

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Rotating electrical machines –
Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II)
used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification
tests**

**Machines électriques tournantes –
Partie 18-42: Systèmes d’isolation électrique résistants aux décharges partielles
(Type II) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par
convertisseurs de tension – Essais de qualification**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED
Copyright © 2017 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 l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC 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.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables 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 online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC 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 l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) 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 IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

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

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC 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.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. 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 de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

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.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Rotating electrical machines –
Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II)
used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification
tests**

**Machines électriques tournantes –
Partie 18-42: Systèmes d'isolation électrique résistants aux décharges partielles
(Type II) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par
convertisseurs de tension – Essais de qualification**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.160.01

ISBN 978-2-8322-3822-6

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	9
4 Machine terminal voltages arising from converter operation.....	12
5 Electrical stresses in the insulation system of machine windings	15
5.1 General.....	15
5.2 Voltages stressing the phase to phase insulation	16
5.3 Voltages stressing the phase to ground insulation.....	16
5.4 Voltages stressing the turn to turn insulation.....	16
5.4.1 General	16
5.4.2 Random-wound windings	16
5.4.3 Form-wound windings.....	17
6 Voltage rating for Type II insulation systems.....	17
7 Stress factors for converter-fed Type II insulation systems	18
8 Qualification tests	19
8.1 General.....	19
8.2 Qualification tests	19
9 Qualification of mainwall insulation system	20
9.1 General.....	20
9.2 Test methods	20
9.3 Use of 50 Hz or 60 Hz life data to predict the service life with a converter drive	22
10 Qualification of turn insulation	23
10.1 General.....	23
10.2 Test methods	24
11 Qualification of the stress control system.....	25
11.1 General.....	25
11.2 Test methods	26
12 Preparation of test objects.....	27
12.1 General.....	27
12.2 Mainwall specimens	27
12.3 Turn to turn specimens	27
12.4 Stress control specimens	27
13 Qualification test procedures	27
13.1 General.....	27
13.2 Mainwall insulation.....	27
13.3 Turn to turn insulation	28
13.4 Stress control system.....	28
14 Qualification test pass criteria.....	29
14.1 Mainwall insulation.....	29
14.2 Turn to turn insulation	29
14.3 Stress control system.....	29
15 Routine test.....	29

16	Optional screening tests	30
17	Analysis, reporting and classification	30
Annex A (informative) Contributions to ageing of the mainwall insulation		31
A.1	Life time consumption of the mainwall insulation	31
A.2	Calculation of the contributions to ageing from a 3-level converter drive	31
A.3	Calculation to derive an equivalent voltage amplitude and frequency	32
Annex B (informative) Examples of circuits for impulse testing		34
B.1	Impulse test circuit using a semiconducting switch	34
B.2	Typical waveform generated from the impulse generator	34
B.3	Alternative impulse test circuit using a semiconducting switch	35
Annex C (informative) Derivation of the short term endurance test voltage		37
Annex D (informative) Derivation of the impulse voltage insulation class for the machine insulation		38
Annex E (normative) Derivation of an IVIC in the absence of a manufacturer's reference life line		40
E.1	Derivation of an IVIC from endurance tests	40
E.1.1	Mainwall insulation	40
E.1.2	Turn insulation	41
E.1.3	Stress control system	41
E.2	Derivation of the IVIC X on the basis of satisfactory service experience	41
E.3	Derivation of an IVIC S on the basis of satisfactory service experience	41
Annex F (informative) Optional screening tests		42
F.1	General	42
F.2	Short term endurance test on the mainwall insulation	42
F.3	Voltage withstand test	42
Bibliography		43
Figure 1 – Voltage impulse waveshape parameters		12
Figure 2 – Waveform representing one complete cycle of the phase to phase voltage at the terminals of a machine fed from a 3-level converter		13
Figure 3 – Jump voltage (U_j) at the terminals of a machine fed from a converter drive		14
Figure 4 – Maximum voltage enhancement at the machine terminals at infinite impedance as a function of cable length for various impulse rise times		15
Figure 5 – Example of a random-wound design		16
Figure 6 – Example of a form-wound design		16
Figure 7 – Worst case voltage stressing the turn to turn insulation in a variety of random-wound stators as a function of the rise time of the impulse		17
Figure 8 – Example of a life curve for a Type II mainwall insulation system		23
Figure 9 – Example of a life curve for turn insulation		25
Figure A.1 – Representation of the phase to ground voltage at the terminals of a machine fed from a 3-level converter		31
Figure A.2 – Ratio of the life time consumption (y-axis) of impulse voltage ($U_{pk/pk}$) to fundamental voltage ($U_{pk/pk}$) expressed as a percentage for various impulse/fundamental frequency ratios ($n=10$)		33
Figure B.1 – Example of a simple converter voltage simulation circuit		34
Figure B.2 – Typical waveform generated from the impulse generator		35
Figure B.3 – Example of a simple converter voltage simulation circuit		36

Figure B.4 – Typical waveform generated from the impulse generator.....	36
Figure E.1 – Reference life line for mainwall insulation	40
Table 1 – Examples of the values of characteristics of the terminal voltages for two converter-fed machines.....	13
Table 2 – Influence of features of the converter drive voltage on acceleration of ageing of components of Type II insulation systems.....	18
Table A.1 – Contribution to electrical ageing by 1 kHz impulses from a 3-level converter as a percentage of the ageing from the 50 Hz fundamental voltage (endurance coefficient of 10).....	32
Table D.1 – Phase to ground test voltages according to IVIC for Type II insulation systems	38
Table D.2 – Impulse voltage insulation classes (IVIC).....	39

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems
(Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage
converters – Qualification tests**

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 60034-18-42 has been prepared by IEC Technical Committee 2: Rotating machinery.

IEC 60034-18-42 cancels and replaces IEC TS 60034-18-42 (2008).

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

FDIS	Report on voting
2/1854/FDIS	2/1856/RVD

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

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

NOTE A table of cross-references of all TC 2 publications can be found on the IEC TC 2 dashboard on the IEC website.

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

INTRODUCTION

The approval of electrical insulation systems for use in rotating electrical machines fed from voltage converters is set out in two International Standards. These standards separate the systems into those which are not expected to experience partial discharge activity within specified conditions in their service lives (Type I) and those which are expected to experience and withstand partial discharge activity in any part of the insulation system throughout their service lives (Type II). For both Type I and Type II insulation systems, the power drive system integrator (the person responsible for co-ordinating the electrical performance of the entire power drive system) shall inform the machine manufacturer what voltage will appear at the machine terminals in service. The machine manufacturer will then decide upon the severity of the tests appropriate for qualifying the insulation system. For insulation systems which have been qualified through IEC 60034-18-41 or IEC 60034-18-42 for use in converter-fed applications, an impulse voltage insulation class may be derived. This indicates the ability of the insulation to withstand the electric stresses resulting from converter operation. For Type I systems, the severity is based on the impulse rise time and the peak to peak voltage. For Type II systems, the severity is additionally affected by the impulse voltage repetition rate and the fundamental voltage characteristics. After installation of the converter/machine system, it is recommended that the system integrator measures the phase to phase and phase to ground voltages between the terminals and ground to check for compliance.

IEC 60034-18-41

Type I insulation systems are dealt with in IEC 60034-18-41. These systems are generally used in rotating machines with rated voltage less than 700 V r.m.s. and tend to have random-wound coils. In IEC 60034-18-41, the necessary normative references and definitions are given together with a review of the effects arising from converter operation. Having established the technical basis for the evaluation procedure, the conceptual approach and test programmes are then described.

IEC 60034-18-42

In IEC 60034-18-42, tests are described for qualification of Type II insulation systems. These insulation systems are generally used in rotating machines which have form-wound windings, mostly rated above 700 V r.m.s. The qualification procedure is completely different from that used for Type I insulation systems and involves destructive ageing of test objects under accelerated conditions. The manufacturer requires a life curve (as described in IEC 60034-18-32) for the insulation system that can be interpreted by use of appropriate calculations and/or experimental procedures to provide an estimate of life under the service conditions with converter drive. Great importance is attached to the qualification of any stress control system that is used and testing here should be performed under sinusoidal and repetitive impulse conditions applied separately. If the insulation system can be shown to provide an acceptable life under the specified ageing conditions, it is qualified for use.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification tests

1 Scope

This part of IEC 60034 defines criteria for assessing the insulation system of stator/rotor windings of single or polyphase AC machines which are subjected to repetitive impulse voltages, such as those generated by pulse width modulation (PWM) converters, and are expected to experience and withstand partial discharge activity during service. It specifies electrical qualification tests on representative specimens to verify fitness for operation with voltage-source converters. It also describes an additional classification system which defines the limits of reliable performance under converter-fed conditions.

Although this document deals with voltage converters, it is recognised that there are other types of converters that can create repetitive impulse voltages. For these converters, a similar approach to testing can be used.

Qualification of insulation systems may not be required for rotating machines which are only fed from voltage converters for starting and so they are excluded from this document.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60034-1:2010, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-18-1:2010, *Rotating electrical machines – Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems. General guidelines*

IEC 60034-18-31, *Rotating electrical machines – Part 18-31: Functional evaluation of insulation systems – Test procedures for form-wound windings – Thermal evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines*

IEC 60034-18-32, *Rotating electrical machines – Part 18-32: Functional evaluation of insulation systems – Test procedures for form-wound windings – Evaluation by electrical endurance*

IEC 60034-18-41:2014, *Rotating electrical machines – Part 18-41: Partial discharge free (Type I) electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests*

IEC TS 60034-27, *Rotating electrical machines – Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines*

IEC TS 61934, *Electrical insulating materials and systems – Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses*

IEC 62539, *Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

partial discharge

PD

electric discharge that only partially bridges the insulation between electrical conductors

Note 1 to entry: It may occur inside or outside the insulation or adjacent to an electrical conductor.

3.2

partial discharge inception voltage

PDIV

lowest voltage at which partial discharges are initiated in the test arrangement when the voltage applied to the test object is gradually increased from a lower value at which no such discharges are observed

Note 1 to entry: With sinusoidal applied voltage, the PDIV is defined as the r.m.s. value of the voltage. With impulse voltages, the PDIV is defined as the peak to peak voltage.

3.3

repetitive partial discharge inception voltage

RPDIV

minimum peak to peak impulse voltage at which more than five PD pulses occur on ten voltage impulses of the same polarity

Note 1 to entry: This is a mean value for the specified test time and a test arrangement where the voltage applied to the test object is gradually increased from a value at which no partial discharges can be detected.

3.4

peak (impulse) voltage

U_p

maximum numerical value of voltage reached during a unipolar voltage impulse (e.g. U_p in Figure 1)

Note 1 to entry: For bipolar voltage impulses, it is half the peak to peak voltage.

3.5

steady state impulse voltage magnitude

U_a

final magnitude of the voltage impulse

SEE: Figure 1.

3.6

voltage overshoot

U_b

magnitude of the peak voltage in excess of the steady state impulse voltage

SEE: Figure 1.

3.7**peak to peak impulse voltage** $U'_{pk/pk}$

peak to peak voltage at the impulse voltage repetition rate

SEE: Figure 2.

3.8**peak to peak voltage** $U_{pk/pk}$

peak to peak phase to phase voltage at the fundamental frequency

SEE: Figure 2.

Note 1 to entry: The definition of peak to peak voltage is clarified in Clause 4.

3.9**unipolar voltage impulse**

voltage impulse, the polarity of which is either positive or negative

Note 1 to entry: The term impulse is used to describe the transient stressing voltage applied to the test object and the term pulse is used to describe the partial discharge signal.

3.10**bipolar voltage impulse**

voltage impulse, the polarity of which changes alternately from positive to negative or vice versa

3.11**impulse voltage repetition rate** f

inverse of the average time between two successive impulses of the same polarity, whether unipolar or bipolar

3.12**impulse rise time** t_r

time for the voltage to rise from 10 % to 90 % of its final value

SEE: Figure 1.

3.13**electrical insulation system**

insulating structure containing one or more electrical insulating materials together with associated conducting parts employed in an electrotechnical device

3.14**motorette**

special test model used for the evaluation of the electrical insulation system for random-wound windings

3.15**formette**

special test model used for the evaluation of the electrical insulation system for form-wound windings

3.16**electric stress**

electric field in V/mm

**3.17
rated voltage** U_N

voltage assigned by the manufacturer for a specified power frequency operating condition of a machine and indicated on its rating plate

**3.18
impulse voltage insulation class
IVIC**

limits of the applied voltage for operation of a Type I or Type II converter-fed machine

Note 1 to entry: The limits are shown as severity levels for which the machine has been qualified.

Note 2 to entry: The severity levels are to be shown in the documentation for the machine.

**3.19
fundamental frequency**

first frequency, in the spectrum obtained from a Fourier transform of a periodic time function, to which all the frequencies of the spectrum are referred

Note 1 to entry: For the purposes of this document, the fundamental frequency of the machine terminal voltage is the one defining the speed of the converter-fed machine.

Note 2 to entry: It is calculated as the reciprocal of the time taken for one complete cycle of the applied voltage (Figure 2).

**3.20
impulse duration**

interval of time between the first and last instants at which the instantaneous value of an impulse reaches a specified fraction of its impulse magnitude or a specified threshold

**3.21
jump voltage** U_j

change in voltage at the terminals of the machine occurring at the start of each impulse when fed from a converter

SEE: Figure 3.

**3.22
dc bus voltage** U_{dc}

voltage of the intermediate circuit of the voltage converter (dc-link-circuit)

Note 1 to entry: For a 2-level converter U_{dc} is equal to U_a in Figure 1.

Note 2 to entry: For a multilevel converter, U_{dc} is equal to $\frac{1}{2} U_{pk/pk}$ minus the overshoot in Figure 2.

**3.23
power drive system
PDS**

complete drive module and rotating machine together with the connecting cable if necessary

**3.24
voltage endurance coefficient** n

exponent of the inverse power model or exponential model on which the relationship between life and stressing voltage amplitude for a specific insulation system depends

**3.25
life**

time to failure

3.26

conductive slot coating

conductive paint or tape layer in intimate contact with the mainwall insulation in the slot portion of the coil side, often called semi-conductive coating

Note 1 to entry: The purpose of the coating is to prevent slot discharges from occurring.

3.27

stress control coating

paint or tape on the surface of the mainwall insulation that extends beyond the conductive slot coating in high-voltage stator bars and coils

Note 1 to entry: The purpose of the coating is to grade the surface electric stress.

3.28

stress control system

generic name for the combination of the conductive slot coating and stress control coating in high-voltage stator bars and coils

3.29

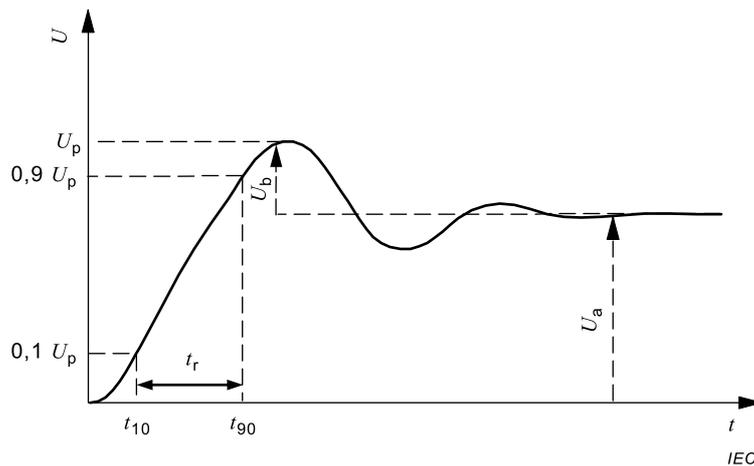
maximum allowable peak to peak phase to ground voltage

U_{IVIC}

maximum allowable peak to peak phase to ground voltage in service

4 Machine terminal voltages arising from converter operation

The voltage appearing at the terminals of a converter-fed machine may be estimated using IEC TS 61800-8 [1]¹ and depends upon several characteristics of the PDS. In order to apply this standard to the qualification and testing of the insulation system of a winding, it is necessary to specify the required parameters of the voltage appearing at the machine terminals (Clause 7).



Key

U voltage

t time

Figure 1 – Voltage impulse waveshape parameters

The amplitude and rise time of the voltage at the machine terminals depend upon the grounding system, various design aspects of the cable, the machine surge impedance and the

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

presence of any filters that increase the impulse rise time. Examples of characteristics of converter impulses at the machine terminals of two motors are given in Table 1.

Table 1 – Examples of the values of characteristics of the terminal voltages for two converter-fed machines

Machine rating	3,3 kV	6,6 kV
Peak to peak voltage on the phase to ground insulation	5,4 kV	10,8 kV
Fundamental frequency	50/60 Hz	50/60 Hz
Number of levels for the converter voltage	5	3
Overshoot of the impulse voltage	60 %	60 %
Nominal voltage per step	650 V	3 kV
Impulse rise time at the motor terminals	1 μ s	3 μ s
Impulse repetition rate	1 kHz	900 Hz
IVIC required to qualify the insulation for this service (see Table D.2)	3	3

In the case of 2-level or other voltage converters, the impulses generate voltage overshoots at the machine terminals, depending on the rise time of the voltage impulse at the converter output and on the cable length and machine impedance. This voltage overshoot is created by reflected waves at the interface between cable and machine or converter terminals due to impedance mismatch. The voltage appearing at the machine terminals when fed from a 3-level converter is shown in Figure 2. The figure shows one cycle at the fundamental frequency.

The maximum change in voltage or jump voltage (U_j) at the impulse repetition rate is shown in Figure 3. This parameter is important in defining the voltage enhancement that can occur across the first or last coil in the winding. A double jump transition (Figure 3) is possible but it is the duty of the PDS integrator to ensure that the software controlling the PDS minimises its occurrence. When the double jump transition occurs in multilevel converter voltages, its effect is insignificant.

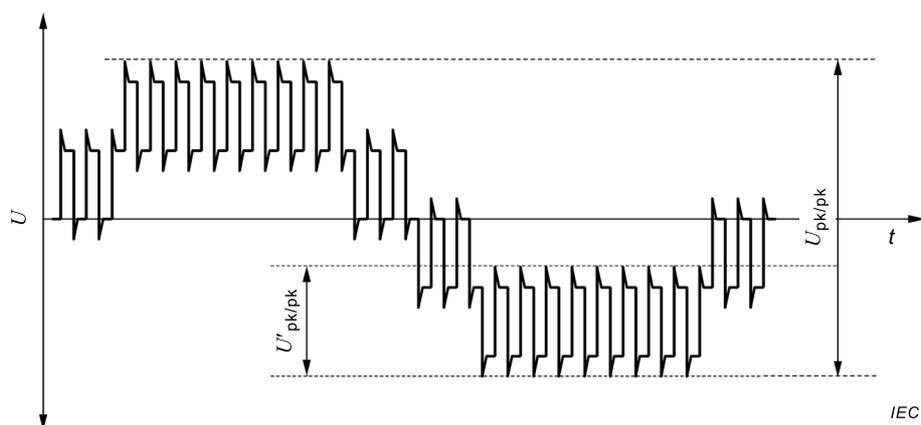


Figure 2 – Waveform representing one complete cycle of the phase to phase voltage at the terminals of a machine fed from a 3-level converter

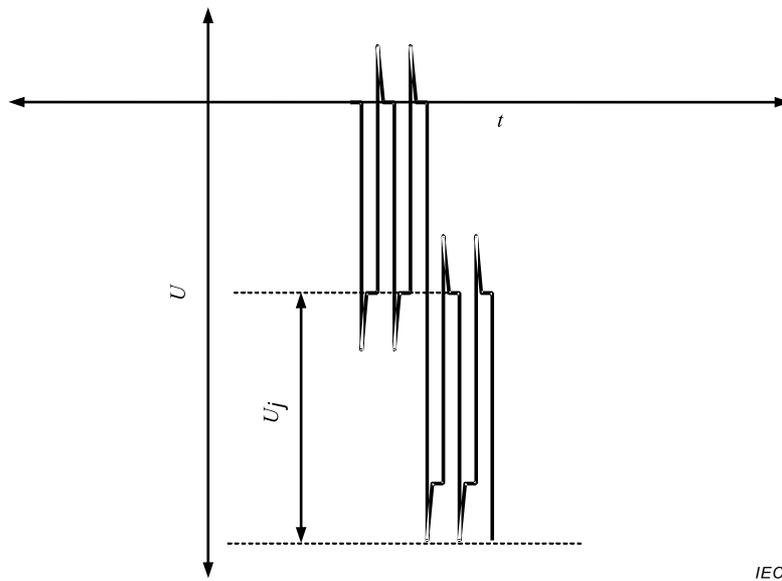
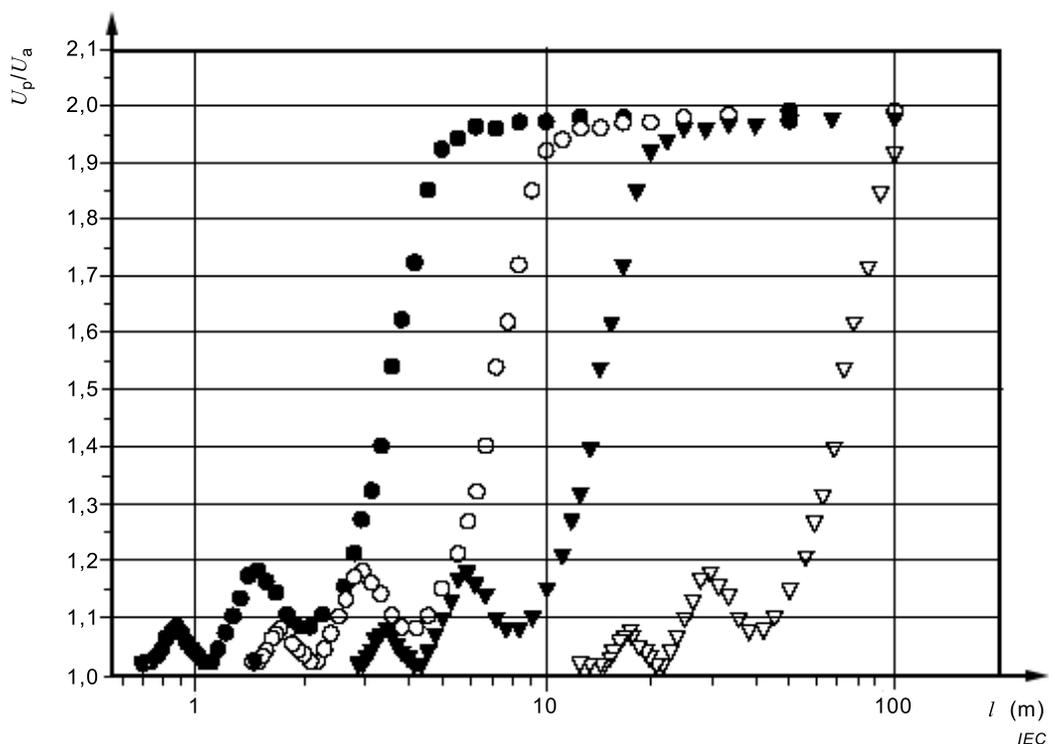


Figure 3 – Jump voltage (U_j) at the terminals of a machine fed from a converter drive

Examples of the enhancements that are produced for various rise times and cable lengths are given in Figure 4, where the worst case is shown, arising from an infinite impedance load. In this case, the enhancement to the voltage for an impulse rise time of $1,0 \mu\text{s}$ is insignificant below about 15 m and only exceeds a factor of 1,2 when the cable length is greater than about 50 m.

Voltages above $2U_{dc}$ can be produced at the terminals of the machine by converter drive double transitions and by a converter-fed drive algorithm that does not allow a minimum time between successive pulses. Double transition occurs, for example, when one phase switches from minus to plus dc bus voltage at the same instant that another phase switches from plus to minus. This generates a $2U_{dc}$ voltage wave which travels to the machine and can then increase in magnitude when reflected at the machine terminals. If there is no minimum impulse time control in the converter drive and if the time between two impulses is matched with the time constant of the cable between the converter and the machine, an over voltage $>2U_{dc}$ can be generated at the machine terminals. The reflection can be reduced or prevented by using a filter in the converter, at the machine terminals or both.

In the event of an earth fault on one of the phases, further damage is avoided by protective systems in the converter that switch it off.



Key

- t_r 0,05 μ s
- t_r 0,1 μ s
- ▼ t_r 0,2 μ s
- ▽ t_r 1,0 μ s
- l cable length

Figure 4 – Maximum voltage enhancement at the machine terminals at infinite impedance as a function of cable length for various impulse rise times

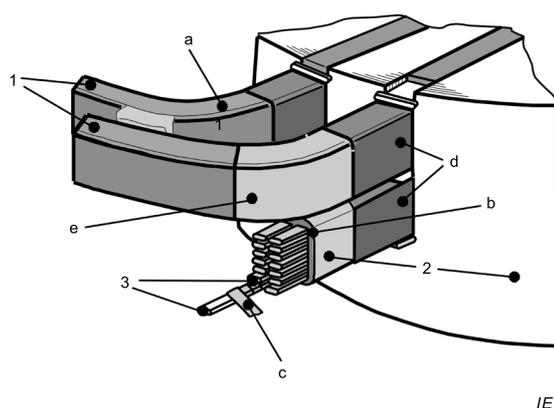
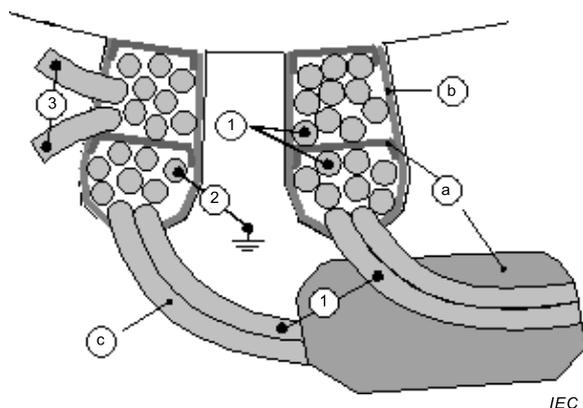
5 Electrical stresses in the insulation system of machine windings

5.1 General

If a winding experiences short rise time voltage impulses with significant magnitude, high voltage stresses will be created in the following locations (Figures 5 and 6):

- between conductors in different phases
- between a conductor and ground
- between adjacent turns, generally in the line-end coil
- in the area of the stress control coating

Due to space and surface charge creation within the insulation components, the electric stress is not only defined by the instantaneous voltage itself but also by the voltages that have been stressing the insulation previously. Generally, it has been shown by experience that, within certain limits valid for converter drive systems, the most significant stressing parameter is the peak to peak voltage. This is also the reason why a unipolar voltage produces the same stress as a bipolar voltage having a peak to peak voltage of the same value.



Key

- | | | | |
|---|--|---|-----------------|
| a | phase insulation/endwinding insulation | 1 | phase to phase |
| b | mainwall insulation | 2 | phase to ground |
| c | turn insulation | 3 | turn to turn |
| d | conductive slot coating | | |
| e | stress control coating | | |

Figure 5 – Example of a random-wound design

Figure 6 – Example of a form-wound design

5.2 Voltages stressing the phase to phase insulation

The maximum voltage stress on the phase to phase insulation is determined by the design of the winding and by the characteristics of the phase to phase voltage.

5.3 Voltages stressing the phase to ground insulation

The maximum voltage stress on the phase to ground insulation is determined by the design of the winding and by the characteristics of the phase to ground voltage.

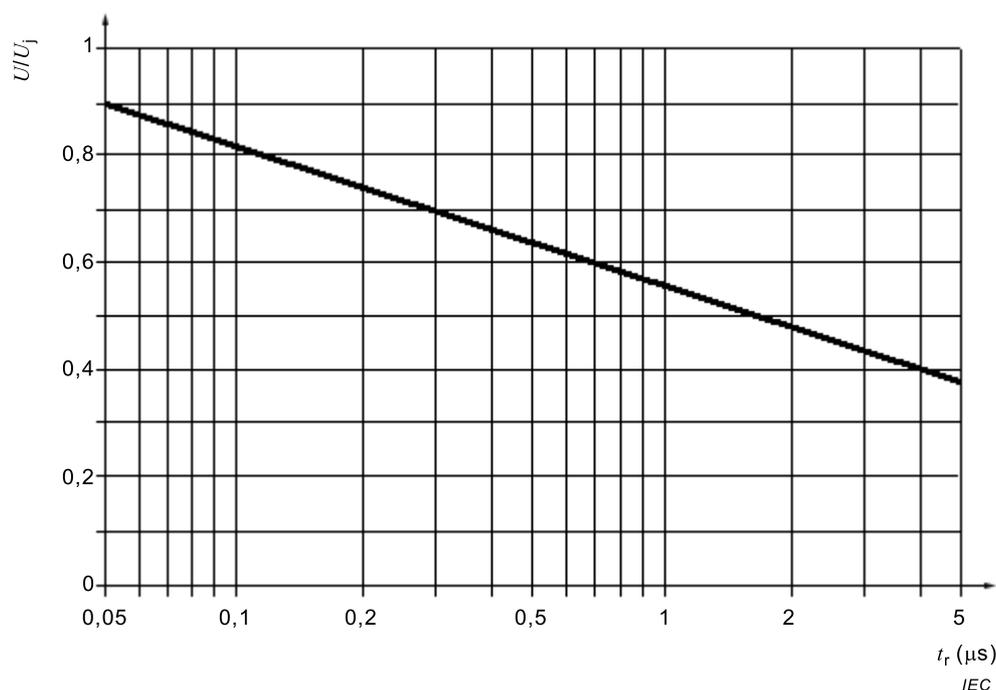
5.4 Voltages stressing the turn to turn insulation

5.4.1 General

The voltage stressing the turn insulation is determined by the jump values of the phase to ground voltage (amplitude and rise time) and by the type of winding, number of coils and the number and length of the turns. The distribution of the transient voltage depends upon the relative position of the individual turns in the slots. Short rise time impulses result in the voltage being unevenly distributed throughout the coils, with high levels of stress present across the first two turns or last two turns, depending upon the winding design. The jump voltage occurs at both the rising and falling edges of the phase to ground voltage. The turn to turn voltage exhibits the same effect at each edge where there is either a positive or a negative peak. If the distribution of voltage stressing the turn to turn insulation in a particular design of rotating machine is known, the manufacturer may use this information to calculate the fraction of jump voltage stressing the turn to turn insulation in the worst case. Otherwise, the fraction may be estimated according to 5.4.2 and 5.4.3.

