

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Bushings for DC application

Traversées pour application en courant continu

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 65700-19-03:2014



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

Copyright © 2014 IEEE

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 being secured. Requests for permission to reproduce should be addressed to either IEC at the address below or IEC's member National Committee in the country of the requester or from IEEE.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
3 Park Avenue
New York, NY 10016-5997
United States of America
stds.ipr@ieee.org
www.ieee.org

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 the IEEE

IEEE is the world's largest professional association dedicated to advancing technological innovation and excellence for the benefit of humanity. IEEE and its members inspire a global community through its highly cited publications, conferences, technology standards, and professional and educational activities.

About IEC/IEEE publications

The technical content of IEC/IEEE publications is kept under constant review by the IEC and IEEE. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum 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 - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 21 000 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

67 000 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: sales@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Bushings for DC application

Traversées pour application en courant continu

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.080.20

ISBN 978-2-8322-6336-5

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.....	6
INTRODUCTION.....	8
1 Scope.....	9
2 Normative references.....	9
3 Terms, definitions and symbols.....	10
3.1 Terms and definitions.....	10
3.2 List of variables.....	12
4 Ratings.....	13
4.1 Rated voltages.....	13
4.1.1 Rated continuous DC voltage.....	13
4.1.2 Rated peak voltage.....	13
4.2 Insulation levels.....	13
4.3 Rated currents.....	13
4.3.1 Pure DC applications.....	13
4.3.2 Combined voltage applications.....	14
4.4 Rated frequency.....	14
4.5 Pollution parameters.....	14
5 Operating conditions.....	15
5.1 General.....	15
5.2 Factors affecting the design, testing and application.....	16
5.3 Altitude correction.....	17
5.4 Interchangeability.....	18
6 General requirements.....	19
6.1 Electrical requirements.....	19
6.2 Mechanical requirements.....	19
6.3 Nameplate markings.....	19
7 Test requirements.....	20
7.1 General requirements.....	20
7.2 Test Conditions.....	20
7.2.1 Air temperature.....	20
7.2.2 Humidity.....	20
7.2.3 Correction factors.....	20
7.3 Test classification.....	21
7.3.1 Type (or design) tests.....	21
7.3.2 Routine tests.....	22
7.3.3 Special tests.....	22
8 Type tests.....	22
8.1 Dry power-frequency voltage withstand test with partial discharge measurement.....	22
8.1.1 Applicability.....	22
8.1.2 Test method and requirements.....	22
8.1.3 Acceptance.....	22
8.2 Dry lightning impulse voltage withstand test (BIL).....	22
8.2.1 Applicability.....	22
8.2.2 Test method and requirements.....	22

8.2.3	Acceptance	23
8.3	Dry or wet switching impulse voltage withstand test (SIL)	23
8.3.1	Applicability	23
8.3.2	Test method and requirements	23
8.3.3	Acceptance	23
8.4	Electromagnetic compatibility tests (EMC)	23
8.4.1	Emission test	23
8.4.2	Immunity test	24
8.5	Temperature rise test	24
8.5.1	Applicability	24
8.5.2	Test method and requirements	24
8.5.3	Acceptance	25
8.6	Cantilever load withstand test	25
8.6.1	Applicability	25
8.6.2	Test method and requirements	25
8.6.3	Acceptance	26
8.7	Tightness test on liquid-filled, compound-filled and liquid-insulated bushings	26
8.8	Internal pressure test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings	26
8.9	Verification of dimensions	27
8.10	Draw-lead bushing cap pressure test	27
8.10.1	Applicability	27
8.10.2	Test method and requirements	27
8.10.3	Acceptance	27
9	Routine tests	27
9.1	Measurement of dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and capacitances	27
9.1.1	Applicability	27
9.1.2	Test method and requirements	27
9.1.3	Acceptance	27
9.2	Dry lightning impulse voltage withstand test (BIL)	28
9.2.1	Applicability	28
9.2.2	Test method and requirements	28
9.2.3	Acceptance	28
9.3	Dry power-frequency voltage withstand test with partial discharge measurement	28
9.3.1	Applicability	28
9.3.2	Test method and requirements	28
9.3.3	Acceptance	29
9.4	DC applied voltage withstand test with partial discharge measurement	29
9.4.1	Applicability	29
9.4.2	Test method and requirements	30
9.4.3	Acceptance	30
9.5	Polarity reversal test with partial discharge measurement	31
9.5.1	Applicability	31
9.5.2	Test method and requirements	31
9.5.3	Acceptance	32
9.6	Dry Switching impulse withstand test	32
9.6.1	Applicability	32
9.6.2	Test method and requirements	33

