traversant le shunt à fréquence industrielle. La magnitude du courant d'essai doit correspondre au courant de défaut traversant le shunt maximum spécifié (courant de défaut partiel) à l'emplacement des condensateurs série. La première crête du courant d'essai appliqué doit correspondre à la valeur spécifiée du courant de court-circuit, y compris si la crête est asymétrique

La durée du courant d'essai doit être conforme à celle correspondant au courant de défaut traversant l'éclateur à l'emplacement de la batterie de condensateurs série. On doit prendre en compte le temps maximal d'élimination du défaut par le disjoncteur de secours ainsi que des situations de défaut. Des situations de défauts typiques sont données dans l'Article 5.

L'essai doit être réalisé une fois.

Critères d'acceptation de l'essai:

Éclateur autodéclenché

Aucun dommage mécanique, ni érosion excessive, ni changement notable de la tension d'amorçage de l'éclateur ne doivent se produire. Cela doit être vérifié par un essai de tension d'amorçage à fréquence industrielle. Cet essai de tension d'amorçage à fréquence industrielle doit être effectué avant et après l'essai au courant établi du shunt. La valeur moyenne d'au moins dix essais subséquents doit être calculée et le rapport des valeurs seules et des valeurs moyennes ne doit pas excéder $\pm 10\%$.

Éclateur à déclenchement forcé

Aucun dommage mécanique, ni érosion excessive, ni changement notable de la tension d'amorçage de l'éclateur ne doivent se produire. Cela doit être vérifié par:

- 1) Un essai de résistance à la tension à fréquence industrielle avec une crête de tension correspondant à 1,2 fois la tension du niveau de protection. La forme d'onde de la tension doit être purement sinusoïdale avec une durée de 60 secondes. Cet essai n'est pas nécessaire si l'essai au courant établi du shunt est effectué sur le même objet de l'essai après l'essai au courant de défaut. Si le modèle de l'éclateur contient des éclateurs auxiliaires, l'essai est limité au seul éclateur principal. Les éclateurs auxiliaires ne doivent pas être montés pour éviter un autodéclenchement.
 - 2) Essai fonctionnel pour vérifier le déclenchement correct dans les limites déclarées.
- b) Essai au courant établi du shunt

Un essai doit être effectué pour démontrer que l'éclateur principal supportera la combinaison du courant de décharge des condensateurs et du courant de défaut à fréquence industrielle auxquelles l'éclateur sera exposé durant le shuntage normal des condensateurs.

La magnitude de la première crête de courant d'essai doit être égale à la somme instantanée maximale simulée du courant de décharge des condensateurs au plus haut niveau de protection et du courant de défaut à fréquence industrielle, décalage inclus. La simulation doit être effectuée sur un modèle de système électrique du système électrique réel comprenant un modèle du condensateur série réel.

Pour chaque application, la crête du courant ne doit pas être inférieure à 95% de la magnitude exigée et la moyenne des crêtes des 20 applications ne doit pas être inférieure à la magnitude exigée. Pour toutes les applications, la valeur moyenne du courant symétrique au cours de la durée d'essai spécifiée ne doit pas être inférieure au courant de défaut symétrique maximal traversant le condensateur série.

La durée du courant d'essai doit être conforme au temps d'élimination normal du défaut par le disjoncteur.

Le courant d'essai peut être soit une combinaison d'un courant à 50 Hz (60 Hz) et d'un courant de décharge des condensateurs à haute fréquence ou un courant uniquement à 50 Hz (60 Hz).

- Si un courant d'essai combiné est utilisé, l'amortissement du courant de décharge des condensateurs doit correspondre à l'amortissement minimum attendu dans l'installation.
- Si un courant uniquement à 50 Hz (60 Hz) est utilisé, la magnitude requise de la première crête peut être obtenue au moyen d'un courant asymétrique.

L'essai doit être réalisé 20 fois.

Critères d'acceptation de l'essai:

Éclateur autodéclenché

Aucun dommage mécanique, ni érosion excessive, ni changement notable de la tension d'amorçage de l'éclateur ne doivent se produire. Cela doit être vérifié par un essai de tension d'amorçage à fréquence industrielle. Cet essai de tension d'amorçage à fréquence industrielle doit être effectué avant et après l'essai au courant établi du shunt. La valeur moyenne d'au moins dix essais subséquents doit être calculée et le rapport entre les valeurs seules et les valeurs moyennes ne doit pas excéder $\pm 10\%$.

Éclateur à déclenchement forcé

Aucun dommage mécanique, ni érosion excessive, ni changement notable de la tension d'amorçage de l'éclateur ne doivent se produire. Cela doit être vérifié par:

- 1) Un essai de tension de rétablissement ou un essai de résistance à la tension à fréquence industrielle avec une crête de tension correspondant à 1,2 fois la tension du niveau de protection. La forme d'onde de la tension doit être purement sinusoïdale avec une durée de 60 secondes. Si le modèle de l'éclateur contient des éclateurs auxiliaires, l'essai est limité au seul éclateur principal. Les éclateurs auxiliaires ne doivent pas être montés pour éviter un autodéclenchement.
 - 2) Essai fonctionnel pour vérifier le déclenchement correct dans les limites déclarées.
- c) Essai de tension de rétablissement (éclateurs à déclenchement forcé seulement)

L'essai doit démontrer que l'éclateur supporte une tension de rétablissement suffisante, en prenant en compte le circuit de déclenchement, afin de permettre la réinsertion des condensateurs après un réenclenchement réussi du réseau.

Cet essai doit être effectué sur un objet d'essai qui a été exposé à au moins 10 applications dans l'essai au courant établi du shunt.

L'éclateur doit être exposé au courant décrit dans l'essai au courant établi du shunt, suivi d'une tension d'essai qui est appliquée, après la déconnexion du courant, pour une durée égale au temps de réinsertion spécifié des condensateurs série.

La tension d'essai présumée de 50 Hz (60 Hz) doit avoir une valeur de crête correspondant à 1,5 fois la tension du niveau de protection des condensateurs série. La tension réelle aux bornes de l'éclateur doit être limitée à au moins la tension du niveau de protection par une varistance donnant la forme d'onde de tension appropriée (voir Figure 3).

La durée de la tension d'essai doit être de 100 ms.

Critères d'acceptation de l'essai: 1 sur 1 ou 2 sur 3 applications réussies.

Afin de vérifier les différentes combinaisons de niveaux de protection et de temps de réinsertion, l'essai peut être combiné avec l'essai au courant établi du shunt. Cependant, il faut effectuer au moins 10 applications dans l'essai au courant établi du shunt avant la vérification de la tension de rétablissement.

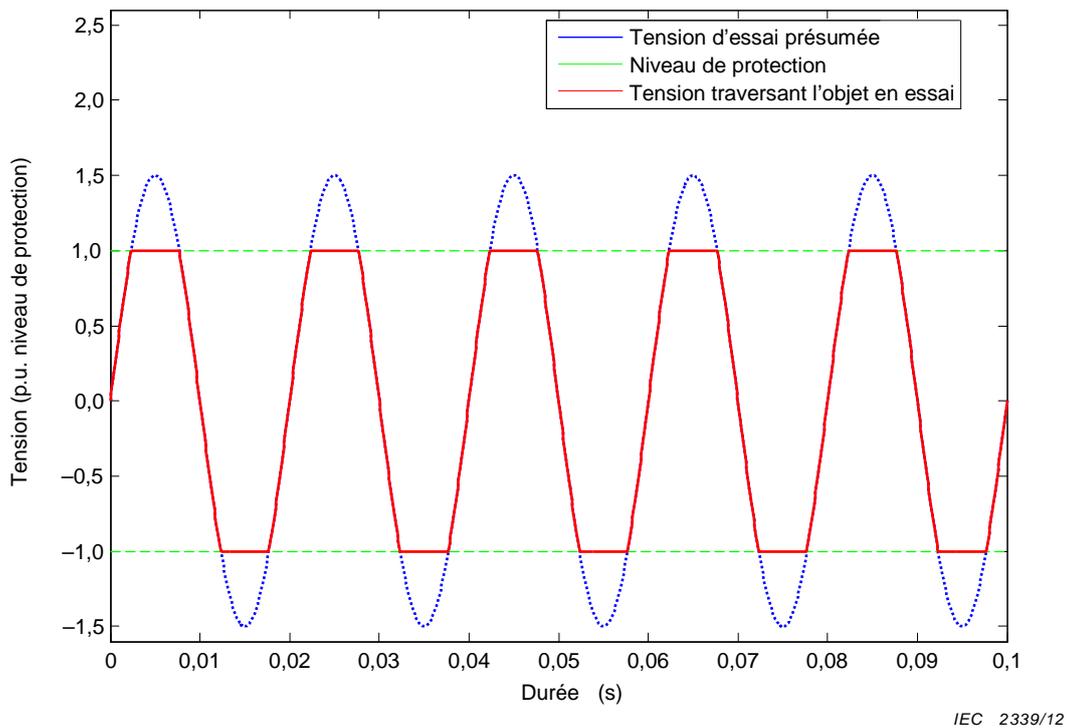


Figure 3 – Illustration des formes d'onde dans un essai de tension de rétablissement

d) Essai de tension de rétablissement (éclateurs à autodéclenchement seulement)

L'essai doit démontrer que l'éclateur supporte une tension de rétablissement suffisante, en prenant en compte le circuit de déclenchement, afin de permettre la réinsertion des condensateurs après un réenclenchement positif du réseau.

Cet essai doit être effectué sur un objet de l'essai qui a été exposé à au moins 10 applications dans l'essai au courant établi du shunt.

L'éclateur doit être exposé au courant décrit dans l'essai au courant établi du shunt, suivi d'une tension d'essai qui est appliquée lorsqu'un temps égal au temps de réinsertion spécifié des condensateurs série s'est écoulé après le courant d'essai.

La tension d'essai présumée de 50 Hz (60 Hz) doit avoir une valeur de crête correspondant à la tension maximale prévue des condensateurs série (décalage inclus) lors de la réinsertion.

L'essai doit être réalisé une fois.

Critères d'acceptation de l'essai: 1 sur 1 ou 2 sur 3 applications réussies.

e) Essai d'endurance mécanique

Cet essai n'est applicable que pour les modèles contenant des pièces mobiles. L'essai doit être effectué à la température de l'air ambiant de l'emplacement de l'essai. La température de l'air ambiant doit être enregistrée dans le rapport d'essai. Les matériels auxiliaires faisant partie des dispositifs de fonctionnement doivent être inclus.

L'essai doit se composer de 500 séquences de fonctionnement dans lesquelles chaque séquence d'une opération de fermeture suivi d'une opération d'ouverture.

Les temps d'ouverture et la résistance de contact (si cela est applicable) doivent être enregistrés avant et après l'essai.

Critères d'acceptation de l'essai:

- La résistance de contact (si cela est applicable) mesurée avant et après l'essai ne doit pas excéder une valeur déclarée par le fabricant.
- Le temps de fermeture, mesuré lors de la première et de la dernière application ne doit pas excéder une valeur déclarée par le fabricant.

4.2.3.3 Circuit de déclenchement

4.2.3.3.1 Essai individuel du circuit à autodéclenchement

Les essais individuels et les essais de type pour un circuit de déclenchement sont les suivants.

- a) Essai diélectrique d'amorçage à fréquence industrielle ou essai à la tension de référence à fréquence industrielle, selon le cas.
- b) Mesure du courant de répartition ou du courant de fuite (si cela est applicable).
- c) Vérification des effets couronne internes (si cela est applicable).
- d) Pour les générateurs d'impulsions de déclenchement aux enveloppes scellées, un essai de fuite doit être effectué sur chaque appareil par toute méthode sensible adoptée par le fabricant.

4.2.3.3.2 Essais de type du circuit à autodéclenchement

Un essai individuel doit être réalisé avant de procéder à l'essai de type.

- a) Essai de tension d'amorçage
L'essai doit démontrer que l'amorçage se produit dans la plage de tolérance spécifiée.
- b) Essai climatique
L'essai doit démontrer que l'amorçage de l'éclateur principal se produit dans la plage de tolérance spécifiée, pour des conditions d'environnement spécifiées, telles que la température, la pression atmosphérique, etc. (voir CEI 60060-1).

4.2.3.3.3 Essai individuel du circuit à déclenchement forcé

Les essais individuels pour un circuit à déclenchement forcé sont les suivants.

- a) Essai fonctionnel (peut être exécuté lors de la mise en service).
- b) Essai de tension d'amorçage de l'éclateur de précision (si cela est applicable).
- c) Mesure du courant de répartition ou du courant de fuite (si cela s'applique).
- d) Vérification des effets couronne internes (si cela s'applique).
- e) Pour les générateurs d'impulsions de déclenchement aux enveloppes scellées, un essai de fuite doit être effectué sur chaque appareil par toute méthode sensible adoptée par le fabricant.
- f) Mesure des valeurs de composants.

4.2.3.3.4 Essai de type du circuit à déclenchement forcé

Voir 4.2.3.4.2.

4.2.3.4 Essais spéciaux (essai type)

4.2.3.4.1 Essai de l'éclateur complet de l'éclateur autodéclenché (optionnel)

L'essai doit permettre de vérifier que l'éclateur complet, comprenant l'éclateur principal et l'éclateur de déclenchement fonctionne correctement. Le circuit d'essai doit comprendre l'éclateur complet. Des enregistrements oscillographiques doivent être réalisés.

4.2.3.4.2 Essai de l'éclateur complet de l'éclateur à déclenchement forcé

La séquence d'essais complète est la suivante.

a) Essai de la durée totale de shuntage correspondant à 0,95 fois le niveau de protection

Le but de cet essai est de vérifier le délai total depuis l'instant où le courant de varistance atteint le seuil de haute intensité jusqu'à la conduction de l'éclateur n'est pas plus longue que ce que le fabricant a déclaré. Le circuit d'essai doit comprendre l'éclateur principal, le circuit de déclenchement et la protection de la varistance contre les surcharges.

Une tension en courant continu d'une magnitude n'excédant pas 0,95 fois la tension du niveau de protection est appliquée aux bornes du matériel. Un ordre de shuntage est généré en soumettant la protection de la varistance contre les surcharges à un courant d'une magnitude (prenant en compte les rapports du TC) qui excède le seuil. L'essai doit être réalisé avec des systèmes redondants désactivés.

L'essai doit être réalisé 5 fois pour les deux polarités de la tension en courant continu appliquée.

Critères d'acceptation de l'essai: Le déclenchement de l'éclateur principal doit se produire pour toutes les applications et le délai maximum ne doit pas dépasser la durée déclarée par le fabricant

b) Vérification du déclenchement et de la durée de shuntage à une tension minimale

Le but de cet essai est de vérifier la tension minimale pour le déclenchement et le délai associé depuis le moment de l'ordre d'un shunt jusqu'à la conduction de l'éclateur. Le circuit d'essai doit comprendre l'éclateur principal et le circuit de déclenchement.