5.4.2 Random-wound windings

In practice, the first and last turn can be adjacent to each other, in which case the turn to turn voltage can be almost equal to the voltage drop across the coil. Figure 7 shows the worst case voltage stressing the turn to turn insulation in a variety of stators as a function of impulse rise time. The voltage is shown as a proportion of the phase to ground jump voltage. The data has been obtained from a combination of figures provided in [2], [3] and [4] and may be used for guidance when the manufacturer has no other data available.

**Key**

U/U_j Fraction of jump voltage stressing the turn to turn insulation

t_r Impulse rise time

NOTE 1,0 is the peak phase to ground jump voltage at the machine terminals.

Figure 7 – Worst case voltage stressing the turn to turn insulation in a variety of random-wound stators as a function of the rise time of the impulse

5.4.3 Form-wound windings

There is insufficient data available at present to establish a figure for form-wound windings similar to Figure 7. If the voltage distribution is not known, the manufacturer shall provide assurance to customers by designing the coils so that, in the case of one-layer-coils, the turn to turn insulation can withstand the jump voltage divided by the number of turns in one coil. For multi-layer coils it is possible that the turn to turn insulation is stressed by as much as the complete jump voltage, depending upon the arrangement of the turns.

6 Voltage rating for Type II insulation systems

If any part of an insulation system is likely to have to withstand PD during its life, it is defined to be Type II and shall therefore contain materials that resist PD. Typically, machines with a rated voltage ≥ 700 V use Type II insulation systems although a significant number of machines rated < 700 V also use Type II insulation systems. Manufacturers usually assign a rated voltage to a machine based on power frequency. This assumes that voltage from the power supply is 50 Hz or 60 Hz sinusoidal. In the case of machines fed from converters, the conventional definition of voltage rating is no longer applicable, although the manufacturer may still assign a rated voltage for 50 Hz or 60 Hz operation and put it on the rating plate on the machine. The performance of the insulation system for converter operation should be defined using the stress factors under which its qualification was achieved. To assist the user of the rotating machine, an impulse voltage insulation class (IVIC) is defined in 3.18 for machines driven from converters. Severity codes for the IVIC are assigned in Annex D. For machines with no stress control coating on the endwindings, the IVIC is mainly dependent on the maximum allowable value of U_{pk}/pk . In the case of machines with a stress control coating on the stator endwindings, the performance of the stress control system is also dependent on the impulse voltage repetition rate and the impulse rise time.

7 Stress factors for converter-fed Type II insulation systems

The PDS integrator shall specify to the machine designer the voltage that will appear at the machine terminals. This information shall be included in the purchase specification, in addition to the traditional parameters such as rated voltage, thermal class, humidity, etc. Specifically, the limiting values are to be defined for the following parameters of the voltage that appear at the machine terminals.

- a) Fundamental frequency and impulse voltage repetition rate at the machine terminals.
- b) Peak to peak voltages at the fundamental frequency and impulse voltage repetition rate as well as the jump voltages that are expected to occur at the machine terminals.
- c) The impulse rise time.

Table 2 gives an indication of the significance of the features of the machine terminal voltage on the ageing of components of a Type II insulation system. In machines having Type II insulation systems, the mainwall, phase to phase and turn to turn insulation materials are generally based on combinations of organic and inorganic materials. For stators operating above 700 V, there may be a conductive slot coating present, which is designed to provide a grounded screen to the insulated stator winding in contact with the slot wall. The surface of the insulation on the conductor is subject to a stress concentration as it emerges from the slot. For higher voltage machines, it may be treated with a stress control coating to avoid the occurrence of surface arcing. These five components (turn to turn, mainwall, phase to phase, conductive slot coating and stress control coating) constitute a typical Type II insulation system. Phase to phase voltages are present, for example, where two coils are in contact in the same slot. However, if a conductive slot coating is present, the surface potential will be zero as it is at ground potential through the core. Similarly, where two layers of mainwall insulation exist, usually separated by an insulating spacer, the voltage stress is not considered to be of significant magnitude to merit testing of phase to phase insulation systems. No specific testing is therefore recommended for phase to phase insulation. It is recognised that there can be discharges and breakdown in the endwinding region but this is not covered in the qualification procedures described in this document. The insulation components assessed in qualification tests are shown in Table 2.

Table 2 – Influence of features of the converter drive voltage on acceleration of ageing of components of Type II insulation systems

Insulation component	Fundamental frequency	Impulse voltage repetition rate	Peak to peak voltage at the fundamental frequency	Jump voltage	Peak to peak impulse voltage at the impulse voltage repetition rate	Impulse voltage rise time
		f	$U_{pk/pk}$	U_j	$U'_{pk/pk}$	t_r
Turn to turn insulation	○	●	○	●	○	●
Mainwall insulation	●	○*	●	○	○*	○*
Stress control system	○	●	●	●	●	●
○ Less significant ● More significant NOTE 1 Testing of the phase to phase insulation is not necessary. NOTE 2 If there are 2 levels in the converter voltage, these parameters (*) can become significant.						

For insulation systems designed to be used with a power frequency supply, the long-term effects of rated line-to-ground voltage across the mainwall insulation and along the length of

the stress control coating are of principal concern. The turn insulation is generally specified by the maximum short rise time surge requirement of the design. Such surge events are generally of very short duration and are relatively infrequent compared to the impulse voltage repetition rate. For this reason, the acceptance requirements are generally satisfied by the ability of the mainwall insulation to endure a power frequency withstand test and the turn insulation to withstand a surge test. The ability of the system to meet the design life requirements is usually satisfied by longer-term voltage endurance testing with sinusoidal voltage. This endurance test allows the designer to establish the long-term capability of the mainwall insulation system.

In the case of converter-fed systems, the more complex voltage waveform produced by the converter drive will provide a different stress distribution in the winding. The mainwall insulation is affected by the magnitude of the voltage overshoot at the fundamental frequency. The stress control system is affected by the magnitude of the voltage overshoot (U_b) at the fundamental frequency and by the impulse voltage repetition rate (f). The latter factor may increase dielectric heating in the stress control system. Both parts of the voltage [5] therefore require consideration in the stress control qualification (see 13.4). The turn to turn insulation may be significantly stressed by the jump voltage (U_j) at the impulse repetition rate (f) but not by the fundamental voltage. As the rise time of the impulses decreases, the voltage stress usually increases on the insulation between adjacent turns on the line end coil of multi-turn coils, thereby producing significant overstress. Very short impulse rise times can affect the life of the turn to turn insulation and the mainwall insulation [6]. The latter is particularly affected if the converter has a small number of levels (e.g. two). However, as a first approximation, the rise time contribution to life reduction of the mainwall insulation can be neglected for long term ageing. The combination of these factors and their effect on the insulation system as a whole are difficult to quantify. Table 2 highlights the most important factors which contribute to accelerated ageing and therefore the assumptions which determine the following test procedures for insulation systems qualification.

8 Qualification tests

8.1 General

The electrical insulation system of a rotating machine to be fed from a converter drive is qualified and given an IVIC classification through testing of the mainwall insulation, the turn to turn insulation and the stress control system including its contact to ground. These three components of the overall insulation system are assessed separately. Each component will be defined by the manufacturer's unique design rules governing parameters, such as insulation materials, acceptable stresses, stress control system, application techniques, processing routes and dimensional guides. It is these design rules that are being qualified. For qualification of the mainwall insulation in Type II systems, form-wound coils or bars are subjected to accelerated electrical ageing to determine an electrical life curve. For random-wound machines, motorettes or complete windings are used. For turn to turn insulation, specimen bars or coils with parallel conductors are used to obtain a life curve. Qualification testing is based on the premise that the principal cause of electrical ageing, leading to premature failure, is partial discharge activity and so all tests shall be performed above the PDIV. In general, testing is permitted using sinusoidal voltages. Separate tests involving impulse and sinusoidal voltages are carried out for the stress control system.

8.2 Qualification tests

These tests are based on the general procedures for functional evaluation of insulation systems described in IEC 60034-18-1, according to which the insulation system intended to be used under converter conditions (candidate system) is compared to an insulation system which has given satisfactory service experience (reference system).

For Type II insulation systems, the qualification of the mainwall and turn insulation systems is achieved through voltage endurance testing at room temperature or at elevated temperature according to IEC 60034-18-32. For simplicity, the voltage endurance testing of the turn and mainwall insulation may be performed with sinusoidal voltage. This simplification ignores the

fact that the occurrence of PD and thus its effect on the ageing rate is influenced by the rise time of the impulses [6,7,8]. Performing life tests under impulsive voltage waveform, at the appropriate frequency, is recommended when feasible.

By using different sinusoidal over-voltages or frequencies, a life curve may be established. Note that interactive ageing mechanisms between turn and mainwall insulation are ignored in this document. On the basis of the following assumptions, the life of an insulation system under impulse conditions may be estimated from a life curve derived from sinusoidal voltage testing.

- a) The ageing rate due to impulse and sinusoidal voltages is the same, provided the peak to peak values and the number of voltage cycles are the same.
- b) The voltage endurance coefficient (n) is not frequency dependent below 1 kHz [9].

The lifetime of the mainwall insulation is generally dominated by the peak to peak magnitude and repetition rate of the fundamental voltage. For 2-level converters, the mainwall insulation is stressed principally by $U'_{pk/pk}$ at the impulse voltage repetition rate. The balance of ageing between these two contributions may be calculated using expressions which are detailed in Annex A.

Qualification of the stress control system is undertaken through an ageing test in which a representative specimen of the insulated winding in a simulated slot is exposed separately to impulse voltage and sinusoidal voltage stresses similar to those expected in service to determine if visible damage occurs, such as significant discolouration or burning.

An IVIC rating may be obtained after satisfactory service experience with a converter-fed supply. The way in which this is derived is explained in Annex E.

9 Qualification of mainwall insulation system

9.1 General

Acceleration of the ageing process that leads to electrical failure will be a desirable feature of the test method used. Care should be taken to avoid introducing a failure mechanism that would not be present in service, for example, by testing above the PDIV. Where acceleration is produced by an increase in voltage excursion (peak to peak), the technique may change the level of partial discharge activity occurring within each impulse. Alternatively, the repetition frequency of the test voltage may be increased to a level above the fundamental frequency of the PDS in service. This is intended to retain the partial discharge activity level and achieve acceleration through an increased repetition rate. In this approach, there may be an increase in heating of the insulation due to frequency dependent losses in the material and the stress control coating. The temperature can be reduced by forced air cooling. Localised hot spot temperature measurements are required in the region where stress control coatings are used to ensure that the insulation material does not exceed the assigned temperature for its thermal class.

Temperature monitoring may be performed using any convenient technique. Temperature sensitive paints or films are simple but not very accurate, while thermocouples may have electromagnetic pick-up and HV isolation difficulties. A non-invasive measurement technique, such as infrared thermography, enables surface hot spots to be identified and quantified simply. Hot spots can limit the operating conditions for the machine. Monitoring of the ageing process can be performed at appropriate intervals by measuring electrical parameters, such as partial discharge activity, loss tangent and permittivity. These tests may be performed at 50 Hz or 60 Hz for diagnostic purposes.

9.2 Test methods

Accelerated voltage ageing shall be performed according to IEC 60034-18-32. Further background information may be found elsewhere [10]. The qualification technique is based on

a comparison of life tests performed on the candidate system and on a reference system, already assessed for service life. A commonly used electrical life model is

$$L = kU^{-n} \quad (1)$$

where

n is the voltage endurance coefficient;

L is the life of the test object;

U is the applied periodical peak voltage, and

k is a constant.

The qualification technique requires testing at three or more over-voltages to enable a graph of log (mean time to failure) to be plotted against log (normalised mainwall electric stress). If power frequency voltages (50 Hz or 60 Hz) are used, the intended mean time to failure at the highest voltage should be about 50 h and at the lowest voltage above 5000 h. The candidate and reference systems should be tested under the same conditions, which may involve any prescribed voltage waveform. Statistical analysis should be performed according to the procedures given in IEC 62539 in order to establish the mean life under each test condition. The voltage endurance coefficient is the slope of the regression line. The life line of the candidate insulation system should be at least equivalent to that of a reference system tested at the fundamental frequency or corrected to the fundamental frequency which has been shown to give a service life acceptable to the customer. The acceptance criteria are explained in IEC 60034-18-32 and IEC 60034-18-1. If the data points do not fit a straight line on the log-log coordinate system, this usually indicates that the ageing mechanism has changed within the test stress range. The straightness of the line may be checked by using the R2 (squared) linearity test with a pass criterion of >95 % recommended. If the line fails to achieve this, an extra ageing point is recommended.

For mainwall and turn insulation, publications show that the number of voltage cycles to failure is essentially independent of the applied voltage frequency [6,9,11]. In many cases, therefore, the following formula can be used to calculate the expected life for a given peak voltage.

$$L_2 = L_1 f_1 / f_2 \quad (2)$$

where

L_2 is the life at frequency f_2 ;

L_1 is the life at frequency f_1 .

Combining the frequency and voltage dependent ageing formulae leads to the general expression

$$L_{f_2, u_2} = L_{f_1, u_1} (U_1 / U_2)^n (f_1 / f_2) \quad (3)$$

where

L_{f_2, u_2} is the life at frequency f_2 and voltage U_2 , and

L_{f_1, u_1} is the life at frequency f_1 and voltage U_1 .

Using formula (3), testing at different frequencies and voltages is generally permitted for mainwall insulation. Experimental evidence exists to support the validity of this approach in calculating life under sinusoidal and impulse voltages at least up to 1 kHz [9]. For the case of a multilevel converter, the dominant factor in ageing under electrical stress is the peak to peak voltage at the fundamental frequency ($U_{pk/pk}$). The effect of frequency is to increase or decrease life in proportion to the fundamental frequency. For mica-based insulation, which generally has a large voltage endurance coefficient and is used in combination with a

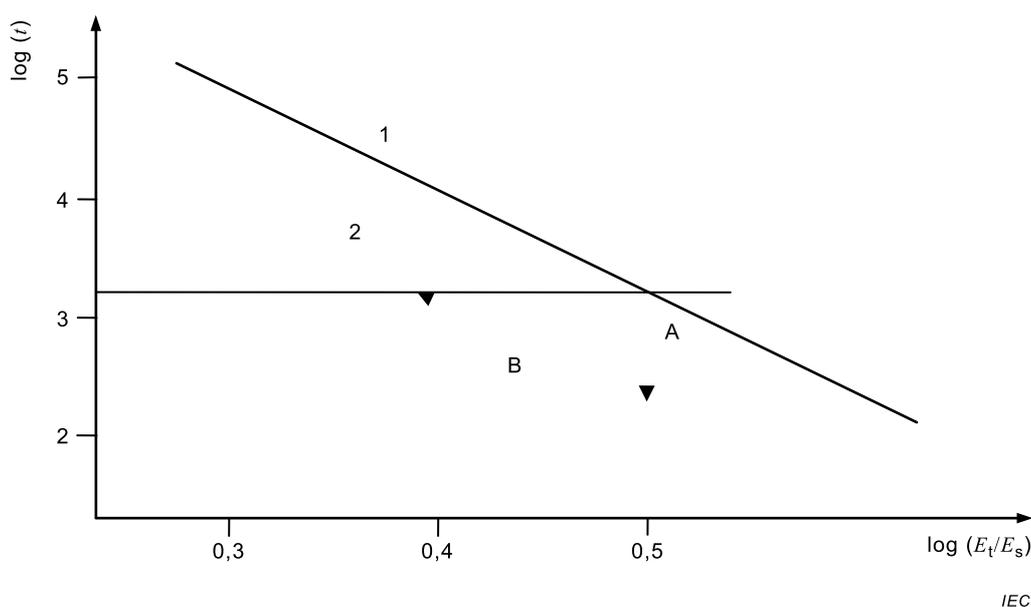
multilevel converter drive, the effect of the impulse voltage (U_j) on electrical ageing of the mainwall insulation is insignificant compared to $U_{pk/pk}$ [7].

9.3 Use of 50 Hz or 60 Hz life data to predict the service life with a converter drive

A typical life curve for a Type II insulation system derived from 50/60 Hz voltage endurance testing is shown in Figure 8. The log (mean time to failure) is plotted as a function of log (normalised mainwall electric stress) for the mainwall insulation on a stator bar or coil. The life line is usually straight [8] and the manufacturer is required to know from service experience that it represents a design that will provide a service life under the operating conditions which is acceptable to the customer. For converter-fed machines, the electrical stress is calculated on the basis of the peak to peak voltage occurring in service across the mainwall insulation ($U_{pk/pk}$). Only one IVIC may be attributed to a machine and it is a requirement that the application for which qualification has been achieved is declared in the documentation of the machine. For example, some applications may only need a reduced life compared with an industrial application.

The effect of voltage frequency on life is to increase or decrease it, as shown in formula (2). If it is expected that the same insulation system may be subjected to a fundamental frequency which is, for example, 10 times greater than that used to derive the curve, the appropriate life curve for this operating condition is obtained by shifting the line downwards by one decade in time, as shown by arrow A in Figure 8. The manufacturer can then compensate by reducing the electric stress on the mainwall insulation to move up this line and thereby restore the life to the original value (arrow B). Alternatively, if the operating frequency is one tenth of that used to derive the life curve, the line will be shifted upwards by a decade in time and the stress may be increased to restore the life to the original value.

The manufacturer shall assess the insulation and may decide that no compensation is required. In this case, a technical justification shall be given in the machine documentation to support the decision. If compensation for a change in lifetime is required, the design of the insulation shall be modified. If a change in the expected lifetime is appropriate, the manufacturer is permitted to move the reference life line in Figure 8. For example, a reduction in the expected life time by a factor of 10 would result in a movement downwards of the line by one decade in a direction parallel to the time axis as shown by arrow A.



Key

E_t Electric stress at the peak to peak test voltage

E_s Electric stress at the peak to peak service voltage

t time to failure in hours

1 Life curve derived from power frequency endurance testing

2 Life curve predicted for the same insulation at x10 frequency

Figure 8 – Example of a life curve for a Type II mainwall insulation system

The qualification test pass criteria are applied after the changes to the reference life line have been made. This procedure shall be recorded in the documentation.

10 Qualification of turn insulation

10.1 General

The turn insulation in the coils of a machine winding operating from a sinusoidal power supply is generally specified according to the requirement to withstand discrete voltages of high magnitude and short duration. The concerns governing turn insulation design are distinct from those for the mainwall insulation. The materials, dimensions and processes used in the construction of turn insulation may be different from those of the mainwall insulation.

The principal features of the applied voltage in regard to ageing of the insulation between turns are the impulse voltage repetition rate, the magnitude of the jump voltage and the impulse rise time (which determines the distribution of jump voltage in the windings). The direct influence of the impulse rise time on ageing of the turn insulation is neglected in this document. When regarded as part of the overall coil design for the winding, the turn insulation also forms part of the mainwall insulation and contributes to the ageing curve described in Clause 9.

In the majority of sinusoidal voltage applications, the insulation between turns will not be stressed significantly during service. Its principal role is to withstand occasional voltage surges or similar events. However, as the rise time of the impulses decreases, the electric stress associated with the jump voltage begins to shift to the regions between turns, particularly at the small radius of curvature on the edge of the turn insulation. This can cause thermal and electrical ageing of the turn insulation in service. The stress between turns intensifies with decreasing rise time, increasing the probability of partial discharges between turns. The effect of the expected phase to ground voltage on the turn insulation will also be

dependent on the number of turns in the coil and the number of coils in the phase. In line-fed operation, high voltage impulses are produced as a result of current breaker operations. The turn insulation will not age electrically in line-fed operations but it may in converter operations, due to the high impulse voltage repetition rate. In general, experience indicates that the stress intensification is greatest between the first two or last two turns in the line-end coil but it may be possible for waveform reflection to initiate ageing at sites further into the winding.

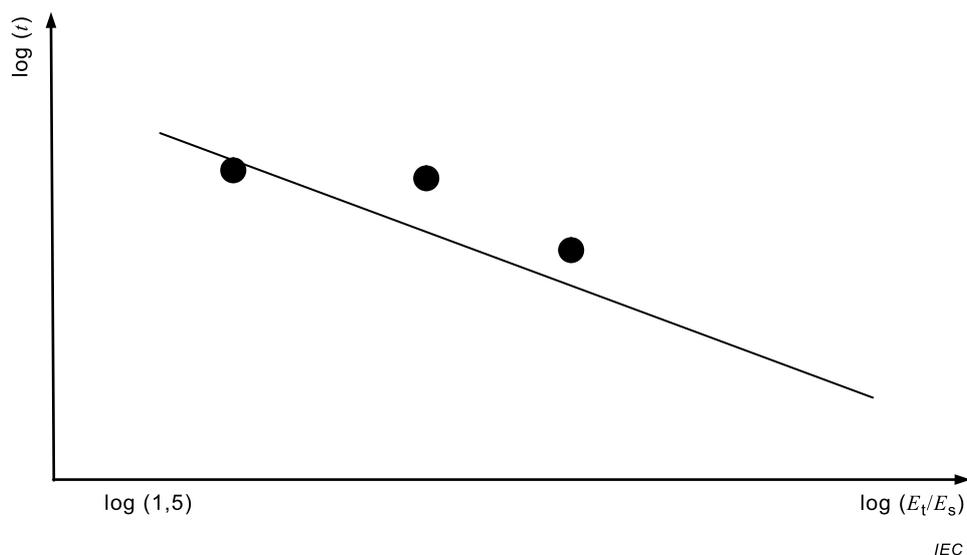
10.2 Test methods

The purpose of testing is to show that the electrical life of the turn insulation provides a life in service which is acceptable to the customer. It is expected that the manufacturer will know the maximum peak to peak voltage to appear between turns in a particular service application. The worst case insulation stress (depending on winding and coil design) shall be chosen. If the maximum peak to peak voltage between turns in service U_{turn} is unknown, it shall be assumed that the complete jump voltage falls across the first coil and so U_{turn} is the jump voltage divided by the number of turns (for one layer coils) or calculated according to the arrangement of turns (for multilayer coils).

A partial discharge test is first made according to IEC 60034-27 using sinusoidal voltage or to IEC TS 61934 using the impulse rise time expected in service. The measurement is made across each pair of parallel adjacent conductors. Coil size can influence whether an impulse test voltage gives a higher or lower RPDIV than a PDIV with sinusoidal voltage. If no PD is detected above the noise level in the turn to turn insulation at $1,5 U_{\text{turn}}$ no further testing is required and the turn insulation is deemed to be qualified. The control, acceptance value and reporting of background noise level are detailed in IEC TS 61934, IEC 60034-27 and IEC 60034-18-41.

The safety factor of 1,5 arises from two contributions. Firstly, there is a need to allow for the effect of temperature, thermal ageing and the hysteresis effect between PD inception and extinction voltages which, according to IEC 60034-18-41, accounts for a factor of at least 1,25. Secondly, long term thermo-mechanical ageing is allowed for by an additional factor of 1,2, thereby making a combined safety factor of 1,5. Thermo-mechanical ageing affects the PD inception voltage, even if research indicates that there is no life time reduction. However, this test is not concerned with the effect of ageing on life time but passing the PD test and the effect on PDIV. If the factor of 1,2 is in doubt, it should be confirmed or dismissed by undertaking a test according to IEC 60034-18-31.

Detection generally requires the PD level to exceed the noise level and so it is important that the background noise is low enough at the test voltage to detect PD. Special care is needed where the parallel turns exit the coil to ensure that corona discharge does not occur here. If PD is detected below $1,5 U_{\text{turn}}$, a voltage endurance test shall be performed according to 13.3. The criteria for PD inception are described in the documents referred to above. A graph can then be plotted showing log (mean time to failure) of the turn to turn insulation as a function of log (normalised electric stress) as in Figure 9. The normalised value is the test value divided by the estimated service value.

**Key**

E_t Electric stress at the peak to peak test voltage

E_s Electric stress at the peak to peak service voltage

t time to failure

Life curve for turn insulation

PD inception

Figure 9 – Example of a life curve for turn insulation

If the life line has not been obtained at the impulse voltage repetition rate, it is corrected by shifting the line as described in 9.3. For example, a life test at 50 Hz shall be corrected for an impulse voltage repetition rate of 1 kHz by shifting the life line downwards, parallel to the time axis, by a factor of 20. The corrected line is then compared with the reference life line for the turn insulation previously obtained by the manufacturer. It is likely that the life line for the turn insulation under converter operation will show shorter lives since the service stress will be significantly larger than the maximum voltage that would be present for power frequency operation of the machine. The manufacturer shall compensate by reducing the turn insulation electrical stress, in order to restore the original intended life, or agree to a reduced life with the customer. In the absence of reference life line, the manufacturer should refer to E.1.2.

11 Qualification of the stress control system

11.1 General

If a stress control coating is to be applied to the endwindings, it will be necessary to qualify it. For this purpose, similar voltages, frequencies and repetition rates to those appearing in service are required. The materials, if based on semi-conductive components such as silicon carbide, have a non-linear resistivity. Their field controlling ability is influenced by frequency, electric stress, temperature and time. In other cases, the stress control may be achieved by capacitive means. For test purposes, the peak to peak voltage, the repetition rate and the impulse rise time are chosen by the manufacturer to ensure that the expected conditions in service are matched or exceeded in severity.

The effect of increasing frequency is to shorten the distance over which the surface electric stress on the endwinding is graded and thereby result in elevated stresses. When these stresses exceed 600 V/mm [12], arcing activity can occur which erodes the surface or produces tracking (conductive carbonaceous paths).

The effect of increased electric stress is to reduce the resistivity of the stress control coating, thereby fulfilling its primary purpose. The effect is also to increase the heat generation. For

converter-fed machines, there is a conflict between providing a low enough resistivity to grade the voltage and a high enough resistivity to keep the heat generation within acceptable limits. A surface temperature rise in the endwinding region may be as little as 10 K or as high as 40 K for a converter-fed machine where there is no forced cooling. The dominant influence on the temperature of the insulation is expected to be the heating from the copper losses but the self-heating of the stress control coating can make a significant contribution. When assessing the limiting temperature at which the machine can operate, it is necessary to take account of this factor as it effectively reduces the rated temperature of the machine.

In the case of non-linear stress control coatings, there are two principal effects of temperature [13]. The first is an immediate increase in the conductivity of the material at a particular voltage stress. The second principal effect is of similar significance and is the reduction in slope of the conductivity/electric stress curve on which effective performance of the silicon carbide-based stress control coating depends. In some cases the non-linearity of the conductivity may be lost altogether.

The second effect may be a permanent reduction in conductivity from this temperature excursion. After a single short-term period at 155 °C for as little as a few hours, a return to 20 °C can show a significant reduction in conductivity. After a longer period at 155 °C, such as 500 h, the stress control coating performance may be partially restored. This is attributed to post-curing of the resin in the stress control coating that shrinks and binds the silicon carbide particles closer together.

The conductive slot coating is used to prevent slot discharges and may be based on carbon loaded tapes or paints. At the beginning of the endwinding region, there may be problems with the electrical contact to the stress control coating. Where a good electrical contact is required in the design, a high contact resistance can result in overheating and discharge activity, which can degrade the materials and reduce the performance of the stress control system on the endwindings. Where capacitive coupling is used, no direct connection is required between the conductive slot coating and the stress control coating.

Design of the stress control system is a crucial element in meeting the qualification test pass criteria in 13.4 and 14.3. The governing factors influencing the design are the choice of materials and the application technique.

11.2 Test methods

The aim of qualification testing of the stress control system is to provide assurance that it will operate satisfactorily for the required service life. A satisfactory performance in service is one in which surface arcing is avoided and the temperature rise on the surface of the endwinding does not raise the mainwall insulation above its assigned temperature limit.

The three major influences on the life of the stress control system are the magnitude of the applied voltage, its frequency and the temperature. Ideally, a test is required in which specimen coils or bars, prepared to production standard, are arranged in simulated slots and subjected to a converter voltage which is 1,3 times the magnitude of the voltage to be withstood in service. In practice, it is likely that a suitable converter is unavailable and so an alternative endurance test is provided in which voltage impulses and a power frequency voltage are applied separately. The specimens and slots may be shorter than in the service machine in order to reduce the capacitive load on the impulse generator. However, they should replicate important design features.

The cost of laboratory equipment to provide the required HV impulses may be significant. A proposal is made for two simple test circuits which experience has shown can quickly reveal deficiencies in a stress control system. They avoid the need for a commercial converter drive and are based on an impulse repetition circuit using a semiconducting switch. The two examples of circuits and typical associated waveforms are shown in Annex B.

12 Preparation of test objects

12.1 General

The test objects in this clause are for qualifying the performance of the insulation components described in Table 2 and shall be made according to the full manufacturing specification for a production machine.

12.2 Mainwall specimens

To qualify the mainwall insulation to be used in the stator, testing of coils or bars, built to production standards and fitted into representative slots, is undertaken.

12.3 Turn to turn specimens

The turn to turn specimens shall reproduce the insulation system used in the machine in terms of materials and manufacturing procedure, with each one containing one or more pairs of parallel conductors. Specimens shall consist of coils or bars (for form-wound windings) or motorettes/complete windings (for random-wound windings) made to production standards. PD activity between the parallel turns at the exit from the coil or bar may be reduced or avoided by the insertion of felt between the turns where they separate, to absorb the impregnating material.

12.4 Stress control specimens

To qualify the stress control system to be used, testing of coils or bars, built to production standards and fitted into representative slots, is undertaken. The slots shall be equipped with heaters for the heating of the straight part to service temperature. Alternatively, heating may be produced by passing current through the conductors. In order to reduce the capacitive load on the test supply, the specimens and slots may be of reduced length but the specimens shall otherwise be manufactured in the same way as the coils or bars used in service.

13 Qualification test procedures

13.1 General

It is not practicable to design a single test method that simulates all the interactions between the various insulation components shown in Table 2. For example, to obtain a life curve for the mainwall insulation system by applying over-voltages would subject the stress control coating to excessive stress. Qualification has therefore been divided into separate test procedures. In all cases, the power supplies shall be chosen to provide the required voltage, repetition rate and rise time at the specimen terminals.

The aim is, firstly, to establish the life curves of the mainwall and turn insulation from which the expected lives may be calculated when the machine is driven from a converter supply in service. It is recognised that PD activity may take place between the turn and mainwall insulation. Since the phase to ground insulation includes the turn insulation, the qualification procedure includes this interactive effect. Ageing is performed by the application of electric stress at an elevated voltage or frequency or both. The voltage waveform used for ageing may be sinusoidal or impulsive in the case of turn to turn or mainwall specimens. The end-point is to be electrical breakdown of the insulation. There shall be a sufficient number of specimens to achieve a statistically valid outcome to the test. The second aim is to establish that the stress control system is suitable for service. Testing is undertaken using impulse and sinusoidal voltages separately.