9.6.3	Acceptance	33
9.7	Test of tap insulation	33
9.8	Internal pressure test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings	33
9.9	Tightness test on liquid-filled, compound-filled and liquid-insulated bushings	33
9.10	Tightness test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings	33
9.11	Tightness test at the flange or other fixing device	33
9.12	Visual inspection and dimensional check	33
10	Special tests	33
10.1	Artificial pollution test	34
10.1.1	Applicability	34
10.1.2	Test method and requirements	34
10.1.3	Acceptance	34
10.2	Even wetting DC voltage test	34
10.2.1	Applicability	34
10.2.2	Test method and requirements	34
10.2.3	Acceptance	35
10.3	Uneven wetting DC voltage test	35
10.3.1	Applicability	35
10.3.2	Test method and requirements	35
10.3.3	Acceptance	35
11	Recommendations for transport, storage, erection, operation and maintenance	36
11.1	Conditions during transport, storage and installation	36
11.2	Installation	36
11.3	Unpacking and lifting	36
11.4	Assembly	36
11.4.1	Mounting	36
11.4.2	Connections	37
11.4.3	Final installation inspection	37
11.5	Operation	37
11.6	Maintenance	38
11.6.1	General	38
11.6.2	Recommendation for the manufacturer	38
11.6.3	Recommendations for the user	38
11.6.4	Failure report	39
12	Safety	40
12.1	Electrical aspects	40
12.2	Mechanical aspects	40
12.3	Thermal aspects	40
13	Environmental aspects	40
Annex A	(informative)	41
A.1	Bushings used in voltage source converters (VSC) HVDC schemes	41
A.1.1	Introduction	41
A.1.2	Design	43
A.1.3	Tests	44
A.1.4	Supporting Published Material	44
Annex B	(informative)	45

B.1	Temperature rise test methods for the determination of the equivalent test current	45
B.1.1	Introduction	45
B.2	Basics concerning the losses in distorted operation	45
B.3	Analytical calculation	46
B.4	Finite element method calculation	46
B.5	Calculation by enhancement factors as described in IEC 61378–1	47
B.6	Examples of calculation	48
B.6.1	Calculation based on the analytical method	49
B.6.2	Calculation based on Finite Element Method	50
B.6.3	Calculation based on the enhancement factor according IEC 61378–1	51
B.7	References	52
	Bibliography	53
	Figure 1 – Altitude correction factor	18
	Figure 2 – Polarity reversal test profile	31
	Figure A.1 – Two-level VSC HVDC converter station applied in a bipolar scheme with DC cable transmission	42
	Figure A.2 – Multi-level VSC HVDC converter station applied in a monopolar scheme with DC overhead line transmission	43
	Table 1 – Temperature of ambient air and immersion media (see 5.1)	16
	Table 2 – Type, routine and special tests	21
	Table 3 – Minimum values of cantilever withstand load	26
	Table 4 – Maximum values of $\tan \delta$ and $\tan \delta$ increase	28
	Table 5 – Maximum values of partial discharge quantity	29
	Table B.1 – Valve side connected bushing current harmonic spectrum	48
	Table B.2 – Calculation based on the analytical method	49
	Table B.3 – Calculation based on Finite Element Method	50
	Table B.4 – Calculation based IEC 61378-1 enhancement factor F_{CE}	51

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

BUSHINGS FOR DC APPLICATION

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.

IEEE Standards documents are developed within IEEE Societies and Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board. IEEE develops its standards through a consensus development process, approved by the American National Standards Institute, which brings together volunteers representing varied viewpoints and interests to achieve the final product. Volunteers are not necessarily members of IEEE and serve without compensation. While IEEE administers the process and establishes rules to promote fairness in the consensus development process, IEEE does not independently evaluate, test, or verify the accuracy of any of the information contained in its standards. Use of IEEE Standards documents is wholly voluntary. IEEE documents are made available for use subject to important notices and legal disclaimers (see <http://standards.ieee.org/IPR/disclaimers.html> for more information).