Une tension en courant alternatif ayant une valeur de crête égale à la tension minimale garantie pour le déclenchement est appliquée aux bornes du matériel. L'essai doit être réalisé avec des systèmes redondants désactivés. L'ordre de shuntage doit être généré de manière cyclique à une position de phase 0, 30, 60 ... 330 selon la tension appliquée.

Critères d'acceptation de l'essai: Le shuntage pour toutes les applications doit se produire dans la période spécifiée par le fabricant.

NOTE 1 Cet essai n'est applicable que si l'éclateur est capable de shunter les condensateurs série par l'intermédiaire d'un ordre de shuntage externe, par exemple pour réduire une tension transitoire de rétablissement (TTR) élevée sur les disjoncteurs du réseau.

c) Essai de résistance à la tension à fréquence industrielle

L'essai doit démontrer que l'éclateur complet incluant les circuits de déclenchement offre une résistance de tension suffisante vis-à-vis des défauts externes sans shunter les condensateurs série dans les conditions d'environnement spécifiées, telles que la température, la pression atmosphérique, etc.

Le circuit d'essai doit comprendre le dispositif complet de protection contre les surtensions, comprenant l'éclateur principal, le circuit de déclenchement forcé et une varistance.

L'éclateur doit être exposé à une tension de 50 Hz (60 Hz) qui est limitée par une varistance. La tension d'essai présumée doit avoir une valeur de crête correspondant à 1,5 fois la tension du niveau de protection. La varistance doit limiter la tension parcourant le matériel à la tension du niveau de protection.

La durée de la tension d'essai doit être de 0,5 secondes.

L'essai doit être réalisé une fois.

NOTE 2 L'essai est applicable aux seuls éclateurs à déclenchement forcé.

NOTE 3 La tension d'essai et le niveau de protection de la varistance sont réglés pour prendre en considération l'influence des conditions d'environnement, telles que la pression atmosphérique, l'altitude, etc.

NOTE 4 La durée de l'essai est basée sur le temps d'élimination du défaut de la ligne de transmission et est limitée à 0,5 secondes afin d'éviter un excès d'énergie de la varistance.

4.3 Varistance

4.3.1 But

Le but principal de la varistance est d'agir pour protéger les condensateurs (type M1 et type M2) contre les surtensions.

4.3.2 Classification

Selon leur principe de fonctionnement, les varistances peuvent être classées comme suit:

- varistance sans éclateur (type M1);
- varistance avec éclateur (type M2).

Les essais pour les deux types sont identiques.

4.3.3 Essais

4.3.3.1 Essais individuels

4.3.3.1.1 Généralités

Les essais individuels ne sont pas décrits en détail, dès lors que plusieurs méthodes d'essai différentes peuvent conduire à la même qualité quant à l'aptitude de tenue à l'énergie, de niveau de protection et de fiabilité de fonctionnement. Le programme d'essai fourni ici doit par conséquent être considéré à titre d'exemple.

4.3.3.1.2 Essai de tenue à l'énergie

On doit soumettre tous les éléments de varistance à un essai de tenue à l'énergie, y compris des séquences d'injection répétées d'énergie, séparées les unes des autres par des périodes de refroidissement. Chaque séquence d'essai doit exposer l'élément de varistance à une injection d'énergie supérieure ou égale à l'énergie assignée de courte durée.

4.3.3.1.3 Essai de tension résiduelle

Pour vérifier la réalisation d'un niveau de protection donné, un essai de tension résiduelle doit être réalisé sur chaque élément de varistance ou sur une unité complète de varistances assemblées. De préférence, il convient de réaliser cet essai avec une amplitude de courant du même ordre que celle obtenue pour le courant maximal de défaut présumé pour la varistance, en tenant compte du facteur d'échelle de courant n_c . La forme d'onde peut avoir n'importe quelle durée de front entre la microseconde et la milliseconde.

Le niveau de protection pour un groupe de varistances, pour la forme d'onde et l'amplitude réelles, est alors déterminé par l'essai de type et par le rapport entre la tension résiduelle pour le courant d'essai individuel et la tension résiduelle des fractions pour l'essai de type avec la même onde de courant.

4.3.3.1.4 Essai de fuite

Des unités complètement assemblées dans des enveloppes hermétiques doivent être soumises à un essai de fuite approprié.

4.3.3.1.5 Essai de tension de référence

La tension de référence doit être mesurée pour chaque unité de varistance. Les valeurs mesurées doivent être comprises dans la plage spécifiée par le fabricant.

4.3.3.1.6 Mesure des pertes

Les pertes électriques doivent être mesurées à une tension à fréquence industrielle égale à la COV pour chaque unité de varistance et les pertes doivent se situer dans les limites spécifiées par le fabricant.

Une tension d'alimentation à fréquence industrielle égale à la COV de chaque unité de varistance doit être appliquée et on doit vérifier que le courant de fuite se situe dans la plage des données garanties. (Pour ce niveau de tension, le courant de fuite est presque purement capacitif.)

4.3.3.1.7 Essai de décharges partielles

Par une méthode précise, on doit démontrer l'absence satisfaisante de décharges partielles internes dans toutes les unités assemblées de varistance. L'essai doit être réalisé en appliquant une tension à fréquence industrielle au moins égale à 1,05 fois la COV de l'unité de varistance. La valeur mesurée pour les décharges partielles internes ne doit pas excéder 10 pC.

4.3.3.1.8 Essai de répartition du courant

Le fabricant doit spécifier, pour la répartition du courant, un écart maximal acceptable entre les colonnes parallèles d'éléments de varistances composant une varistance complète. En outre, le fabricant doit indiquer la procédure d'essai individuel démontrant que la répartition du courant est comprise dans les limites données.

4.3.3.2 Essais de type

4.3.3.2.1 Échantillons

Sauf indication contraire, tous les essais de type doivent être réalisés sur trois fractions d'éléments de varistance neufs qui n'ont pas été soumis à des essais préalables, sauf dans un but d'évaluation.

Les facteurs d'échelle en tension, courant et énergie utilisés pour déterminer les contraintes représentatives à appliquer sur les échantillons sont décrits plus en détail dans l'Article 5.

4.3.3.2.2 Essai de tension résiduelle

Le but de la mesure de la tension résiduelle est d'obtenir la tension maximale résiduelle pour un modèle donné pour tous les courants spécifiés. La tension maximale résiduelle pour un choc de courant utilisé pour les essais individuels est spécifiée et indiquée dans les caractéristiques d'essai de type fournies par le fabricant.

La tension maximale résiduelle d'un modèle donné de varistance pour toute amplitude de courant est calculée à partir de la tension résiduelle de fractions contrôlées lors d'essais de type multipliée par un facteur d'échelle spécifique. Ce facteur d'échelle est égal au rapport de la tension maximale résiduelle déclarée, comme vérifié lors des essais individuels, pour la tension résiduelle mesurée des fractions au courant et à la forme d'onde identiques.

4.3.3.2.3 Essai de tension résiduelle en choc de manœuvre

L'essai doit être réalisé sur des fractions avec une tension de référence d'au moins 3 kV. Ces fractions doivent comprendre une seule colonne de varistances; celle-ci n'a pas besoin de son enveloppe et doit être exposée à l'air libre, à une température ambiante de $(20 \pm 15) ^\circ\text{C}$.

Les fractions sont soumises à un choc de courant de manœuvre conformément à la CEI 60099-4:2009 avec une durée de front conventionnelle comprise entre 30 μ s et 100 μ s et une durée conventionnelle de mi-valeur sur la queue d'environ deux fois la durée de front conventionnelle. L'amplitude du courant est choisie approximativement égale à 0,5, 1,0 et 1,5 fois le courant maximal présumé pour le groupe de varistances, divisée par le facteur d'échelle n_c pour le courant. La tension résiduelle de la varistance complète est déterminée pour la tension résiduelle la plus élevée de la fraction, selon 4.3.3.2.2.

Si les magnitudes de courant sont les mêmes et que la durée de front conventionnelle de la forme d'onde de l'essai individuel est comprise entre 30 μ s et 100 μ s, l'essai individuel est suffisant et l'essai de type n'est pas nécessaire.

4.3.3.2.4 Procédure de vieillissement accéléré

L'essai doit être réalisé conformément à 8.5.2 de la CEI 60099-4:2009 visant à déterminer si un facteur de correction doit être appliqué à la tension COV permanente de fonctionnement dans l'essai de tenue à l'énergie et de stabilité diélectrique à fréquence industrielle du 4.3.3.2.6.

4.3.3.2.5 Essai répété de tenue à l'énergie

Le but de cet essai est de vérifier que la varistance peut supporter le courant et d'énergie pour lesquelles elle a été conçue, tout en conservant les variations de ses caractéristiques dans des limites acceptables.

L'essai doit être réalisé sur les éléments de la varistance de chaque hauteur et diamètre d'un modèle.

L'essai de tenue à l'énergie doit être effectué sur trois nouveaux échantillons de fractions qui n'ont été soumis précédemment à aucun essai, sauf celui spécifié plus haut à des fins d'évaluation. Les fractions doivent comprendre des éléments individuels de varistances à l'air libre ou dans le milieu environnant réel du modèle (le choix revient au fabricant) et doivent être exposées à l'air libre, à une température ambiante de (20 ± 15) °C.

On doit appliquer à la fraction, un choc de courant longue durée d'une durée conventionnelle d'environ (2 à 4) ms, injectant une énergie égale à l'énergie maximale prescrite pour la varistance tout en tenant compte du facteur d'échelle d'énergie n_w .

L'essai doit être réalisé 20 fois, avec un intervalle de temps entre chaque fonctionnement suffisamment long pour permettre le retour de la fraction à la température ambiante.

Avant de répéter l'essai de tenue à l'énergie, on doit faire les mesures suivantes:

- mesure de la tension de référence;
- mesure de la tension résiduelle, avec une amplitude de courant de 500 A et une forme d'onde 30/60 μ s.

On doit répéter ces mesures après l'essai et on doit démontrer qu'aucun changement significatif ne s'est produit. La tension de référence ne doit pas avoir chuté de plus de 5 % et la tension résiduelle ne doit pas avoir varié de plus de 5 %.

De plus, il ne doit pas y avoir de signe de dommage mécanique (crevaisson, contournement ou rupture).

NOTE L'ouvrage réalisé et publié par Cigré WG A3.17 a montré que l'aptitude de tenue à l'énergie des éléments de varistance pour des événements dans la plage de temps 200 μ s à 10 s en pratique est indépendante du temps d'application. Par conséquent, afin de simplifier la procédure d'essai, des chocs de courant rectangulaire ont été choisis pour l'application de l'énergie.

4.3.3.2.6 Essai de tenue à l'énergie et essai diélectrique de stabilité à fréquence industrielle (essai de récupération thermique)

Le but de cet essai est de vérifier que la varistance est capable de supporter l'énergie maximale spécifiée, complétée éventuellement par une séquence de surtensions temporaires, et ainsi démontrer la stabilité thermique à la COV et à la température ambiante la plus élevée.

L'essai doit être effectué sur trois nouveaux échantillons de fractions qui n'ont été soumis précédemment à aucun essai, sauf celui spécifié plus haut à des fins d'évaluation. Les fractions doivent comprendre des éléments de varistance dotés de leur enveloppe de telle manière que la fraction représente un modèle thermique fidèle du groupe de varistances.

Si le groupe de varistances comprend des unités avec plusieurs colonnes d'éléments de varistances en parallèle, les fractions doivent avoir le même nombre de colonnes en parallèle.

En outre, si la tension de référence de l'essai défini en 4.3.3.2.5 a diminué pour l'un quelconque des échantillons, on doit utiliser, pour cet essai, les mêmes éléments de varistance. Sinon on doit choisir des éléments de varistance neufs.

Avant l'essai, on doit effectuer les mesures suivantes:

- mesure de la tension de référence;
- mesure de la tension résiduelle, avec une amplitude de courant de 500 A et une forme d'onde 30/60 μ s.

On doit répéter ces mesures après l'essai et on doit démontrer qu'aucun changement significatif ne s'est produit. La tension de référence ne doit pas avoir chuté de plus de 5 % et la tension résiduelle ne doit pas avoir varié de plus de 5 %.

L'essai de tenue à l'énergie et de stabilité en tension à fréquence industrielle débute avec un préchauffage des fractions en essai, à une température de (60 ± 3) °C, dans une étuve.

Dans les 5 min suivant le retrait de la fraction d'essai de la source de chaleur, l'essai doit être réalisé avec la température de départ des pièces actives à (60 ± 3) °C, mesurée par une sonde de température. L'énergie doit être injectée en 3 min par une durée conventionnelle d'un ou plusieurs chocs de courant longue durée de (2 à 4) ms (nombre non spécifié). L'amplitude de courant et le nombre de chocs doivent être choisis de telle sorte que l'énergie totale déchargée n'est pas inférieure à l'énergie maximale prescrite pour la varistance tout en tenant compte du facteur d'échelle d'énergie n_w .

Dès que possible et dans les 5 s qui suivent l'application de l'énergie, on doit appliquer une tension à fréquence industrielle égale à la tension de fonctionnement du groupe de varistances en régime permanent, en tenant compte du facteur d'échelle de tension n_v , et maintenir cette tension pendant 30 min. Pendant ces 30 min, on doit démontrer la stabilité thermique, c'est-à-dire d'une part mesurer la composante résistive du courant de fuite et/ou la température des éléments de varistance et/ou les pertes, et d'autre part démontrer une diminution progressive.

Si après une absorption d'énergie, on a spécifié une séquence de surtensions temporaires pour le groupe de varistances, on doit appliquer la même séquence ou une séquence équivalente aux fractions en essai, en tenant compte du facteur d'échelle de tension.

Si la surtension temporaire est très élevée, la température peut s'élever pendant cette période. Cependant, si la tension est réduite à la tension de fonctionnement en régime permanent ou à un niveau qui peut être maintenu pendant des heures, on doit prouver la stabilité thermique. Par exemple après une séquence de défauts, la tension du condensateur peut être supérieure de 35 % à la tension de fonctionnement en régime permanent, pendant 30 min, et peut être suivie d'une surcharge de 17 % pendant encore 24 h. La varistance doit alors être stable en température après une énergie maximale et une surcharge de pendant

30 min, c'est-à-dire que la varistance doit pouvoir se refroidir quand elle est soumise à une surcharge en tension pendant 24 h.

NOTE 1 Si nécessaire, la COV peut être réglée conformément aux résultats de la procédure de vieillissement accélérée du 4.3.3.2.4.