13.2 Mainwall insulation

The purpose of the test is to qualify the mainwall insulation of the candidate insulation system. This is performed by establishing the life curve for the mainwall insulation using

elevated voltage. Testing is performed according to IEC 60034-18-32 where the parameter to be used on the horizontal axis is the log of the electric stress at the peak to peak test voltage divided by the electric stress at the peak to peak service voltage, as shown in Figure 8. The value of U_s to be used on the horizontal axis in Figure 8 is derived from the rated voltage for the machine multiplied by the enhancement factor in column 1 of Table D.2 for which qualification is required. The electric stress at the service voltage, E_s , is obtained by dividing U_s by the wall thickness. In the case of mainwall insulation fed from a 2-level converter drive, there may be little or no difference between peak-peak values of U and U' . In this case, U' and the impulse voltage repetition rate are to be used instead of U in Table D.2, column 1.

At least three voltages shall be selected and the end-point is when electrical breakdown of the insulation takes place. At least five separate bars or coil legs shall be tested at each voltage. The life line for the candidate insulation system is compared with the reference life curve, i.e. one that has been derived from an insulation system that has been shown to provide an acceptable service life at the fundamental frequency (IEC 60034-18-1). The reference life line may have been obtained from satisfactory service life under converter drive.

It is recognised that, where a stress control system is in use on endwinding insulation, it may be subjected to an unacceptable severity during life testing of complete coil systems at elevated voltages. For this reason, the coils may be tested with any stress relieving measure, such as stress cones or additional layers of insulation, in order to ensure that failure occurs only in the mainwall insulation. The stress control system may be repaired during the test period.

13.3 Turn to turn insulation

A partial discharge test is first made on at least five specimens with a sinusoidal voltage, according to IEC 60034-27. Alternatively, the test may be performed according to IEC TS 61934 using an impulse voltage rise time as short as the value expected in service and generally as described in 9.2 of IEC 60034-18-41:2014. The test equipment shall be able to detect PD below the test value. This may be achieved by using test equipment where the background noise is severely attenuated by using signal processing, which is able to separate noise from PD. If the turn to turn insulation is PD free at a peak to peak voltage of $1,5 U_{\text{turn}}$ on all specimens, no further testing is required and the turn insulation is deemed to be qualified. If PD is detected below this value, a voltage endurance test shall be performed at room temperature. It shall consist of applying a sinusoidal voltage between each pair of parallel conductors in the test specimen until electrical breakdown occurs. The number of test voltages shall be at least three and the preferred peak to peak test voltages are $4,5 U_{\text{turn}}$, $4,0 U_{\text{turn}}$ and $3,5 U_{\text{turn}}$. Five specimens shall be tested at each voltage. The time to failure may be calculated using any commonly used statistical methods (see IEC 62539) involving Weibull statistics. A graph shall then be plotted showing the time to failure of the turn to turn insulation as a function of normalised test electric stress, as shown in Figure 9. If power frequency is used for the endurance test, the life will be shorter with a convertor, since the turn insulation is aged by the impulse voltage repetition rate. The candidate life line shall be corrected by the ratio of the impulse voltage repetition rate reported in the documentation for column 4 of Table D.2 to the power frequency used in the ageing test. The correction shall be applied according to Formula 2 before comparison with the reference life line. The normalised value is the test value divided by the estimated service value (i.e. U_{turn}).

13.4 Stress control system

Where a stress control coating is to be used in the region of the endwinding, specimens shall be made according to the requirements of 12.4 and each one mounted in a representative or simulated grounded slot. The specimen is then subjected to a three part sequential test regime at the expected service temperature. The first part is a 100 h impulse voltage endurance test performed with a peak to peak voltage equal to the maximum jump voltage experienced in service multiplied by a safety factor of 1,3. The rise time of the impulses shall be at least as short and the repetition rate at least as large as the values expected in service. If the impulse voltage parameters in service are unknown, default values of 1 kHz to 1,5 kHz repetition rate and 0,5 μs to 1 μs rise time shall be used. The second part of the test is a 1000 h endurance test with sinusoidal voltage at the fundamental frequency expected in service.

The voltage level shall be the maximum peak to peak phase to ground voltage experienced in service multiplied by a safety factor of 1,3. The equivalent r.m.s. voltage is calculated by dividing by $2\sqrt{2}$. In the third part of testing, the first part shall be repeated. At least three specimens shall be tested.

14 Qualification test pass criteria

14.1 Mainwall insulation

Comparison between the candidate and reference life lines shall be at the same frequency. Any corrections for a different frequency used in testing shall be undertaken according to 9.3 before the comparison is made. The mainwall insulation is qualified according to IEC 60034-18-32 if

- a) the upper 90 % confidence limit of the candidate system life line exceeds the upper 90 % confidence limit of the reference mainwall insulation life line over the same test voltages, or
- b) the lower 90 % confidence limit of the candidate system life line exceeds or is equal to the lower 90 % confidence limit of the reference mainwall insulation life line at the lowest test voltage and the slope of the regression line of the mean values of the candidate system life line is steeper than that of the reference mainwall insulation life line (i.e. the value of n for the candidate system is greater than for the reference system).

14.2 Turn to turn insulation

If the application of $1,5 U_{\text{turn}}$ between conductors does not give rise to partial discharge activity in any of the five specimens tested, the insulation is deemed to be qualified. If PD activity is detected at the test voltage in one or more specimens, qualification of the insulation is assessed by comparison of the life line with that obtained for the reference turn insulation system as defined in IEC 60034-18-32. The comparison is performed at normalised service field stress with any corrections for frequency made beforehand so that the comparison is made at the same frequency. The turn insulation is qualified if

- a) the upper 90 % confidence limit of the turn to turn life line exceeds the upper 90 % confidence limit of the reference turn insulation life line over the range of turn to turn insulation test voltages, or
- b) the lower 90 % confidence limit of the candidate turn to turn life line at the lowest test voltage exceeds or is equal to the lower 90 % confidence limit of the reference life line and the slope of the regression line of the mean values of the candidate turn to turn insulation life line is steeper than that of the reference turn insulation life line (i.e. the value of n for the turn to turn insulation is greater than for the reference insulation system).

14.3 Stress control system

No partial discharge activity shall be visible to the unaided eye (i.e. without the aid of a microscope or magnifying glass) in a dark room or by a UV detector during the final stage of testing with impulse voltages. No significant deterioration of the stress control coating or conductive slot coatings shall be visible by the unaided eye on the outer surface of the endwinding after the final stage of testing.

15 Routine test

A mandatory voltage withstand test is required according to IEC 60034-1. This withstand test may be at an increased voltage level for converter-fed machines, according to the specified IVIC, as described in Clause D.1. The results of any routine test that is undertaken shall be reported in the documentation for the machine.

16 Optional screening tests

Optional screening tests are described in Annex F. The results of any screening test that is undertaken shall be reported in the documentation for the machine.

17 Analysis, reporting and classification

The approach given in 6.2 of IEC 60034-18-1:2010 to analysis, reporting and classification shall be adopted so that all relevant data is analysed correctly and reported in a traceable manner.

Annex A (informative)

Contributions to ageing of the mainwall insulation

A.1 Life time consumption of the mainwall insulation

Under converter operation, the insulation system is stressed by a complex voltage (Figure 2) consisting of the peak to peak impulse voltage ($U'_{pk/pk}$) at the impulse repetition rate and the peak to peak voltage ($U_{pk/pk}$) at the fundamental frequency. For a multilevel converter, the life time consumption of Type II mainwall insulation with a relatively high voltage endurance coefficient, such as 10, is mainly defined by the fundamental frequency with its associated peak to peak voltage. This is due to the fact that, in this example, the influence of the voltage on the lifetime consumption is 10 times greater than the influence of the frequency.

The share of the life time consumption between the fundamental and the impulse repetition rates with their associated peak to peak voltages can be calculated on the assumptions that the general life expression in 9.2 applies and that the value of “ n ” does not change with voltage or frequency in the range considered. The contribution of these voltages and frequencies to the life time consumption depends strongly on the voltage endurance life time exponent of the insulation [7] according to formula (3). Although it has not been shown scientifically, it is assumed that the superposition effect for ageing is valid. This means that the sequential application of impulse and fundamental voltages is equivalent to their simultaneous application.

A.2 Calculation of the contributions to ageing from a 3-level converter drive

An example is given here of the contributions to accelerated ageing of stator mainwall insulation in 3-level converter-fed machines. It shows only the effects of electrical ageing and ignores thermal ageing. The converter characteristics chosen for this example are a 3-level system with an impulse repetition rate of 1 kHz, which is a commonly found value. The contribution to the ageing from the converter impulses is given as a percentage of the total ageing for different values of overshoot factor, U_b/U_a .

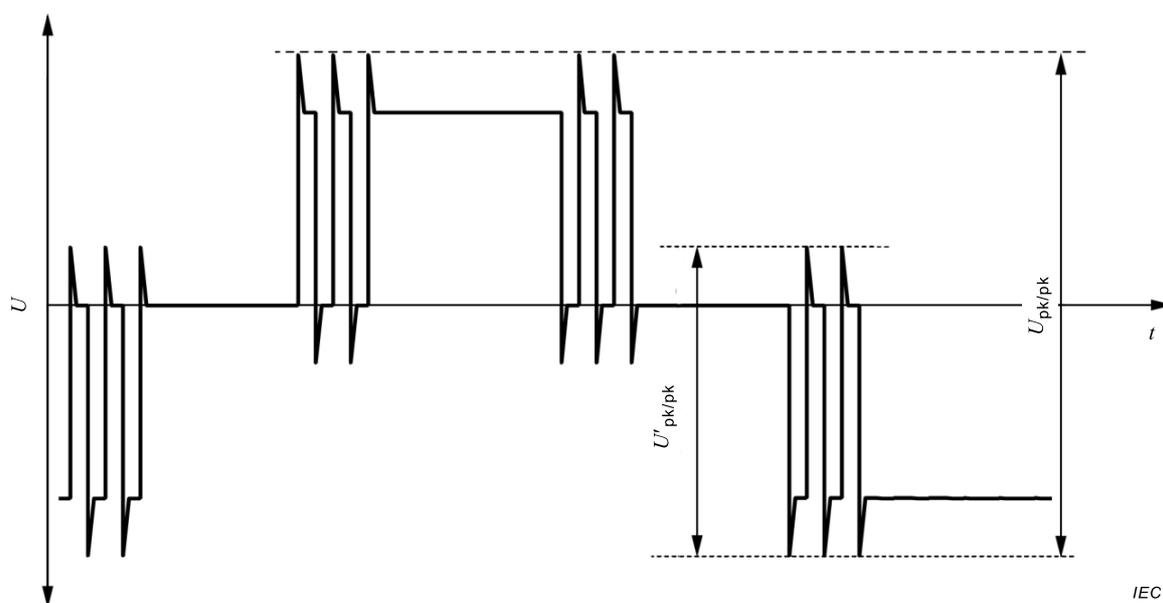


Figure A.1 – Representation of the phase to ground voltage at the terminals of a machine fed from a 3-level converter

The calculation used for each contribution to ageing is based on the formulae given in 9.2. The ageing rate per impulse is proportional to $1/L$ so, as an example, for a fundamental impulse at 50 Hz and a peak to peak fundamental voltage of $U_{pk/pk}$ the contribution to ageing over a period of 20 ms is given by

Ageing rate (50 Hz) = $(U_{pk/pk})^n/k$ where k is a constant.

For a 3-level converter with no voltage overshoot, the contribution to ageing from 1 kHz impulses over 20 ms is given by

$$\text{Ageing rate (1 kHz)} = \frac{(U'_{pk/pk})^n \times 20}{k} \quad (\text{see Figure A.1})$$

According to the cumulative ageing rate theory and, in the absence of synergism, the total ageing rate is therefore the sum of these two contributions.

Table A.1 has been generated by substituting appropriate values in the two formulae above. As an example, a 20 % overshoot factor (U_b/U_a) as shown in Figure 1 would give

$$U'_{pk/pk} = 1,4 U_a \text{ and } U_{pk/pk} = 2,4 U_a$$

and the percentage contribution to ageing from the converter impulses for $n = 10$ is given by

$$\frac{(1,4)^{10} \times 20 \times 100}{(2,4)^{10}}$$

Table A.1 – Contribution to electrical ageing by 1 kHz impulses from a 3-level converter as a percentage of the ageing from the 50 Hz fundamental voltage (endurance coefficient of 10)

Overshoot factor (U_b/U_a)	Impulse repetition rate	Ratio of ageing from impulse and fundamental voltages
%	kHz	%
0	1	2
10	1	4
20	1	9
50	1	35

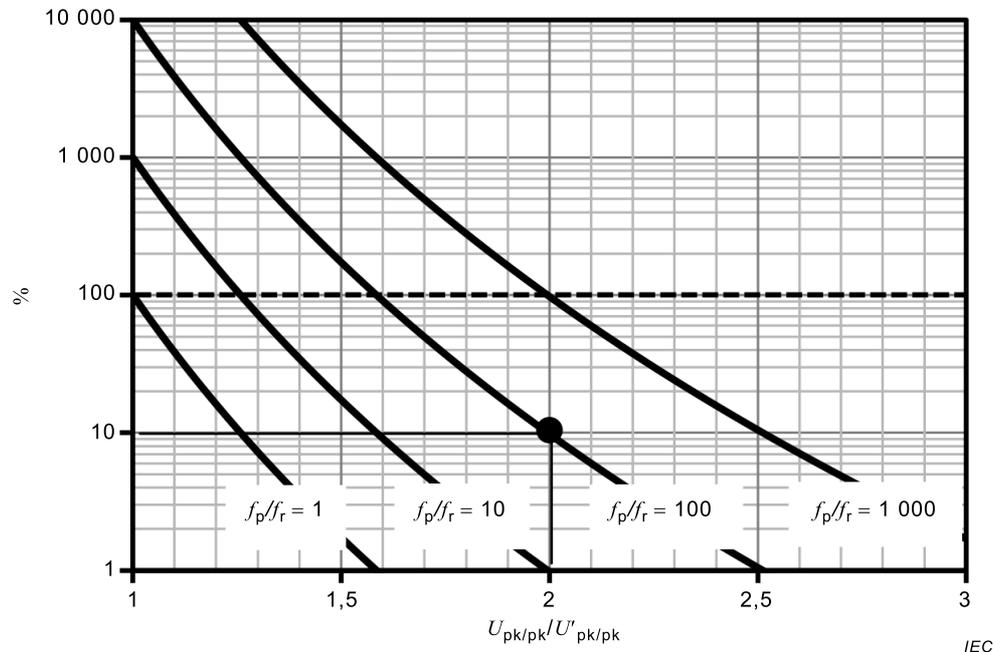
A.3 Calculation to derive an equivalent voltage amplitude and frequency

An alternative approach combines the accelerated electrical ageing from the fundamental and impulse voltages. It renders an equivalent peak to peak voltage U_{eq} and frequency f_{eq} , resulting in the same life time consumption as two peak to peak voltages U_1 and U_2 and their respective frequencies f_1 and f_2 :

$$U_{eq}^n \times f_{eq} = U_1^n \times f_1 + U_2^n \times f_2 \quad (\text{A.1})$$

where f_1 stands for the fundamental frequency and f_2 for the average impulse repetition rate. The value chosen for f_{eq} is likely to be 50 Hz or 60 Hz but should be appropriate for the application.

For this formula, the calculated result of the life time consumption by the impulse voltage and the fundamental frequency voltage is shown in Figure A.2. It shows that for a voltage endurance coefficient of 10, a fundamental/impulse voltage ratio of 2 and an impulse/fundamental frequency ratio of 100, the fundamental part of the voltage will consume 90 % of the life while the impulse repetition rate contribution to the life time consumption is only 10 %.



Key
 f_p/f_r ratio of impulse/fundamental repetition rate

Figure A.2 – Ratio of the life time consumption (y-axis) of impulse voltage ($U_{pk/pk}$) to fundamental voltage ($U'_{pk/pk}$) expressed as a percentage for various impulse/fundamental frequency ratios ($n=10$)

For this reason, the qualification procedure of Type II mainwall insulation generally uses the fundamental peak to peak voltage ($U_{pk/pk}$) and the fundamental repetition rate expected in service (or as defined by the IVIC) and ignores the life time consumption contribution of the impulse repetition rate with its associated peak to peak voltage ($U'_{pk/pk}$).

If the frequency ratio becomes larger and the voltage ratio or voltage endurance coefficient becomes smaller than in the above example, the impulse voltages may contribute considerably to the life time consumption as well. In this case, an equivalent voltage and frequency can be calculated which will consume the same life time as the more complex voltage with two frequencies. For 2-level converters, where there may be little or no difference between peak-peak values of U and U' . In this case U' is to be used instead of U in Table D.2, column 1, and the qualification procedure for Type II mainwall insulation will in this case use the impulse peak to peak voltage at the impulse repetition rate.

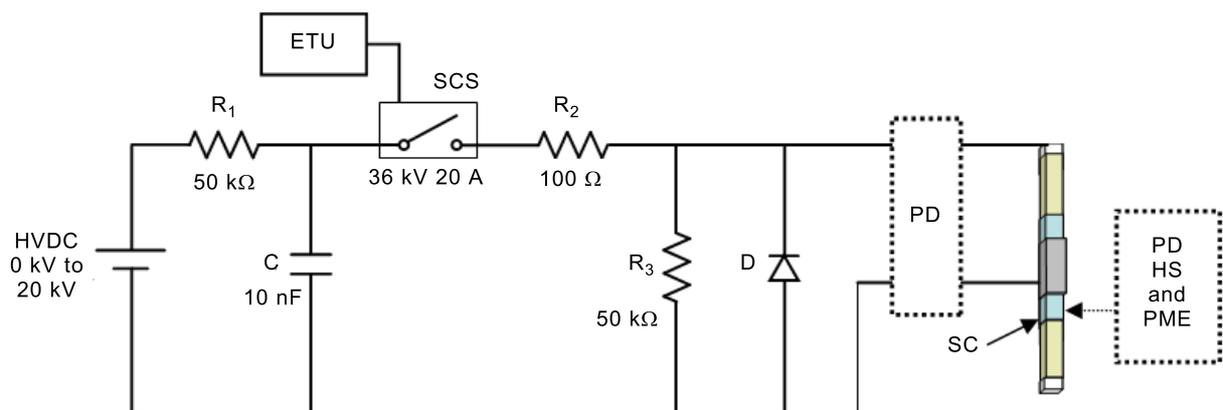
Annex B
(informative)

Examples of circuits for impulse testing

B.1 Impulse test circuit using a semiconducting switch

A circuit diagram is shown in Figure B.1 for a laboratory test kit to produce impulses similar in magnitude, repetition rate and rise time to those used in commercial converter/machine assemblies. It has been found suitable for turn to turn and stress control system testing of the specimens of coils or bars described in 12.4. The peak to peak impulse voltage is controlled by the output voltage of the HVDC power supply. In this example, a maximum output voltage of 20 kV is available. The impulse voltage repetition rate is adjusted by the electronic trigger unit (ETU) which controls the semiconducting switch (SCS), rated at 36 kV 20 A. A power diode may be used if perfect unipolar repetitive impulse voltages are required. The peak to peak voltage, maximum repetition rate and rise time of the impulse voltage can be adjusted through the circuit parameters R_1 , R_2 and C . The impulse fall time may be adjusted through R_3 .

A PD detecting sensor may be inserted into the circuit to measure RPDIV with the required impulse voltage parameters. Hot spot temperature and surface potential measurement systems [14] may also be installed, depending upon the test requirements.



IEC

Key

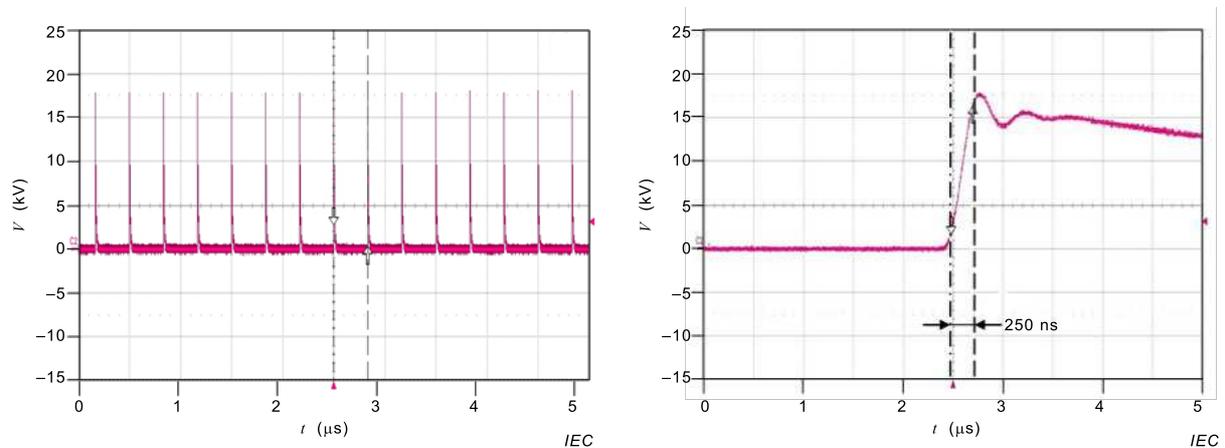
- C Capacitor
- D Power diode
- R Resistor
- HS Hot spot detector
- PD Partial discharge measurement equipment
- PME Surface potential measurement equipment
- SC Stress control region
- SCS Semiconducting switch
- ETU Electronic trigger unit

Figure B.1 – Example of a simple converter voltage simulation circuit

B.2 Typical waveform generated from the impulse generator

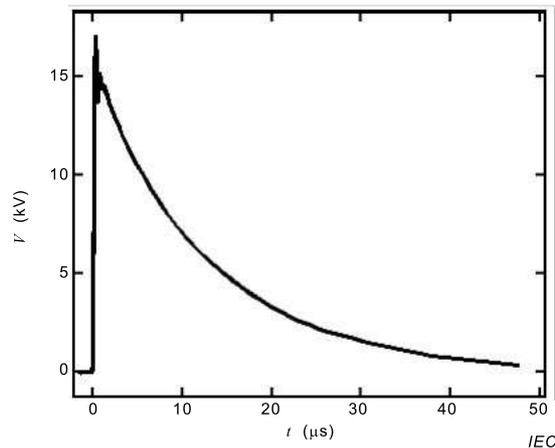
Figure B.2a) shows an example of a stream of voltage impulses generated from the simple converter voltage simulation circuit shown in Figure B.1. The peak to peak impulse voltage

and the impulse voltage repetition rate are 17 kV and 1,5 kHz respectively. The impulse rise time and fall time are 250 ns and about 50 μ s respectively. These are shown in greater detail in Figures B.2b) and c).



a) Voltage and repetition rate

b) Rise time of an impulse



c) Fall time of an impulse

Key

V voltage

t time

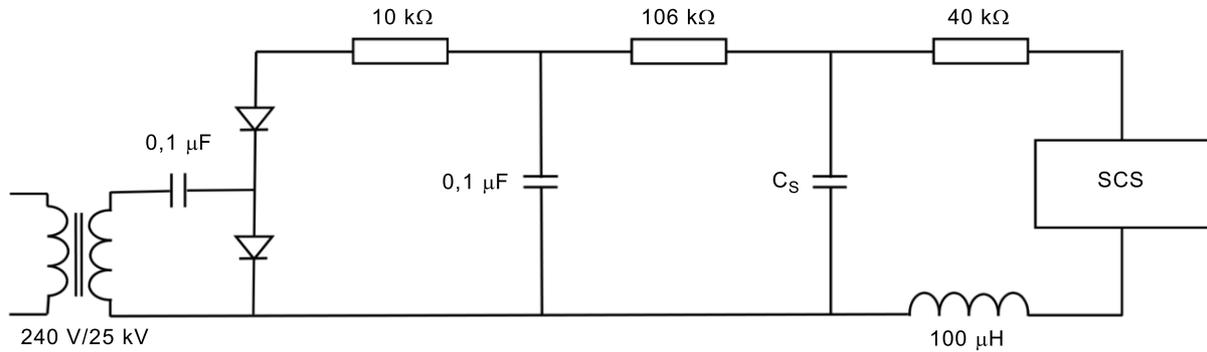
Figure B.2 – Typical waveform generated from the impulse generator

B.3 Alternative impulse test circuit using a semiconducting switch

An alternative circuit diagram is shown in Figure B.3 for a laboratory test kit to produce impulses similar in magnitude, repetition rate and rise time to those used in commercial converter/machine assemblies at present. It has been found suitable for turn to turn and stress control system testing.

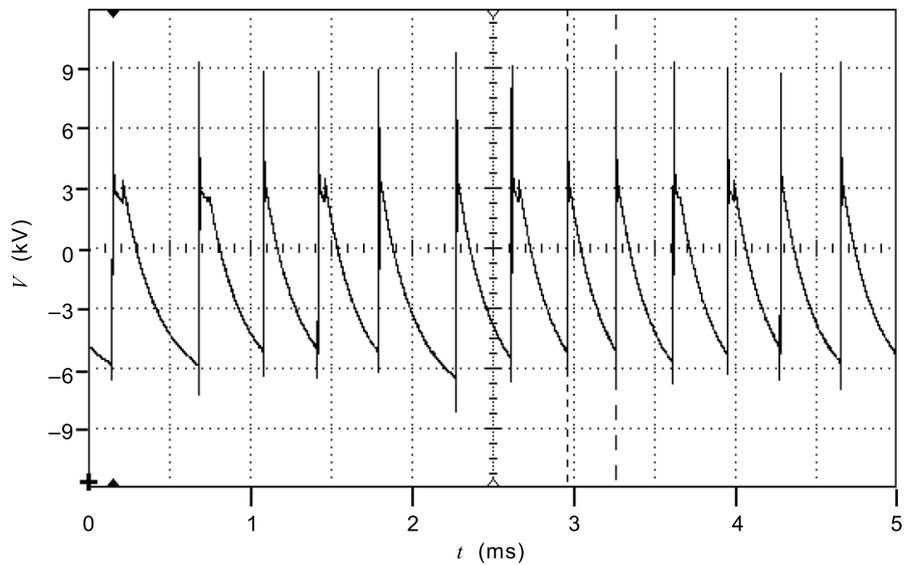
In this circuit, the sample bar is C_s and typically has a value of 2 nF. If its capacitance is greater, additional parallel capacitance should be added to reach this value. The semiconducting switch (SCS) should be set to give an appropriate breakdown voltage to produce a stream of impulses with an average repetition rate of 1,5 kHz. The impulse waveform is typically a falling voltage until breakdown occurs after which the voltage rises in 1,5 μ s with a peak to peak value determined by the semiconducting switch. The maximum dV/dt in the wavefront may be 15 kV/ μ s. The repetition rate, rise time and peak to peak voltage can be changed through the circuit parameters. Figure B.4 shows the output voltage when a spark gap was used instead of a semiconducting switch. The advantage of using a

spark gap is offset by the higher maintenance involved in its use due to wear during operation.



IEC

Figure B.3 – Example of a simple converter voltage simulation circuit



IEC

Key

V Voltage

t time

Figure B.4 – Typical waveform generated from the impulse generator

Annex C (informative)

Derivation of the short term endurance test voltage

For many years, it has been accepted that the mainwall insulation in a line-fed (sinusoidal) rotating machine should be able to withstand $2,5 U_N$ for at least 250 h in an electrical endurance test performed at power frequency [15]. This is equivalent to 4,3 times the phase to ground voltage. In the case of converter-fed machines, the meaning of rated voltage is not clear. Nonetheless, the ageing mechanism of the mainwall insulation fed from a multilevel drive is still considered to be dependent on the peak to peak voltage excursion and the number of cycles in the same way as for line fed machines. For a 3-level drive, the voltage excursion and frequency to be used are described in Annex A. This enables the equivalent test for converter-fed machines to be calculated as follows, assuming that all testing is referenced to the same power frequency.

$$\begin{aligned} \text{Test voltage for line fed coils} &= 2,5 U_N \text{ (r.m.s.)} \\ &= 2,5 \times \sqrt{3} \times U_0 \text{ (where } U_0 \text{ is the phase to ground r.m.s. voltage)} \\ &= \frac{2,5 \times \sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times \text{(phase to ground peak to peak voltage)} \\ &= 1,53 \times \text{(phase to ground peak to peak voltage)} \end{aligned}$$

Therefore

Short term endurance test voltage for converter-fed coils = 1,53 x (maximum phase to ground peak to peak voltage)

For example, if the maximum peak to peak phase to ground voltage on a coil in a converter-fed machine is 8 kV,

the r.m.s. value of the sinusoidal test voltage = 1,53 x 8 kV = 12,25 kV.

Note that, for a converter-fed machine, the equivalent rated voltage for estimating the life line of the mainwall insulation is U_N x the enhancement factor in column 1 of Table D.2.

Annex D
(informative)

**Derivation of the impulse voltage insulation class
for the machine insulation**

Where a rotating machine is to be fed from a converter, an additional classification (IVIC X) may be assigned to the machine insulation system which defines the maximum allowable enhancement ratio for the phase to ground fundamental voltage under converter fed conditions. The enhancement ratio is the peak to peak converter output voltage divided by the peak to peak line voltage. Table D.2 shows an arbitrary range of severities for this parameter from which one is selected by the manufacturer to indicate the maximum value permitted in service. This value is determined from the results of qualification tests. If a manufacturer wishes to qualify the mainwall insulation at a different enhancement ratio, a special classification of IVIC S shall be used, with the precise value given in the documentation for the machine. It is recommended that the IVIC classification is put onto the rating plate. There are four other parameters, shown in columns 2 to 5 of Table D.2, which affect the performance of the insulation under converter operation, as follows.

Maximum allowable phase to ground fundamental frequency

Maximum allowable ratio of the jump voltage (U_j) to the phase to ground peak/peak voltage

Maximum allowable phase to ground impulse voltage repetition rate

Minimum allowable phase to ground impulse voltage rise time

The values of these parameters for which qualification has been achieved shall be given in the documentation for the machine. The maximum allowable peak to peak phase to ground voltage may be converted into units of U_N as in Table D.1. Additionally a test voltage factor (TVF) is shown in Table D.1 for the derivation of IVIC-related routine test voltages. It is defined by the ratio of the maximum allowable operating peak to peak phase to ground voltage in units of U_N divided by $2\sqrt{2}$. Machines with an IVIC having a test voltage factor >1 will need higher test voltages than non-IVIC qualified machines.