IEC collaborates closely with IEEE in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations. This Dual Logo International Standard was jointly developed by the IEC and IEEE under the terms of that agreement.

- 2) The formal decisions 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. The formal decisions of IEEE on technical matters, once consensus within IEEE Societies and Standards Coordinating Committees has been reached, is determined by a balanced ballot of materially interested parties who indicate interest in reviewing the proposed standard. Final approval of the IEEE standards document is given by the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board.
- 3) IEC/IEEE Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees/IEEE Societies in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC/IEEE Publications is accurate, IEC or IEEE 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 (including IEC/IEEE Publications) transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC/IEEE Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC and IEEE do not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC and IEEE are 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 IEEE or their directors, employees, servants or agents including individual experts and members of technical committees and IEC National Committees, or volunteers of IEEE Societies and the Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board, 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/IEEE Publication or any other IEC or IEEE 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 implementation of this IEC/IEEE Publication may require use of material covered by patent rights. By publication of this standard, no position is taken with respect to the existence or validity of any patent rights in connection therewith. IEC or IEEE shall not be held responsible for identifying Essential Patent Claims for which a license may be required, for conducting inquiries into the legal validity or scope of Patent Claims or determining whether any licensing terms or conditions provided in connection with submission of a Letter of Assurance, if any, or in any licensing agreements are reasonable or non-discriminatory. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any patent rights, and the risk of infringement of such rights, is entirely their own responsibility.

This International Standard has been prepared by a joint working group of sub-committee 36A: Insulated bushings, of IEC technical committee 36: Insulators and Bushing subcommittee of the IEEE-PES transformer committee¹.

This bilingual version (2019-01) corresponds to the monolingual English version, published in 2014-07.

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

FDIS	Report on voting
36A/173/FDIS	36A/174/RVD

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

The French version of this standard has not been voted upon.

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

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

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

¹ A list of IEEE participants can be found at the following URL:
<http://standards.ieee.org/downloads/65700/65700-19-03-2014/65700-19-03-2014_wg-participants.pdf>.

INTRODUCTION

In this first edition of IEC/IEEE 65700-19-03, service experiences as well as established market requirements have been harmonized with existing IEC and IEEE standards, primarily:

IEC 60137, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

IEC 62199, *Bushings for DC application*

IEEE Std C57.19.00™, *IEEE Standard General Requirements and Test Procedures for Outdoor Power Apparatus Bushings*

IEEE Std C57.19.03™, *IEEE Standard Requirements, Terminology and Test Code for Bushings for DC Application*

This dual numbered standard replaces the previous IEC and IEEE DC bushing standards.

Where applicable, reference is also made to the following standards:

IEC 61462, *Composite insulators – Hollow insulators for use in outdoor and indoor electrical equipment*; and

IEC 62155, *Hollow pressurized and unpressurized ceramic and glass insulators for use in electrical equipment with rated voltages greater than 1 000 V*.

Non-ceramic bushing insulators are widely used in DC applications and this standard applies to similar qualification procedures on all types of insulators, except for the artificial pollution test. Preparation of a bushing for an artificial pollution test destroys the surface of a composite insulator and therefore cannot be performed on such bushings.

The range of type tests and routine tests has been carefully planned, considering that high voltage direct current (HVDC) power transmission is a mature technology, but still with limited service experience compared to AC systems and voltage coordination may vary with different system HVDC design practices.

Work on IEEE Std C57.19.03 edition 1 was started in 1988 within the Working Group on Bushings for DC Applications of the Bushing Subcommittee of the IEEE Transformers Committee. The working group decided to address requirements for these bushings in a self-standing document because many problems specific to this type of bushing were being experienced within the industry and other available standards on bushings were inadequate for this purpose. The main reference for the resulting document was its counterpart for ac bushings, IEEE Std C57.19.00-1991 and IEC 60137. Requirements were also coordinated with the CIGRE Joint Working Group 12/14.10 as well as with the HVDC Converter Transformer and Smoothing Reactor Subcommittee of the IEEE Transformers Committee, which developed standards for these HVDC apparatus during the same time frame.