NOTE 2 Si les mêmes éléments de varistance que dans l'essai de tenue à l'énergie sont utilisés en raison de la baisse de la tension de référence, le facteur d'échelle de la tension sera calculé à partir de la mesure initiale de la tension de référence, à savoir avant l'essai de tenue à l'énergie

4.3.3.2.7 Vérification des fractions thermiques

L'essai doit être réalisé conformément à l'Annexe B de la CEI 60099-4:2009. Afin de prouver que la fraction est le modèle thermique fidèle du groupe de varistances, on doit comparer la courbe de refroidissement de la fraction avec la courbe de refroidissement de l'unité de varistance la plus longue.

On doit déterminer les courbes de refroidissement soit par les valeurs moyennes, soit en vérifiant la température des éléments de varistance pris isolément.

Si l'on choisit de vérifier la température d'un seul élément de varistance, on doit choisir un élément situé entre la moitié et le tiers de la longueur de l'unité depuis le haut.

Enfin, pendant toute la période de refroidissement, afin de prouver l'équivalence thermique, la fraction doit être à une température supérieure ou égale à celle de l'unité de varistance.

NOTE Les différences entre la courbe de refroidissement du modèle thermique et celle de la varistance réelle (refroidissement plus rapide du modèle thermique) durant les 15 premières minutes sont acceptables mais peuvent être compensées par une température de départ supérieure dans les essais. L'augmentation de la température de départ correspond à la plus grosse différence de température entre le modèle thermique et la varistance réelle durant les 15 premières minutes.

4.3.3.2.8 Essai de court-circuit

L'essai est applicable pour toutes les varistances, c'est-à-dire aussi pour les modèles ne disposant pas de dispositif de baisse de pression. Dans la CEI 60099-4:2009, sont prescrites les procédures d'essai (de baisse de pression) qui sont valables pour les parafoudres conventionnels. L'objectif de ces essais est de montrer qu'un court-circuit interne au parafoudre ne provoquera pas de projection d'éclats de l'enveloppe qui serait dangereuse pour les équipements environnants et les personnels à proximité.

Dès lors que la varistance est reliée aux bornes de la batterie de condensateurs, on doit tenir parfaitement compte du fait que l'essai couvre également la décharge de la batterie de condensateurs à partir du niveau de protection, c'est-à-dire que le condensateur se déchargera par la varistance.

En l'absence d'autre procédure, les essais de baisse de pression, à la fois pour des courants élevés et faibles, doivent être réalisés conformément à la CEI 60099-4:2009.

Pour des unités de varistance de même type, différant les unes des autres uniquement par la longueur de l'isolateur, un essai positif pour l'unité la plus longue est considéré comme valable pour les unités plus courtes.

4.4 Disjoncteur shunt

Le but du disjoncteur shunt est de shunter et d'insérer le condensateur série. L'insertion d'un condensateur est réalisée en ouvrant le disjoncteur shunt. En cas de défauts et de perturbations on peut aussi utiliser un shuntage automatique. On doit faire très attention au courant d'appel à haute fréquence quand le condensateur est court-circuité. Dans certains cas, le disjoncteur est relié en série avec un éclateur de protection, et utilisé uniquement pour l'insertion (type K avec deux éclateurs). Voir le 5.1.3 de la CEI 60143-1:2004. Le disjoncteur shunt doit être conforme aux exigences de la CEI 62271-109:2008.

Il est important d'observer que le ou les éléments de coupure doivent être conçus pour manœuvrer le segment réel de condensateurs, alors que l'isolement par rapport à la terre doit correspondre à celui du réseau.

Le cycle de fonctionnement doit être inversé, par exemple (O)-C-O-C et il est recommandé d'équiper le disjoncteur shunt de deux bobines d'enclenchement.

En ce qui concerne le service mécanique requis, la CEI 62271-109:2008 définit deux catégories.

- Disjoncteur shunt de catégorie M1: Disjoncteur shunt avec une endurance mécanique normale (soumis aux essais de type mécanique pour 2 000 séquences de fonctionnement). C'est le cas normal.
- Disjoncteur shunt de catégorie M2: Disjoncteur shunt fréquemment utilisé pour des exigences de service spécial et conçu pour ne nécessiter qu'une maintenance limitée comme démontré par les essais de type spécifiques (disjoncteur shunt avec endurance mécanique étendue, soumis aux essais de type mécanique pour 10 000 séquences de fonctionnement). Ce type de disjoncteur shunt est normalement utilisé sur des condensateurs série multi-segmentés où la réactance des condensateurs est un service fréquent. Il s'agit du cas étendu.

4.5 Sectionneurs et sectionneurs de mise à la terre

4.5.1 But

4.5.1.1 Sectionneur shunt

Le but du sectionneur shunt est de shunter la batterie de condensateurs série, sous réserve que cette batterie de condensateurs série soit déjà shuntée par un disjoncteur shunt. Le but du sectionneur shunt est aussi de relier la batterie de condensateurs série au système de transmission en ouvrant le sectionneur shunt. Les sectionneurs isolants et le disjoncteur shunt doivent être fermés lors de l'ouverture du sectionneur shunt.

L'ouverture du sectionneur shunt est difficile notamment si le circuit d'amortissement et de limitation du courant est relié en parallèle au condensateur série et l'inductance de la bobine est élevée, voir 5.7.

4.5.1.2 Sectionneur d'isolation

Le but du sectionneur isolant est de déconnecter délibérément la batterie de condensateurs série du réseau.

Les sectionneurs shunt et d'isolation sont capables de déconnecter la batterie de condensateurs série sans interrompre le fonctionnement du réseau, par exemple pour la maintenance de la batterie de condensateurs série.

4.5.2 Classification

Les sectionneurs peuvent être classés de différentes façons.

- a) Selon leur principe de fonctionnement: coupure centrale, à double coupure, coupure horizontale, coupure verticale, pantographe, semi-pantographe, etc.
- b) Selon le mécanisme de fonctionnement: par moteur, à commande pneumatique, à commande hydraulique, etc.

4.5.3 Essais

4.5.3.1 Généralités

Les essais suivants doivent être réalisés. On doit faire la corrélation avec les CEI 62271-102:2001 et CEI 62271-1.

4.5.3.2 Essais individuels

La séquence d'essais individuels est comme suit:

- a) Essai diélectrique sur le circuit principal
7.1 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- b) Essai diélectrique sur les circuits auxiliaires et de commande
7.2 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- c) Mesure de la résistance du circuit principal
7.3 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- d) Essai d'étanchéité
7.4 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- e) Contrôles de conformité et contrôles visuels
7.5 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- f) Essais de fonctionnement mécanique
7.101 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.

4.5.3.3 Essais de type

6.1 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.

- a) Essais diélectriques
6.2 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- b) Essais de tension de perturbation radioélectrique (r.i.v.)
6.3 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- c) Mesure de la résistance des circuits
6.4 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- d) Essais d'échauffement
6.5 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- e) Essais au courant de courte durée et à la valeur de crête du courant admissibles
6.6 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- f) Vérification de la protection
6.7 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- g) Essai d'étanchéité
6.8 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- h) Essai de compatibilité électromagnétique (CEM)
6.9 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- i) Essai pour prouver l'aptitude de fermeture en court-circuit des sectionneurs de terre
6.101 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- j) Essais de fonctionnement et d'endurance mécanique
6.102 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- k) Fonctionnement dans des conditions sévères de formation de glace

Cet essai peut seulement être réalisé sur demande particulière de l'utilisateur. Le 6.103 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.

- l) Fonctionnement aux températures limites
6.104 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- m) Essai pour vérifier le fonctionnement correct du dispositif indicateur de position
6.105 de la CEI 62271-102:2001 s'applique.
- n) Essais de coupure de courant de transfert de barres
6.106 et l'Annexe B de la CEI 62271-102:2001 s'appliquent.
- o) Essais de coupure de courant induit
6.107 et l'Annexe C de la CEI 62271-102:2001 s'appliquent.

4.6 Matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge (MALCD)

4.6.1 But

Le but du matériel d'amortissement et de limite de décharge est de limiter l'amplitude du courant et la fréquence ainsi que de produire un amortissement suffisant des oscillations de décharge des condensateurs lors du fonctionnement de l'éclateur de protection ou de la fermeture du sectionneur shunt.

4.6.2 Classification

Le matériel d'amortissement se compose d'une bobine d'inductance de limitation de décharge et dans certaines applications, il peut aussi inclure une résistance d'amortissement reliée en parallèle à la bobine. La bobine est presque exclusivement d'un modèle central à air sec. La résistance est aussi presque exclusivement d'un modèle à air sec. La résistance d'amortissement peut être connectée en permanence dans le circuit ou être reliée seulement pendant le fonctionnement du dispositif de shuntage.

Le matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge peut se situer dans la branche de dérivation de la batterie de condensateurs ou dans la branche contenant le condensateur. Voir 5.7.

4.6.3 Essais

4.6.3.1 Généralités

Les essais doivent être réalisés séparément sur la bobine d'inductance et sur la résistance.

4.6.3.2 Bobine d'inductance de limitation de courant de décharge

4.6.3.2.1 Généralités

Les essais individuels, de type et optionnels pour la bobine de limite de courant de décharge doivent être réalisés conformément à l'Article 9 de la norme CEI 60076-6:2007 sur les bobines d'inductance.

4.6.3.2.2 Essais individuels

Les essais individuels suivants doivent être réalisés:

- a) Mesure de la résistance de bobinage.
On doit mesurer la résistance en courant continu et en courant alternatif (à 50 Hz ou 60 Hz). 9.10.2 de la CEI 60076-6:2007 et la CEI 60076-1 s'appliquent.
- b) Mesure de l'inductance
9.10.5 de la CEI 60076-6:2007 s'applique.

c) Mesure du facteur de perte et qualité

9.10.6 de la CEI 60076-6:2007 s'applique.

d) Essai de surtension d'enroulement

9.10.7 de la CEI 60076-6:2007 s'applique. L'essai doit être réalisé trois (3) fois.

La valeur du choc de tension doit être choisie en tenant compte du niveau de protection en tension. Voir 6.1.3.4 de la CEI 60143-1:2004.

Un essai de tension de tenue à fréquence industrielle ne peut normalement pas être réalisé sur une bobine d'inductance de limitation de courant de décharge en raison de la faible impédance de la bobine. Un essai aux ondes de choc équivalent est donc utilisé. Du fait de la faible valeur d'inductance de la bobine de limite de courant de décharge, la forme d'onde de l'impulsion peut être plus courte que $1,2/50 \mu\text{s}$ et l'onde peut être déformée. Il convient de l'accepter.

4.6.3.2.3 Essais de type obligatoires

Les essais de type obligatoire sont les suivants.

a) Essai au courant de court-circuit

Un essai au courant de court-circuit doit être effectué pour démontrer que la bobine d'inductance de limitation de courant de décharge supportera le courant de défaut traversant le shunt à fréquence industrielle assignée (courant de défaut existant et ultérieur). La magnitude du courant d'essai doit correspondre au courant de défaut traversant le shunt maximum spécifié (courant de défaut partiel) à l'emplacement des condensateurs série. La première crête du courant d'essai appliqué doit correspondre à la valeur spécifiée du courant de court-circuit mécanique.

La durée du courant d'essai doit être conforme à celle correspondant au courant de défaut traversant l'éclateur à l'emplacement de la batterie de condensateurs série. On doit prendre en compte le temps maximal d'élimination du défaut par le disjoncteur de secours ainsi que des situations de défaut. Des situations de défauts typiques sont données à l'Article 5. L'essai doit être réalisé deux fois.

9.10.10 de la CEI 60076-6:2007 s'applique.

b) Essai au courant établi du shunt

Un essai au courant établi du shunt doit être effectué pour démontrer que la bobine d'inductance de limitation de courant de décharge supportera la combinaison des courants de décharge et de défaut à fréquence industrielle auxquelles la bobine d'inductance sera exposée durant le shuntage des condensateurs.

La magnitude du courant d'essai doit correspondre à la somme instantanée simulée maximale du courant de décharge des condensateurs au plus haut niveau de protection et du courant de défaut à fréquence industrielle, décalage inclus. La simulation doit être effectuée sur un modèle de système électrique du système électrique réel comprenant un modèle du condensateur série réel.

La fréquence du courant d'essai doit être conforme à la fréquence du courant de décharge de la batterie de condensateurs série réelle. Toutefois, on peut aussi utiliser une demi-période de courant à 50 Hz ou 60 Hz provenant d'un générateur de court-circuit, avec une amplitude identique.

La durée du courant d'essai doit être choisie afin de fournir la même contrainte thermique sur la bobine d'inductance comme prévu en conditions de service. On doit tenir compte de la question de savoir si la bobine d'inductance peut être exposée à des décharges multiples des condensateurs en l'espace de quelques secondes du fait de la refermeture automatique à grande vitesse de la ligne de transmission.

L'essai au courant établi du shunt doit être réalisé 20 fois.

Critères d'acceptation de l'essai: il ne doit pas se produire d'échauffement excessif, ni de dommage mécanique ou électrique.

c) Essai d'échauffement

Pendant l'essai d'échauffement, la résistance d'amortissement, si elle existe, doit aussi être en place, si celle-ci est placée à l'intérieur de la réactance.

9.10.8 de la CEI 60076-6:2007 s'applique.

4.6.3.2.4 Essais de type obligatoires, si cela est applicable.

Les essais spéciaux suivants doivent être réalisés sur la requête spécifique de l'acheteur.

a) Essai au courant de court-circuit / au courant établi du shunt modifié

Il est possible de réaliser, à titre d'alternative des essais des points a) et b) de 4.6.3.2.3, un essai au courant de court-circuit / au courant établi du shunt modifié. Cet essai comprendra à la fois les exigences de l'essai au courant établi du shunt et l'essai au courant de défaut.

9.10.15 de la CEI 60076-6:2007 s'applique.

b) Essai de résonance mécanique

9.10.16 de la CEI 60076-6:2007 s'applique.

c) Mesure de la résistance d'enroulement et de l'inductance contre fréquence

La mesure de la résistance d'enroulement et de l'inductance comme fonction de la fréquence, dans un intervalle de fréquence spécifié supérieur à la fréquence industrielle, doit être réalisée au moyen d'une méthode pont approuvée à tension réduite. La plage de fréquence doit être l'intervalle de fréquence spécifié par le fabricant des condensateurs série.

4.6.3.3 Résistance d'amortissement

4.6.3.3.1 Essais individuels

Les essais de type à réaliser sont les suivants.

a) Mesure de la résistance

La résistance doit être mesurée en courant alternatif, en utilisant la fréquence de décharge, comme en courant continu.