**Table D.1 – Phase to ground test voltages according
to IVIC for Type II insulation systems**

IVIC	Maximum allowable operating voltages in units of U_N		Maximum allowable enhancement ratio for the phase to ground peak to peak voltage $\sqrt{3}(U_{IVIC}/U_N)/2\sqrt{2}$	Examples of r.m.s. routine test voltages at 50/60 Hz ($U_N = 6,6$ kV)	
	Peak to peak	TVF		Converter fed (Note 3)	Line fed
None (line)	1,6	-	1,0	$U_N = 6,6$ kV	
1	1,8	0,6	1,1	14,2	14,2
2	2,1	0,8	1,3	14,2	14,2
3	2,4	0,9	1,5	14,2	14,2
4	2,8	1,0	1,7	14,2	14,2
5	3,3	1,2	2,0	16,2	14,2
6	3,8	1,3	2,3	18,5	14,2
7	4,2	1,5	2,6	20,8	14,2
S	$2QV\sqrt{2}/\sqrt{3}$	$QV/\sqrt{3}$	QV	$2U_N QV/\sqrt{3}+1$ kV	14,2

NOTE 1 Enhancement ratio is the peak to peak machine terminal voltage divided by the peak to peak line voltage.

NOTE 2 QV is the value of $\sqrt{3}(U_{IVIC}/U_N)/2\sqrt{2}$ for which a manufacturer's qualification procedure provides a severity code different to those in Table D.2.

NOTE 3 14,2 kV is the lowest test voltage allowed by IEC 60034-1 for $U_N = 6,6$ kV.

Table D.2 – Impulse voltage insulation classes (IVIC)

Impulse voltage insulation classes for Type II insulation systems – Severity codes and limiting values						
IVIC		Independent parameters of the IVIC				
		Phase to ground fundamental voltage		Phase to ground impulse voltage		
		Maximum allowable enhancement ratio for the phase to ground fundamental voltage (Column 1)	Maximum allowable phase to ground fundamental frequency (Column 2)	Maximum allowable ratio of the jump voltage to the phase to ground peak to peak voltage (Column 3)	Maximum allowable impulse voltage repetition rate (f) (Column 4)	Minimum allowable phase to ground impulse voltage rise time (t_r) (Column 5)
		$U_{pk/pk}$ phase to ground (converter) $U_{pk/pk}$ phase to ground (line)	Hz	$U_j/U_{pk/pk}$	kHz	μ s
Severity code	1	1,1	Value to be reported in the documentation	Value to be reported in the documentation	Value to be reported in the documentation	Value to be reported in the documentation
	2	1,3				
	3	1,5				
	4	1,7				
	5	2,0				
	6	2,3				
	7	2,6				
	S	To be chosen by the manufacturer				

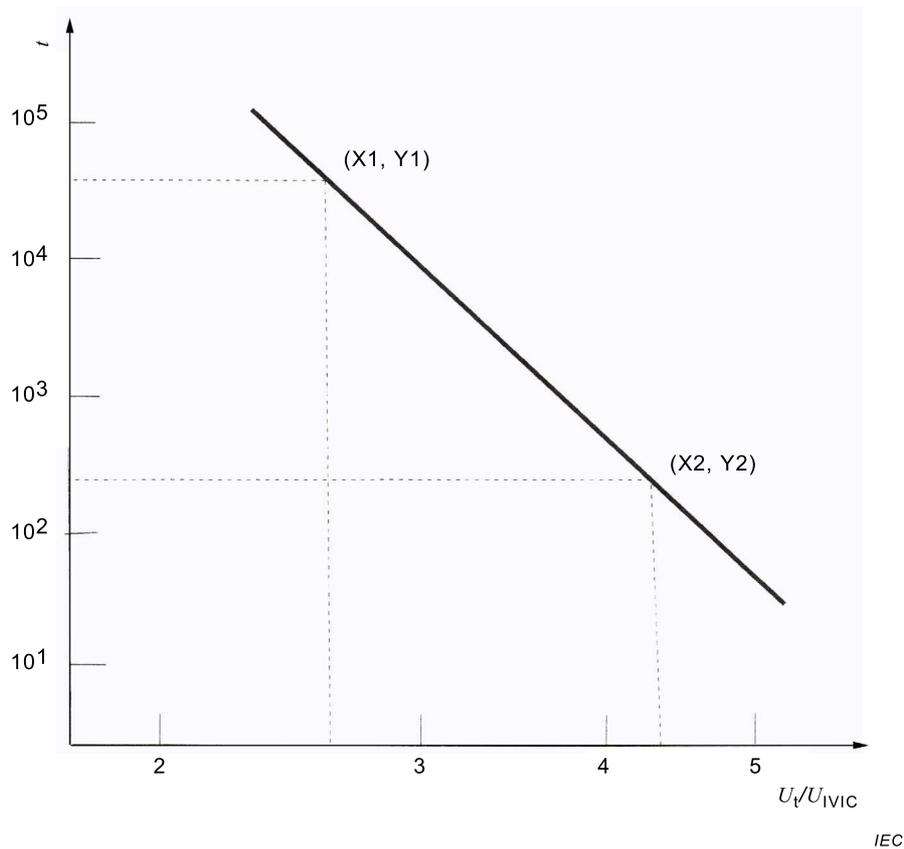
Annex E
(normative)

**Derivation of an IVIC in the absence of
a manufacturer’s reference life line**

E.1 Derivation of an IVIC from endurance tests

E.1.1 Mainwall insulation

Where a reference life line for mainwall insulation is not available for comparison purposes, the qualification procedure shall be for the manufacturer to generate a candidate endurance life line for the intended mainwall insulation system using sinewave voltages. At least four specimens shall be tested at each of 3 voltages. After correction to 50 Hz or 60 Hz using formula (3), the points shall be plotted to show log(mean life in hours) as a function of log(normalised voltage). Normalised voltage is the peak to peak test voltage divided by U_{IVIC} . The value of U_{IVIC} is calculated to be the maximum phase to ground peak to peak voltage for which qualification is required.



Key

X1	2,6	t	time to electrical failure in hours
Y1	41 000	U_t	peak to peak test voltage
X2	4,33	U_{IVIC}	maximum allowable peak to peak phase to ground operating voltage
Y2	250		

Figure E.1 – Reference life line for mainwall insulation

Comparison of the measured lifetimes shall be against the reference life line shown in Figure E.1. This life line is consistent with those measured at 50 Hz or 60 Hz from mica/epoxy resin systems that have been shown to give reliable lives in service [16,17,18]. The slope of the line is based on an endurance coefficient of 10 and passes through the point (4,33; 250) which is

specified in [15]. The pass criterion for the candidate system shall be that no more than one of the specimens at each voltage has a lifetime less than indicated by the reference line.

If the pass criterion has been satisfied, IVIC X is assigned to the machine, where X is the severity code selected from column 1 of Table D.2. Details shall be given in the machine documentation describing the severity code for which qualification has been achieved and stating that it has been obtained according to the reference insulation life line shown in this Annex. If the insulation is qualified to a value of U_{IVIC} different to those in Table D.2, an IVIC S may be assigned.

E.1.2 Turn insulation

In the absence of a reference life line for the turn insulation, it will be necessary to demonstrate that the turn to turn insulation is PD free at the selected qualification jump voltage. The meaning of PD free is clarified in 13.3. Specimens are produced according to 12.3 and tested according to 13.3. If PD inception occurs below $1,5 U_{turn}$, qualification shall be to the highest value of U_{turn} at which the specimens are PD free. If qualification is required at a higher value of U_{turn} , it may only be achieved by obtaining a life line according to 13.3 and comparing it against a reference line. The life line in Figure E.1 has been obtained from mica-based mainwall insulation, rather than turn insulation, and so may not be appropriate. If a reference life line is used, U_{IVIC} is replaced by the maximum permissible peak to peak voltage stressing the turn insulation in service (U_{turn}). Alternatively, the value used in a machine shown to provide satisfactory service experience with converter-fed PDS is acceptable. The IVIC for the machine will be shown in the documentation as IVIC S and details shall be given for the limiting value of U_{turn} .

E.1.3 Stress control system

Where a stress control system is used in service, the qualification is performed by using the specimens and procedures described in 12.4 and 13.4 respectively. The test conditions are derived from the value of peak to peak phase to ground voltage for which the mainwall insulation system has been qualified in E.1.1 and the value of U_{turn} for which the turn insulation has been qualified in E.1.2.

E.2 Derivation of the IVIC X on the basis of satisfactory service experience

Where satisfactory service experience has been obtained for the insulation system when fed from a converter, an IVIC may be derived from the operating parameters. The value shall conform to one of the severity codes shown in column 1 of Table D.2. An example of how this is performed is shown in Table 1 where the IVIC code is taken as the next least severe level shown in column 1 of Table D.2. If a severity level in service coincides with a level shown on Table D.2, it may be used. For insulation systems which have been shown to perform satisfactorily in service, the values for parameters in columns 2 to 5 of Table D.2 shall be reported in the documentation.

E.3 Derivation of an IVIC S on the basis of satisfactory service experience

It is recognised that the procedure in Clause E.2 may not reflect the required capability of the insulation system and, in this case, the code IVIC S is used. The precise values for the five parameters in Table D.2 for which satisfactory service experience has been achieved shall be reported in the documentation, together with the other relevant information on the service experience, such as, service operating time and application.

Annex F (informative)

Optional screening tests

F.1 General

Two tests are described which offer the opportunity for providing short-term screening of the mainwall insulation system. It is not intended that they be viewed as type tests nor that they are required for every contract.

F.2 Short term endurance test on the mainwall insulation

Coils or bars made to production standards are mounted in simulated slots and subjected to a 50 Hz or 60 Hz sinusoidal voltage with an r.m.s. value of 1,53 times the maximum peak to peak phase to ground voltage appearing on the coils during converter operation (see Annex C). The slot simulators should be earthed. Any stress control system to be used should be applied to the coils beforehand. This is a quality test of the mainwall insulation. It is similar to the test described in [15] and is primarily a test of the mainwall insulation. As such, the test conditions may be too severe for the stress control coating to last the complete test period and so remedial work on the stress control coating is permitted.

The recommended number of test specimens is four [15] and the pass criterion is that all should withstand the test conditions without electrical breakdown for 250 h. A withstand does not guarantee an acceptable service life with a converter drive. This is a damaging test and the specimens may not be used in a production machine.

F.3 Voltage withstand test

A short term power frequency test may be performed according to 4.4 of IEC 60034-15:2009 [20] in which an r.m.s. voltage of $(1,22U_{VIC}+1 \text{ kV})$ is applied for 1 min between coil terminals and ground. The factor of 1,22 arises from $\sqrt{3}$ divided by $\sqrt{2}$. The applied r.m.s. voltage is then increased at the rate of 1 kV/s up to $2(1,22U_{VIC} + 1 \text{ kV})$, and then immediately reduced at a rate of at least 1 kV/s to zero. There shall be no voltage breakdown during the sequence. This test may not reveal some failure mechanisms which are only apparent from performing a voltage endurance test. The test is conducted at room temperature and humidity on at least two complete coil specimens. This is a damaging test and the specimens may not be used in a production machine.

Bibliography

- [1] IEC TS 61800-8:2010, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface*
- [2] F.Schemmel, K.Bauer and M.Kaufhold, "Reliability and statistical lifetime prognosis of Motor Winding Insulation in Low Voltage Power Drive Systems", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 25, No. 4, pp. 6-13, 2009
- [3] M.Kaufhold, H.Aunger, M.Berth, J.Speck and M.Eberhardt, "Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-Inverter-fed low voltage induction motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 2, No.2, pp. 396-402, 2000
- [4] G.C.Stone, S.Campbell and S.Tetreault," Converter Duty Motors: Which Motors are at Risk", *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 17-22, 2000
- [5] J.C.G.Wheeler, A.M.Gully, A.E.Baker and F.A.Perrot, "Novel stress grading systems for converter-fed machines", *Electrical Insulation Magazine*, Vol.23, pp. 27-33, Jan/Feb 2007
- [6] P.Wang, A.Cavallini and G.C.Montanari "Endurance testing of rotating machines insulation systems: do sinusoidal and square voltage wavefor.m.s.provide comparable results?", *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Bologna, pp.310-313, June 2013
- [7] M.Kaufhold, K.Schäfer, K.Bauer and M.Rossmann "Medium and high power drive systems; Requirements and suitability proof for winding insulation systems", *10th Insucon International Electrical Insulation Conference*, pp 86-89, Birmingham, May 2006
- [8] A.Cavallini, D.Fabiani and G.C.Montanari, "Power electronics and electrical insulation systems – Part 2: Life modelling for insulation design", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol.26, no.4, pp. 33-39, 2010
- [9] F.Sahlen, L.Ming, K.Johansson, E. Martensson and O.Koponen, "Investigation of mica-based insulation for high voltage machines subjected to repetitive pulsed voltage" *ISEI Conference*, pp. 409-413, San Diego, USA, 2010
- [10] IEC TS 61251, *Electrical insulating materials – AC voltage endurance evaluation*
- [11] A.Wichmann and P.Grunewald "Statistical evaluation of accelerated voltage endurance tests on mica insulation for rotating electrical machines", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.25, No.2, pp.319-323, April 1990
- [12] J.C.G.Wheeler "Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors", *Electrical Insulation Magazine*, Vol 21, No 2, pp. 22-29, 2005
- [13] J.C.G.Wheeler, A.M.Gully, A.E.Baker and F.A.Perrot, "Thermal performance of stress grading systems for converter-fed motors", *IEEE Insulation Magazine*, Vol 23, No.2, pp. 5-11, March/April 2007
- [14] A. Kumada, T. Nakamura, H. Ikeda, K. Hidaka, Y. Tsuboi, T. Kisakibaru, and T. Yoshimitsu, "Transient potential distribution on stress grading system of rotating machines under repetitive impulse voltages", *Electrical Insulation Conference*, Philadelphia, USA, pp. 368 – 372, June 2014

- [15] IEEE 1553, *Standard for voltage endurance testing of form-wound coils and bars for hydrogenerators*
 - [16] B.E.Ward, G.C.Stone and M.Kurtz, “A quality control test for high voltage insulation”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 3, No 5, pp. 12-17, Sept. 1987
 - [17] H.Meyer and A.Wichmann “Experience and practice with standardized acceptance test procedures for windings of rotating machinery” *Proc. Electrical/Electronic Insulation Conference*, pp. 146-151, Chicago, 1983
 - [18] R.H.Schuler and G.Liptak “Long term functional tests on insulation systems for HV rotating machines”, *CIGRE International Conference on Large Electric Systems*, Paper 15.05, August 1976
 - [19] A.Wichmann “Two decades of experience and progress in epoxy mica insulation systems for large rotating machines”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, Issue 1, pp. 74-82, 1983
 - [20] IEC 60034-15:2009, *Rotating electrical machines – Part 15: Impulse voltage withstand levels of form-wound stator coils for rotating a.c. machines*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	49
INTRODUCTION	51
1 Domaine d'application	52
2 Références normatives	52
3 Termes et définitions	53
4 Tensions aux bornes de la machine liées au fonctionnement du convertisseur	57
5 Contraintes électriques pour les systèmes d'isolation des enroulements de machines	60
5.1 Généralités	60
5.2 Tensions contraignant l'isolation entre phases	60
5.3 Tensions contraignant l'isolation entre phase et terre	60
5.4 Tensions contraignant l'isolation entre spires	61
5.4.1 Généralités	61
5.4.2 Enroulements non rangés	61
5.4.3 Enroulements préformés	62
6 Tension nominale pour les systèmes d'isolation de Type II	62
7 Facteurs de contrainte pour les systèmes d'isolation de Type II alimentés par convertisseur	62
8 Essais de qualification	64
8.1 Généralités	64
8.2 Essais de qualification	64
9 Qualification du système d'isolation principale	65
9.1 Généralités	65
9.2 Méthodes d'essai	66
9.3 Utilisation de données de durée de vie à 50 Hz ou 60 Hz pour prédire la durée de vie en service avec un entraînement par convertisseur	67
10 Qualification de l'isolation entre spires	68
10.1 Généralités	68
10.2 Méthodes d'essai	69
11 Qualification du système de maîtrise des contraintes	70
11.1 Généralités	70
11.2 Méthodes d'essai	71
12 Préparation des éprouvettes	72
12.1 Généralités	72
12.2 Éprouvettes pour essais d'isolation principale	72
12.3 Éprouvettes pour essais d'isolation entre spires	72
12.4 Éprouvettes pour essais de système de maîtrise des contraintes	72
13 Procédures d'essais de qualification	73
13.1 Généralités	73
13.2 Isolation principale	73
13.3 Isolation entre spires	74
13.4 Système de maîtrise des contraintes	74
14 Critères de réussite des essais de qualification	74
14.1 Isolation principale	74
14.2 Isolation entre spires	75

14.3	Système de maîtrise des contraintes.....	75
15	Essai de routine.....	75
16	Essais de dépistage facultatifs	75
17	Analyse, compte-rendu et classement	76
Annexe A (informative) Contributions au vieillissement de l'isolation principale.....		77
A.1	Réduction de la durée de vie de l'isolation principale	77
A.2	Calcul des contributions au vieillissement pour un convertisseur à 3 niveaux.....	77
A.3	Calcul pour déduire une amplitude et une fréquence de tension équivalentes	79
Annexe B (informative) Exemples de circuits pour l'essai d'impulsions.....		81
B.1	Circuit d'essai d'impulsions utilisant un interrupteur à semiconducteur.....	81
B.2	Forme d'onde typique produite par le générateur d'impulsions	82
B.3	Variante de circuit d'essai d'impulsions utilisant un interrupteur à semiconducteur	82
Annexe C (informative) Déduction de la tension d'essai d'endurance de courte durée		84
Annexe D (informative) Déduction de la classe d'isolation contre les tensions de choc pour l'isolation de la machine.....		85
Annexe E (normative) Déduction d'une classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) en l'absence d'une courbe de durée de vie de référence fournie par le constructeur.....		88
E.1	Déduction d'une classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) à partir d'essais d'endurance	88
E.1.1	Isolation principale.....	88
E.1.2	isolation entre spires	89
E.1.3	Système de maîtrise des contraintes	89
E.2	Déduction de la classe IVIC X fondée sur un fonctionnement satisfaisant en conditions de service	89
E.3	Déduction d'une classe IVIC S fondée sur un fonctionnement satisfaisant en conditions de service	90
Annexe F (informative) Essais de dépistage facultatifs		91
F.1	Généralités	91
F.2	Essai d'endurance de courte durée sur l'isolation principale	91
F.3	Essai de tenue en tension.....	91
Bibliographie.....		92
Figure 1 – Paramètres de la forme d'onde de l'impulsion de tension		57
Figure 2 – Forme d'onde représentant un cycle complet de la tension entre phases aux bornes d'une machine alimentée par un convertisseur à 3 niveaux.....		58
Figure 3 – Saut de tension (U_j) aux bornes d'une machine alimentée par un entraînement par convertisseur.....		58
Figure 4 – Augmentation maximale de tension aux bornes de la machine due à une charge d'impédance infinie, en fonction de la longueur de câble pour divers temps de montée d'impulsions		59
Figure 5 – Exemple de conception à enroulements non rangés.....		60
Figure 6 – Exemple de conception à enroulements préformés.....		60
Figure 7 – Cas le plus défavorable de tension contraignant l'isolation entre spires dans une variété de stators non rangés, en fonction du temps de montée de l'impulsion.....		61
Figure 8 – Exemple de courbe de durée de vie pour un système d'isolation principale de Type II		68
Figure 9 – Exemple de courbe de durée de vie pour une isolation entre spires		70

Figure A.1 – Représentation de la tension phase-terre aux bornes d'une machine alimentée par un convertisseur à 3 niveaux	78
Figure A.2 – Rapport de la durée de vie en pourcentage (axe y) entre la tension de choc (U_{pk}/p_k) et la tension fondamentale (U'_{pk}/p_k) exprimé en pourcentage, pour divers rapports de fréquence d'impulsion/fréquence fondamentale ($n=10$).....	80
Figure B.1 – Exemple de circuit de simulation de tension par convertisseur simple.....	81
Figure B.2 – Forme d'onde typique produite par le générateur d'impulsions.....	82
Figure B.3 – Exemple de circuit de simulation de tension par convertisseur simple.....	83
Figure B.4 – Forme d'onde typique produite par le générateur d'impulsions.....	83
Figure E.1 – Courbe de durée de vie de référence pour une isolation principale	88
Tableau 1 – Exemples de valeurs de caractéristiques des tensions aux bornes pour deux machines alimentées par convertisseurs	57
Tableau 2 – Influence des caractéristiques de la tension d'entraînement par convertisseur sur l'accélération du vieillissement des composants des systèmes d'isolation de Type II.....	63
Tableau A.1 – Contribution au vieillissement électrique par des impulsions de 1 kHz à partir d'un convertisseur à 3 niveaux, exprimée en pourcentage du vieillissement résultant de la tension fondamentale à 50 Hz (coefficient d'endurance de 10).....	79
Tableau D.1 – Tensions d'essai entre phase et terre selon la classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) pour les systèmes d'isolation de Type II.....	86
Tableau D.2 – Classes d'isolement contre les tensions de choc (IVIC).....	87

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 18-42: Systèmes d'isolation électrique résistants aux décharges partielles (Type II) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par convertisseurs de tension – Essais de qualification

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC 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 l'IEC. L'IEC 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 l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC 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 IEC 60034-18-42 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes.

L'IEC 60034-18-42 annule et remplace l'IEC TS 60034-18-42 (2008).

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1854/FDIS	2/1856/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.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

NOTE Un tableau des correspondances de toutes les publications du comité d'études 2 de l'IEC peut être trouvé sur le site web de l'IEC, à la page d'accueil de ce comité.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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.

INTRODUCTION

L'approbation des systèmes d'isolation électrique destinés à des machines électriques tournantes alimentées par convertisseurs de tension est décrite dans deux normes internationales. Ces normes répartissent les systèmes en deux types selon qu'ils sont destinés à un fonctionnement où ils ne sont pas susceptibles d'être soumis, en un point quelconque de leur système d'isolation, à des décharges partielles dans des conditions spécifiées d'exploitation (Type I), ou bien s'ils sont susceptibles d'être soumis, en un point quelconque de leur système d'isolation, à des décharges partielles dans des conditions spécifiées d'exploitation (Type II). Pour les deux systèmes d'isolation, Type I et Type II, l'intégrateur du système d'entraînement de puissance (chargé de coordonner le rendement électrique de tout le système d'entraînement de puissance) doit informer le constructeur de la machine de la tension à laquelle les bornes de la machine sont soumises pendant le fonctionnement. Le constructeur de la machine devra donc choisir un degré de sévérité d'essais appropriés pour qualifier le système d'isolation. Pour les systèmes d'isolation qualifiés conformément à l'IEC 60034-18-41 ou à l'IEC 60034-18-42 pour l'utilisation dans des applications alimentées par des convertisseurs, une classe d'isolation contre les tensions de choc peut être déduite. Ceci indique l'aptitude de l'isolation à supporter les contraintes électriques liées au fonctionnement des convertisseurs. Pour les systèmes de Type I, la sévérité est basée sur le temps de montée de l'impulsion et sur la tension crête à crête. Pour les systèmes de Type II, la sévérité est en plus affectée par le taux de répétition des tensions de choc et par les caractéristiques de la tension fondamentale. Après l'installation du système convertisseur/machine, il est recommandé que l'intégrateur du système mesure les tensions entre phases et les tensions entre phase et terre, entre les bornes et la terre pour vérifier la conformité.

IEC 60034-18-41

Les systèmes d'isolation de Type I sont traités dans l'IEC 60034-18-41. Ces systèmes sont généralement utilisés dans des machines tournantes dont la tension assignée d'alimentation est inférieure à 700 V en valeur efficace et dont les bobines sont généralement à enroulement non rangé. Les références normatives et définitions nécessaires sont données dans l'IEC 60034-18-41, ainsi qu'une présentation des effets liés à l'utilisation de convertisseurs. L'approche conceptuelle et les programmes d'essais utilisés sont décrits après que les bases techniques nécessaires à la procédure d'évaluation ont été établies.

IEC 60034-18-42

L'IEC 60034-18-42 décrit les essais de qualification des systèmes d'isolation de Type II. Ces systèmes d'isolation sont généralement utilisés dans les machines tournantes ayant généralement des bobines préformées, le plus souvent assignées à une tension supérieure à 700 V en valeur efficace. La procédure de qualification est totalement différente de celle utilisée pour les systèmes d'isolation de Type I et implique la destruction d'éprouvettes dans des conditions de vieillissement accélérées. Le constructeur exige une courbe de durée de vie (telle que décrite dans l'IEC 60034-18-32) pour le système d'isolation, qui puisse être interprétée en utilisant des calculs appropriés et/ou des procédures expérimentales, pour donner une estimation de la durée de vie dans les conditions de fonctionnement avec l'entraînement par convertisseur. Une grande importance est donnée à la qualification de tout système de maîtrise des contraintes utilisé, et il convient d'effectuer les essais dans des conditions d'impulsions sinusoïdales répétées appliquées séparément. S'il peut être démontré que le système d'isolation offre une durée de vie acceptable dans les conditions de vieillissement spécifiées, le système est qualifié pour son utilisation.

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 18-42: Systèmes d'isolation électrique résistants aux décharges partielles (Type II) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par convertisseurs de tension – Essais de qualification

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60034 définit les critères d'évaluation du système d'isolation des enroulements statoriques et rotoriques des machines à courant alternatif monophasées ou polyphasées qui sont soumises à des tensions de choc répétitives telles que celles générées par les convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI), et qui sont susceptibles de subir et de supporter des décharges partielles pendant leur fonctionnement. Elle spécifie des essais de qualification électrique réalisés sur des éprouvettes représentatives, pour vérifier leur adéquation à un fonctionnement avec des convertisseurs de source de tension. Elle décrit également un système de classification supplémentaire qui définit les limites de performances fiables dans des conditions d'alimentation par des convertisseurs.

Bien que le présent document traite des convertisseurs de tension, il est admis qu'il existe d'autres types de convertisseurs qui peuvent créer des tensions de choc répétitives. Pour ces convertisseurs, une approche similaire des essais peut être utilisée.

La qualification des systèmes d'isolation ne peut pas être requise pour les machines tournantes qui sont uniquement alimentées par des convertisseurs de tension pour le démarrage; de telles machines ne relèvent donc pas du domaine d'application du présent document.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. 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).

IEC 60034-1:2010, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

IEC 60034-18-1:2010, *Machines électriques tournantes – Partie 18-1: Évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation – Principes directeurs généraux*

IEC 60034-18-31, *Machines électriques tournantes – Partie 18-31: Évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation – Procédures d'essai pour enroulements préformés – Évaluation thermique et classification des systèmes d'isolation utilisés dans les machines tournantes*

IEC 60034-18-32, *Machines électriques tournantes – Partie 18-32: Évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation – Procédures d'essai pour enroulements préformés – Évaluation par endurance électrique*

IEC 60034-18-41:2014, *Machines électriques tournantes – Partie 18-41: Systèmes d'isolation électrique sans décharge partielle (Type I) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par des convertisseurs de tension – Essais de qualification et de contrôle qualité*

IEC TS 60034-27, *Machines électriques tournantes – Partie 27: Mesures à l'arrêt des décharges partielles effectuées sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes*

IEC TS 61934, *Electrical insulating materials and systems – Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses* (disponible en anglais seulement)

IEC 62539, *Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions

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

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

décharge partielle

PD

décharge électrique dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'isolation entre des conducteurs électriques

Note 1 à l'article: Elle peut se produire au sein même de l'isolation ou à l'extérieur de celle-ci, ou à partir d'un conducteur électrique.

Note 2 à l'article: L'abréviation «PD» est dérivée du terme anglais développé correspondant «partial discharge».

3.2

tension de seuil de décharge partielle

PDIV

tension la plus faible à laquelle sont initiées les décharges partielles durant l'essai quand la tension appliquée à l'éprouvette est graduellement augmentée à partir d'une valeur plus faible que celle pour laquelle aucune décharge n'est observée

Note 1 à l'article: Avec une tension sinusoïdale appliquée, la PDIV est définie comme la valeur efficace de la tension. Avec des tensions en impulsion, la PDIV est définie comme la valeur crête-crête de la tension.

Note 2 à l'article: L'abréviation «PDIV» est dérivée du terme anglais développé correspondant «partial discharge inception voltage».

3.3

tension de seuil de décharge partielle répétitive

RPDIV

tension de choc crête-à-crête minimale à laquelle plus de cinq impulsions de décharge électrique se produisent sur dix impulsions de tension de même polarité

Note 1 à l'article: Il s'agit d'une valeur moyenne pour le temps d'essai spécifié et pour une configuration d'essai où la tension appliquée à l'éprouvette est graduellement augmentée à partir d'une valeur à laquelle aucune décharge partielle ne peut être observée.

Note 2 à l'article: L'abréviation «RPDIV» est dérivée du terme anglais développé correspondant «repetitive partial discharge inception voltage».

3.4

tension (de choc) de crête

U_p

valeur numérique maximale atteinte par la tension unipolaire (par exemple, U_p sur la Figure 1)

Note 1 à l'article: Pour des impulsions de tension bipolaires, il s'agit de la moitié de la tension crête à crête.

3.5 amplitude de la tension de choc permanente

U_a
amplitude finale de l'impulsion de tension

VOIR: Figure 1.

3.6 surtension

U_b
amplitude de la tension de crête supérieure à la tension de choc permanente

VOIR: Figure 1.

3.7 tension de choc crête à crête

$U'_{pk/pk}$
tension crête à crête au taux de répétition de la tension de choc

VOIR: Figure 2.

3.8 tension crête à crête

$U_{pk/pk}$
tension crête à crête entre phases à la fréquence fondamentale

VOIR: Figure 2.

Note 1 à l'article: La définition de la tension crête à crête est clarifiée à l'Article 4.

3.9 tension de choc unipolaire

impulsion de tension dont la polarité est positive ou négative

Note 1 à l'article: Le terme «impulsion» est utilisé pour décrire la contrainte en tension transitoire appliquée à l'éprouvette et le terme «pulsion» est utilisé pour décrire le signal de décharge partielle.

3.10 tension de choc bipolaire

impulsion de tension dont la polarité varie alternative de positive à négative ou inversement

3.11 taux de répétition de tension de choc

f
inverse du temps moyen entre deux impulsions successives de même polarité, qu'elles soient unipolaires ou bipolaires

3.12 temps de montée de l'impulsion

t_r
intervalle de temps pour que la tension monte de 10 % à 90 % de sa valeur finale

VOIR: Figure 1.