IEEE Std C57.19.03:1996 was approved by the IEEE-SA Standards Board on 20 June 1996 and published on 6 January 1997. During the reaffirmation process for this document in 2002, several errors in the document were reported. All known errors were corrected in a corrigendum in December 2005. This revised standard includes the corrections made in the corrigendum.

Work on IEC 62199 started in 2000 by IEC SC 36A, the insulated bushings subcommittee of IEC TC 36, the insulators technical committee, and was largely based on IEEE Std C57.19.03. Edition 1 was published in 2004.

After work on the revision of IEEE Std C57.19.03 was started by IEEE it was agreed at a meeting of IEC TC36 in Sao Paulo in 2008 to approach IEEE to establish a Joint Maintenance Team under the Dual Logo Standard procedure. This was agreed and work on the new document IEC/IEEE 65700-19-03 was started in 2009.

BUSHINGS FOR DC APPLICATION

1 Scope

This International Standard applies to outdoor and indoor bushings of any voltage used on DC systems, of capacitance graded or gas insulated types for use as components of oil-filled converter transformers and smoothing reactors, as well as air-to-air DC bushings. This standard does not apply to the following:

- cable terminations (potheads);
- bushings for instrument transformers;
- bushings for test power supplies;
- bushings applied with gaseous insulation (other than air at atmospheric pressure) external to the bushing;
- bushings for industrial application;
- bushings for traction application;
- bushings for distribution class transformers.

This standard makes reference to IEC 60137 for general terms and conditions and defines the special terms used, operating conditions, ratings, test procedures as well as general mechanical and electrical requirements for bushings for DC application.

2 Normative references

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

IEC 60050, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*. Available from:
<http://www.electropedia.org/>

IEC 60060-1:2010, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

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

IEC 60071-5, *Insulation co-ordination – Part 5: Procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations*

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

IEC 60076-2, *Power Transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*

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

IEC 60137:2008, *Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V*

IEC 60270, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60296, *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*

IEC 60376, *Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF₆) for use in electrical equipment*

IEC 60480, *Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specification for its re-use*

IEC 60836, *Specifications for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes*

IEC 60867, *Insulating liquids - Specifications for unused liquids based on synthetic aromatic hydrocarbons*

IEC 61245, *Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on d.c. systems*

IEC 61378-2, *Converter transformers – Part 2: Transformers for HVDC Applications*

IEC 61462, *Composite hollow insulators – Pressurized and unpressurized insulators for use in electrical equipment with rated voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendations*

IEC 62155, *Hollow pressurized and unpressurized ceramic and glass insulators for use in electrical equipment with rated voltages greater than 1 000 V*

CISPR 16-1 (all parts), *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods*

CISPR 18-2, *Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment – Parts 2: Methods of measurement and procedure for determining limits*

IEEE Std C57.19.00™-2004, *IEEE General Requirements and Test Procedures for Outdoor Apparatus Bushings (ANSI)*

IEEE Standards Dictionary Online²

3 Terms, definitions and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60137, IEEE Std C57.19.00, IEC 60050-471 and the IEEE Standards Dictionary Online, as well as the following, apply.

3.1.1

DC bushing

bushing subject to DC voltage stress, i.e. bushings applied to the valve winding side of a converter transformer, bushings applied to a DC smoothing reactor, wall bushing or a bushing applied to a converter valve

3.1.2

bushing for pure DC application

DC bushing subject to a DC voltage with only a small AC voltage ripple, such as applied on the high voltage side of a DC converter valve

² Subscription is available at http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

3.1.3

bushing for combined voltage application

DC bushing subject to a large AC voltage superimposed on a DC bias voltage, such as a bushing applied to the valve winding side of a converter transformer

3.1.4

wall bushing

roof bushing

bushing intended to be mounted on the wall (roof) of a building such as a converter valve hall

3.1.5

tilted bushing

bushing intended to be mounted at an angle of 20° to 70° from the vertical

3.1.6

vertical bushing

bushing intended to be mounted vertically or at an angle not exceeding 20° from the vertical

3.1.7

horizontal bushing

bushing intended to be mounted horizontally or at an angle 70° to 90° from the vertical

3.1.8

draw-lead bushing

bushing that will allow use of a draw-lead conductor

3.1.9

draw-lead conductor

cable or solid conductor that has one end connected to the transformer or reactor winding and the other end drawn through the central tube of the bushing and connected to the top of the bushing

3.1.10

major insulation

insulation material providing the dielectric, which is necessary to maintain proper isolation between the energised conductor and ground potential, consisting of internal insulation and the insulation envelope(s)

3.1.11

internal insulation

Insulating material provided in a radial direction around the energised conductor in order to insulate it from the ground potential

3.1.12

charging current

capacitive current

current resulting from charge absorbed by the capacitor formed by the capacitance of the bushing

3.1.13

dissipation factor

tangent of the dielectric loss angle

Note 1 to entry: For small values of dielectric loss, the dissipation factor is virtually equal to the insulation power factor.