Une mesure en basse tension continue est suffisante, si le rapport de la mesure en continu avec la résistance réelle en alternatif est connu, à partir de l'essai de type de décharge en haute tension.

b) Essai de fuite

Si cela s'applique à la conception de la résistance réelle.

c) Essai de tension de référence

Si la résistance contient une varistance de série, un essai de tension de référence doit être réalisé.

d) Essai de tension d'amorçage

L'éclateur auxiliaire, s'il existe, doit être soumis à un essai de tension d'amorçage.

e) Essai de décharges partielles (essai d'effet couronne interne)

L'essai doit être réalisé conformément à la CEI 60270. L'essai est seulement pertinent pour la partie de la résistance d'amortissement qui contient une varistance si cela est applicable.

4.6.3.3.2 Essais de type

La résistance doit être essayée pour vérifier que la tenue à l'énergie, la tenue au courant à haute fréquence et au courant de défaut à fréquence industrielle sont conformes aux spécifications.

Pour des raisons pratiques, l'essai peut être mené sur un modèle plus petit de la résistance d'amortissement. La conception du modèle doit être similaire à la conception de la résistance réelle.

a) Essai d'aptitude à absorber l'énergie

On doit vérifier l'aptitude à absorber l'énergie en déchargeant une batterie de condensateurs dans la résistance. L'énergie doit être basée sur l'accumulation d'énergie à court terme de la résistance durant les conditions de service, en tenant aussi compte des décharges multiples des condensateurs pendant une courte période de temps en raison du fait de la refermeture automatique à grande vitesse de la ligne de transmission (voir l'Article 5, Guide). L'essai doit être réalisé 10 fois. L'échantillon d'essai doit pouvoir refroidir à température ambiante entre les essais.

Avant et après les essais, la résistance de l'échantillon d'essai doit être vérifiée. On doit démontrer qu'aucun changement majeur ne s'est produit. La résistance ne doit pas avoir changé de plus de $\pm 5\%$.

De plus, il ne doit pas y avoir de signe de dommage mécanique (crevaison, contournement ou rupture).

b) Essai au courant de décharge

Un essai de tenue au courant de décharge doit être effectué pour démontrer que la résistance supportera le courant de décharge auxquelles la résistance sera exposée durant les opérations de shuntage des condensateurs. L'injection de courant, dans la résistance, avec l'amplitude correcte, doit être effectuée à partir d'une batterie de condensateurs chargée. L'amplitude de courant ne doit pas être inférieure à 1,05 fois le courant de décharge maximal en service et la durée de la crête de courant ne doit pas être inférieure à celle en service réel. L'essai doit être réalisé 2 fois. L'échantillon d'essai doit pouvoir refroidir à température ambiante entre les essais.

Avant et après les essais, la résistance de l'échantillon d'essai doit être vérifiée. On doit démontrer qu'aucun changement majeur ne s'est produit. La résistance ne doit pas avoir changé de plus de $\pm 5\%$.

De plus, il ne doit pas y avoir de signe de dommage mécanique (crevaison, contournement ou rupture).

c) Essai de tenue au courant de défaut à fréquence industrielle

L'essai doit vérifier que la résistance peut supporter le courant à fréquence industrielle, qui suit le courant de décharge du condensateur à haute fréquence (si cela s'applique). Un courant à fréquence industrielle avec les valeurs correctes d'amplitude et de durée doit être injecté dans la résistance. L'essai doit être réalisé une fois.

Avant et après les essais, la résistance de l'échantillon d'essai doit être vérifiée. On doit démontrer qu'aucun changement majeur ne s'est produit. La résistance ne doit pas avoir changé de plus de $\pm 5\%$. Comme la résistance est liée à la température de l'élément de résistance, elle doit être prise en compte dans l'évaluation des résultats.

De plus, il ne doit pas y avoir de signe de dommage mécanique (crevaison, contournement ou rupture)

NOTE Si la résistance comprend une varistance série, cet essai n'est pas applicable, car la varistance empêchera les courants de fréquence industrielle de circuler.

d) Essai aux ondes de choc sur l'enveloppe

L'enveloppe de la résistance doit être soumise à un essai aux ondes de choc. L'amplitude des ondes de choc doit être calculée sur la base du niveau de tension présumé et en appliquant un facteur de sûreté de 1,2. Voir 6.1.3.4 de la CEI 60143-1:2004.

On doit appliquer 15 chocs des deux polarités. Il est permis au maximum 2 contournements externes pour chaque polarité.

Il se peut que les générateurs de chocs de laboratoires haute tension ne puissent pas fournir de tension de choc de $1,2 / 50 \mu\text{s}$ avec la forme d'onde correcte du fait de la faible résistance de la résistance d'amortissement. La 'fin' peut être plus courte que $50 \mu\text{s}$.

e) Extinction de l'éclateur de la résistance d'amortissement

Dans certains cas il existe un petit éclateur relié en série avec la résistance d'amortissement, qui connecte la résistance au circuit, uniquement lors de l'oscillation de décharges. L'extinction du courant de l'éclateur, contre la tension de fréquence industrielle parcourant la bobine d'inductance reliée en parallèle, après la cessation du courant de décharge haute fréquence, doit être démontrée par des essais; le cas échéant, l'essai de fréquence industrielle conformément à c) doit être réalisé et la résistance assignée pour des pertes continues.

4.7 Transformateur de tension

4.7.1 But

Les transformateurs de tension dans les batteries de condensateurs série peuvent avoir différents buts:

- Pour les condensateurs série raccordés à des réseaux basse tension les transformateurs magnétiques de tension peuvent être utilisés pour mesurer la tension aux bornes du segment de condensateur (deux bornes haute tension) ou la tension phase-terre, (une borne haute tension et une borne basse tension ou à la terre). Les transformateurs magnétiques de tension peuvent aussi être utilisés comme un moyen de décharge.
- Pour les condensateurs série raccordés à des réseaux haute tension, les transformateurs de tension capacitifs (CVT) peuvent être utilisés pour mesurer la tension phase-terre. Les CVT peuvent aussi être utilisés comme source auxiliaire d'alimentation pour les matériels de protection et de commande installés sur la plate-forme (CVT inversés). Voir l'Article 5.

4.7.2 Classification

Les transformateurs de tension peuvent être classés de différentes façons.

a) Concernant leur emplacement:

- transformateurs de tension au potentiel de terre. Le niveau d'isolement doit correspondre à la tension du réseau;
- transformateurs de tension au potentiel de la plate-forme. Le niveau d'isolement doit être conforme à l'Article 6 de la CEI 60143-1:2004.

b) Concernant leur conception:

- transformateurs de tension inductifs (magnétiques). Les transformateurs de tension inductifs sont généralement isolés au moyen d'huile et munis d'un noyau de fer;
- les transformateurs condensateurs de tension (TCT). Un TCT se compose d'un diviseur de tension capacitif (DTC) et d'un transformateur de sortie inductif (magnétique).

4.7.3 Essais

4.7.3.1 Généralités

Les essais (individuels / de type) du transformateur de tension doivent être effectués conformément à la CEI 61869-3 ou à la CEI 61869-5.

4.7.3.2 Essais de type supplémentaires pour les transformateurs de tension inductifs

Si les conditions de service sont telles qu'un transformateur de tension inductif forme un circuit fermé avec un condensateur, les essais de type suivants doivent être réalisés.

a) Essai au courant de décharge

Le but de l'essai est de vérifier que le transformateur de tension peut électriquement et mécaniquement supporter le courant dynamique lors d'une décharge du condensateur.

On doit de préférence réaliser l'essai en chargeant un condensateur sous une tension continue et puis en le déchargeant à travers le transformateur de tension. L'amplitude du courant de décharge doit être de 110 % du courant de décharge réel de l'installation, si le condensateur est au moins chargé au niveau de protection. L'essai doit être réalisé 10 fois.

Il ne doit pas se produire de dommage sur l'enroulement et sur les bornes du transformateur de tension.

b) Essai d'aptitude à dissiper l'énergie.

Le but de l'essai est de vérifier que le transformateur de tension peut absorber l'énergie spécifiée lors de décharges successives du condensateur. L'énergie par décharge et le nombre de décharges successives doivent être spécifiés. Voir les autres explications à l'Article 5.

On doit de préférence réaliser l'essai en chargeant un condensateur sous une tension continue et puis en le déchargeant à travers le transformateur de tension. Chaque essai doit avoir une énergie qui est la somme des énergies du nombre spécifié de décharges successives du condensateur. L'essai doit être réalisé 5 fois avec une période de refroidissement entre les essais correspondant aux conditions réelles d'exploitation.

Aucun échauffement excessif ni dommage ne doivent survenir dans la bobine de décharge.

4.8 Sondes de courant

4.8.1 But

Le but principal des sondes de courant est de fournir des mesures pour la protection, voir l'Article 5.

Les transformateurs de courant peuvent également être utilisés comme alimentation auxiliaire des matériels de protection et de commande situés sur la plate-forme.

4.8.2 Classification

Trois types de sondes peuvent être utilisés pour mesurer la circulation du courant sur la plate-forme. Ces sondes comprennent des transformateurs de courant à noyau de fer, des transformateurs électroniques qui intègrent de l'électronique avec le transformateur de courant et des capteurs de courant optiques.

Les sondes de courant peuvent être classés selon le potentiel auquel ils se trouvent:

- sondes de courant au potentiel de terre. Le niveau d'isolement doit correspondre à la tension du réseau;
- sondes de courant au potentiel de la plate-forme. Le niveau d'isolement doit être conforme à l'Article 6 de la CEI 60143-1:2004.

Des informations sur les différents transformateurs de courant alimentant les différentes protections des condensateurs série sont données à l'Article 5 et dans la CEI 60143-1:2004.

4.8.3 Essais des transformateurs de courant

Les essais individuels et de type des transformateurs de courant doivent être effectués conformément à la CEI 60044-1.

4.8.4 Essais des transformateurs électroniques

Les essais individuels et de type des transformateurs de courant doivent être effectués conformément à la CEI 60044-8.

4.8.5 Essais des capteurs optiques

Les essais individuels et de type des transformateurs de courant doivent être effectués conformément aux parties applicables de la série CEI 60044.

4.9 Condensateur de couplage

4.9.1 But

Le but d'un condensateur de couplage dans une installation de condensateurs série est d'être utilisé comme alimentation auxiliaire des matériels de protection et de commande situés sur la plate-forme.

Le niveau d'isolement doit correspondre à la tension du réseau.

4.9.2 Essais

Les essais (individuels / de type) des condensateurs de couplage doivent être effectués conformément aux CEI 60358-1 et CEI 60358-2.

4.10 Colonne de signal

4.10.1 But

Le but du système de transmission des signaux est de faire transiter l'information et/ou les signaux de commande depuis le niveau de la plate-forme vers le bâtiment de commande. De même les commandes provenant du bâtiment de commande et destinées au niveau de la plate-forme (par exemple la commande de déclenchement forcé) sont envoyées par l'intermédiaire du système de transmission.

Le système de transmission des signaux comprend généralement trois sous-ensembles principaux: l'électronique de la plate-forme, la colonne de signal en fibre optique et le câble à fibre optique. L'électronique de la plate-forme est traitée à l'article 4.12. Les câbles à fibre optique sont couverts par la CEI 60794-1 et la CEI 60794-2.

La colonne de signal à laquelle se réfère 4.10 est spécifiquement une liaison par fibre optique isolée à haute tension, pouvant être soumise à des tensions de fonctionnement supérieures à 1 000 V.

4.10.2 Essais

La colonne de signal a des exigences d'essais optiques et d'isolement.

Essais diélectriques

À des fins d'essais électriques et de vérifications visuelles d'isolement, la colonne de signal doit être contrôlée conformément à la CEI IEC 61109; à ces fins ainsi que pour la présente norme, elle est définie comme isolateur «hybride», normalement non conçu pour supporter des charges mécaniques.

Les niveaux de tenue à la tension d'essais de type doivent correspondre à ceux de la plate-forme, et la colonne de signal peut être contrôlée de façon à simuler sa position sous ou à côté de la plate-forme.

Essais optiques

À des fins d'essais optiques, la colonne de signal doit être contrôlée conformément à la CEI 61300-3-4. Il doit être déterminé, entre le client et le fournisseur, quelle méthode utiliser exactement à partir de la présente norme, sur la base de la longueur des fibres, du type de fibres et des connecteurs de fibre optique (le cas échéant).

4.11 Liaisons de plate-forme par fibre optique.

4.11.1 But

Le but des liaisons de plate-forme par fibre optique est de fournir un circuit pour la transmission de signaux optiques entre les sondes de courant situées à différents emplacements de la plate-forme et de la colonne de signal par fibre optique. En outre, les liaisons de plate-forme par fibre optique offrent un isolement entre les sondes de courant et la plate-forme.

4.11.2 Essais

4.11.2.1 Généralités

Les essais diélectriques doivent être réalisés en conformité générale avec la CEI 61109 et la CEI 60143-1:2004.

4.11.2.2 Essais individuels

Les essais individuels sont comme suit.

- a) inspection visuelle;
- b) essai de continuité et essai d'affaiblissement léger de chaque fibre optique.

4.11.2.3 Essais de type

Essais diélectriques, humides.

4.12 Protection par relais, matériel de commande et matériels de liaison entre la plate-forme et le sol.

4.12.1 But

Le but du matériel de protection par relais est de surveiller toutes les fonctions d'exploitation des condensateurs série ainsi que les méthodes d'autosupervision pour la transmission des signaux de la plate-forme vers le sol et de fournir une fonction de protection en cas de défauts tels que le déséquilibre d'un condensateur, l'arc maintenu d'un éclateur, le contournement sur la plate-forme, etc. Normalement les protections initialisent le shuntage des condensateurs série, en fermant le disjoncteur shunt et/ou en déclenchant un éclateur puis en fermant le disjoncteur shunt.

Le but du matériel de commande est de fournir les fonctions de commande à l'exploitation des condensateurs série, telles que l'insertion et la mise en court-circuit.

Le but du matériel de liaison de la plate-forme au sol est de faire transiter l'information entre le matériel monté sur la plate-forme et le matériel installé au sol et vice versa.

La liaison peut être réalisée par transfert des signaux sous formes mécanique, pneumatique, magnétique ou optique. Actuellement, le transfert des signaux sous forme optique au moyen de fibres optiques est la méthode la plus utilisée.

4.12.2 Classification

Des informations sur les différentes protections et les fonctions de commande sont fournies dans l'Article 5.

4.12.3 Essais

4.12.3.1 Généralités

Les essais de la protection des condensateurs série et du système de commande se composent d'essais individuels, d'essais de type et d'essais de fonctionnement. Le but des essais de type est de vérifier la conception correcte des matériels, leur aptitude à fonctionner dans des conditions ambiantes spécifiées et à satisfaire aux exigences spécifiées de fonctionnement et de compatibilité électromagnétique.