3.13 système d'isolation électrique

structure isolante comprenant un ou plusieurs matériaux isolants électriques ainsi que les parties conductrices utilisées dans un dispositif électrotechnique

3.14**motorette**

modèle d'essai particulier utilisé pour l'évaluation des systèmes d'isolation électriques des enroulements non rangés

3.15**formette**

modèle d'essai particulier utilisé pour l'évaluation des systèmes d'isolation électriques des enroulements préformés

3.16**contrainte électrique**

champ électrique en V/mm

3.17**tension assignée**

U_N

tension assignée par le constructeur pour une condition de fonctionnement à fréquence industrielle d'une machine et indiquée sur sa plaque signalétique

3.18**classe d'isolation contre les tensions de choc****IVIC**

limites de la tension appliquée pour le fonctionnement d'une machine alimentée par convertisseur de Type I ou de Type II

Note 1 à l'article: Les limites sont présentées sous forme de niveaux de sévérité pour lesquels la machine a été qualifiée.

Note 2 à l'article: Les niveaux de sévérité doivent figurer dans la documentation de la machine.

Note 3 à l'article: L'abréviation «IVIC» est dérivée du terme anglais développé correspondant «impulse voltage insulation class».

3.19**fréquence fondamentale**

première fréquence du spectre, obtenue à partir d'une transformée de Fourier d'une fonction temporelle périodique, et à laquelle toutes les autres fréquences du spectre se réfèrent

Note 1 à l'article: Pour les besoins du présent document, la fréquence fondamentale de la tension aux bornes de la machine est identique à celle définissant la vitesse de la machine alimentée par convertisseur.

Note 2 à l'article: Elle est calculée comme l'inverse du temps pris pour un cycle complet de la tension appliquée (Figure 2).

3.20**durée d'impulsion**

durée de l'intervalle de temps entre les premier et dernier instants auxquels la valeur instantanée d'une impulsion devient égale à une fraction déterminée de la hauteur de l'impulsion, ou égale à un seuil spécifié

3.21**saut de tension**

U_j

variation de tension aux bornes de la machine, se produisant au début de chaque impulsion, lorsqu'elle est alimentée par un convertisseur

VOIR: Figure 3.

3.22**tension continue de nœud** U_{dc}

tension du circuit intermédiaire du convertisseur de tension (circuit de liaison-dc)

Note 1 à l'article: Pour un convertisseur à 2 niveaux, U_{dc} est égale U_a dans la Figure 1.Note 2 à l'article: Pour un convertisseur à niveaux multiples, U_{dc} est égale à $\frac{1}{2} U_{pk/pk}$ moins la surtension dans la Figure 2.**3.23****système d'entraînement de puissance****PDS**

module d'entraînement complet et machine tournante avec le câble de raccordement si nécessaire

Note 1 à l'article: L'abréviation «PDS» est dérivée du terme anglais développé correspondant «power drive system».

3.24**coefficient d'endurance sous tension** n

exposant du modèle en puissance inverse ou du modèle exponentiel duquel dépend la relation entre la durée de vie et l'amplitude de la contrainte en tension pour un système d'isolation spécifique

3.25**durée de vie**

durée de fonctionnement avant défaillance

3.26**revêtement conducteur dans l'encoche**

peinture ou bande conductrice en contact étroit avec l'isolation principale dans la partie de l'encoche du côté bobine, souvent appelée revêtement semiconducteur

Note 1 à l'article: Le but du revêtement est d'empêcher les décharges de se produire dans l'encoche.

3.27**revêtement de maîtrise des contraintes**

peinture ou bande appliquée sur l'isolation principale et s'étendant au-delà du revêtement du conducteur dans l'encoche dans les bobines ou les barres statoriques

Note 1 à l'article: Le but du revêtement est de répartir la contrainte électrique de surface.

3.28**système de maîtrise des contraintes**

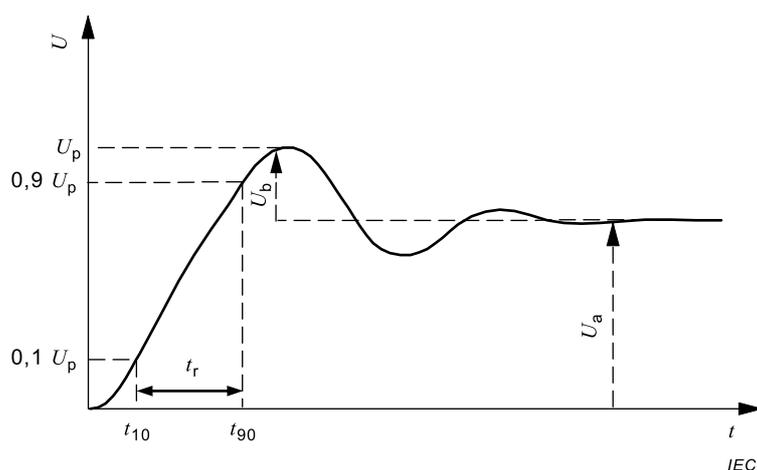
nom générique pour désigner la «combinaison de revêtement conducteur dans l'encoche» et le «revêtement de maîtrise des contraintes» dans les bobines et les barres statoriques haute tension

3.29**tension crête à crête et entre phase et terre maximale admissible** U_{VIC}

tension crête à crête et entre phase et terre maximale admissible

4 Tensions aux bornes de la machine liées au fonctionnement du convertisseur

La tension apparaissant aux bornes d'une machine alimentée par convertisseur peut être estimée à l'aide de l'IEC TS 61800-8 [1]¹ et dépend de plusieurs caractéristiques du système d'entraînement de puissance. Afin d'appliquer la présente norme à la qualification et aux essais du système d'isolation d'un enroulement, il est nécessaire de spécifier les paramètres requis de la tension apparaissant aux bornes de la machine (Article 7).



Légende

U tension

t temps

Figure 1 – Paramètres de la forme d'onde de l'impulsion de tension

L'amplitude et le temps de montée de la tension aux bornes de la machine dépendent de l'installation de mise à la terre, de divers aspects de conception du câble, de l'impédance d'onde de la machine et de la présence d'éventuels filtres qui augmentent le temps de montée de l'impulsion. Des exemples de caractéristiques d'impulsions du convertisseur aux bornes de deux moteurs de la machine sont fournis dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Exemples de valeurs de caractéristiques des tensions aux bornes pour deux machines alimentées par convertisseurs

Tension nominale de la machine	3,3 kV	6,6 kV
Tension crête à crête sur l'isolation entre phase et terre	5,4 kV	10,8 kV
Fréquence fondamentale	50/60 Hz	50/60 Hz
Nombre de niveaux pour la tension du convertisseur	5	3
Surtension de la tension d'impulsion	60 %	60 %
Tension nominale par échelon	650 V	3 kV
Temps de montée de l'impulsion aux bornes des moteurs	1 μ s	3 μ s
Fréquence de répétition de l'impulsion	1 kHz	900 Hz
Classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) pour qualifier l'isolation pour ce service (voir Tableau D.2)	3	3

Dans le cas de convertisseurs à 2 niveaux ou autres convertisseurs de tension, les impulsions génèrent des surtensions aux bornes de la machine, en fonction du temps de montée de

¹ Les numéros entre crochets font référence à la Bibliographie.

l'impulsion de tension au niveau de la sortie du convertisseur et de la longueur du câble et de l'impédance de la machine. Cette surtension est créée par réflexion des ondes à l'interface entre le câble et la machine ou aux bornes du convertisseur, en raison d'une impédance non adaptée. La tension apparaissant aux bornes de la machine lorsqu'elle est alimentée par un convertisseur à 3 niveaux est représentée à la Figure 2. La figure illustre un cycle à la fréquence fondamentale.

La variation maximale de tension ou saut de tension (U_j) au taux de répétition des impulsions est représentée à la Figure 3. Ce paramètre est important pour définir l'augmentation de la tension qui peut se produire dans la première ou la dernière bobine de l'enroulement. Une double transition de saut de tension (Figure 3) est possible, mais il appartient à l'intégrateur du système d'entraînement de puissance (PDS) de s'assurer que le logiciel contrôlant le PDS minimise cette possibilité. Si une double transition de saut de tension se produit dans les tensions d'un convertisseur à niveaux multiples, son effet est négligeable.

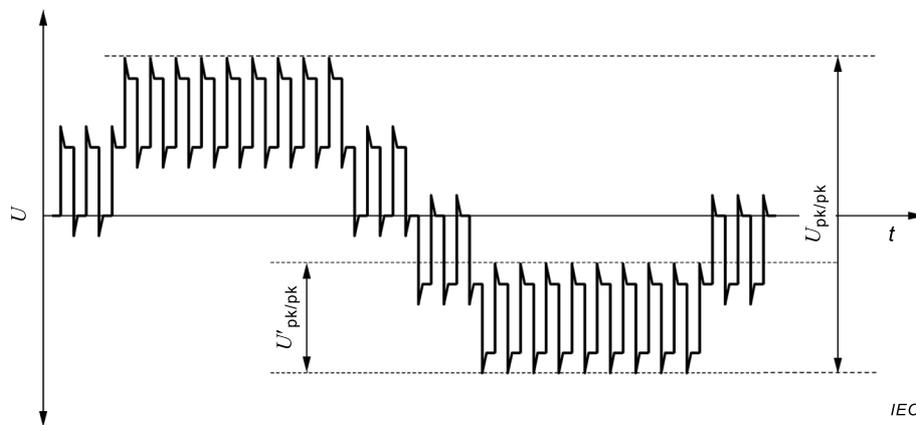


Figure 2 – Forme d'onde représentant un cycle complet de la tension entre phases aux bornes d'une machine alimentée par un convertisseur à 3 niveaux

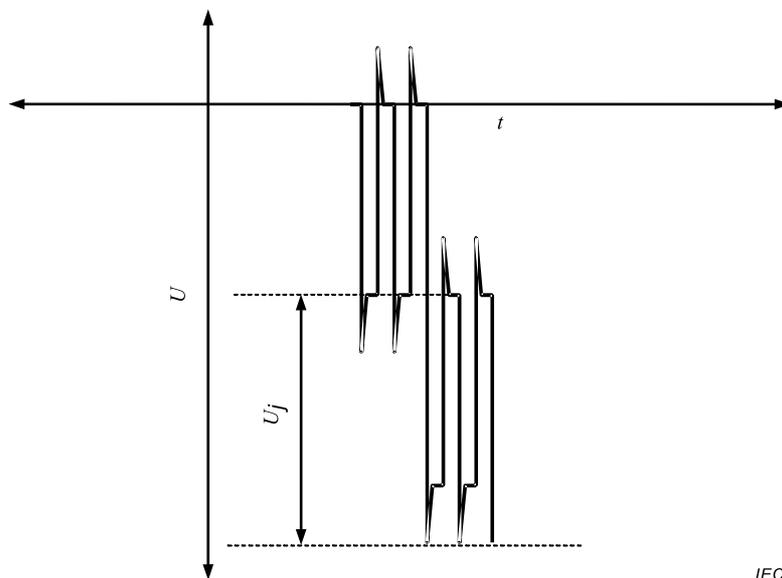


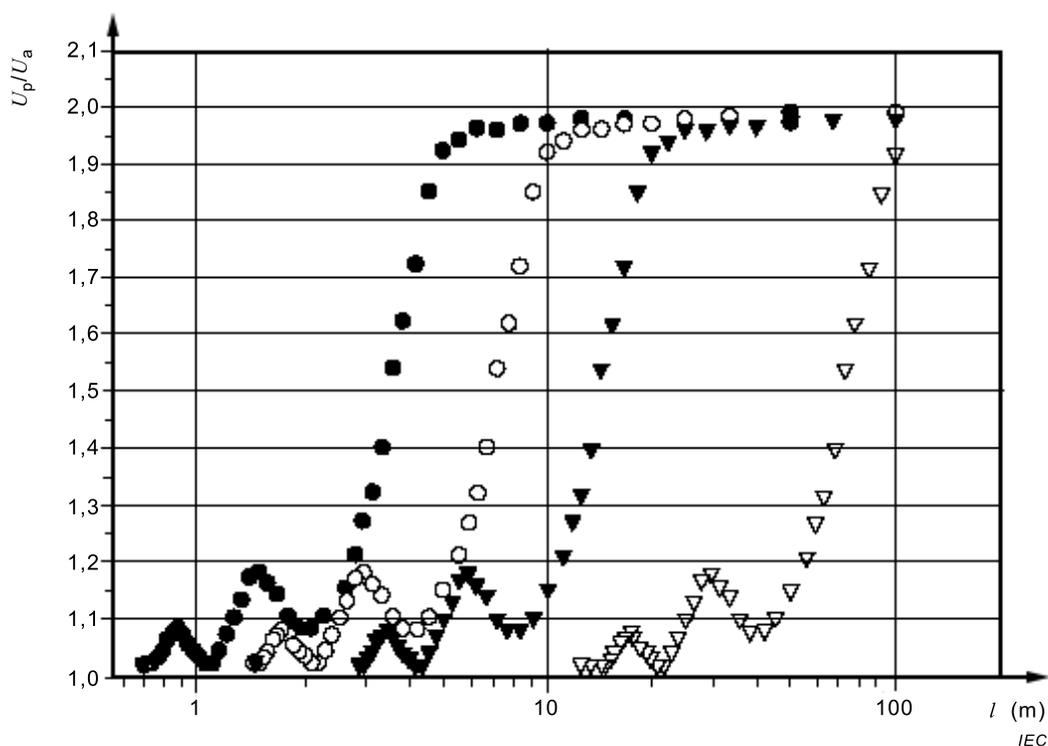
Figure 3 – Saut de tension (U_j) aux bornes d'une machine alimentée par un entraînement par convertisseur

Des exemples d'augmentation produite pour divers temps de montée et différentes longueurs de câbles sont donnés à la Figure 4, où le cas le plus défavorable est présenté, provenant d'une charge d'impédance infinie. Dans ce cas, l'augmentation de la tension pour un temps

de montée d'impulsion de $1,0 \mu\text{s}$ est négligeable pour une longueur de câble inférieure à 15 m et dépasse seulement un facteur de 1,2 quand cette longueur de câble dépasse environ 50 m.

Des tensions supérieures à $2U_{dc}$ peuvent apparaître aux bornes de la machine par des doubles transitions d'entraînement par convertisseur et par un algorithme d'entraînement alimenté par un convertisseur qui ne laisse pas un temps minimal entre deux impulsions successives. Une double transition se produit, par exemple, lorsqu'une phase permute d'une tension continue de nœud négative à une tension continue de nœud positive alors qu'au même moment, une autre phase permute d'une tension positive à une tension négative. Cela génère une onde de tension $2U_{dc}$ qui se dirige vers la machine et peut ensuite augmenter en amplitude lorsqu'elle est réfléchiée aux bornes de la machine. S'il n'y a aucun contrôle du temps d'impulsion dans l'entraînement par convertisseur et si le temps entre deux impulsions coïncide avec la constante de temps du câble entre le convertisseur et la machine, une surtension supérieure à $2U_{dc}$ peut être générée aux bornes de la machine. L'utilisation d'un filtre au niveau du convertisseur, au niveau des bornes de la machine, ou les deux à la fois, peut réduire ou empêcher la réflexion de l'onde de tension.

En cas de défaut à la terre sur une des phases, des systèmes de protection dans le convertisseur empêchent toute détérioration en éteignant celui-ci.



Légende

- t_r 0,05 μs
- t_r 0,1 μs
- ▼ t_r 0,2 μs
- ▽ t_r 1,0 μs
- l longueur de câble

Figure 4 – Augmentation maximale de tension aux bornes de la machine due à une charge d'impédance infinie, en fonction de la longueur de câble pour divers temps de montée d'impulsions

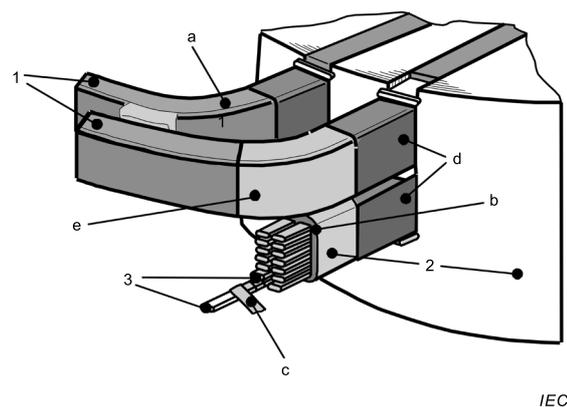
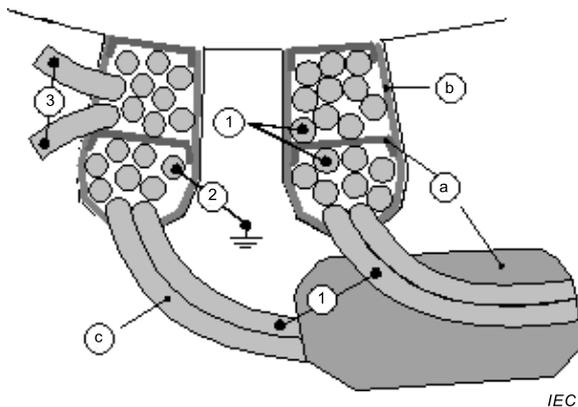
5 Contraintes électriques pour les systèmes d'isolation des enroulements de machines

5.1 Généralités

Lorsqu'un enroulement est soumis à des impulsions de tension à temps de montée abrupt d'amplitude significative, des contraintes de tension élevée vont être créées aux emplacements suivants (Figures 5 et 6):

- entre les conducteurs dans différentes phases,
- entre un conducteur et la terre,
- entre des spires adjacentes, généralement dans la dernière bobine,
- dans la zone du revêtement de maîtrise des contraintes.

Du fait de l'existence d'une charge d'espace soit en volume soit en surface dans les composants d'isolation, les contraintes électriques ne sont pas seulement définies par la valeur instantanée de la tension elle-même, mais aussi par les tensions qui ont contraint précédemment l'isolation. L'expérience montre que, dans certaines limites, la tension crête à crête constitue le paramètre contraignant le plus significatif dans les applications utilisant des systèmes d'entraînement par convertisseurs. C'est également la raison pour laquelle une tension unipolaire produit le même type de contraintes qu'une tension bipolaire ayant une tension crête à crête de la même valeur.



Légende

- | | | | |
|---|--|---|----------------------|
| a | isolation entre phases / isolation des têtes de bobines des enroulements | 1 | entre phases |
| b | isolation principale | 2 | entre phase et terre |
| c | isolation entre spires | 3 | entre spires |
| d | revêtement conducteur dans l'encoche | | |
| e | revêtement de maîtrise des contraintes | | |

Figure 5 – Exemple de conception à enroulements non rangés

Figure 6 – Exemple de conception à enroulements préformés

5.2 Tensions contraignant l'isolation entre phases

La contrainte maximale de tension s'exerçant sur l'isolation entre phases est déterminée par la conception de l'enroulement et par les caractéristiques de la tension entre phases.

5.3 Tensions contraignant l'isolation entre phase et terre

La contrainte maximale de tension s'exerçant sur l'isolation entre phase et terre est déterminée par la conception de l'enroulement et par les caractéristiques de la tension entre phase et terre.

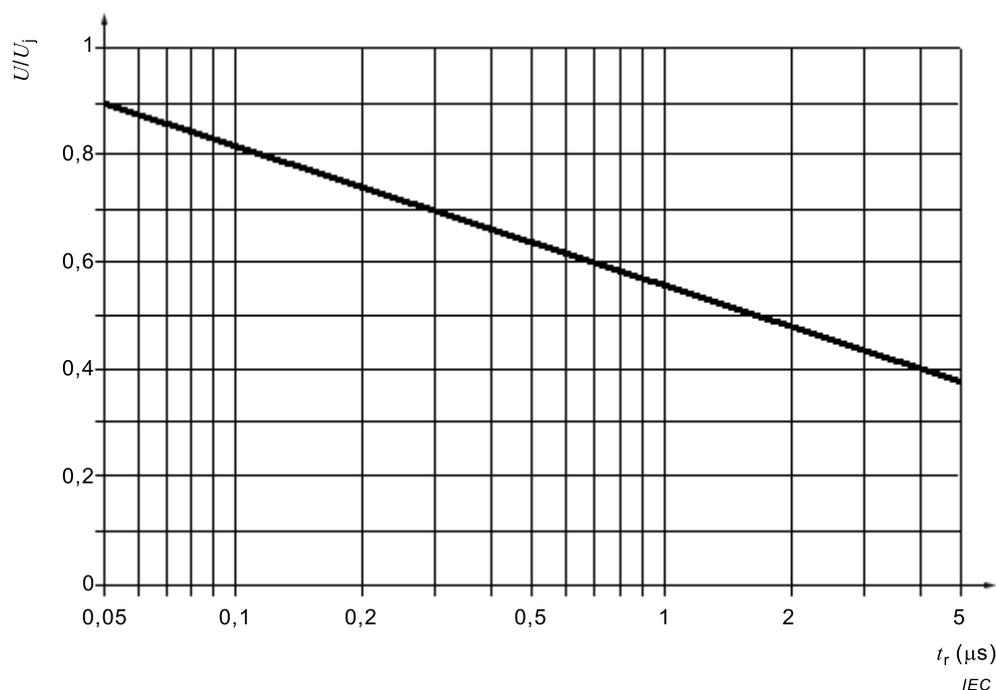
5.4 Tensions contraignant l'isolation entre spires

5.4.1 Généralités

La tension contraignant l'isolation entre spires est déterminée par les valeurs de saut de la tension entre phase et terre (amplitude et temps de montée) et par le type d'enroulement, le nombre de bobines ainsi que par le nombre et la longueur des spires. La distribution de la tension transitoire dépend de la position relative des spires individuelles dans les encoches. Les impulsions à temps de montée abrupt donnent lieu à une distribution inégale de la tension à travers les bobines, avec des niveaux de contrainte élevés à travers les deux premières spires ou les deux dernières spires, selon la conception des enroulements. Le saut de tension se produit à la fois au niveau du flanc avant et du flanc arrière de la tension entre phase et terre. La tension entre spires présente le même effet à chaque flanc où il y a une crête positive ou une crête négative. Si la distribution de la tension contraignant l'isolation entre spires dans une conception particulière de machine tournante est connue, le constructeur peut utiliser cette information pour calculer la fraction de saut de tension contraignant l'isolation entre spires dans le cas le plus défavorable. Sinon, la fraction peut être estimée selon 5.4.2 et 5.4.3.

5.4.2 Enroulements non rangés

Dans la pratique, la première spire et la dernière spire peuvent être adjacentes, auquel cas la tension entre spires peut être presque égale à la chute de tension à travers la bobine. La Figure 7 représente le cas le plus défavorable de tension contraignant l'isolation entre spires dans une grande variété de stators, en fonction du temps de montée de l'impulsion. La tension est représentée comme une proportion du saut de tension entre phase et terre. Les données ont été obtenues à partir d'une combinaison de figures fournies dans les références [2], [3] et [4] et peuvent être utilisées à titre indicatif lorsque le constructeur ne dispose pas d'autres données.



Légende

U/U_j Fraction de saut de tension contraignant l'isolation entre spires

t_r Temps de montée d'impulsion

NOTE 1,0 correspond au saut de tension de crête entre phase et terre aux bornes de la machine.

Figure 7 – Cas le plus défavorable de tension contraignant l'isolation entre spires dans une variété de stators non rangés, en fonction du temps de montée de l'impulsion

5.4.3 Enroulements préformés

Les données actuellement disponibles sont insuffisantes et ne permettent pas d'élaborer, pour les enroulements préformés, une figure similaire à la Figure 7. Si la distribution de la tension n'est pas connue, le constructeur doit donner des garanties aux clients en concevant les bobines de sorte que, dans le cas de bobines monocouches, l'isolation entre spires puisse supporter une contrainte égale au saut de tension divisé par le nombre de spires dans une bobine. Pour les bobines multicouches, il est possible que l'isolation entre spires subisse une contrainte égale à la totalité du saut de tension, en fonction de la disposition des spires.

6 Tension nominale pour les systèmes d'isolation de Type II

Si une partie quelconque d'un système d'isolation est susceptible de devoir endurer des décharges partielles au cours de sa durée de vie, elle est définie comme étant de Type II et doit par conséquent contenir des matériaux qui résistent aux décharges partielles. En général, les machines prévues pour une tension assignée supérieure ou égale à 700 V utilisent des systèmes d'isolation de Type II, bien qu'un nombre significatif de machines prévues pour une tension assignée inférieure à 700 V utilisent également des systèmes d'isolation de Type II. La valeur de la tension assignée à une machine est en général attribuée par le constructeur à fréquence industrielle. Ceci suppose que la tension provenant de l'alimentation est de type sinusoïdal à 50 Hz ou 60 Hz. Dans le cas de machines alimentées par convertisseurs, la définition classique de la tension assignée n'est plus du tout applicable, même si le constructeur peut continuer à assigner cette tension pour un fonctionnement à 50 Hz ou à 60 Hz et le marquer sur la plaque signalétique de la machine. Il convient que la tension nominale du système d'isolation pour le fonctionnement sur convertisseur soit définie en utilisant les facteurs de contrainte pour lesquels sa qualification a été réalisée. Pour aider l'utilisateur de la machine tournante, une classe d'isolation contre les tensions de choc est définie en 3.18 pour les machines alimentées par des convertisseurs. Les codes de sévérité pour les classes d'isolation contre les tensions de choc sont fournis à l'Annexe D. Pour les machines sans revêtement de maîtrise des contraintes sur les têtes de bobines des enroulements, la classe d'isolation contre les tensions de choc dépend principalement de la valeur maximale admissible de $U_{pk/pk}$. Dans le cas de machines pourvues d'un revêtement de maîtrise des contraintes sur les têtes de bobines de stators, la performance du système de maîtrise des contraintes dépend également du taux de répétition de la tension de choc et du temps de montée de l'impulsion.

7 Facteurs de contrainte pour les systèmes d'isolation de Type II alimentés par convertisseur

La personne en charge de l'intégration du convertisseur d'entraînement de puissance doit spécifier à la personne en charge de la conception de la machine la tension qui va être appliquée à ses bornes. Ces informations doivent être mentionnées dans la spécification d'achat en plus des paramètres classiques tels que la tension assignée, la classe thermique, l'humidité, etc. Plus spécifiquement, les valeurs extrêmes doivent être définies pour les paramètres suivants de la tension qui apparaissent aux bornes de la machine.

- a) la fréquence fondamentale et le taux de répétition de la tension de choc aux bornes de la machine;
- b) les tensions crête à crête à la fréquence fondamentale et au taux de répétition de la tension de choc, ainsi que les sauts de tension susceptibles de se produire aux bornes de la machine;
- c) le temps de montée de l'impulsion.

Le Tableau 2 donne une indication de l'incidence des caractéristiques de la tension aux bornes de la machine sur le vieillissement des composants d'un système d'isolation de Type II. Dans les machines possédant des systèmes d'isolation de Type II, les matériaux de l'isolation principale, de l'isolation entre phases et de l'isolation entre spires sont généralement des combinaisons de matériaux organiques et inorganiques. Pour les stators fonctionnant au-dessus de 700 V, il peut y avoir un revêtement conducteur dans l'encoche,

conçu pour fournir un écran mis à la terre pour l'enroulement statorique isolé en contact avec la paroi de l'encoche. La surface de l'isolation sur le conducteur est soumise à une concentration de contraintes car elle dépasse de l'encoche. Pour des machines alimentées par des tensions plus élevées, il est possible d'utiliser un revêtement de maîtrise des contraintes pour éviter les phénomènes d'arcs en surface. Ces cinq composants (isolation principale, entre spires, entre phases, revêtement conducteur dans l'encoche et revêtement de maîtrise des contraintes) constituent un système d'isolation de Type II typique. Les tensions entre phases sont présentes lorsque, par exemple, deux bobines sont en contact dans la même encoche. Cependant, si un revêtement conducteur est présent dans l'encoche, le potentiel de surface sera nul car il est au potentiel de la terre à travers le noyau. De la même manière, si deux couches d'isolation principale existent, généralement séparées par un isolant, la contrainte de tension n'est pas considérée comme étant d'amplitude suffisante pour nécessiter des essais de systèmes d'isolation entre phases. Aucun essai spécifique n'est par conséquent recommandé pour l'isolation entre phases. Il est reconnu que la présence de décharges et de claquage est possible dans la région des têtes de bobines des enroulements, mais cela n'est pas couvert dans les procédures de qualification décrites dans le présent document. Les composants d'isolation évalués dans les essais de qualification sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Influence des caractéristiques de la tension d'entraînement par convertisseur sur l'accélération du vieillissement des composants des systèmes d'isolation de Type II

Composant d'isolation	Fréquence fondamentale	Taux de répétition de tension de choc	Tension crête à crête à la fréquence fondamentale	Saut de tension	Tension de choc crête à crête au taux de répétition de la tension de choc	Temps de montée de l'impulsion de tension de choc
		f	$U_{pk/pk}$	U_j	$U'_{pk/pk}$	t_r
Isolation entre spires	○	●	○	●	○	●
Isolation principale	●	○*	●	○	○*	○*
Système de maîtrise des contraintes	○	●	●	●	●	●
○ Peu significatif ● Très significatif						
NOTE 1 L'essai relatif à l'isolation entre phases n'est pas nécessaire.						
NOTE 2 S'il y a deux niveaux de tension dans le convertisseur, ces paramètres (*) peuvent devenir significatifs.						

Pour les systèmes d'isolation conçus pour être utilisés avec une alimentation à fréquence industrielle, les effets à long terme de la tension assignée entre phase et terre à travers l'isolation principale et sur la longueur du système de répartition des contraintes sont primordiaux. L'isolation entre spires est généralement spécifiée par l'exigence de la conception concernant la surtension à temps de montée abrupt. De tels surtensions sont en général de courte durée et sont relativement peu fréquentes par rapport au taux de répétition de la tension de choc. Pour cette raison, les exigences d'acceptation sont généralement satisfaites par l'aptitude de l'isolation principale à supporter un essai de tenue à fréquence industrielle et de l'isolation entre spires à résister à un essai de surtension. L'aptitude du système à satisfaire aux exigences de durée de vie prévue à la conception est généralement satisfaite par des essais d'endurance sous tension sinusoïdale de longue durée. Cet essai d'endurance permet au concepteur d'établir l'aptitude à long terme du système d'isolation principale.

Dans le cas de systèmes alimentés par convertisseurs, la forme d'onde de tension plus complexe produite par l'entraînement par convertisseur fournira une distribution de

contraintes différente dans l'enroulement. L'isolation principale est affectée par l'amplitude de la surtension à la fréquence fondamentale. Le système de maîtrise des contraintes est affecté par l'amplitude de la surtension (U_b) à la fréquence fondamentale ainsi que par le taux de répétition de la tension de choc (f). Le dernier facteur peut augmenter l'échauffement diélectrique dans le système de maîtrise des contraintes. Les deux parties de la tension [5] doivent donc être prises en compte lors de la qualification de la maîtrise des contraintes (voir 13.4). Il est possible que, contrairement à la tension fondamentale, le saut de tension (U_j) au taux de répétition de l'impulsion (f) soumette l'isolation entre spires à des contraintes significatives. À mesure que le temps de montée des impulsions diminue, la contrainte de tension augmente généralement sur l'isolation entre les spires adjacentes sur la dernière bobine des bobines à spires multiples, générant ainsi des surcontraintes significatives. Des temps de montée très abrupts des impulsions peuvent affecter la durée de vie de l'isolation entre spires ainsi que l'isolation principale [6]. La durée de vie de l'isolation principale est particulièrement affectée si le convertisseur comprend un nombre réduit de niveaux (par exemple, deux). Toutefois, en première approximation, la contribution du temps de montée à la réduction de la durée de vie de l'isolation principale peut être négligée pour un vieillissement de longue durée. La combinaison de ces facteurs et leur effet sur le système d'isolation dans son ensemble sont difficiles à quantifier. Le Tableau 2 met en évidence les facteurs les plus importants qui contribuent au vieillissement accéléré et, par conséquent, les hypothèses qui déterminent les procédures d'essai suivantes pour la qualification des systèmes d'isolation.

8 Essais de qualification

8.1 Généralités

La qualification du système d'isolation d'une machine électrique tournante alimentée par un entraînement par convertisseur et l'attribution à celui-ci d'une classe d'isolation contre les tensions de choc sont réalisées par le biais d'essais de l'isolation principale, de l'isolation entre spires et du système de maîtrise des contraintes y compris son contact à la terre. Ces trois composants du système d'isolation globale sont évalués séparément. Chaque composant sera défini par les paramètres régissant les règles de conception du constructeur, comme par exemple les matériaux d'isolation, les contraintes acceptables, le système de maîtrise des contraintes, les techniques d'application, les processus et les guides dimensionnels. Ce sont précisément ces règles de conception qui sont qualifiées. Pour la qualification de l'isolation principale de systèmes de Type II, les bobines préformées ou les barres sont soumises à un vieillissement électrique accéléré afin de déterminer une courbe de durée de vie électrique. Pour les machines à enroulement non rangés, on utilise des motorettes ou des enroulements complets. Pour l'isolation entre spires, des éprouvettes de barres ou de bobines avec des conducteurs parallèles sont utilisées pour obtenir une courbe de durée de vie. Les essais de qualification sont basés sur le principe selon lequel les décharges partielles sont la cause principale du vieillissement électrique qui conduit à une défaillance précoce; par conséquent, tous les essais doivent être effectués au-dessus de la tension de seuil de décharge partielle (PDIV). En général, les essais peuvent être réalisés en utilisant des tensions sinusoïdales. Des essais séparés impliquant des tensions de choc et des tensions sinusoïdales sont réalisés pour le système de maîtrise des contraintes.

8.2 Essais de qualification

Ces essais sont basés sur les procédures générales pour l'évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation décrits dans l'IEC 60034-18-1, selon lesquelles le système d'isolation destiné à être utilisé dans des conditions de fonctionnement avec convertisseur (système candidat) est comparé à un système d'isolation qui s'est révélé satisfaisant en service (système de référence).

Pour les systèmes d'isolation de Type II, la qualification des systèmes d'isolation principale et d'isolation entre spires est obtenue par des essais d'endurance sous tension à température ambiante ou à température élevée conformément à l'IEC 60034-18-32. Par souci de simplicité, les essais d'endurance sous tension de l'isolation entre spires et de l'isolation principale peuvent être effectués en utilisant une tension sinusoïdale. Cette simplification

permet de ne pas tenir compte du fait que l'apparition de décharges partielles (et donc de leur effet sur la vitesse de vieillissement) est influencée par le temps de montée des impulsions [6,7,8]. Dans la mesure du possible, il est recommandé d'effectuer les essais de durée de vie en utilisant une forme d'onde de tension de choc à la fréquence appropriée.

En utilisant différentes surtensions sinusoïdales ou fréquences, une courbe de durée de vie peut être établie. Il est à noter que les mécanismes de vieillissement interactifs entre l'isolation principale et l'isolation entre spires ne sont pas pris en compte dans le présent document. Sur la base des hypothèses suivantes, la durée de vie d'un système d'isolation dans des conditions d'impulsion peut être estimée à partir d'une courbe de durée de vie déduite à partir d'essais sous tension sinusoïdale.

- a) La vitesse de vieillissement due à des tensions de choc et des tensions sinusoïdales est la même, à condition que les valeurs crête à crête et le nombre de cycles de tension fondamentale soient les mêmes.
- b) Le coefficient d'endurance sous tension (n) ne dépend pas de la fréquence en dessous de 1 kHz [9].

La durée de vie de l'isolation principale est généralement dominée par l'amplitude crête à crête et la taux de répétition de la tension fondamentale. Pour les convertisseurs à 2 niveaux, l'isolation principale est principalement contrainte par $U'_{pk/pk}$ au taux de répétition de la tension de choc. Le bilan du vieillissement entre ces deux contributions peut être calculé en utilisant les expressions détaillées en Annexe A.

La qualification du système de maîtrise des contraintes est entreprise par un essai de vieillissement dans lequel une éprouvette représentative de l'enroulement isolé dans une encoche simulée est exposée séparément à des contraintes de tension de choc et de tension sinusoïdale semblables à celles prévues en service afin de déterminer si un dommage visible se produit, tel qu'une décoloration ou une combustion.

Un classement d'isolation contre les tensions de choc peut être obtenu après un fonctionnement qui s'est révélé satisfaisant avec une alimentation par convertisseur. La manière dont cela a été déduit est expliquée en Annexe E.

9 Qualification du système d'isolation principale

9.1 Généralités

L'accélération du processus de vieillissement conduisant à une défaillance électrique sera une caractéristique souhaitable de la méthode d'essai utilisée. Il convient de veiller à éviter l'introduction d'un mécanisme de défaillance qui ne serait pas présent en service, par exemple, ou en réalisant l'essai avec une tension supérieure à la tension de seuil de décharge partielle. Lorsqu'une accélération est produite par une augmentation de l'excursion en tension (crête à crête), la technique peut modifier le niveau des décharges partielles apparaissant dans chaque impulsion. Sinon, la fréquence de répétition de la tension d'essai peut être augmentée à un niveau supérieur à la fréquence fondamentale du système d'entraînement de puissance (PDS) en service. Ceci est destiné à maintenir le niveau des décharges partielles et à obtenir une accélération par une augmentation du taux de répétition. Dans cette approche, il peut y avoir une augmentation de l'échauffement de l'isolation due à des pertes dépendant de la fréquence dans le matériau et le revêtement de maîtrise des contraintes. La température peut être réduite par un refroidissement forcé par ventilation. Les mesures de la température de points chauds localisés sont nécessaires dans la région où les revêtements de maîtrise des contraintes sont utilisés pour assurer que le matériau d'isolation ne dépasse pas la température assignée pour sa classe thermique.

Un contrôle de la température peut être réalisé à l'aide de toute technique adaptée. Les peintures ou films thermosensibles sont simples d'utilisation mais pas très précis(e)s, tandis que les thermocouples peuvent présenter des difficultés au niveau du capteur électromagnétique et de l'isolation HT. Une technique de mesure non invasive, telle que la

thermographie infrarouge, permet d'identifier et de quantifier simplement les points chauds en surface. Les points chauds peuvent limiter les conditions de fonctionnement de la machine. Un contrôle du processus de vieillissement peut être effectué à des intervalles appropriés en mesurant les paramètres électriques, tels que les décharges partielles, le facteur de dissipation diélectrique et la permittivité. Ces essais peuvent être réalisés à 50 Hz ou à 60 Hz à des fins de diagnostic.

9.2 Méthodes d'essai

Le vieillissement accéléré sous tension doit être effectué conformément à l'IEC 60034-18-32. D'autres informations de base peuvent figurer dans d'autres documents [10]. La technique de qualification est fondée sur une comparaison des essais de durée de vie effectués sur le système candidat et sur un système de référence déjà évalué pour la durée de vie en service. Un modèle de durée de vie électrique couramment utilisé est le suivant:

$$L = kU^{-n} \quad (1)$$

où:

- n est le coefficient d'endurance sous tension;
- L est la durée de vie de l'éprouvette;
- U est la tension de crête périodique appliquée; et
- k est une constante.

La technique de qualification exige des essais à trois surtensions ou plus, afin de permettre le tracé d'un graphique log-log durée moyenne de fonctionnement avant défaillance / contrainte électrique normalisée sur l'isolation principale. Si des tensions à fréquence industrielle (50 Hz ou 60 Hz) sont utilisées, il convient que la durée moyenne de fonctionnement avant défaillance prévue soit d'environ 50 h à la tension la plus élevée et de plus de 5000 h à la tension la plus faible. Il convient de soumettre aux essais les systèmes candidat et de référence dans les mêmes conditions, ce qui peut impliquer toutes les formes d'ondes de tension prescrites. Il convient d'effectuer une analyse statistique conformément aux procédures données dans l'IEC 62539, afin d'établir la durée de vie moyenne dans chaque condition d'essai. Le coefficient d'endurance sous tension est la pente de la droite de régression. Il convient que la courbe de durée de vie du système d'isolation candidat soit au moins équivalente à celle d'un système de référence soumis aux essais à la fréquence fondamentale, qui s'est révélé donner une durée de vie en service jugée acceptable par le client. Les critères d'acceptation sont expliqués dans l'IEC 60034-18-32 et l'IEC 60034-18-1. Si les points de données ne coïncident pas avec une droite sur le système de coordonnées log/log, cela indique généralement que le mécanisme de vieillissement a changé dans la plage de contraintes d'essai. Il est possible de vérifier la linéarité de la courbe en utilisant l'essai de linéarité R2 (carré), en recommandant un critère de réussite supérieur à 95 %. Si la courbe ne satisfait pas à ce test, un point de vieillissement supplémentaire est recommandé.

Pour l'isolation principale et l'isolation entre spires, des publications montrent que le nombre de cycles de tension avant défaillance est quasiment indépendant de la fréquence de la tension appliquée [6,9,11]. Dans de nombreux cas, par conséquent, la formule suivante peut être utilisée pour calculer la durée de vie prévue pour une tension de crête donnée.

$$L_2 = L_1 f_1 / f_2 \quad (2)$$

où:

- L_2 est la durée de vie à la fréquence f_2 ;
- L_1 est la durée de vie à la fréquence f_1 .

La combinaison des formules pour le vieillissement dépendant de la fréquence et de la tension conduit à l'expression générale suivante:

$$L_{f_2, u_2} = L_{f_1, u_1} (U_1/U_2)^n (f_1/f_2) \quad (3)$$

où:

L_{f_2, u_2} est la durée de vie à la fréquence f_2 et à la tension U_2 , et

L_{f_1, u_1} est la durée de vie à la fréquence f_1 et à la tension U_1 .

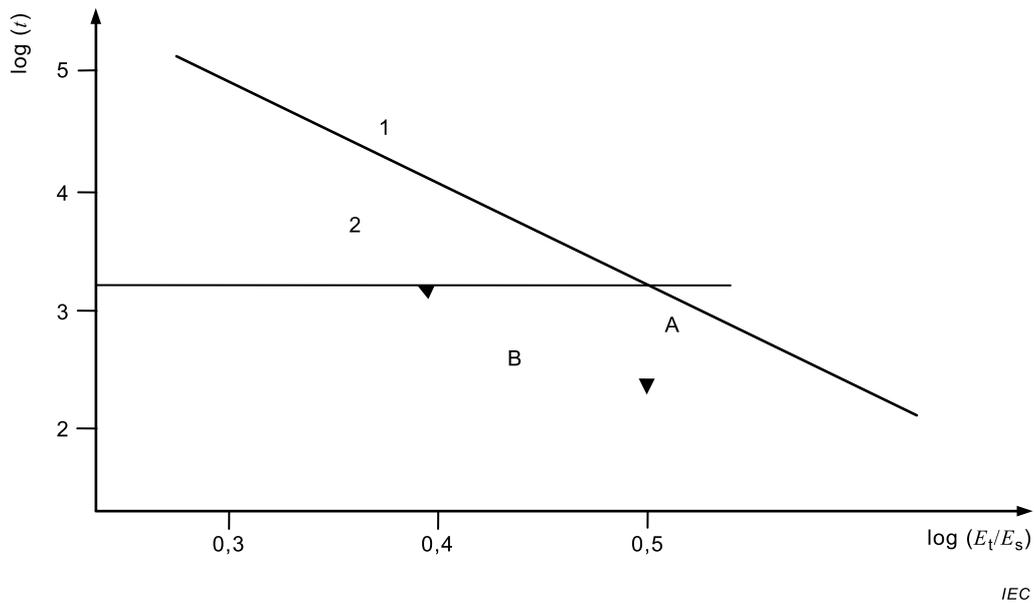
En utilisant la Formule (3), les essais à des fréquences et tensions différentes sont autorisés pour l'isolation principale. Une preuve expérimentale existe pour soutenir la validité de cette approche en calculant la durée de vie sous des tensions sinusoïdales et des tensions de choc au moins jusqu'à 1 kHz [9]. Pour le cas d'un convertisseur à niveaux multiples, le facteur prépondérant dans le vieillissement sous contrainte électrique est la tension crête à crête à la fréquence fondamentale ($U_{pk/pk}$). La fréquence a pour effet d'augmenter ou de réduire la durée de vie proportionnellement à la fréquence fondamentale. Pour un système d'isolation à base de mica, qui présente en général un coefficient d'endurance en tension élevé et qui est utilisé conjointement avec un entraînement par convertisseur à niveaux multiples, l'effet de la tension de choc (U_j) sur le vieillissement sous contrainte électrique de l'isolation principale est négligeable par rapport à $U_{pk/pk}$ [7].

9.3 Utilisation de données de durée de vie à 50 Hz ou 60 Hz pour prédire la durée de vie en service avec un entraînement par convertisseur

Une courbe de durée de vie typique pour un système d'isolation de Type II, déduite à partir d'un essai d'endurance sous tension à 50/60 Hz est représentée à la Figure 8. Un graphique log-log durée moyenne de fonctionnement avant défaillance / contrainte électrique normalisée sur l'isolation principale est tracé pour l'isolation principale sur une barre ou une bobine statorique. La courbe de durée de vie est habituellement une droite [8] et le constructeur doit savoir, sur la base de l'expérience acquise en service, qu'elle représente une conception qui garantit une durée de vie en service dans des conditions de fonctionnement jugée acceptable par le client. Pour les machines alimentées par convertisseurs, la contrainte électrique est calculée sur la base de la tension crête à crête apparaissant en service à travers l'isolation principale ($U_{pk/pk}$). Une seule classe d'isolation contre les tensions de choc peut être attribuée à une machine; il est exigé que l'application pour laquelle la qualification a été réalisée soit déclarée dans la documentation de la machine. Par exemple, il est possible que certaines applications nécessitent seulement une durée de vie limitée par rapport à une application industrielle.

La fréquence de la tension a pour effet d'augmenter ou de réduire la durée de vie, comme indiqué dans la Formule (2). S'il est prévu que le même système d'isolation puisse être soumis à une fréquence fondamentale qui est, par exemple, 10 fois supérieure à celle utilisée pour déduire la courbe, la courbe de durée de vie appropriée pour cette condition de fonctionnement est obtenue en déplaçant cette courbe vers le bas d'une décade dans le temps, tel que représenté par la flèche A à la Figure 8. Le constructeur peut ensuite compenser en réduisant la contrainte électrique sur l'isolation principale pour déplacer cette courbe vers le haut, et rétablir ainsi la durée de vie à sa valeur d'origine (flèche B). Autrement, si la fréquence de fonctionnement représente un dixième de celle utilisée pour déduire la courbe de durée de vie, la courbe sera déplacée vers le haut d'une décade dans le temps, et la contrainte peut être augmentée pour rétablir la durée de vie à sa valeur d'origine.

Le constructeur doit évaluer l'isolation et peut décider qu'aucune compensation n'est nécessaire. Dans ce cas, une justification technique à l'appui de cette décision doit figurer dans la documentation de la machine. Si une compensation pour une modification de la durée de vie est requise, la conception de l'isolation doit être modifiée. Si une modification de la durée de vie prévue est pertinente, le constructeur est autorisé à déplacer la courbe de durée de vie de référence représentée à la Figure 8. Par exemple, une réduction de la durée de vie prévue, par un facteur de 10, entraînerait un déplacement de la courbe vers le bas d'une décade dans une direction parallèle à l'axe du temps, tel que représenté par la flèche A.



Légende

E_t Contrainte électrique à la tension d’essai crête à crête

E_s Contrainte électrique à la tension de service crête à crête

t durée de fonctionnement avant défaillance, en heures

1 Courbe de durée de vie déduite des essais d’endurance à fréquence industrielle

2 Courbe de durée de vie prévue pour la même isolation à une fréquence dix fois supérieure

Figure 8 – Exemple de courbe de durée de vie pour un système d’isolation principale de Type II

Les critères de réussite de l’essai de qualification sont appliqués dès lors que les modifications à la courbe de durée de vie de référence ont été effectuées. Cette procédure doit être enregistrée dans la documentation.

10 Qualification de l’isolation entre spires

10.1 Généralités

L’isolation entre spires dans les bobines d’un enroulement de machine fonctionnant à partir d’une alimentation sinusoïdale est généralement déterminée pour répondre à la nécessité de résister à des tensions discrètes d’amplitude élevée et de courte durée. Les considérations régissant la conception de l’isolation entre spires sont distinctes de celles relatives à l’isolation principale. Les matériaux, les dimensions et les processus utilisés dans la construction de l’isolation entre spires peuvent être différents de ceux utilisés pour l’isolation principale.

Les caractéristiques principales de la tension appliquée en ce qui concerne le vieillissement de l’isolation entre spires sont le taux de répétition de la tension de choc, l’amplitude du saut de tension et le temps de montée de l’impulsion (qui détermine la distribution du saut de tension dans les enroulements). L’influence directe du temps de montée de l’impulsion sur le vieillissement de l’isolation entre spires n’est pas prise en compte dans le présent document. Lorsqu’elle est considérée comme une partie de la conception globale de la bobine pour l’enroulement, l’isolation entre spires fait également partie de l’isolation principale et contribue à la courbe de vieillissement décrite à l’Article 9.

Dans la majorité des applications de tension sinusoïdale, l’isolation entre spires ne sera pas soumise à des contraintes significatives en fonctionnement. Son rôle principal est de résister à des surtensions occasionnelles ou à des événements similaires. Cependant, à mesure que

Le temps de montée des impulsions diminue, les contraintes électriques associées au saut de tension commencent à se déplacer vers les régions entre les spires, en particulier au niveau de la courbure sur le bord de l'isolation entre spires. Ceci peut provoquer un vieillissement thermique et électrique de l'isolation entre spires en service. La contrainte entre les spires s'intensifie avec la diminution du temps de montée, augmentant ainsi la probabilité de décharges partielles entre les spires. L'effet de la tension prévue entre phase et terre sur l'isolation entre spires dépendra également du nombre de spires dans la bobine et du nombre de bobines dans la phase. Lors d'un fonctionnement sur le réseau, les impulsions de haute tension sont produites suite à des manœuvres de disjoncteurs. L'isolation entre spires ne sera pas soumise à un vieillissement électrique lors d'un fonctionnement sur le réseau, mais elle peut l'être lors d'un fonctionnement sur convertisseur, en raison du taux de répétition de tension de choc élevée. En général, l'expérience montre que l'intensification des contraintes est la plus élevée entre les deux premières ou les deux dernières spires dans la dernière bobine, mais il peut être possible, en raison de la réflexion de la forme d'onde, d'initier un vieillissement en d'autres emplacements à l'intérieur de l'enroulement.

10.2 Méthodes d'essai

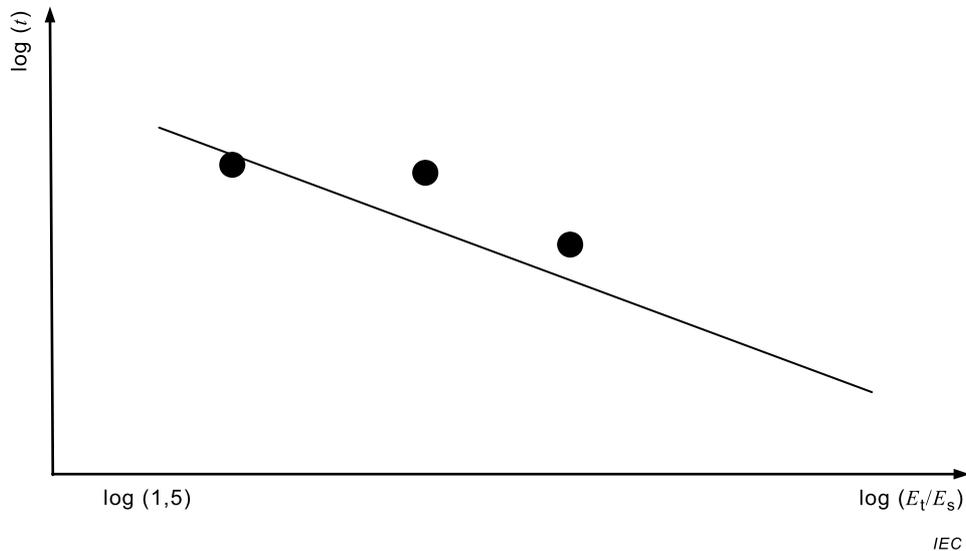
Le but des essais est de montrer que la durée de vie de l'isolation électrique entre spires garantit une durée de vie en service jugée acceptable par l'utilisateur. Il est prévu que le constructeur sache quelle tension crête à crête maximale apparaîtra entre les spires dans une application de service particulière. La contrainte d'isolation la plus défavorable (selon la conception des enroulements et des bobines) doit être choisie. Si la tension crête à crête maximale en service U_{turn} est inconnue, il faut supposer que le saut de tension complet peut survenir dans la première bobine, et donc U_{turn} est le saut de tension divisé par le nombre de spires (pour les bobines monocouches) ou calculé selon la disposition des spires (pour les bobines multicouches).

Un essai de décharges partielles est d'abord effectué conformément à l'IEC 60034-27 en utilisant une tension sinusoïdale ou à l'IEC TS 61934 en utilisant le temps de montée d'impulsion en service. La mesure est effectuée au niveau de chaque paire de conducteurs adjacents parallèles. La taille des bobines peut avoir une incidence sur le fait qu'une tension de choc d'essai donne une tension de seuil de décharge partielle répétitive (RPDIV) supérieure ou inférieure à la tension de seuil de décharge partielle avec une tension sinusoïdale. Si aucune décharge partielle n'est observée au-dessus du niveau de bruit dans l'isolation entre spires à $1,5 U_{\text{turn}}$, aucun essai supplémentaire n'est requis et on considère que l'isolation entre spires est qualifiée. Le contrôle, la valeur d'acceptation et la consignation du niveau de bruit de fond sont détaillés dans l'IEC TS 61934, l'IEC 60034-27 et l'IEC 60034-18-41.

Le facteur de sécurité de 1,5 provient de deux contributions. Premièrement, il est nécessaire de tenir compte de l'effet de température, de vieillissement thermique et de l'effet d'hystérésis entre les tensions de seuil et d'extinction qui, conformément à l'IEC 60034-18-41, correspondent à un facteur d'au moins 1,25. Deuxièmement, le vieillissement thermomécanique à long terme est pris en compte par un facteur de 1,2, donnant ainsi un facteur de sécurité combiné de 1,5. Le vieillissement thermomécanique modifie la tension de seuil de décharge partielle, même si la recherche indique qu'il n'y a pas de réduction de la durée de vie. Cependant, cet essai n'est pas concerné par l'effet du vieillissement sur la durée de vie mais la réalisation de l'essai de décharge partielle et l'effet sur la tension de seuil de décharge partielle. S'il y a des doutes sur le facteur de 1,2, il convient de le confirmer ou de l'infirmer en réalisant un essai conformément à l'IEC 60034-18-31.

La détection exige généralement que le niveau de décharge partielle soit supérieur au niveau de bruit; il est donc important que le bruit de fond soit suffisamment faible à la tension d'essai pour qu'une décharge partielle soit détectée. Une attention particulière est nécessaire lorsque des spires parallèles sortent de la bobine afin de s'assurer que la décharge de la couronne ne se produise pas ici. Si une décharge partielle est détectée en dessous de $1,5 U_{\text{turn}}$, un essai d'endurance sous tension doit être réalisé selon 13.3. Les critères relatifs à la tension de seuil de décharge partielle sont décrits dans les documents mentionnés ci-dessus. Un graphique peut alors être tracé, représentant le $\log(\text{durée moyenne de fonctionnement avant défaillance})$ de l'isolation entre spires en fonction du $\log(\text{contrainte électrique normalisée})$,

comme à la Figure 9. La valeur normalisée est la valeur d'essai divisée par la valeur estimée en service.



Légende

- E_t contrainte électrique à la tension d'essai crête à crête
- E_s contrainte électrique à la tension de service crête à crête
- t durée de fonctionnement avant défaillance
- Courbe de durée de vie pour l'isolation entre spires
- Tension de seuil de décharge partielle

Figure 9 – Exemple de courbe de durée de vie pour une isolation entre spires

Si la courbe de durée de vie n'a pas été obtenue au taux de répétition de la tension de choc, elle est corrigée en décalant la courbe comme décrit en 9.3. Par exemple, un essai de durée de vie à 50 Hz doit être corrigé pour un taux de répétition de tension de choc de 1 kHz en décalant la courbe de durée de vie vers le bas, parallèlement à l'axe du temps, par un facteur de 20. La courbe corrigée est ensuite comparée à la courbe de durée de vie de référence pour l'isolation entre spires précédemment obtenue par le constructeur. Il est probable que la courbe de durée de vie pour l'isolation entre spires dans des conditions de fonctionnement sur convertisseur présentera des durées de vie plus courtes car la contrainte en service sera considérablement plus grande que la tension maximale qui serait présente pour le fonctionnement à fréquence industrielle de la machine. Le constructeur doit compenser cela en réduisant les contraintes électriques sur l'isolation entre spires, afin de rétablir la durée de vie prévue à sa valeur d'origine, ou convenir d'une durée de vie réduite avec le client. En l'absence d'une courbe de durée de vie de référence, il convient que le constructeur se reporte au E.1.2.

11 Qualification du système de maîtrise des contraintes

11.1 Généralités

Si un revêtement de maîtrise des contraintes doit être appliqué aux têtes de bobines des enroulements, il est nécessaire de le qualifier. À cet effet, des tensions, des fréquences et des taux de répétition semblables à ceux apparaissant en service sont nécessaires. Les matériaux, s'ils sont basés sur des composants semiconducteurs, tels que le carbure de silicium, ont une résistivité non linéaire. Leur aptitude à contrôler le champ est influencée par la fréquence, les contraintes électriques, la température et le temps. Dans d'autres cas, la maîtrise des contraintes peut être réalisée par des moyens capacitifs. À des fins d'essais, la tension crête à crête, le taux de répétition et le temps de montée des impulsions sont choisis

par le constructeur pour s'assurer que les conditions prévues en service sont adaptées ou dépassées en sévérité.

L'effet de l'augmentation de la fréquence tend à réduire la distance sur laquelle la contrainte électrique de surface sur les têtes de bobines de l'enroulement est soumise à une répartition et entraîne ainsi des contraintes élevées. Lorsque les contraintes dépassent 600 V/mm [12], il peut se produire des phénomènes d'arcs électriques qui érodent la surface ou produisent un cheminement (chemins carbonisés conducteurs).

L'effet de l'augmentation des contraintes électriques tend à réduire la résistivité du revêtement de maîtrise des contraintes, remplissant ainsi son objectif principal. L'effet entraîne également une augmentation de la production de chaleur. Pour les machines alimentées par convertisseur, il y a un conflit entre le fait de fournir une résistivité assez faible pour échelonner la tension et une résistivité assez élevée pour maintenir la production de chaleur dans des limites acceptables. Un échauffement en surface dans la région des têtes de bobines des enroulements peut atteindre une valeur aussi faible que 10 K ou aussi élevée que 40 K pour une machine alimentée par convertisseur dans laquelle il n'y a aucun refroidissement forcé. L'influence prédominante sur la température de l'isolation est supposée être l'échauffement provenant des pertes dans le cuivre, mais l'auto-échauffement du revêtement de maîtrise des contraintes peut y contribuer de façon significative. Il est nécessaire de prendre en compte ce facteur lors de l'évaluation de la température limite à laquelle la machine peut fonctionner, dans la mesure où il réduit effectivement la température assignée de la machine.

Dans le cas des revêtements de maîtrise des contraintes non linéaires, il y a deux effets principaux de la température [13]. Le premier est une augmentation immédiate de la conductivité du matériau à une contrainte de tension particulière. Le second effet principal est de signification similaire et consiste en la réduction de la pente de la courbe de conductivité/contrainte électrique dont dépendent les performances effectives du revêtement de maîtrise des contraintes à base de carbure de silicium. Dans certains cas, la non-linéarité de la conductivité peut être perdue globalement.

Le deuxième effet peut être une réduction permanente de la conductivité provenant de cette excursion en température. Après un seul séjour à 155 °C d'une durée de quelques heures, un retour à 20 °C peut montrer une réduction significative de la conductivité. Après une période plus longue à 155 °C, telle que 500 h, la performance du revêtement de maîtrise des contraintes peut être partiellement rétablie. Ceci est attribué au post-traitement thermique de la résine dans le revêtement de maîtrise des contraintes, qui se rétracte et lie plus étroitement entre elles les particules de carbure de silicium.

La revêtement conducteur dans l'encoche est utilisé pour empêcher des décharges dans les encoches, et peut être basé sur des rubans ou des peintures chargé(e)s au carbone. Au début de la région des têtes de bobines des enroulements, il peut y avoir des problèmes de contact électrique du revêtement de maîtrise des contraintes. Lorsqu'un bon contact électrique est exigé dans la conception, une résistance de contact élevée peut entraîner une surchauffe et des décharges, ce qui peut dégrader les matériaux et réduire les performances du système de maîtrise des contraintes sur les têtes de bobines des enroulements. Lorsqu'un couplage capacitif est utilisé, aucune connexion directe n'est exigée entre le revêtement conducteur dans l'encoche et le revêtement de maîtrise des contraintes.

La conception du système de maîtrise des contraintes est un élément crucial pour satisfaire aux critères de réussite de l'essai de qualification en 13.4 et 14.3. Les facteurs influençant la conception sont le choix des matériaux et la technique d'application.