On doit faire la corrélation avec les CEI 60068-2 pour les conditions climatiques, CEI 60255-21 pour les essais mécaniques, CEI 60255-5 pour les essais diélectriques, CEI 61000-4-11 et CEI 61000-4-29 pour les variations de tension d'alimentation auxiliaire et CEI 61000-4 pour les exigences de compatibilité électromagnétique, sauf indication contraire.

4.12.3.2 Essais individuels

4.12.3.2.1 Généralités

Au minimum les essais suivants doivent être réalisés. Les essais cités doivent concerner le matériel situé sur la plate-forme, le matériel de liaison de la plate-forme vers le sol et le matériel au sol.

- a) Examen visuel.
- b) Essai de tenue diélectrique (CEI 60255-5).
- c) Essai thermique préliminaire de 100 h.
- d) Essai de fonctionnement (4.12.3.2.2).

L'objectif des essais est de vérifier la qualité de fabrication de toutes les composantes et de l'assemblage complet.

4.12.3.2.2 Essai de fonctionnement

La procédure consiste à injecter des signaux qui simulent des conditions nécessitant une action de protection dans chaque entrée d'asservissement. Chaque sortie est surveillée lors de ces essais. Tous les paramètres de matériels informatiques et logiciels sont vérifiés. Les paramètres des logiciels peuvent être vérifiés par des techniques logicielles.

Si la communication optique entre la plate-forme et le sol est utilisée, la puissance de sortie des émetteurs doit être vérifiée.

Un essai de perte optique doit être réalisé sur chaque fibre des isolateurs avec communication entre la plate-forme et le sol.

4.12.3.3 Essais de type

Au minimum, les essais suivants doivent être réalisés.

- a) Essais climatiques: Essai à l'air chaud et essai de chaleur humide (CEI 60068-2).
- b) Essai diélectrique (CEI 60255-5).
- c) Essais de compatibilité électromagnétique (CEI 61000-4).
- d) Essai mécanique (CEI 60255-21).

Les essais cités doivent concerner le matériel situé sur la plate-forme, le matériel de liaison de la plate-forme vers le sol et le matériel au sol.

NOTE Les essais avant la mise en service, sur la protection par relais, le matériel de commande et le matériel de liaison de la plate-forme vers le sol sont normalement spécifiés. Ces essais sont réalisés avant la mise en service de la batterie en réseau. Voir l'Article 5.

5 Guide

5.1 Généralités

Un bref sommaire de quelques principes relatifs à l'application et au fonctionnement des condensateurs série est présenté ici.

5.2 Données spécifiques pour les condensateurs série

Il convient que l'acheteur fournisse au fabricant les données suivantes:

- réactance capacitive initiale et finale par phase (Ω /phase);
- courants initial et final assignés par phase (A/phase);
- amplitude (A) et durée (s, min, h) du courant de surcharge maximal;
- courant d'oscillation (A, s);
- niveau maximal de protection en tension (kV crête);
- niveau minimal de protection en tension (kV crête);
- courant de réinsertion maximal (A);
- courant de défaut maximal dans le condensateur série, avec le condensateur série en court-circuit (initial/final) (kA) Note - Ce courant est inférieur au courant de défaut total à la terre;
- vitesse de réinsertion à l'issue de l'élimination d'un défaut du réseau (externe), si un éclateur est utilisé (ms);
- longueur de la ligne (km);
- paramètres de la ligne (r/km, x/km, b/km) (composantes directe et homopolaire);
- emplacement des condensateurs série² ;
- type de relais de protection de ligne;
- tension normale entre phases et tension la plus élevée du réseau (kV);
- niveau d'isolement entre la plate-forme de condensateurs et le sol: LIWL, SIWL, tenue de courte durée en tension à fréquence industrielle (respectivement kV crête-kV crête-kV rms);
- altitude par rapport au niveau de la mer (m);
- vitesse de vent maximale (m/s);
- charge de glace maximale (N/m²);
- caractéristiques sismiques;
- plage de température ambiante (°C);
- tensions d'alimentation disponibles au niveau du sol (V alternatif, V en continu);
- durée maximale admissible du courant de défaut (ms);
- durée minimale pour le réenclenchement du disjoncteur de réseau après l'élimination d'un défaut et nombre de cycles de fermeture (ms);
- nombre de voies nécessaires pour les fonctions de commande et d'alarme, au niveau du sol;

² Un schéma unifilaire du réseau réel est préférable.

- nombre minimal et fonctions des signaux de mise en service à gérer, si cela est demandé.

5.3 Éclateur de protection

On utilise des éclateurs dans les batteries de condensateurs série afin de protéger les unités de condensateurs contre les surtensions (éclateurs autodéclenchés) ou pour protéger la varistance à oxyde métallique contre les surcharges (éclateurs à déclenchement forcé).

Les éclateurs peuvent être autodéclenchés ou à déclenchement forcé.

Éclateur autodéclenché

L'éclateur utilisé pour les condensateurs série conventionnels sans varistances est un éclateur de type autodéclenché (déclenchement de tension). Il s'amorce quand la tension à ses bornes atteint le seuil de réglage.

L'éclateur autodéclenché doit avoir une tension de déclenchement précise, avec une tolérance de l'ordre de $\pm 3\%$ à $\pm 6\%$.

Éclateur à déclenchement forcé

Dans le cas d'une varistance, la tension d'autodéclenchement de l'éclateur est réglée pour être supérieure à la tension du niveau de protection U_{PL} . L'éclateur est déclenché par un circuit de commande de déclenchement forcé dans le cas où la capacité thermique de la varistance à oxyde métallique est dépassée.

5.4 Varistance

5.4.1 Généralités

Le but d'une varistance est de limiter la surtension transitoire aux bornes du condensateur en écoulant la surintensité du réseau, habituellement provoquée par des défauts du réseau, ce qui, dans le cas contraire, provoquerait une tension excessive aux bornes du condensateur. Cette condition se produit à chaque demi-période pendant la durée des surintensités. Voir Figure 5. La tension maximale aux bornes du condensateur série, qui en résulte, dépend des caractéristiques non linéaires «courant-tension» de la varistance et de l'amplitude de la surintensité. Comme la tension de la varistance s'accroît avec le courant, le niveau maximal de protection est habituellement défini par le courant maximal attendu dans la varistance pendant la durée du défaut en réseau. Voir Figure 4.

Le choix du niveau de protection de la varistance doit tenir compte des tensions associées aux courants hors défaut dans les condensateurs série, tels que:

- courant normal et assigné
- courants de surcharge (amplitude/durée)
- courants d'oscillation

La varistance doit supporter ces tensions, après avoir été exposée à une injection d'énergie de courte durée à valeur assignée. La température ambiante maximale doit être prise en compte.

La varistance doit être conçue pour l'énergie maximale à laquelle elle sera exposée en situation de défaut en réseau. Les situations de défaut pour lesquelles la varistance doit être conçue sont habituellement spécifiées dans un cycle de fonctionnement sur défaut établissant les types de défaut, la durée des défauts et le temps de repos entre les défauts successifs. Le temps de repos peut être un facteur décisif pour la conception de la varistance. Un exemple de cycle de fonctionnement sur défaut est indiqué dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Sommaire des critères de conception d'une varistance pour absorber l'énergie (exemple)

Type de défaut	Durée
Phase-terre externe	5 cycles, 0,5 s ouvert – 12 cycles
Phase-phase	5 cycles, 0,5 s ouvert – 12 cycles
Triphasé	12 cycles
Phase-terre interne	5 cycles ^a , 0,5 s ouvert – 12 cycles ^a
Phase-phase	5 cycles ^a , 0,5 s ouvert – 12 cycles ^a
Triphasé	12 cycles ^a
NOTE Il est plus fréquent d'étudier les défauts uniphasés et triphasés.	
^a La varistance peut être court-circuitée par l'éclateur de secours pendant les périodes de 5 et 12 cycles de défauts internes.	

L'énergie qui est développée pendant un cycle spécifié de fonctionnement sur défaut, dans une varistance protégeant un condensateur série, dépend principalement des facteurs indiqués ci-dessous:

- amplitude du courant dans la varistance;
- caractéristiques «tension-courant» de la varistance;
- durée totale du défaut;
- instant de l'apparition du défaut.

Le processus du développement de l'énergie est illustré dans les formes d'onde indiquées à la Figure 5.

Le courant, la tension et l'énergie des formes d'onde pour un défaut interne entre phase et terre sont indiqués.

Une philosophie communément utilisée pour réduire les exigences relatives à l'énergie, et par conséquent le coût d'une varistance, est d'autoriser une mise en court-circuit rapide de la varistance au moyen d'un éclateur déclenché pour les défauts sur la fraction de ligne compensée (défauts internes). Cependant, la varistance doit être conçue pour supporter l'énergie issue des cycles de fonctionnement sur défaut, à l'extérieur de la fraction de ligne compensée (défauts externes), sans mise en court-circuit rapide. Voir Tableau 1.

Une étude sur ordinateur des régimes électromagnétiques transitoires, basée sur les caractéristiques du réseau (impédances directe et homopolaire), et les caractéristiques de la varistance sont généralement nécessaires pour déterminer le dimensionnement correct de la varistance et ses caractéristiques assignées. L'absorption d'énergie doit correspondre aux combinaisons les plus contraignantes entre le type de défaut, la durée du défaut et les pratiques de réenclenchement, par exemple deux défauts monophasés ou un défaut triphasé.

Informations demandées sur le réseau

- impédances directe et homopolaire du réseau équivalent;
- courbes de charge;
- durée maximale d'élimination du premier défaut;

- durée du réenclenchement après élimination du premier défaut;
- nombre de réenclenchements;
- durée maximale d'élimination en secours;
- durée du réenclenchement après élimination en secours.

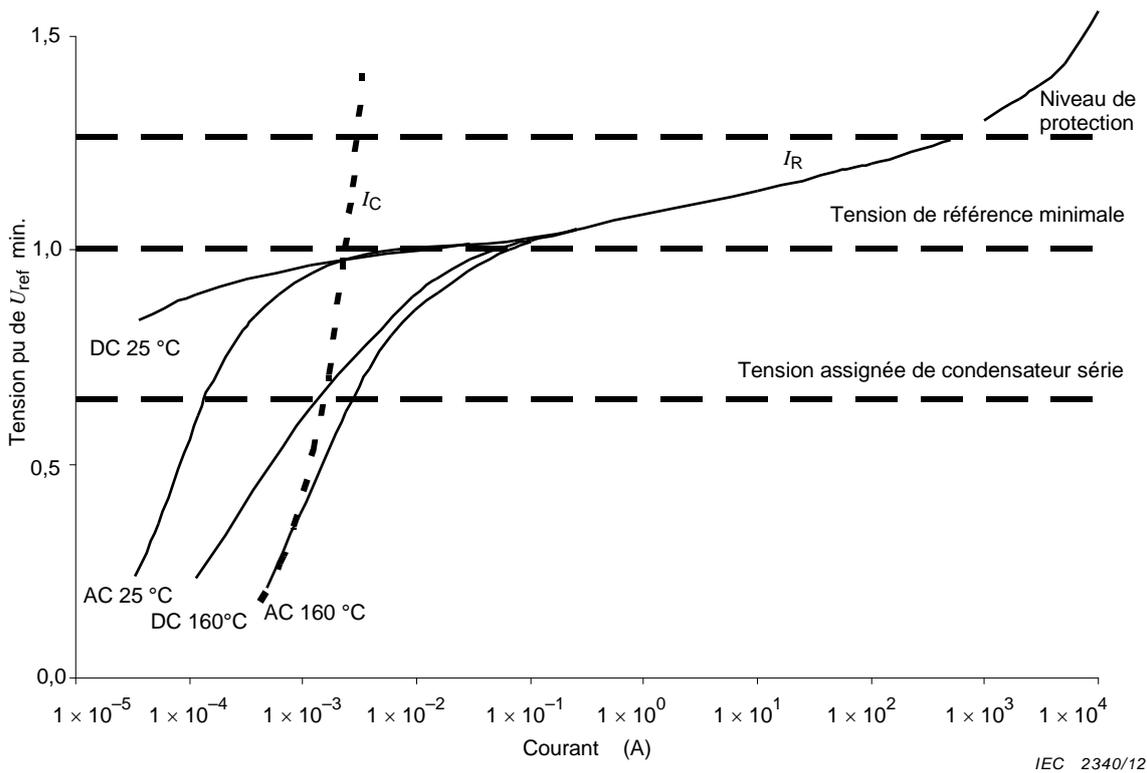
5.4.2 Caractéristique «tension-courant» d'une varistance

Les caractéristiques «tension-courant» typiques d'un disque donné d'oxyde métallique sont indiquées en Figure 4. La tension assignée du condensateur série, la tension de référence et le niveau de protection de la varistance sont précisés.

Historiquement, les caractéristiques «tension-courant» d'une varistance ont été décrites selon une formule

$$I = kU^\alpha$$

où k et α sont des constantes pour un matériau donné. Si une telle formule est utilisée pour la composante résistive du courant, dans les disques d'oxyde métallique, on doit mettre en exergue qu'un exposant unique ne peut décrire la caractéristique complète. Les exposants qui s'appliquent dépendent de la zone de conduction et peuvent varier entre 3 et 50. Même dans une zone particulière, des nombres généralisés ne s'appliquent pas et les caractéristiques réelles de la varistance doivent être utilisées pour la détermination des constantes.

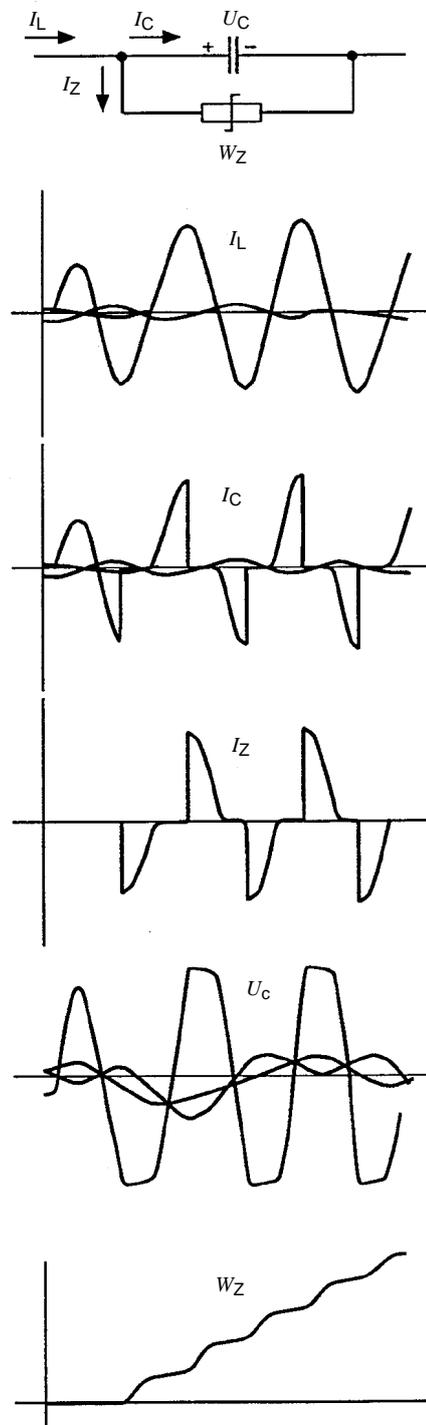


I_R = Composante résistive
 I_C = Composante capacitive

Figure 4 – Caractéristiques typiques «tension-courant» d'un disque particulier d'oxyde métallique (95 mm de diamètre)

5.4.3 Formes d'ondes du courant et de la tension d'une varistance pendant un défaut en réseau

Les formes d'ondes correspondant au courant, à la tension et à l'énergie, pour un défaut entre phase et terre, sont indiquées dans les schémas de la Figure 5.