11.2 Méthodes d'essai

L'objectif des essais de qualification du système de maîtrise des contraintes est de s'assurer qu'il fonctionnera de façon satisfaisante pendant la durée de vie en service exigée. Une performance satisfaisante en service est une performance dans laquelle les arcs en surface

sont évités et où l'échauffement sur la surface des têtes de bobines des enroulements n'augmente pas la limite de température assignée de l'isolation principale.

Les trois influences majeures sur la durée de vie du système de maîtrise des contraintes sont l'amplitude de la tension appliquée, sa fréquence et la température. Idéalement, un essai est exigé dans lequel les éprouvettes de barres ou de bobines, préparées conformément à une norme de production, sont disposées dans des encoches simulées et soumises à une tension de convertisseur qui représente au moins 1,3 fois l'amplitude de la tension à supporter en service. Dans la pratique, il est probable qu'un convertisseur adapté ne soit pas disponible et qu'il soit nécessaire de prévoir un essai d'endurance alternatif au cours duquel des impulsions de tension et une tension à fréquence industrielle soient appliquées séparément. Les éprouvettes et les encoches peuvent être plus courtes que dans la machine en service, afin de réduire la charge capacitive sur le générateur d'impulsion. Cependant, il convient qu'elles reproduisent des caractéristiques importantes de conception.

Le coût des appareils de laboratoire pour fournir les impulsions HT exigées peut être significatif. Une solution est l'utilisation de deux simples circuits d'essai qui, d'après l'expérience, peuvent révéler rapidement des déficiences dans un système de maîtrise des contraintes. Ils évitent l'utilisation d'un entraînement par convertisseur du commerce, et sont basés sur un circuit de répétition des impulsions utilisant un interrupteur à semiconducteur. Les deux exemples de circuits et de formes d'onde associées typiques sont présentés à l'Annexe B.

12 Préparation des éprouvettes

12.1 Généralités

Les éprouvettes dans le présent article sont destinées à la qualification de la performance des composants d'isolation décrits dans le Tableau 2. Les éprouvettes doivent être réalisées conformément à la spécification de fabrication complète pour une machine de production;

12.2 Éprouvettes pour essais d'isolation principale

Pour qualifier l'isolation principale à utiliser dans le stator, des essais sont réalisés sur des bobines ou des barres construites conformément aux normes de production et installées dans des encoches représentatives.

12.3 Éprouvettes pour essais d'isolation entre spires

Les éprouvettes pour essais d'isolation entre spires doivent reproduire le système d'isolation utilisé dans la machine en termes de matériaux et de processus de fabrication, chaque éprouvette contenant une ou plusieurs paires de conducteurs parallèles. Les éprouvettes doivent être des bobines ou des barres (pour enroulements préformés) ou des motorettes/enroulements complets (pour enroulements non rangés) réalisées conformément aux normes de production. La décharge partielle entre les spires parallèles à la sortie de la bobine ou de la barre peut être réduite ou évitée par l'insertion de feutre entre les spires où elles se séparent, pour absorber le matériau imprégnant.

12.4 Éprouvettes pour essais de système de maîtrise des contraintes

Pour qualifier le système de maîtrise des contraintes à utiliser, des essais sont réalisés sur des bobines ou des barres construites conformément aux normes de production et installées dans des encoches représentatives. Les encoches doivent être équipées de dispositifs de chauffage pour chauffer la partie rectiligne à la température de service. En variante, la chaleur peut être produite par un courant circulant dans les conducteurs. Afin de réduire la charge capacitive pour l'alimentation d'essai, les éprouvettes et les encoches peuvent avoir une longueur réduite, mais les éprouvettes doivent être fabriquées de façon identique aux bobines ou barres utilisées en service.

13 Procédures d'essais de qualification

13.1 Généralités

Il n'est pas possible en pratique de concevoir une seule méthode d'essai qui simule toutes les interactions entre les divers composants d'isolation présentés dans le Tableau 2. Par exemple, pour obtenir une courbe de durée de vie pour le système d'isolation principale en appliquant des surtensions, le revêtement de maîtrise des contraintes serait soumis à des contraintes excessives. La qualification a par conséquent été scindée en procédures d'essai distinctes. Dans tous les cas, les alimentations doivent être choisies pour fournir la tension, le taux de répétition et le temps de montée requis aux bornes des éprouvettes.

Le premier objectif est d'établir les courbes de durée de vie de l'isolation principale et de l'isolation entre spires, à partir desquelles les durées de vie prévues peuvent être calculées lorsque la machine est alimentée par un convertisseur en service. Il est reconnu que les décharges partielles peuvent se produire entre l'isolation entre spires et l'isolation principale. Étant donné que l'isolation entre phase et terre comprend l'isolation entre spires, la procédure de qualification inclut cet effet interactif. Le vieillissement est réalisé par l'application de contraintes électriques à une tension ou une fréquence élevée, ou les deux. La forme d'onde de tension utilisée pour le vieillissement peut être sinusoïdale ou impulsive dans le cas d'éprouvettes pour l'isolation entre spires ou pour l'isolation principale. Le point final doit être le claquage électrique de l'isolation. Il est nécessaire que le nombre d'éprouvettes soit suffisant pour obtenir un résultat d'essai statistiquement valide. Le second objectif est d'établir que le système de maîtrise des contraintes est adapté au fonctionnement. Les essais sont effectués en utilisant séparément des tensions de choc et des tensions sinusoïdales.

13.2 Isolation principale

Le but de l'essai est de qualifier l'isolation principale du système d'isolation candidat. Cela est effectué en établissant la courbe de durée de vie pour l'isolation principale en utilisant une tension élevée. L'essai est réalisé conformément à l'IEC 60034-18-32, où le paramètre à utiliser sur l'axe horizontal est le log de la contrainte électrique à la tension d'essai crête à crête divisée par la contrainte électrique à la tension de service crête à crête, tel que représenté à la Figure 8. La valeur de U_s à utiliser sur l'axe horizontal à la Figure 8 est déduit à partir de la tension assignée pour la machine multipliée par le facteur d'augmentation figurant dans la colonne 1 du Tableau D.2, pour laquelle la qualification est requise. La contrainte électrique à la tension de service, E_s , est obtenue en divisant U_s par l'épaisseur de la paroi. Dans le cas d'une isolation principale d'une machine devant être alimentée par un entraînement par convertisseur à 2 niveaux, il est probable qu'il n'y ait que peu ou pas de différences entre les valeurs crête à crête de U et U' . Dans ce cas, U' et le taux de répétition de la tension de choc sont utilisés, en lieu et place de U dans le Tableau D.2, colonne 1.

Trois tensions au moins doivent être choisies et le point final est le claquage électrique de l'isolation. Au moins cinq barres ou bobines distinctes doivent être soumises à essai à chaque tension. Le courbe de durée de vie du système d'isolation candidat est comparée à la courbe de durée de vie de référence, c'est-à-dire une courbe qui a été déduite à partir d'un système d'isolation qui s'est révélé donner une durée de vie en service acceptable à la fréquence fondamentale (IEC 60034-18-1). La courbe de durée de vie de référence peut avoir été obtenue à partir d'une durée de vie en service satisfaisante dans des conditions d'entraînement par convertisseur.

Il est reconnu que, lorsqu'un système de maîtrise des contraintes est utilisé sur l'isolation des têtes de bobines des enroulements, il peut être soumis à une sévérité inacceptable au cours des essais de durée de vie des systèmes de bobines complets à des tensions élevées. Pour cette raison, les bobines peuvent être soumises aux essais avec toute mesure de limitation des contraintes, comme par exemple des cônes défecteurs ou des couches d'isolation supplémentaires, afin de garantir que la défaillance ne peut se produire que dans l'isolation principale. Le système de maîtrise des contraintes peut être réparé au cours de la période d'essai.

13.3 Isolation entre spires

Un essai de décharge partielle est d'abord réalisé sur au moins cinq éprouvettes avec une tension sinusoïdale, conformément à l'IEC 60034-27. En variante, l'essai peut être effectué conformément à l'IEC TS 61934 en utilisant un temps de montée de tension de choc aussi court que la valeur attendue en service, et en général tel que décrit en 9.2 de l'IEC 60034-18-41:2014. L'équipement d'essai doit être capable de détecter des décharges partielles en dessous de la valeur d'essai. Pour cela, il est possible d'utiliser un équipement d'essai où le bruit de fond est fortement atténué par l'utilisation d'un dispositif de traitement de signal capable de séparer le bruit de la décharge partielle. Si l'isolation entre spires est exempte de décharges partielles à une fréquence crête à crête de $1,5 U_{turn}$ sur toutes les éprouvettes, aucun essai supplémentaire n'est requis et on considère que l'isolation entre spires est qualifiée. Si une décharge partielle est détectée en dessous de cette valeur, un essai d'endurance sous tension doit être réalisé à température ambiante. Cet essai doit consister à appliquer une tension sinusoïdale entre chaque paire de conducteurs parallèles dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'un claquage électrique ait lieu. Le nombre de tensions d'essai doit être au moins de trois et les tensions d'essai crête à crête préférentielles sont $4,5 U_{turn}$, $4,0 U_{turn}$ et $3,5 U_{turn}$. Cinq éprouvettes doivent être soumises aux essais à chaque tension. La durée de fonctionnement avant défaillance peut être calculée à l'aide de toute méthode statistique couramment utilisée (voir l'IEC 62539) impliquant les distributions statistiques de Weibull. Un graphique doit ensuite être tracé, représentant la durée de fonctionnement avant défaillance de l'isolation entre spires en fonction de la contrainte électrique normalisée, comme représenté à la Figure 9. Si la fréquence du secteur est utilisée pour l'essai d'endurance, la durée de vie sera plus courte avec un convertisseur car l'isolation entre spires subit un vieillissement dû au taux de répétition de la tension de choc. La courbe de durée de vie candidate doit être corrigée pour le taux de répétition de la tension de choc consigné dans la documentation (colonne 4 du Tableau D.2) par rapport à la fréquence du secteur utilisée lors de l'essai de vieillissement. La correction doit être appliquée conformément à la Formule 2 avant la comparaison avec la courbe de durée de vie de référence. La valeur normalisée est la valeur d'essai divisée par la valeur estimée en service (c'est-à-dire U_{turn}).

13.4 Système de maîtrise des contraintes

Lorsqu'un revêtement de maîtrise des contraintes doit être utilisé dans la région des têtes de bobines des enroulements, les éprouvettes doivent être réalisées conformément aux exigences de 12.4 et chaque éprouvette doit être montée dans une encoche simulée ou représentative mise à la terre. Les éprouvettes sont ensuite soumises à un régime d'essai séquentiel en trois parties à la température prévue en service. La première partie de l'essai est un essai d'endurance sous une tension de choc pendant 100 h, réalisé en utilisant une tension crête à crête égale au saut de tension maximal observé en service multiplié par un facteur de sécurité de 1,3. Le temps de montée des impulsions doit être au moins aussi court et le taux de répétition au moins aussi élevé que les valeurs prévues en service. Si les paramètres de la tension de choc en service ne sont pas connus, il est nécessaire d'utiliser des valeurs par défaut de 1 kHz à 1,5 kHz pour le taux de répétition et de 0,5 μ s à 1 μ s pour le temps de montée. La deuxième partie de l'essai est un essai d'endurance de 1000 h réalisé en utilisant une tension sinusoïdale à la fréquence fondamentale prévue en service. Le niveau de tension doit être la tension maximale crête à crête entre phase et terre observée en service multipliée par un facteur de sécurité de 1,3. La tension en valeur efficace équivalente est calculée en divisant par $2\sqrt{2}$. La troisième partie de l'essai consiste à répéter la première partie. Trois éprouvettes au moins doivent être soumises aux essais.

14 Critères de réussite des essais de qualification

14.1 Isolation principale

La comparaison entre la courbe de durée de vie candidate et la courbe de durée de vie de référence doit être effectuée à la même fréquence. Toute correction pour une fréquence différente utilisée lors des essais doit être effectuée selon 9.3 avant de procéder à la comparaison. L'isolation principale est qualifiée conformément à l'IEC 60034-18-32 si

- a) la limite supérieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie du système candidat dépasse la limite supérieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie de l'isolation principale de référence pour les mêmes tensions d'essai; ou
- b) la limite inférieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie du système candidat est supérieure ou égale à la limite inférieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie de l'isolation principale de référence à la plus faible tension d'essai et la pente de la droite de régression est plus prononcée que celle de la courbe de durée de vie de l'isolation principale de référence (c'est-à-dire que la valeur de n pour le système candidat est supérieure à celle pour le système de référence).

14.2 Isolation entre spires

Si l'application de $1,5 U_{\text{turn}}$ entre les conducteurs n'entraîne pas de décharges partielles dans les cinq éprouvettes soumises aux essais, on considère que l'isolation est qualifiée. Si des décharges partielles sont observées à la tension d'essai dans une ou plusieurs éprouvettes, la qualification de l'isolation est évaluée en comparant la courbe de durée de vie avec celle obtenue pour le système d'isolation entre spires de référence, tel que défini dans l'IEC 60034-18-32. La comparaison est effectuée sous les contraintes normalisées en service avec toute correction de fréquence effectuée au préalable afin que la comparaison soit effectuée à la même fréquence. L'isolation entre spires est qualifiée si

- a) la limite supérieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie de l'isolation entre spires dépasse la limite supérieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie de l'isolation entre spires de référence sur toute la plage de tensions d'essai d'isolation entre spires; ou
- b) la limite inférieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie de l'isolation entre spires candidate à la plus faible tension d'essai est supérieure ou égale à la limite inférieure de l'intervalle de confiance de 90 % de la courbe de durée de vie de référence et la pente de la droite de régression des valeurs moyennes de la courbe de durée de vie de l'isolation entre spires est plus prononcée que celle de la courbe de durée de vie de l'isolation entre spires de référence (c'est-à-dire que la valeur de n pour l'isolation entre spires est supérieure à celle pour le système d'isolation de référence).

14.3 Système de maîtrise des contraintes

Aucune décharge partielle ne doit être visible à l'œil nu (c'est-à-dire sans l'aide d'un microscope ou d'une loupe) dans une chambre noire ou avec un détecteur UV au cours de l'étape finale des essais avec des tensions de choc. Aucune détérioration notable du revêtement de maîtrise des contraintes ou des revêtements conducteurs dans l'encoche ne doit être visible à l'œil nu sur la surface extérieure des têtes de bobines des enroulements à l'issue de l'étape finale des essais.

15 Essai de routine

Un essai de résistance à la tension obligatoire est exigé conformément à l'IEC 60034-1. Cet essai de résistance peut être réalisé à un niveau de tension élevée pour les machines alimentées par convertisseur, conformément à la classe d'isolation contre les tensions de choc spécifiée, tel que décrit à l'Article D.1. Les résultats de tout essai de routine qui est réalisé doivent être consignés dans la documentation de la machine.

16 Essais de dépistage facultatifs

Les essais de dépistage facultatifs sont décrits en Annexe F. Les résultats de tout essai de dépistage qui est réalisé doivent être consignés dans la documentation de la machine.

17 Analyse, compte-rendu et classement

L'approche donnée en 6.2 de l'IEC 60034-18-1:2010 pour l'analyse, le compte-rendu et le classement doit être adoptée afin que toutes les données nécessaires soient analysées correctement et rapportées d'une manière permettant la traçabilité.

Annexe A (informative)

Contributions au vieillissement de l'isolation principale

A.1 Réduction de la durée de vie de l'isolation principale

Dans des conditions de fonctionnement sur convertisseur, le système d'isolation est contraint par une tension complexe (Figure 2) composée de la tension de choc crête à crête ($U'_{pk/pk}$) au taux de répétition des impulsions et de la tension crête à crête ($U_{pk/pk}$) à la fréquence fondamentale. Pour un convertisseur à niveaux multiples, la réduction de la durée de vie d'une isolation principale de Type II avec un coefficient d'endurance sous tension relativement élevé, par exemple 10, est principalement définie par la fréquence fondamentale et sa tension crête à crête associée. Cela est dû au fait que, dans cet exemple, l'influence de la tension sur la réduction de la durée de vie est 10 fois supérieure à l'influence de la fréquence.

Le partage de la réduction de la durée de vie entre la fréquence fondamentale et les taux de répétition des impulsions avec leurs tensions crête à crête associées peut être calculé sur la base des hypothèses selon lesquelles l'expression générale de la durée de vie en 9.2 s'applique et la valeur de « n » ne varie pas avec la tension ou la fréquence dans la plage considérée. La contribution de ces tensions et fréquences à la réduction de la durée de vie dépend fortement de l'exposant de la durée de vie en endurance sous tension de l'isolation [7] selon la Formule (3). Bien que cela n'ait pas été montré scientifiquement, il est admis que l'effet de superposition pour le vieillissement est valide. Cela signifie que l'application séquentielle de tensions de choc et de tensions fondamentales est équivalente à leur application simultanée.

A.2 Calcul des contributions au vieillissement pour un convertisseur à 3 niveaux

Le présent article fournit des exemples de contributions au vieillissement accéléré de l'isolation principale du stator dans les machines alimentées par un convertisseur à 3 niveaux. Ces exemples présentent uniquement les effets du vieillissement électrique et ne prennent pas en compte le vieillissement thermique. Les caractéristiques du convertisseur choisi pour cet exemple sont un système à 3 niveaux avec un taux de répétition des impulsions de 1 kHz, qui est une valeur généralement trouvée. La contribution au vieillissement à partir des impulsions du convertisseur est donnée comme un pourcentage du vieillissement total pour différentes valeurs du facteur de surtension U_b/U_a .

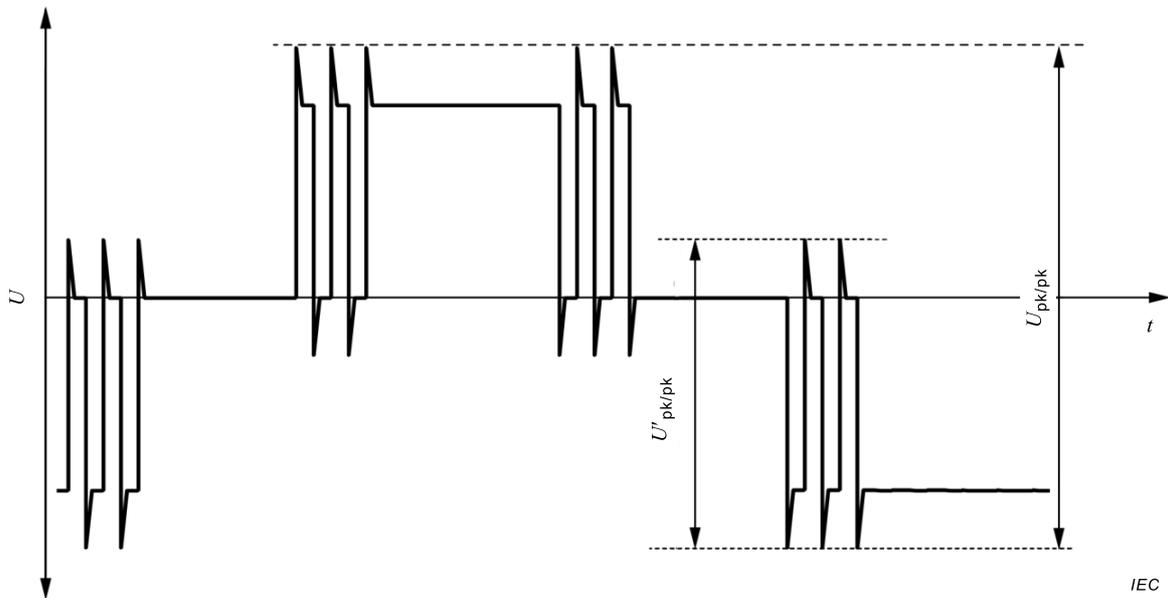


Figure A.1 – Représentation de la tension phase-terre aux bornes d’une machine alimentée par un convertisseur à 3 niveaux

Le calcul utilisé pour chaque contribution au vieillissement est fondé sur les formules données en 9.2. La contribution de chaque impulsion à la vitesse de vieillissement est proportionnelle à $1/L$ et donc, à titre d'exemple, pour une impulsion fondamentale à 50 Hz et une tension fondamentale crête à crête de $U_{pk/pk}$, la contribution au vieillissement sur une période de 20 ms est donnée par:

Vitesse de vieillissement (50 Hz) = $(U_{pk/pk})^n/k$, où k est une constante.

Pour un convertisseur à 3 niveaux sans surtension, la contribution au vieillissement à partir d'impulsions de 1 kHz pendant 20 ms est donnée par:

$$\text{Vitesse de vieillissement (1 kHz)} = \frac{(U'_{pk/pk})^n \times 20}{k} \quad (\text{voir Figure A.1})$$

Conformément à la théorie sur la vitesse de vieillissement cumulée et en l'absence de synergie, la vitesse de vieillissement totale est par conséquent la somme de ces deux contributions.

Le Tableau A.1 a été élaboré en substituant les valeurs appropriées dans les deux formules ci-dessus. À titre d'exemple, un facteur de surtension de 20 % (U_b/U_a) tel que présenté en Figure 1 donnerait:

$$U'_{pk/pk} = 1,4 U_a \text{ and } U_{pk/pk} = 2,4 U_a$$

et la contribution au vieillissement exprimée en pourcentage à partir des impulsions du convertisseur pour $n = 10$ est donnée par:

$$\frac{(1,4)^{10} \times 20 \times 100}{(2,4)^{10}}$$

Tableau A.1 – Contribution au vieillissement électrique par des impulsions de 1 kHz à partir d'un convertisseur à 3 niveaux, exprimée en pourcentage du vieillissement résultant de la tension fondamentale à 50 Hz (coefficient d'endurance de 10)

Facteur de surtension (U_b/U_a)	Taux de répétition des impulsions	Pourcentage de vieillissement résultant de la tension de choc et de la tension fondamentale
%	kHz	%
0	1	2
10	1	4
20	1	9
50	1	35

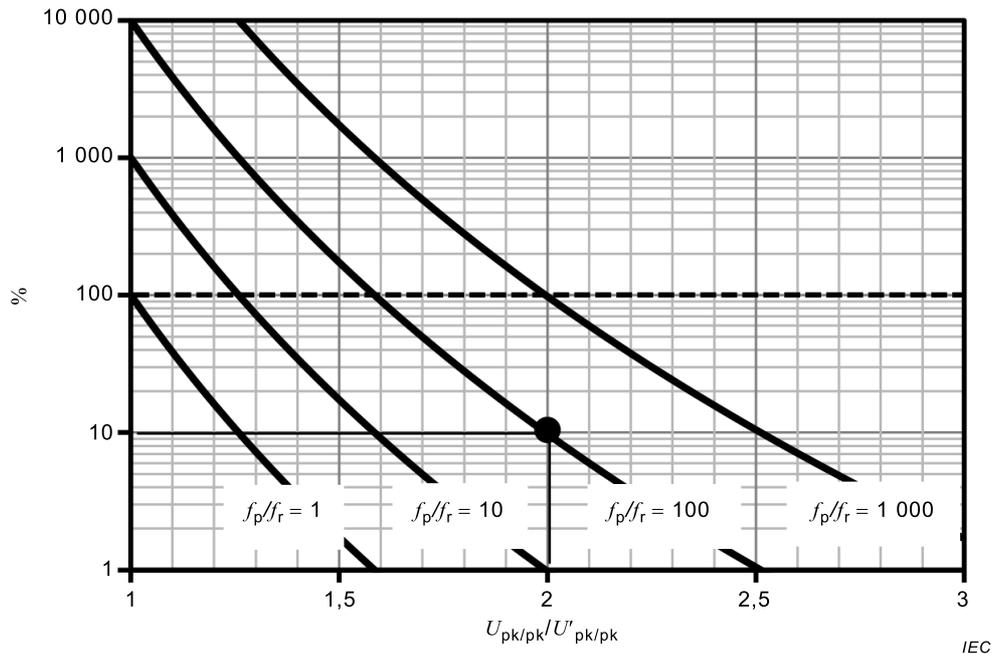
A.3 Calcul pour déduire une amplitude et une fréquence de tension équivalentes

Une autre approche combine le vieillissement électrique accéléré résultant des tensions fondamentale et de choc. On obtient une tension crête à crête U_{eq} et une fréquence f_{eq} équivalentes, ayant pour résultat la même réduction de la durée de vie que celle due à deux tensions crête à crête U_1 et U_2 et à leurs fréquences respectives f_1 et f_2 :

$$U_{eq}^n \times f_{eq} = U_1^n \times f_1 + U_2^n \times f_2 \quad (\text{A.1})$$

où f_1 représente la fréquence fondamentale et f_2 le taux moyen de répétition des impulsions. Il est probable que la valeur choisie pour f_{eq} soit 50 Hz ou 60 Hz, mais il convient qu'elle soit appropriée pour l'application.

Pour cette formule, le résultat calculé pour la réduction de la durée de vie par la tension de choc et la tension à la fréquence fondamentale est représenté à la Figure A.2. La représentation graphique montre que, pour un coefficient d'endurance sous tension de 10, un rapport de 2 entre la tension fondamentale et la tension de choc et un rapport de 100 entre la fréquence de la tension de choc et la fréquence de la tension fondamentale, la partie fondamentale de la tension réduira 90 % de la durée de vie, alors que la contribution du taux de répétition des impulsions à la réduction de la durée de vie est de seulement 10 %.



Légende

f_p/f_r rapport entre taux de répétition de la tension de choc et taux de répétition de la tension fondamentale

Figure A.2 – Rapport de la durée de vie en pourcentage (axe y) entre la tension de choc ($U_{pk/pk}$) et la tension fondamentale ($U'_{pk/pk}$) exprimé en pourcentage, pour divers rapports de fréquence d'impulsion/fréquence fondamentale ($n=10$)

Pour cette raison, la procédure de qualification d'une isolation principale de Type II utilise généralement la tension fondamentale crête à crête ($U_{pk/pk}$) et le taux de répétition fondamental prévu en service (ou tel que défini par la classe d'isolation contre les tensions de choc) et ne tient pas compte de la contribution, à la réduction de la durée de vie, du taux de répétition des impulsions et de sa tension crête à crête associée ($U'_{pk/pk}$).

Si le rapport des fréquences devient plus élevé et si le rapport des tensions ou le coefficient d'endurance sous tension devient plus faible que dans l'exemple ci-dessus, les tensions de choc peuvent contribuer de manière considérable à la réduction de la durée de vie. Dans ce cas, une tension et une fréquence équivalentes peuvent être calculées; leur contribution à la réduction de la durée de vie sera identique à celle de la tension plus complexe avec deux fréquences. Pour les convertisseurs à 2 niveaux, il est probable qu'il n'y ait que peu ou pas de différences entre les valeurs crête à crête de U et U' . Dans ce cas, U' doit être utilisé, en lieu et place de U dans le Tableau D.2, colonne 1 et la procédure de qualification pour une isolation principale de Type II utilisera dans ce cas la tension de choc crête à crête au taux de répétition des impulsions.

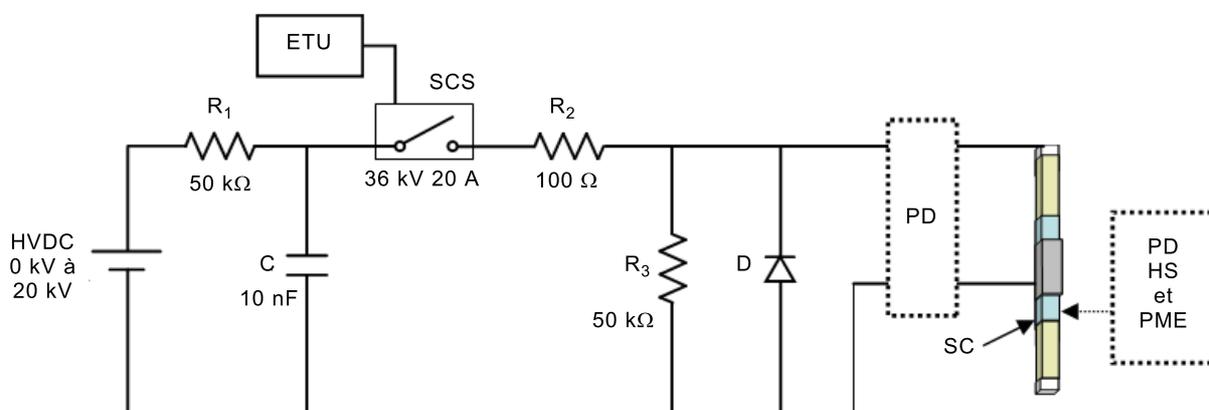
Annexe B (informative)

Exemples de circuits pour l'essai d'impulsions

B.1 Circuit d'essai d'impulsions utilisant un interrupteur à semiconducteur

Un schéma de circuit est représenté à la Figure B.1 pour un appareil d'essai de laboratoire pour produire des impulsions semblables en amplitude, en taux de répétition et en temps de montée à celles utilisées dans les ensembles convertisseurs/machines commerciaux. Cet appareil s'est avéré adéquat pour soumettre les éprouvettes de bobines ou de barres décrites en 12.4 à des essais d'isolation entre spires et du système de maîtrise des contraintes. La tension de choc crête à crête est contrôlée par la tension de sortie de l'alimentation à haute tension continue (HVDC). Dans cet exemple, une tension de sortie maximale de 20 kV est disponible. Le taux de répétition de la tension de choc est ajusté par l'unité de déclenchement électronique (ETU) qui commande l'interrupteur à semi-conducteur (SCS), à une tension assignée de 36 kV et un courant assigné de 20 A. Une diode de puissance peut être utilisée si des tensions de choc répétitives unipolaires parfaites sont requises. La tension crête à crête, le taux de répétition maximal et le temps de montée de la tension de choc peuvent être ajustés par les paramètres R_1 , R_2 et C du circuit. Le temps de descente de l'impulsion peut être ajusté par R_3 .

Un détecteur de décharges partielles peut être inséré dans le circuit pour mesurer la tension de seuil de décharge partielle répétitive (RPDIV) avec les paramètres de la tension de choc requise. Des systèmes de mesure de la température des points chauds et des potentiels de surface [14] peuvent être également installés, en fonction des exigences des essais.