IEC 2341/12

Figure 5 – Formes d'ondes du courant, de la tension et de l'énergie pour un défaut entre phase et terre

5.4.4 Commentaires sur les définitions relatives aux varistances et sur les essais de type

5.4.4.1 Généralités

On donne ci-après des explications et commentaires importants sur les définitions relatives aux varistances et sur les essais de type de l'Article 2.

5.4.4.2 Commentaires sur la tension de référence minimale (U_{MRef})

U_{MRef} est utilisée pour désigner la varistance. Dans l'essai individuel des unités de varistances assemblées, il convient de contrôler que la tension de référence est égale ou supérieure à U_{MRef} afin d'être sûr qu'aucune unité de varistance ne soit acceptée avec des pertes trop importantes.

NOTE 1 Le rapport U_{Ref}/U_{MRef} est utilisé pour déterminer le facteur d'échelle de la fraction pour l'essai de type. U_{Ref} est la tension de référence de la fraction d'essai et U_{MRef} est la tension de référence minimale admissible qui est donnée pour la varistance complète.

NOTE 2 Cette définition de U_{MRef} signifie, selon le choix du courant de référence, que U_{MRef} sera presque égale au terme correspondant à la «tension assignée du cycle de fonctionnement» (ANSI³) ou à la «tension assignée» (CEI) pour les parafoudres. Cependant ces définitions ne sont pas issues directement de procédures d'essai, ni définies par celles-ci. Comme la «tension assignée» d'une varistance, prévue pour la protection d'un condensateur série EHV, peut facilement être confondue avec la tension assignée des condensateurs série, on a évité ce terme ici.

5.4.4.3 Choix des échantillons pour les essais de type

Sauf indication contraire, tous les essais de type doivent être réalisés sur trois fractions d'éléments de varistance neufs qui n'ont pas été soumis à des essais préalables, sauf dans un but d'évaluation.

Les facteurs d'échelle pour les tensions, courant et énergie qui sont utilisés pour déterminer les contraintes à appliquer sur les échantillons doivent être déterminés comme suit:

a) *Le facteur d'échelle pour la tension n_v*

Est défini comme n_v , le rapport existant entre le volume minimal des éléments de varistances utilisés dans la varistance complète ayant le même nombre de colonnes parallèles que l'échantillon, et le volume des éléments de varistances utilisés comme échantillons.

Il convient que la tension de référence de la fraction U_{Ref} , soit égale à U_{MRef}/n_v . Si U_{Ref} est supérieure à U_{MRef}/n_v pour un échantillon disponible, le facteur n_v doit être diminué en conséquence.

b) *Le facteur d'échelle pour le courant n_c*

est déterminé comme le rapport entre le nombre total de colonnes parallèles de la varistance complète et le nombre de colonnes parallèles de l'échantillon.

c) *Le facteur d'échelle pour l'énergie n_w*

Il est déterminé comme le produit $n_v \times n_c \times$ la tolérance maximale autorisée pour le partage du courant entre les colonnes parallèles.

5.4.4.4 Commentaires sur l'essai de type de tension résiduelle

Le but de la mesure de tension résiduelle est d'obtenir la tension résiduelle maximale pour un modèle donné pour tous les courants spécifiés, par exemple pour vérifier la réalisation d'un niveau de protection donné.

La procédure d'essai individuel pour contrôler la tension résiduelle doit permettre de mesurer la tension résiduelle des varistances complètes, d'unités de varistances et d'éléments

³ American National Standards Institute.

individuels de varistance. Dans ce dernier cas, la somme des tensions résiduelles mesurées sur les unités (si plusieurs unités sont en série) ou sur les éléments doit être ajoutée pour constituer la tension résiduelle de la varistance complète.

La tension maximale résiduelle pour un choc de courant utilisé pour les essais individuels doit être spécifiée et indiquée dans les caractéristiques d'essai de type fournies par le fabricant.

Les tensions résiduelles mesurées des fractions pour n'importe quel courant et n'importe quelle forme d'onde spécifiés sont alors multipliées par le rapport de la tension résiduelle maximale, pour le courant d'essai individuel, avec la tension résiduelle mesurée pour la fraction, au même courant, afin d'obtenir les tensions résiduelles maximales de la varistance complète.

Exemple

Tous les éléments de varistance d'une varistance particulière sont classés à 500 A avec un choc de courant de 8/20 μ s (temps de front virtuel 8 μ s, durée jusqu'à la mi-valeur 20 μ s). Un nombre spécifié d'éléments de varistance sont alors empilés en série. Autant d'empilements d'éléments qu'il est nécessaire sont constitués pour obtenir le nombre de colonnes parallèles de varistance. La tension résiduelle maximale pour un courant d'essai individuel de 500 A à 8/20 μ s pour toute colonne, donnée par la somme des tensions résiduelles des éléments unitaires de varistances, a une certaine valeur (U_M).

Une section d'essai choisie pour des essais de tension résiduelle est tout d'abord essayée pour le même courant de 500 A à 8/20 μ s, donnant une tension résiduelle U_{TM} .

Le rapport U_M/U_{TM} est alors utilisé pour recalculer les tensions résiduelles mesurées de la fraction pour les courants et formes d'ondes spécifiés, pour donner des chiffres représentatifs de la varistance complète en oxyde métallique.

5.4.4.5 Commentaire sur la procédure de vieillissement accéléré

En ce qui concerne la procédure de vieillissement accéléré, il existe des accords entre groupes de travail de la CEI et de l'IEEE⁴ préparant des normes pour les essais des parafoudres en alternatif, sur les principes fondamentaux de la procédure d'essai. Dès lors qu'il n'y a pas de différence essentielle, ces principes fondamentaux peuvent également être appliqués pour les varistances, dans les applications concernant les condensateurs série. Pour les parafoudres utilisés en courant alternatif, la répartition de la tension le long du parafoudre, provoquée par les capacités parasites par rapport à la terre, est prise en considération. Cela est fait en utilisant une formule dans laquelle la hauteur du parafoudre est prise en compte. Cependant, la plupart des varistances destinées aux condensateurs série sont courtes. De plus, le grand nombre d'unités parallèles contribue à obtenir une répartition linéaire de tension. En conséquence, pour les varistances à oxyde métallique, on omet de prendre en compte cette considération relative à la hauteur.

5.4.4.6 Commentaire sur le partage du courant

Afin de satisfaire aux exigences concernant les énergies élevées, il se peut qu'on doive utiliser des colonnes parallèles d'éléments de varistance dans les parafoudres. Pour les applications relatives à la protection des condensateurs série, cela est usuel. Des varistances à oxyde métallique comportant jusqu'à 400 colonnes parallèles ont été commandées. Le point fondamental est d'obtenir un bon partage du courant et de l'énergie pour éviter une construction peu économique. L'extrême non linéarité du matériau, malgré de faibles différences entre les tensions résiduelles entre colonnes parallèles, peut presque totalement empêcher un partage satisfaisant du courant.

⁴ Institute of Electrical and Electronics Engineers.

En raison des tolérances de production, l'écart maximal typique est d'environ 5 % pour les tensions résiduelles à des courants compris entre 100 A et 1 000 A par élément de varistance. Avec un facteur de non linéarité α égal à 30 dans l'équation $I = kU^\alpha$, cela correspond à un rapport de courant de 1:4.

L'aptitude demandée en matière d'énergie, pour les varistances, signifie habituellement que les courants significatifs par élément de varistance se situeront dans cet intervalle. Pour des courants plus élevés, par exemple pour les surtensions, qui doivent être pris en compte pour les parafoudres, le facteur α est plus petit; environ 11 pour un courant de 10 kA. Comme la tension résiduelle est habituellement mesurée pour ce courant en essai individuel, l'intervalle est plus petit, environ 1 % à 2 %, et le partage du courant est alors meilleur, même si aucune mesure particulière n'est prise. Avec α égal à 11 et une différence de 2 % pour les tensions de décharge, on obtient un rapport de courant de 1:1,24.

5.4.4.7 Unité de varistance de réserve

On doit tirer une autre conclusion des essais de partage de courant; en considérant l'extrême non-linéarité, même de petites modifications, relatives aux tensions résiduelles comprises dans les tolérances normales pour les mesures, peuvent affecter la répartition du courant entre les colonnes parallèles. Il est alors recommandé de toujours installer et mettre sous tension les éventuelles unités de varistance de réserve parmi les autres unités, cela dès la date de réception. Cela assurera un vieillissement uniforme de toutes les unités de varistance, y compris les unités de rechange, et cela maintiendra fixes les tolérances sur le partage du courant. Notons que chaque phase aura son propre historique électrique et que, par conséquent il n'est pas recommandé de mélanger les unités de réserve entre les différentes phases. Chaque phase doit avoir ses propres unités de réserve.

Pour les raisons mentionnées en 5.4.4.7, il n'est pas recommandé de modifier les batteries de varistances en leur ajoutant des colonnes de varistances nouvellement fabriquées.

5.5 Disjoncteur shunt

Le disjoncteur shunt est normalement installé au sol sur sa propre structure avec chaque unité de coupure en parallèle avec le condensateur série et le matériel de protection pour chaque phase ou segment.

Le disjoncteur doit pouvoir s'ouvrir pour insérer les condensateurs dans les circuits quand les conditions du réseau sont telles que les condensateurs peuvent atteindre leur niveau assigné de surcharge dans un délai d'une demi-heure et quand ces charges résultent d'une tension d'insertion transitoire entre pôles égale au niveau de protection.

Les disjoncteurs doivent être sans réamorçage et doivent pouvoir supporter les courants d'appel provenant des décharges fréquentes des condensateurs depuis la tension assignée (valeur crête) et des décharges plus rares depuis une tension égale au niveau de protection.

Le disjoncteur doit pouvoir remplir sa fonction à une fréquence au moins égale à la fréquence déterminée par le matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge de la capacité (par exemple 500 Hz à 1 500 Hz).

La CEI 62271-109 donne plus d'informations.

5.6 Sectionneurs

Lors de la mise sous tension du condensateur, par exemple après une maintenance, les sectionneurs série sont fermés, le sectionneur shunt est ouvert et finalement le disjoncteur shunt est ouvert.

Lors de la mise hors tension du condensateur, la séquence de manœuvre inverse est réalisée.

Quand on ouvre le sectionneur shunt, le courant doit basculer vers la batterie de condensateur shuntée (voir Figure 1). Contrairement à l'utilisation habituelle d'un sectionneur (c'est-à-dire ouverture d'une ligne, ce qui signifie coupure d'un courant capacitif), dans ce cas un courant inductif doit être coupé.

Le sectionneur shunt doit avoir des possibilités de coupure suffisantes pour remplir sa fonction pour une charge de réseau importante et éventuellement sur plusieurs segments.

Outre la fonction normale, le sectionneur shunt peut être utilisé comme dispositif de fermeture d'urgence, comme secours d'un disjoncteur shunt. En raison du fait que les sectionneurs se ferment habituellement lentement, on doit s'attendre à des préamorçages et à des collages importants des contacts. Des matériaux particulièrement choisis pour les contacts peuvent minimiser les détériorations.

5.7 Matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge

5.7.1 But du matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge

Le but du matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge (MALCD) est de limiter et amortir le courant de décharge haute fréquence qui est produit à l'amorçage de l'éclateur de protection ou la fermeture du disjoncteur shunt. L'amplitude (particulièrement la première crête de courant) ainsi que la fréquence du courant haute fréquence, produit à la décharge des condensateurs, doit être limitée. L'amplitude, la fréquence et l'amortissement du courant de décharge doit être limitée à des valeurs acceptables pour les unités de condensateurs fondues, le disjoncteur shunt et l'éclateur.

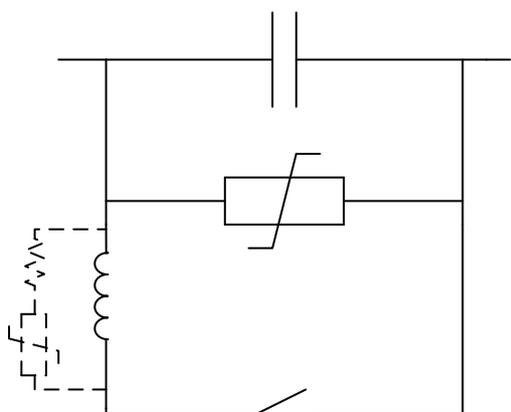
5.7.2 Emplacement du MALCD

5.7.2.1 Généralités

L'emplacement du MALCD est déterminé par les exigences spécifiées.

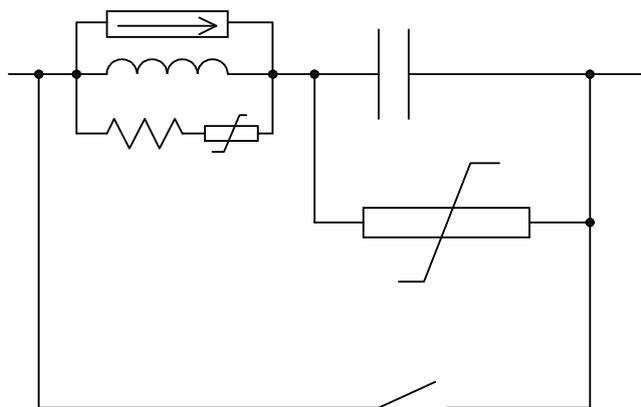
Les présentes formes d'emplacement du MALCD sont indiquées ci-dessous:

- emplacement conventionnel dans la branche du disjoncteur shunt conformément à la Figure 6;
- emplacement en série avec le condensateur conformément à la Figure 7 ou à la Figure 8.



IEC 2342/12

Figure 6 – Emplacement conventionnel dans la branche du disjoncteur shunt



IEC 2343/12

Figure 7 – MALCD en série avec le condensateur et le MOV en parallèle

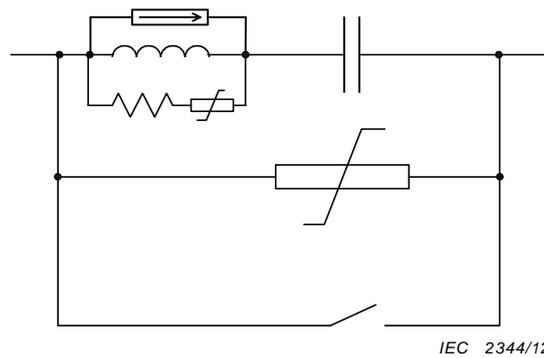


Figure 8 – MALCD en série avec le condensateur et parallèle au MOV

Si aucune exigence sur l'emplacement du MALCD n'est spécifiée, le matériel peut se trouver dans un endroit conventionnel conformément à la Figure 6. S'il existe une exigence selon laquelle la tension aux bornes du condensateur doit être très faible, lorsque le condensateur série est exploité avec le disjoncteur shunt en position fermée, il convient de placer le MALCD en série avec le condensateur conformément à la Figure 7 ou à la Figure 8. Il est à noter que le MALCD relié en série augmentera les pertes totales de l'installation des condensateurs série parce que la bobine d'inductance est continuellement exposée au courant du réseau lorsque les condensateurs série sont en service, c'est-à-dire non court-circuités.

Avec le MALCD en série et le condensateur monté conformément à la Figure 7 et la Figure 8, une résistance d'amortissement en parallèle est nécessaire aussi au cas où une résistance d'amortissement n'est pas spécifiée dans les spécifications client. C'est parce que la bobine d'inductance doit être conçue avec de faibles pertes continues parce qu'elle est exposée au courant de service lorsque le condensateur série est en fonctionnement. Les faibles pertes correspondent à une forte valeur q de la bobine, ce qui signifie que l'amortissement du courant de décharge du condensateur sera très faible. Pour améliorer l'amortissement du courant de décharge du condensateur, il convient d'installer une résistance d'amortissement en parallèle.

Avec le MALCD est situé comme sur la Figure 7 et la Figure 8, la réactance du condensateur doit être augmentée afin de compenser la bobine d'inductance reliée en série.

NOTE 1 Lorsque le MALCD est situé comme sur la Figure 7 et la Figure 8, cela atténuera la transmission à fréquence porteuse sur la ligne. Dans certains cas, les dispositifs associés de couplage de la transmission à fréquence porteuse sont installés sur le côté secteur des condensateurs série (condensateurs série situés côté ligne).

5.7.2.2 Emplacement du MALCD en parallèle avec le condensateur

L'avantage de cet emplacement du MALCD en parallèle selon la Figure 6 réside dans le fait que les pertes continues de la bobine d'inductance sont évitées lorsque les condensateurs série sont en service, c'est-à-dire non court-circuités. Cela signifie que la bobine peut être conçue avec une faible valeur q afin d'obtenir l'amortissement nécessaire du courant de décharge du condensateur. Il en résulte que la résistance d'amortissement peut être omise dans de nombreux cas, par ex. si de fortes exigences sur l'amortissement ne sont pas spécifiées.

Les inconvénients de cet emplacement du MALCD en parallèle selon la Figure 6 sont les suivants:

- a) Lorsque le disjoncteur shunt d'un condensateur série est en position fermée, le condensateur et la bobine d'inductance formeront un circuit résonnant en parallèle. Si le disjoncteur shunt est en position fermée et qu'il y a un courant harmonique important dans le réseau, un courant harmonique élevé circulant peut aboutir dans le circuit bobine/condensateur. Il est possible que ce courant harmonique puisse faire surchauffer la bobine.

L'inductance de la bobine doit être choisie de façon à ce que la fréquence de résonance du circuit résonnant en parallèle ne coïncide pas avec les fréquences harmoniques des ordres suivants:

- (i) $6 \times n \pm 1$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (convertisseur harmonique)
 - (ii) $3 \times k$, $k = 1, 3, 5, \dots$
- b) Lorsque le sectionneur shunt est ouvert (disjoncteur shunt en position fermée), une tension se met à circuler dans la bobine d'inductance. La magnitude de la tension de bobine dépend de l'inductance de la bobine et de la magnitude réelle du courant du réseau à l'ouverture du sectionneur shunt. Le sectionneur shunt doit pouvoir s'ouvrir par rapport à la tension de bobine.

5.7.2.3 Emplacement du MALCD en série avec le condensateur

Les avantages de cet emplacement du MALCD en série selon la Figure 7 et la Figure 8 sont les suivants:

- a) La tension parcourant les condensateurs série à l'ouverture du sectionneur shunt (disjoncteur shunt en position fermée) est très faible. Cela entraîne de faibles exigences sur la capacité d'ouverture du sectionneur shunt. Le sectionneur shunt peut être ouvert sans problèmes, indépendamment de la magnitude du courant du réseau réel.
- b) Il n'y a pas de risque de condition résonnante en parallèle pour les fréquences harmoniques si la bobine est reliée en série avec le condensateur.

Les inconvénients de cet emplacement du MALCD selon la Figure 7 et la Figure 8 sont les suivants:

- a) Les pertes totales de l'installation de condensateurs série avec les condensateurs série en service seront plus grandes par rapport aux pertes avec l'emplacement selon la Figure 6.
- b) Le coût de l'installation pour une résistance d'amortissement en parallèle à la bobine d'inductance doit être ajouté.
- c) L'atténuation de la transmission à fréquence porteuse sur la ligne de transmission va s'accroître.
- d) La réactance du condensateur doit être augmentée pour compenser la réactance inductive de la bobine.
- e) Avec l'emplacement du MALCD situé selon la Figure 7 et la Figure 8, il peut falloir installer un parafoudre supplémentaire à travers la bobine afin de protéger celle-ci de surtensions causées par les ondes progressives le long de la ligne de transmission, à moins que la résistance de la résistance d'amortissement ne soit assez faible pour limiter la surtension maximale de la bobine.
- f) Avec l'emplacement du MALCD situé selon la Figure 8, le condensateur doit être conçu pour un plus grand niveau de protection par rapport à un emplacement du MALCD selon la Figure 6 et la Figure 7. C'est parce que les pointes de tension apparaîtront aux bornes du condensateur dans les conditions de défaut de la ligne de transmission lorsque le courant du réseau est commuté entre le MOV et le condensateur. Voir 10.5.2 de la CEI 60143-1:2004.

5.7.3 Configuration du MALCD

La configuration et la conception du MALCD dépendent des exigences spécifiées. Les configurations standard suivantes sont utilisées:

- a) Seulement une bobine de limitation du courant de décharge. Voir Figure 9.
- b) Une bobine de limitation du courant de décharge reliée en parallèle avec une résistance d'amortissement. Une varistance est reliée en série avec la résistance. Figure 10.
- c) Une bobine de limitation du courant de décharge reliée en parallèle avec une résistance d'amortissement. Un petit éclateur est relié en série avec la résistance. Voir Figure 11.

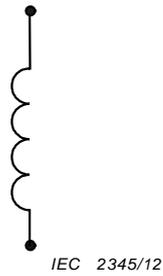


Figure 9 – Seulement une bobine de limitation du courant de décharge

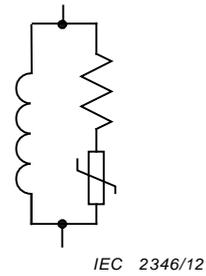


Figure 10 – Bobine de limitation du courant de décharge reliée en parallèle avec une résistance d'amortissement. Une varistance est reliée en série avec la résistance

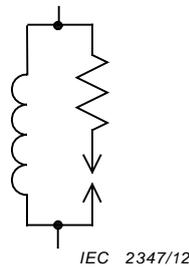


Figure 11 – Bobine de limitation du courant de décharge reliée en parallèle avec une résistance d'amortissement. Un petit éclateur est relié en série avec la résistance

La résistance d'amortissement reliée en parallèle est nécessaire lorsque le MALCD se trouve en série avec le condensateur selon la Figure 7 et la Figure 8. La résistance d'amortissement reliée en parallèle est aussi nécessaire lorsque l'exigence d'amortissement spécifiée est $< 0,9$ pu, c'est-à-dire si un amortissement lourd du courant de décharge du condensateur est nécessaire. Ceci est valable pour tous les emplacements conformément à la Figure 6 jusqu'à la Figure 8.

Le but d'avoir une varistance ou un éclateur relié en série avec la résistance d'amortissement est d'éviter des pertes continues dans la résistance durant le fonctionnement en essai continu de la batterie de condensateurs série. L'arrangement implique que la résistance d'amortissement est en fonctionnement et exposée à une haute tension et un courant élevé seulement pendant les oscillations de décharge transitoires des condensateurs.

Des exemples de formes d'ondes des oscillations de décharge condensateur – MALDC sont donnés à la Figure 12 pour deux configurations différentes du MALDC.

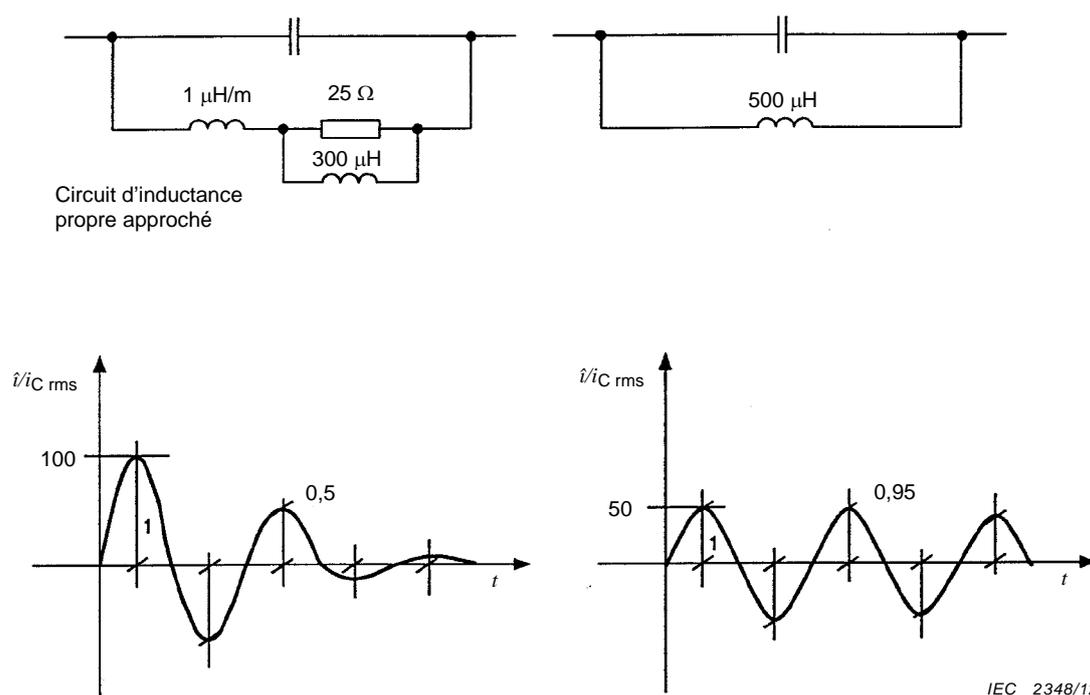


Figure 12 – Matériel d'amortissement et de limitation de courant avec et sans résistance d'amortissement

5.7.4 Divers commentaires sur le MALCD

Comme le matériel d'amortissement limitant le courant de décharge est en série avec la ligne, quand la batterie de condensateurs est court-circuitée, on doit la concevoir pour transporter les courants normaux et de surcharge, et pour supporter les contraintes thermiques et mécaniques relatives aux courants de décharge et de court-circuit.

Comme la fréquence de décharge se situe habituellement entre 500 Hz et 1 500 Hz, il n'est généralement pas possible de fournir de telles valeurs de courant pour l'essai du matériel (sauf si l'on construit un segment entier de batterie de condensateurs).

En pratique, les performances du matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge en regard des efforts électrodynamiques sont vérifiées par un essai en court-circuit à 50 Hz ou 60 Hz, pourvu que le matériel soit exempt de résonance mécanique quand il est soumis au courant à la fréquence de décharge. Cela est particulièrement important dans le cas de réactance de limitation du courant sans résistance d'amortissement.

Le nombre de décharges consécutives pendant les essais est déterminé en fonction des situations de défauts, de telle manière que le matériel d'amortissement et de limitation du courant de décharge soit en mesure de supporter l'énergie totale qui lui est appliquée dans le cas du défaut le plus contraignant.

Les mesures des pertes dans une résistance d'amortissement et de limitation du courant réclament une attention particulière en raison du faible facteur de puissance. Il est habituel de demander la mesure de la résistance de pertes de la réactance, à la fréquence fondamentale du réseau et à la fréquence de décharge, par exemple de 500 Hz à 1 500 Hz. Le fabricant doit utiliser une méthode appropriée (wattmètre, pont ou autre). Dès lors que les réactances ne contiennent habituellement pas de matériaux magnétiques, les mesures peuvent être faites pour n'importe quel courant et corrigées pour le courant permanent assigné. Pour la correction de température, se référer à la CEI 60076-1.

En variante, les pertes peuvent être calculées à partir de la résistance en alternatif.

Une bobine à noyau d'air sans écran génère un champ magnétique autour de la bobine. Ce champ magnétique alternatif peut induire des courants dans les parties métalliques situées à proximité, et provoquer des échauffements pendant l'écoulement du courant permanent, et des efforts sur celles-ci lors d'un courant de décharge ou pendant la circulation d'un courant de court-circuit.

Il existe quelques règles élémentaires pour estimer les effets magnétiques autour de la bobine:

Il convient de ne pas avoir de petites parties métalliques formant des boucles fermées, cela dans une zone située à une distance des bords de la réactance égale au moins à la moitié du diamètre de son noyau. Il convient de placer les surfaces importantes ou les boucles fermées à une distance des bords de la réactance au moins égale au diamètre de la bobine. Pour plus de détails il est judicieux de consulter le fabricant des réactances.

Le niveau d'isolement d'un segment sur la plate-forme est déterminé à la fois par la tension maximale pendant le fonctionnement normal et les surtensions maximales limitées par la protection contre les surtensions dans les conditions de défaut de la ligne. Le niveau d'isolement entre la plate-forme et le sol correspond au niveau d'isolement entre phase et terre. Comme cela est établi pour le disjoncteur shunt, le niveau d'isolement des matériels d'amortissement et de limitation du courant de décharge correspond à celui du segment réel de condensateurs, si celui-ci est installé sur la plate-forme (ce qui est le cas habituellement). Sinon le niveau d'isolement phase-terre doit être considéré pour ce matériel.