IEC

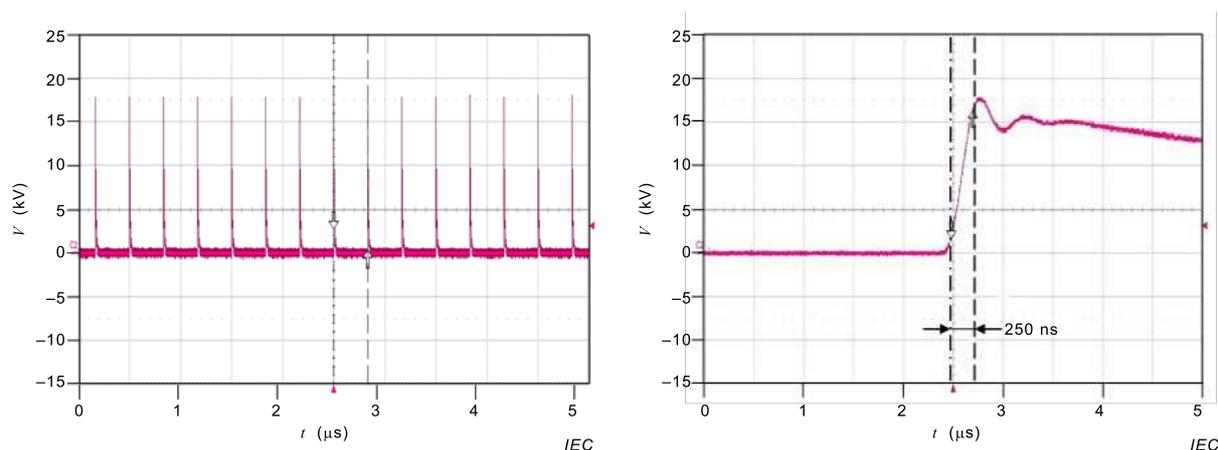
Légende

C	Condensateur
D	Diode de puissance
R	Résistance
HS	Détecteur de points chauds
PD	Dispositif de mesure de décharges partielles
PME	Dispositif de mesure de potentiels de surface
SC	Région de maîtrise des contraintes
SCS	Interrupteur à semi-conducteur
ETU	Unité de déclenchement électrique

Figure B.1 – Exemple de circuit de simulation de tension par convertisseur simple

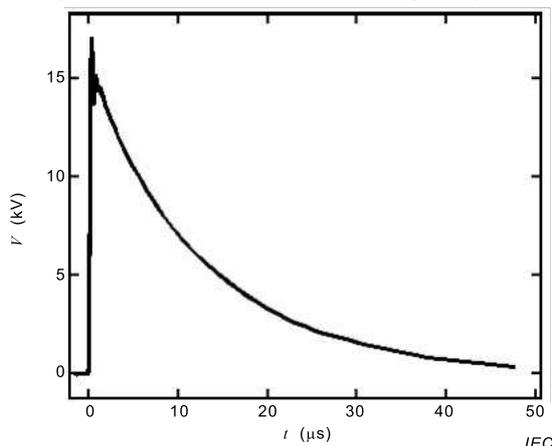
B.2 Forme d'onde typique produite par le générateur d'impulsions

La Figure B.2a) montre un exemple de trains d'impulsions de tension générées par le circuit de simulation de tension par convertisseur simple représenté à la Figure B.1. La tension de choc crête à crête et le taux de répétition de la tension de choc sont respectivement de 17 kV et de 1,5 kHz. Le temps de montée et le temps de descente de l'impulsion sont respectivement de 250 ns et d'environ 50 μ s. Les Figures B.2b) et c) les représentent de manière plus détaillée.



a) Tension et taux de répétition

b) Temps de montée d'une impulsion



c) Temps de descente d'une impulsion

Légende

V tension

t temps

Figure B.2 – Forme d'onde typique produite par le générateur d'impulsions

B.3 Variante de circuit d'essai d'impulsions utilisant un interrupteur à semiconducteur

Une variante de schéma de circuit est représentée à la Figure B.3 pour un appareil d'essai de laboratoire pour produire des impulsions semblables en amplitude, taux de répétition et temps de montée à celles utilisées actuellement dans les ensembles convertisseurs/machines commerciaux. Cet appareil s'est avéré adéquat pour les essais d'isolation entre spires et du système de maîtrise des contraintes.

Dans ce circuit, la barre échantillon est C_s et a généralement une valeur de 2 nF. Si sa capacité est supérieure, il convient d'ajouter une capacité parallèle supplémentaire pour

atteindre cette valeur. Il convient que l'interrupteur à semiconducteur soit réglé de manière à donner une tension de claquage appropriée afin de générer un train d'impulsions avec un taux moyens de répétition de 1,5 kHz. La forme d'onde d'impulsion est en général une baisse de tension jusqu'au claquage, après quoi la tension augmente en 1,5 μ s avec une valeur crête à crête déterminée par l'interrupteur à semiconducteur. Le dV/dt maximal dans le front d'onde peut être de 15 $kV/\mu s$. Le taux de répétition, le temps de montée et la tension crête à crête peuvent être modifiés par les paramètres du circuit. La Figure B.4 représente la tension de sortie lorsqu'un éclateur était utilisé à la place d'un interrupteur à semiconducteur. L'avantage lié à l'utilisation d'un éclateur est atténué par l'entretien important qu'il nécessite en raison d'une usure lors du fonctionnement.

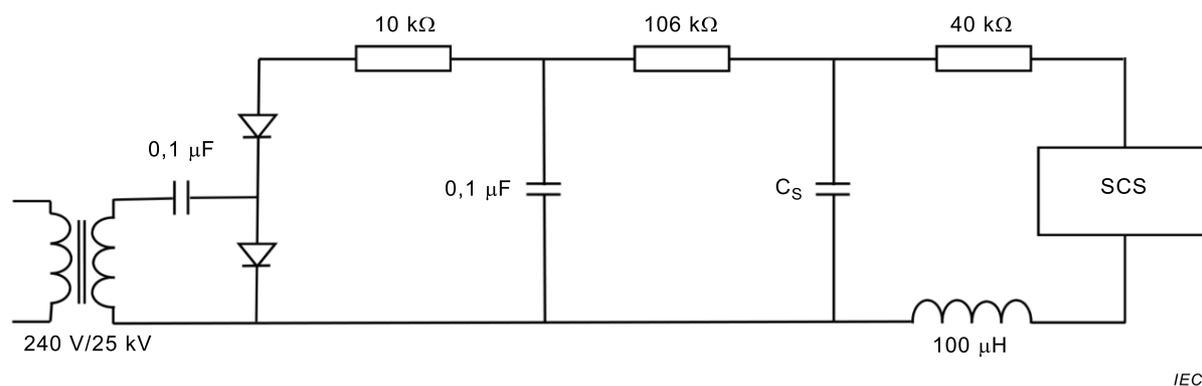
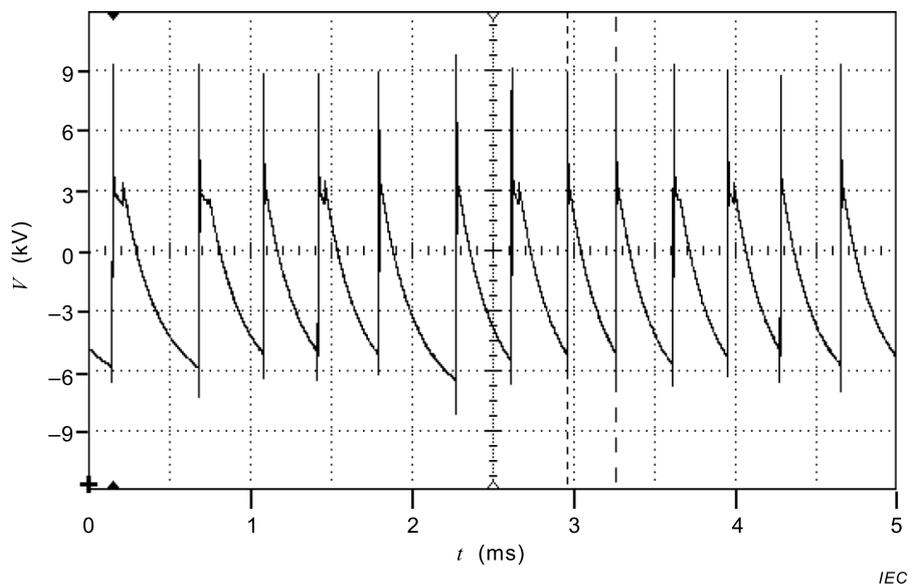


Figure B.3 – Exemple de circuit de simulation de tension par convertisseur simple



Légende

V tension

t temps

Figure B.4 – Forme d'onde typique produite par le générateur d'impulsions

Annexe C (informative)

Déduction de la tension d'essai d'endurance de courte durée

Pendant de nombreuses années, on a admis qu'il convenait que l'isolation principale dans une machine tournante alimentée par le réseau (tension sinusoïdale) soit capable de supporter $2,5 U_N$ pendant au moins 250 h au cours d'un essai d'endurance électrique réalisé à fréquence industrielle [15]. Ceci est équivalent à une tension égale à 4,3 fois la tension entre phase et terre. Dans le cas des machines alimentées par convertisseurs, la signification du terme «tension assignée» n'est pas claire. Néanmoins, le mécanisme de vieillissement de l'isolation principale alimentée par un entraînement à niveaux multiples est toujours considéré comme dépendant de l'excursion en tension crête à crête et du nombre de cycles de la même façon que pour les machines alimentées par le réseau. Pour un entraînement à 3 niveaux, l'excursion en tension et la fréquence à utiliser sont décrites en Annexe A. Cela permet à l'essai équivalent pour les machines alimentées par convertisseurs d'être calculé de la manière suivante, en supposant que tous les essais font référence à la même fréquence industrielle.

Tension d'essai pour des bobines alimentés par le réseau = $2,5 U_N$ (en valeur efficace)

= $2,5 \times \sqrt{3} \times U_0$ (où U_0 est la tension entre phase et terre en valeur efficace)

= $\frac{2,5 \times \sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times$ (tension crête à crête entre phase et terre)

= 1,53 x (tension crête à crête entre phase et terre)

Par conséquent:

Tension d'essai d'endurance de courte durée pour les bobines alimentées par convertisseur = 1,53 (tension crête à crête maximale entre phase et terre).

Par exemple, si la tension crête à crête maximale entre phase et terre sur une bobine dans une machine alimentée par convertisseur est de 8 kV,

la valeur efficace de la tension d'essai sinusoïdale = $1,53 \times 8 \text{ kV} = 12,25 \text{ kV}$.

Noter que, pour une machine alimentée par convertisseur, la tension assignée équivalente pour estimer la courbe de durée de vie de l'isolation principale est égale à U_N x le facteur d'augmentation indiqué dans la colonne 1 du Tableau D.2.

Annexe D (informative)

Déduction de la classe d'isolation contre les tensions de choc pour l'isolation de la machine

Lorsqu'une machine tournante doit être alimentée par un convertisseur, il est possible qu'une classe supplémentaire d'isolation contre les tensions de choc (IVIC X) soit attribuée au système d'isolation de la machine, qui définit le rapport d'augmentation maximal admissible pour la tension fondamentale entre phase et terre dans des conditions d'alimentation par convertisseur. Le rapport d'augmentation correspond à la tension de crête de sortie du convertisseur divisée par la tension crête à crête du réseau. Le Tableau D.2 représente une plage de sévérités arbitraire pour ce paramètre, où le constructeur choisira une sévérité pour indiquer la valeur maximale admise en service. Cette valeur est déterminée à partir des résultats des essais de qualification. Si un constructeur souhaite qualifier l'isolation principale à un rapport d'augmentation différent, une classe particulière d'isolation contre les tensions de choc (IVIC S) doit être utilisée, avec la valeur précise indiquée dans la documentation de la machine. Il est recommandé que la classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) figure sur la plaque signalétique. Il existe quatre autres paramètres, indiqués dans les colonnes 2 à 5 du Tableau D.2, qui affectent la performance de l'isolation dans des conditions de fonctionnement du convertisseur, de la manière suivante:

Fréquence fondamentale entre phase et terre maximale admissible.

Rapport maximal admissible entre le saut de tension (U_j) et la tension crête à crête entre phase et terre.

Taux de répétition maximal admissible de la tension de choc entre phase et terre.

Temps de montée minimal admissible de la tension de choc entre phase et terre.

Les valeurs de ces paramètres pour lesquels la qualification a été réalisée doivent être indiquées dans la documentation de la machine. La tension crête à crête entre phase et terre maximale admissible peut être convertie en unités de U_N comme dans le Tableau D.1. En outre, un facteur de tension d'essai (TVF) est indiqué dans le Tableau D.1 pour la déduction des tensions d'essai de routine liées à la classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC). Il est défini par le rapport de la tension crête à crête entre phase et terre maximale admissible de fonctionnement en unités de U_N divisé par $2\sqrt{2}$. Les machines avec une classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) ayant un facteur de tension d'essai supérieur à 1 nécessitent des tensions d'essai plus élevées que les machines non qualifiées en termes de classe d'isolation contre les tensions de choc.

Tableau D.1 – Tensions d’essai entre phase et terre selon la classe d’isolation contre les tensions de choc (IVIC) pour les systèmes d’isolation de Type II

IVIC	Tensions de fonctionnement maximales admissibles en unités de U_N		Rapport d’augmentation maximal admissible pour la tension crête à crête entre phase et terre $\sqrt{3}(U_{IVIC}/U_N)/2\sqrt{2}$	Exemples de tensions d’essai de routine à 50/60 Hz, en valeur efficace ($U_N = 6,6$ kV)	
	Crête à crête	TVF		Alimentation par convertisseur (Note 3)	Alimentation par réseau
Aucune (réseau)	1,6	-	1,0	$U_N = 6,6$ kV	
1	1,8	0,6	1,1	14,2	14,2
2	2,1	0,8	1,3	14,2	14,2
3	2,4	0,9	1,5	14,2	14,2
4	2,8	1,0	1,7	14,2	14,2
5	3,3	1,2	2,0	16,2	14,2
6	3,8	1,3	2,3	18,5	14,2
7	4,2	1,5	2,6	20,8	14,2
S	$2QV\sqrt{2}/\sqrt{3}$	$QV/\sqrt{3}$	QV	$2U_N QV/\sqrt{3} + 1$ kV	14,2

NOTE 1 Le rapport d’augmentation correspond à la tension crête à crête aux bornes de la machine divisée par la tension crête à crête du réseau.

NOTE 2 QV est la valeur de $\sqrt{3}(U_{IVIC}/U_N)/2\sqrt{2}$ pour laquelle une procédure de qualification d’un constructeur fournit un code de sévérité différent de ceux fournis au Tableau D.2.

NOTE 3 La valeur de 14,2 kV est la plus faible tension d’essai autorisée par l’IEC 60034-1 pour $U_N = 6,6$ kV.

Tableau D.2 – Classes d'isolement contre les tensions de choc (IVIC)

Classes d'isolement contre les tensions de choc pour les systèmes d'isolation de Type II – Codes de sévérité et valeurs limites						
IVIC		Paramètres indépendants de la classe d'isolement contre les tensions de choc (IVIC)				
		Tension fondamentale entre phase et terre		Tension de choc entre phase et terre		
		Rapport d'augmentation maximal admissible pour la tension fondamentale entre phase et terre (Colonne 1)	Fréquence fondamentale entre phase et terre maximale admissible (Colonne 2)	Rapport maximal admissible entre le saut de tension et la tension crête à crête entre phase et terre (Colonne 3)	Taux de répétition maximal admissible de la tension de choc (f) (Colonne 4)	Temps de montée minimal admissible de la tension de choc entre phase et terre (t_r) (Colonne 5)
		$U_{pk/pk}$ entre phase et terre (convertisseur)/ $U_{pk/pk}$ entre phase et terre (réseau)	Hz	$U_j/U_{pk/pk}$	kHz	μ s
Code de sévérité	1	1,1	Valeur devant être consignée dans la documentation	Valeur devant être consignée dans la documentation	Valeur devant être consignée dans la documentation	Valeur devant être consignée dans la documentation
	2	1,3				
	3	1,5				
	4	1,7				
	5	2,0				
	6	2,3				
	7	2,6				
	S	Au choix du constructeur				

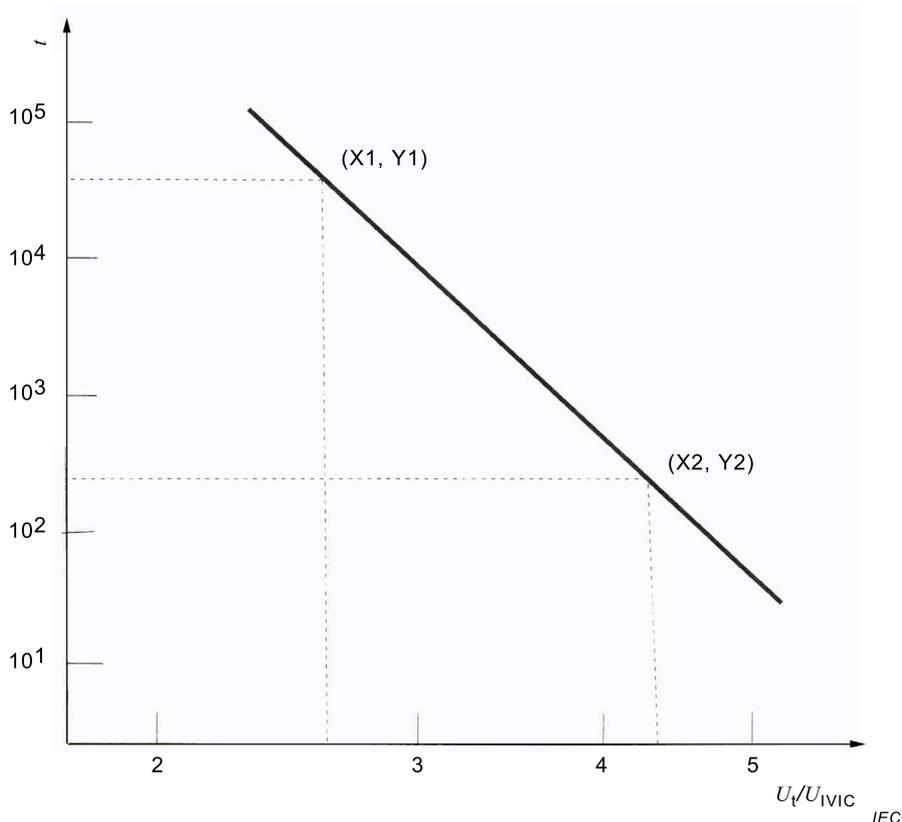
Annexe E (normative)

Déduction d'une classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) en l'absence d'une courbe de durée de vie de référence fournie par le constructeur

E.1 Déduction d'une classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) à partir d'essais d'endurance

E.1.1 Isolation principale

Si une courbe de durée de vie de référence pour l'isolation principale n'est pas disponible à des fins de comparaison, le constructeur doit, dans le cadre de la procédure de qualification, établir une courbe de durée de vie de référence pour le système d'isolation principale prévu, en utilisant des tensions sinusoïdales. Au moins quatre éprouvettes doivent être soumises aux essais à chacune des trois tensions. Après correction à 50 Hz ou 60 Hz à l'aide de la Formule (3), les points doivent être portés sur le graphique afin de construire la courbe log-log durée de vie moyenne en heures / tension normalisée. La tension normalisée est la tension d'essai crête à crête divisée par U_{IVIC} . La valeur de U_{IVIC} est calculée comme la tension maximale crête à crête entre phase et terre pour laquelle la qualification est requise.



Légende

X1 2,6

Y1 41 000

X2 4,33

Y2 250

t durée de fonctionnement avant défaillance électrique, en heures

U_t tension d'essai crête à crête

U_{IVIC} tension de fonctionnement crête à crête entre phase et terre maximale admissible

Figure E.1 – Courbe de durée de vie de référence pour une isolation principale

Les durées de vie mesurées doivent être comparées à la courbe de durée de vie de référence représentée à la Figure E.1. Cette courbe de durée de vie concorde avec celles mesurées à 50 Hz ou 60 Hz à partir de systèmes à base de mica/résine époxy réputés pour avoir donné des durées de vie en service fiables [16, 17, 18]. La pente de la droite est basée sur un coefficient d'endurance de 10 et passe par le point (4,33; 250) qui est spécifié en [15]. Le critère de réussite pour le système candidat doit être le suivant: une éprouvette au plus a, à chaque tension, une durée de vie inférieure à celle indiquée par la courbe de durée de vie de référence.

Si le critère de réussite a été rempli, la classe IVIC X est attribuée à la machine, où X représente le code de sévérité choisi dans la colonne 1 du Tableau D.2. Des détails doivent figurer dans la documentation de la machine pour décrire le code de sévérité pour lequel la qualification a été réalisée et pour indiquer qu'il a été obtenu conformément à la courbe de durée de vie de l'isolation de référence représentée dans la présente annexe. Si l'isolation est qualifiée par rapport à une valeur de U_{IVIC} différente de celles figurant dans le Tableau D.2, une classe IVIC S peut être attribuée.

E.1.2 Isolation entre spires

En l'absence d'une courbe de durée de vie de référence pour l'isolation entre spires, il sera nécessaire de démontrer que l'isolation entre spires est exempte de décharges partielles au saut de tension de qualification choisi. La signification du terme «décharge partielle» est clarifiée en 13.3. Des éprouvettes sont produites selon 12.3 et soumises aux essais selon 13.3. Si une tension de seuil de décharge partielle se produit au-dessous de $1,5 U_{turn}$, la qualification doit être réalisée à la valeur la plus élevée de U_{turn} à laquelle les éprouvettes sont exemptes de décharges partielles. Si la qualification est requise à une valeur plus élevée de U_{turn} , elle ne peut être réalisée qu'en obtenant une courbe de durée de vie selon 13.3 et en la comparant à une courbe de durée de vie de référence. La courbe de durée de vie représentée à la Figure E.1 a été obtenue à partir d'une isolation principale à base de mica plutôt qu'à partir d'une isolation entre spires; par conséquent, il est possible qu'elle ne soit pas appropriée. Si une courbe de durée de vie de référence est utilisée, la tension U_{IVIC} est remplacée par la tension crête à crête maximale admissible contraignant l'isolation entre spires en service (U_{turn}). En variante, il est possible d'accepter la valeur utilisée dans une machine qui s'est révélée satisfaisante en service avec un système d'entraînement de puissance alimenté par convertisseur. La classe d'isolation contre les tensions de choc (IVIC) pour la machine figurera dans la documentation en tant que IVIC S et des détails doivent être fournis concernant la valeur limite de U_{turn} .

E.1.3 Système de maîtrise des contraintes

Lorsqu'un système de maîtrise des contraintes est utilisé en conditions de service, la qualification est réalisée en utilisant les éprouvettes et les procédures décrites en 12.4 et 13.4 respectivement. Les conditions d'essai sont déduites de la valeur de la tension crête à crête entre phase et terre pour laquelle le système d'isolation principale a été qualifié en E.1.1 et de la valeur de U_{turn} pour laquelle l'isolation entre spires a été qualifiée en E.1.2.

E.2 Déduction de la classe IVIC X fondée sur un fonctionnement satisfaisant en conditions de service

Lorsqu'un fonctionnement satisfaisant a été observé en conditions de service pour le système d'isolation avec alimentation par convertisseur, une classe IVIC peut être déduite à partir des paramètres de fonctionnement. La valeur doit être conforme à l'un des codes de sévérité indiqués dans la colonne 1 du Tableau D.2. Un exemple illustrant la manière dont cela est réalisé est donné dans le Tableau 1 où le code IVIC est pris comme le niveau le moins sévère suivant figurant dans la colonne 1 du Tableau D.2. Si le niveau de sévérité en service coïncide avec un niveau figurant dans le Tableau D.2, il peut être utilisé. Pour les systèmes d'isolation dont la performance s'est avérée satisfaisante en service, les valeurs relatives aux paramètres figurant dans les colonnes 2 à 5 du Tableau D.2 doivent être consignées dans la documentation.

E.3 Déduction d'une classe IVIC S fondée sur un fonctionnement satisfaisant en conditions de service

Il est reconnu que la procédure décrite à l'Article E.2 ne peut pas refléter l'aptitude requise du système d'isolation et, dans ce cas, le code IVIC S est utilisé. Les valeurs précises pour les cinq paramètres figurant dans le Tableau D.2 pour lesquels un fonctionnement satisfaisant en conditions de service a été observé doivent être consignées dans la documentation, en même temps que d'autres informations pertinentes sur le fonctionnement en conditions de service, comme par exemple, le temps de fonctionnement et l'application.

Annexe F (informative)

Essais de dépistage facultatifs

F.1 Généralités

Deux essais sont décrits. Ils ont pour objet de permettre un dépistage à court-terme du système d'isolation principale. Ils ne sont ni destinés à être considérés comme des essais de type ni à être requis pour chaque contrat.

F.2 Essai d'endurance de courte durée sur l'isolation principale

Les bobines ou barres réalisées conformément aux normes de production sont montées dans des encoches simulées et soumises à une tension sinusoïdale à 50 Hz ou 60 Hz avec une valeur efficace crête à crête de 1,53 fois la tension crête à crête entre phase et terre maximale apparaissant sur les bobines au cours d'un fonctionnement sur convertisseur (voir Annexe C). Il convient que les simulateurs d'encoches soient mis à la terre. Il convient que toutes les mesures de maîtrise des contraintes soient appliquées préalablement aux bobines. Il s'agit d'un essai de qualité de l'isolation principale. Cet essai est similaire à l'essai décrit en [15] et il concerne principalement l'isolation principale. En tant que telles, les conditions d'essai peuvent s'avérer trop sévères pour que le revêtement de maîtrise des contraintes puisse durer pendant toute la durée de l'essai; par conséquent, il est permis d'effectuer des actions correctives sur le revêtement de maîtrise des contraintes.

Le nombre recommandé d'éprouvettes est de quatre [15] et le critère de réussite est qu'il convient que les éprouvettes résistent toutes aux conditions d'essai, sans claquage électrique pendant 250 h. Une tenue ne garantit pas une durée de vie en service acceptable avec un entraînement par convertisseur. Il s'agit d'un essai destructif et les éprouvettes ne peuvent pas être utilisées dans une machine de production.

F.3 Essai de tenue en tension

Il est possible d'effectuer un essai de courte durée à fréquence industrielle selon 4.4 de l'IEC 60034-15:2009 [20], au cours duquel une tension en valeur efficace de $(1,22 U_{VIC} + 1 \text{ kV})$ est appliquée pendant 1 min entre les bornes d'une bobine et la terre. Le facteur de 1,22 provient de $\sqrt{3}$ divisée par $\sqrt{2}$. La tension efficace appliquée est ensuite augmentée à la vitesse de 1 kV/s jusqu'à 2 $(1,22 U_{VIC} + 1 \text{ kV})$, puis immédiatement réduite jusqu'à zéro à une vitesse d'au moins 1 kV/s. Aucun claquage ne doit être observé au cours de l'essai. Cet essai ne peut pas révéler certains mécanismes de défaillance qui sont uniquement détectés lors de la réalisation d'un essai d'endurance sous tension. L'essai est réalisé à température et humidité ambiantes sur au moins deux éprouvettes de bobines complètes. Il s'agit d'un essai destructif et les éprouvettes ne peuvent pas être utilisées dans une machine de production.

Bibliographie

- [1] IEC TS 61800-8:2010, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface* (disponible en anglais seulement)
- [2] F.Schemmel, K.Bauer and M.Kaufhold, "Reliability and statistical lifetime prognosis of Motor Winding Insulation in Low Voltage Power Drive Systems", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 25, No. 4, pp. 6-13, 2009
- [3] M.Kaufhold, H.Aunger, M.Berth, J.Speck and M.Eberhardt, "Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-Inverter-fed low voltage induction motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 2, No.2, pp. 396-402, 2000
- [4] G.C.Stone, S.Campbell and S.Tetreault, "Converter Duty Motors: Which Motors are at Risk", *IEEE Industry Applications Magazine*, pp.17-22, 2000
- [5] J.C.G.Wheeler, A.M.Gully, A.E.Baker and F.A.Perrot, "Novel stress grading systems for converter-fed machines", *Electrical Insulation Magazine*, Vol.23, pp. 27-33, Jan/Feb 2007
- [6] P.Wang, A.Cavallini and G.C.Montanari "Endurance testing of rotating machines insulation systems: do sinusoidal and square voltage wavefor.m.s.provide comparable results?", *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Bologna, pp.310-313, June 2013
- [7] M.Kaufhold, K.Schäfer, K.Bauer and M.Rossmann "Medium and high power drive systems; Requirements and suitability proof for winding insulation systems", *10th Insucon International Electrical Insulation Conference*, pp. 86-89, Birmingham, May 2006
- [8] A.Cavallini, D.Fabiani and G.C.Montanari, "Power electronics and electrical insulation systems – Part 2: Life modelling for insulation design", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol.26, no.4, pp.33-39, 2010
- [9] F.Sahlen, L.Ming, K.Johansson, E. Martensson and O.Koponen, "Investigation of mica-based insulation for high voltage machines subjected to repetitive pulsed voltage" *ISEI Conference*, pp. 409-413, San Diego, USA, 2010
- [10] IEC TS 61251, *Systèmes et matériaux isolants électriques – Évaluation de l'endurance à la tension alternative*
- [11] A.Wichmann and P.Grunewald "Statistical evaluation of accelerated voltage endurance tests on mica insulation for rotating electrical machines", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.25, No.2, pp.319-323, April 1990
- [12] J.C.G.Wheeler "Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors", *Electrical Insulation Magazine*, Vol 21, No 2, pp. 22-29, 2005
- [13] J.C.G.Wheeler, A.M.Gully, A.E.Baker and F.A.Perrot, "Thermal performance of stress grading systems for converter-fed motors" *IEEE Insulation Magazine*, Vol 23, No.2, pp. 5-11, March/April 2007
- [14] A. Kumada, T. Nakamura, H. Ikeda, K. Hidaka, Y. Tsuboi, T. Kisakibaru, and T. Yoshimitsu, "Transient potential distribution on stress grading system of rotating machines under repetitive impulse voltages", *Electrical Insulation Conference*, Philadelphia, USA, pp. 368 – 372, June 2014

- [15] IEEE 1553, *Standard for voltage endurance testing of form-wound coils and bars for hydrogenerators*
 - [16] B.E.Ward, G.C.Stone and M.Kurtz, "A quality control test for high voltage insulation", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 3, No 5, pp. 12-17, Sept 1987
 - [17] H.Meyer and A.Wichmann "Experience and practice with standardized acceptance test procedures for windings of rotating machinery", *Proc. Electrical/Electronic Insulation Conference*, pp. 146-151, Chicago, 1983
 - [18] R.H.Schuler and G.Liptak "Long term functional tests on insulation systems for HV rotating machines", *CIGRE International Conference on Large Electric Systems*, Paper 15.05, August 1976
 - [19] A.Wichmann "Two decades of experience and progress in epoxy mica insulation systems for large rotating machines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, Issue 1, pp. 74-82, 1983
 - [20] IEC 60034-15:2009, *Machines électriques tournantes – Partie 15: Niveaux de tenue au choc électrique des bobines de stator préformées des machines tournantes à courant alternatif*
-

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