La bobine d'inductance doit être conçue de façon à éviter une résonance mécanique à $2 \times f_0$.

5.8 Transformateur de tension

Il est essentiel que le transformateur de tension (type magnétique) soit conçu pour supporter les contraintes mécaniques et thermiques survenant pendant la décharge des condensateurs série. Le niveau d'isolement du transformateur de tension doit être corrélé avec celui de l'installation des condensateurs série.

5.9 Transformateur de courant

Chaque transformateur de courant dans une installation de condensateurs série (voir l'Annexe B de la CEI 60143-1:2004) doit être spécifié et conçu pour son propre rôle. Il est important de considérer non seulement le courant de défaut (contrainte thermique) mais aussi les contraintes transitoires importantes (contrainte dynamique) qui peuvent survenir pendant les décharges des condensateurs série. Par exemple, le transformateur de la plate-forme doit être conçu pour supporter l'importante amplitude du courant de décharge à haute fréquence résultant d'un contournement sur la plate-forme.

Le niveau d'isolement du transformateur de courant doit être corrélé avec celui de l'installation comportant les condensateurs série.

5.10 Protection par relais, matériel de commande et matériels de liaison entre la plate-forme et le sol

Les fonctions de protection et commande qu'il convient de prendre en compte pour un condensateur série fixe comprennent ce qui suit.

Protection des matériels de condensateurs série contre la surcharge à partir des conditions système:

- a) Surcharge du condensateur – le but de la protection des condensateurs contre la surcharge est de protéger les unités de condensateurs contre une surcharge excessive causée par une surintensité à travers les condensateurs série.
- b) Surcharge de la varistance – le but de la protection de la varistance contre la surcharge est de protéger la varistance contre une température excessive et une forte énergie de courte durée dépassant les valeurs assignées.
- c) Protection subharmonique (optionnelle) – le but de la protection subharmonique est de détecter des oscillations subharmoniques sur le courant du réseau et de court-circuiter les condensateurs série pour éviter d'éventuelles perturbations sur le réseau.
- d) Protection contre la résonance hyposynchrone (SSR) (optionnelle) – le but de la protection contre la résonance hyposynchrone est de détecter des courants subharmoniques de fréquences spécifiées et d'éviter le phénomène de SSR.
- e) Surveillance du courant du réseau – le but de cette protection est de bloquer l'insertion des condensateurs série lorsqu'il y a un courant de défaut sur le réseau. Habituellement, l'insertion de condensateurs série sous courant de défaut sur le réseau pourrait se produire lors de l'activation de la refermeture automatique à grande vitesse des disjoncteurs du réseau.
- f) Les SSR sont des interactions de torsion de l'arbre rotor des turbogénéatrices avec le système de transmission électrique qui peut fatiguer ou endommager l'arbre rotor. La SSR ne présente pas de risque pour les condensateurs série et par conséquent les condensateurs série n'ont pas à être protégés contre la SSR. En raison de la complexité du phénomène SSR ainsi que de sa dépendance de la topologie de réseau et les conditions de fonctionnement du système, une approche commune est de mener une étude de filtrage afin d'évaluer si certaines turbogénéatrices d'un réseau peuvent être exposées à la SSR. Une étude détaillée indiquera à quel système et dans quelles conditions de fonctionnement la SSR se produit, si cela fatigue ou endommage l'arbre rotor ou non et quelle mesures de protection sont requises pour prévenir de manière efficace le phénomène (fréquences SSR et magnitude, stratégie de protection, délais de réaction pour la protection). L'étude de filtrage doit être défini par accord entre l'acheteur et le fournisseur.

Fonctions de protections associées à la défaillance des matériels de condensateurs série:

- a) Déséquilibre des condensateurs – le but de la protection contre le déséquilibre des condensateurs est de détecter les défaillances d'éléments entraînant une contrainte dommageable au sein des unités de condensateurs.
- b) Contournement sur la plate-forme – le but de la protection contre le contournement sur la plate-forme est de détecter le courant dans toute la plate-forme du fait d'une panne de l'isolement de tout matériel monté sur la plate-forme.
- c) Rupture de la varistance – le but de la protection contre la rupture de la varistance est de détecter la rupture à l'intérieur d'une unité de varistance.
- d) Rupture de l'éclateur – le but de la protection contre la rupture de l'éclateur est de détecter la conduction involontaire de l'éclateur (applicable seulement aux éclateurs à déclenchement forcé) et de faire échouer le fonctionnement de l'éclateur: i) ne pas conduire une fois un ordre de court-circuitage envoyé; ii) temps de conduction prolongé lorsque la conduction était censée être éliminée
- e) Rupture du disjoncteur shunt – le but de la protection contre la rupture du disjoncteur shunt est de détecter la non-fermeture après un ordre de court-circuitage et la non-ouverture après un ordre d'ouverture.
- f) Désaccord sur la polarité – le but de la protection contre le désaccord sur la polarité est de détecter toute divergence entre les phases du disjoncteur shunt.
- g) Défaillance des systèmes de protection et de commande – le but de la protection contre la défaillance des systèmes de protection et de commande est de surveiller le statut fonctionnel des systèmes de protection et de commande des condensateurs série.

NOTE La protection contre la rupture du disjoncteur shunt est généralement basée sur la position indiquant les contacts auxiliaires du disjoncteur shunt.

Fonctions de commande des condensateurs série:

- a) Fonction de décharge des condensateurs – le but de cette fonction de décharge des condensateurs est de décharger les condensateurs série par l'intermédiaire d'un circuit de shuntage lorsque les disjoncteurs de la ligne de transmission sont ouverts.
- b) Shuntage – shuntage des condensateurs série du fait du fonctionnement de la protection et de l'action manuelle.
- c) Insertion (automatique ou manuelle) et réinsertion – insertion des condensateurs série par une action de fonctionnement, l'expiration de l'insertion temporaire de blocs et la fonction de refermeture automatique.
- d) Verrouillage – verrouillage permanent résultant d'une opération de protection correspondante.
- e) Insertion temporaire de blocs – verrouillage temporaire résultant d'une opération de protection correspondante.
- f) Fonctionnement des sectionneurs – les sectionneurs sont commandés par une action de fonctionnement.
- g) Verrouillage – les commandes des sectionneurs et du disjoncteur shunt sont exécutées tant que les conditions de verrouillage sont remplies.

Le Tableau 2 présente un aperçu des protections habituelles des batteries de condensateurs série et des actions correspondantes pendant leur fonctionnement.

Tableau 2 – Aperçu des protections habituelles des batteries de condensateurs série

Fonction	Niveau d'alarme	Shunt	Verrouillage	insertion temporaire de blocs insertion	Réinsertion
Surcharge des condensateurs	X	X		X	X
Surcharge de la varistance		X		X	X
Protection subharmonique	X	X		X	X
protection SSR	X	X			
Surveillance du courant de réseau				X	
Déséquilibre des condensateurs	X	X	X		
Contournement sur la plate-forme		X	X		
Rupture de la varistance		X	X		
Rupture de l'éclateur		X	X		
Protection contre la rupture du dispositif de shuntage: non-fermeture		X	X		
Protection contre la rupture du dispositif de shuntage: non-ouverture		X	X		
Protection contre le désaccord sur la polarité de disjoncteur shunt		X	X		
Protection contre le désaccord sur la polarité du sectionneur		X	X		
Défaillance du système de protection et de commandes		X	X		
Contournement sur la plate-forme		X	X		

5.11 Redondance de la protection

La quantité de redondance est habituellement spécifiée indirectement sous la forme de fiabilité générale et d'exigences de disponibilité pour les condensateurs série. L'acheteur peut toutefois spécifier explicitement les éléments qui sont redondants, voir les exemples de la liste suivante. L'acheteur peut aussi spécifier que les deux systèmes de protection soient physiquement séparés, chacun dans sa propre armoire. L'acheteur peut spécifier si le système de protection doit être en fonction à partir d'un ou deux postes de batteries et du degré de séparation entre les alimentations qui est nécessaire dans la protection et le système de commandes des batteries de condensateurs série.

- Système de protection numérique et relais.
- Système de commande numérique.
- Modules E/S et relais.
- Alimentations électriques.
- Colonnes de signaux entre la plate-forme et le sol.
- Transformateurs de courant et sondes de courant.
- Circuits pour déclencher l'éclateur à déclenchement forcé.
- Bobines de fermeture pour le disjoncteur shunt.

5.12 Essais de mise en service

Quand le condensateur série est installé, mais avant de le mettre en service, les procédures suivantes sont recommandées:

- mesure de la capacité des groupes de condensateurs;
- vérification de l'équilibre lors de l'essai de basse tension;
- mesure et réglage si nécessaire de l'éclateur;
- essai de déclenchement des éclateurs à déclenchement forcé;
- mesure d'impédance des bobines et des résistances d'amortissement;
- essais fonctionnels de la protection par relais, du matériel de commande et du matériel de liaison entre la plate-forme et le sol;
- essai d'affaiblissement du système de fibres optiques;
- essai fonctionnel du disjoncteur shunt;
- essai fonctionnel des sectionneurs.

5.13 Essais de mise sous tension

Quand une batterie de condensateurs est mise sous tension, quelques essais sur site doivent être réalisés avant de mettre la batterie en fonctionnement continu:

- Mise sous tension de la plate-forme: la plate-forme est mise sous tension pour une demi-heure, le disjoncteur shunt étant fermé. Les courants sont mesurés.
- Essai à faible charge: la ligne doit être alimentée depuis une extrémité, l'autre étant ouverte. La batterie est connectée à la ligne pour une demi-heure. Le courant et la tension de la ligne sont mesurés.
- Essai à pleine charge: les condensateurs série sont insérés avec la ligne chargée à 50 % à 100 % du courant de ligne assigné pendant une demi-heure. La tension et le courant de la batterie, en régimes transitoire et permanent sont enregistrés, lors de l'ouverture et de la fermeture du disjoncteur shunt.
- Le fabricant et l'acheteur peuvent convenir d'essais supplémentaires mentionnés ci-dessous:

- Contrôle par thermovision: la température des connexions des unités de condensateurs et de l'appareillage est observée à l'aide d'une caméra thermique, pour un courant de ligne aussi élevé que possible.
- Essai de sous-harmonique: la ligne comprenant le condensateur série est alimentée à une extrémité. Une réactance ou un transformateur de puissance à vide est relié à l'autre extrémité. La tension et le courant de ligne sont enregistrés sur un oscillographe, et le contenu des composantes sous-harmoniques est observé.
- essais de défaut en ligne: il peut être utile de réaliser un essai de défaut établi (défaut entre phase et terre) pour prouver que le matériel de protection des condensateurs série et que les relais de protection de ligne fonctionnent correctement.
- Mise sous tension d'une ligne parallèle ou adjacente: sortir et mettre en service une ligne parallèle ou adjacente à la batterie de condensateurs série, puis observer le comportement de la batterie de condensateurs série suivant les oscillations de puissance.
- Défaut de provocation d'un shunt de la batterie de condensateurs série: les batteries de condensateurs série peuvent être mises en service initialement ou en défaut. L'objectif de cet essai est de vérifier la réponse complète et le fonctionnement à partir de détection/mesure sur le shunt de la batterie de condensateurs série en présence d'un défaut. L'essai doit permettre de valider la vitesse de fonctionnement, y compris le temps où le système de transmission est alimenté et la fermeture du disjoncteur shunt à partir de la détection de la perturbation. Cet essai donne par exemple un défaut d'isolement de la plate-forme ou un déséquilibre des condensateurs. Cet essai pourrait inclure le court-circuit d'une unité de condensateurs avant l'insertion de la batterie de condensateurs série.
- Ouverture et fermeture du sectionneur: l'objectif de cet essai est de vérifier l'immunité de la commande des condensateurs série face au bruit qui est créé par le fonctionnement d'un sectionneur. Il convient de sélectionner pour cet essai un sectionneur à proximité de la batterie de condensateurs série. Le risque associé à cet essai est limité à un shuntage immédiat de la batterie de condensateurs série.

Bibliographie

CEI 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire électrotechnique international* (disponible sous <<http://www.electropedia.org>>)

CEI 60068-1, *Essais d'environnement – Partie 1: Généralités et guide*

CEI 60068-2-2, *Essais d'environnement – Partie 2-2: Essais – Essais B – Chaleur sèche*

CEI 60068-2-78 – *Essais d'environnement – Partie 2-78: essais – Essai Cab: chaleur humide, essai continu*

CEI 60068-2-30, *Essais d'environnement – Partie 2-30: Essais - Essai Db: Essai cyclique de chaleur humide (cycle de 12 + 12 heures)*

CEI 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

CEI 60071-2, *Coordination de l'isolement – Partie 2: Guide d'application*

CEI 60143-3, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux – Partie 3: Fusibles internes*

CEI 60255-1, *Relais de mesure et dispositifs de protection – Partie 1: prescriptions communes*

CEI 60273, *Caractéristiques des supports isolants d'intérieur et d'extérieur destinés à des installations de tension nominale supérieure à 1 000 V*

CEI 60383 (Parties 1 et 2), *Isolateurs pour lignes aériennes de tension nominale supérieure à 1 000 V*

CEI 60507, *Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif*

CEI 60549, *Coupe-circuit à fusibles haute tension destinés à la protection externe des condensateurs de puissance en dérivation*

CEI 60654 (Parties 1 à 4), *Matériels de mesure et de commande dans les processus industriels – Conditions de fonctionnement*

CEI/TS 60815-1, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles* (disponible uniquement en anglais)

CEI/TS 60815-2, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems* (disponible uniquement en anglais)

CEI/TS 60815-3, *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems* (disponible uniquement en anglais)

CEI 60871-1, *Condensateurs shunt pour réseaux à courant alternatif de tension assignée supérieure à 1 000 V – Partie 1: Généralités*

CEI 60909 (toutes les parties), *Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif*

CEI 61000-4-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-2: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux décharges électrostatiques*

CEI 61000-4-11, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-11 – Techniques d'essai et de mesure – Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension*

CEI 62217, *Isolateurs polymériques à haute tension pour utilisation à l'intérieur ou à l'extérieur – Définitions générales, méthodes d'essai et critères d'acceptation*

CEI 62271-100, *Appareillage à haute tension – Partie 100: Disjoncteurs à courant alternatif*

CEI 62223, *Isolateurs – Lexique de termes et définitions*

Cigré-Publication 411, *Protection, Control and Monitoring of Series Compensated Networks. ISBN: 978-2-85873-098-8. Cigré Working Group B5-10 (disponible en anglais seulement)*

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