3.1.14

insulation power factor

ratio of the power dissipated in the insulation, in watts, to the product of the effective voltage and current in volt-amperes, when tested under a sinusoidal voltage and prescribed conditions

Note 1 to entry: The insulation power factor is equal to the cosine of the phase angle between the voltage and the resulting current when both the voltage and current are sinusoidal.

3.1.15

partial discharge

discharge that does not completely bridge the insulation between electrodes

Note 1 to entry: The term corona is preferably reserved for partial discharge in air around a conductor, but not within the bushing assembly.

3.1.16

corona

external partial discharge due to ionisation of the air surrounding a conductor caused by a voltage gradient exceeding a critical value

3.1.17

radio-interference voltage

RIV

high-frequency voltage generated as a result of partial discharge or corona, which may be propagated by conduction, induction, radiation or a combined effect of all three

3.1.18

polarity

polarity of the DC voltage with respect to ground, for example positive or negative

3.1.19

polarity reversal

change of voltage polarity from positive to negative or from negative to positive polarity

3.1.20

insulating barriers

set of barriers which form part of the insulation structure of the converter transformer or smoothing reactor at the oil end of the DC bushing

Note 1 to entry: Usually supplied for DC systems of nominal voltage above 150 kV.

3.1.21

leakage current

conduction current

current resulting from the resistance of the dielectric insulation and surface leakage

3.2 List of variables

$I_{eq,DC}$ is the total equivalent (or test) DC current;

I_h is the magnitude of the h^{th} harmonic current in the transformer;

$I_{test,AC}$ is the applied fundamental frequency AC current during the thermal test;

R_{AC} is the resistance of the current carrying parts of the bushing under test at fundamental (or test) frequency;

R_{DC} is the DC resistance of the load current carrying part of the bushing under test;

R_h is the AC resistance of the load current carrying part of the bushing at the h^{th} harmonic;

U_1 is the rated voltage (see 4.1.1 and 4.1.2);

U_{AC}	is the AC r.m.s. test voltage for measurement of partial discharge;
U_{dm}	is the highest DC voltage per valve bridge;
U_{DC}	is the DC withstand test voltage;
U_{pr}	is the polarity reversal test voltage (DC voltage);
U_{vm}	is the maximum phase-to-phase AC operating voltage of the valve windings of the converter transformer on which the bushing will be assembled. The parameter also applies to wall bushings installed on the ac-side of the converter valve;
N	is the number of six-pulse bridges in series from the neutral of the DC line to the rectifier bridge connected to the bushing when mounted on the converter transformer. The parameter also applies to wall bushings installed on the ac-side of the converter valve.

4 Ratings

4.1 Rated voltages

4.1.1 Rated continuous DC voltage

The rated continuous DC voltage is the maximum continuous DC voltage assigned to the bushing by the manufacturer for specified operating conditions.

4.1.2 Rated peak voltage

The rated peak voltage is the maximum value of the combination of DC voltage plus peak AC voltage that the bushing is required to withstand under the specified operating conditions.

4.2 Insulation levels

According to IEC 60071-5 the insulation levels for bushings used in DC applications do not generally follow the standard values of insulation level given in IEC 60071-1. The purchaser shall specify the insulation levels. The methods of calculation for test voltages are given in the relevant clauses of this standard.

4.3 Rated currents

The definition of rated current depends on the bushing application. If the bushing is one for pure DC application, the ratings are defined in 4.3.1. If the bushing is one for combined voltage application, the ratings are defined in 4.3.2.

4.3.1 Pure DC applications

4.3.1.1 Rated continuous DC current

The rated continuous DC current is the maximum continuous direct current that the bushing is required to carry under the specified operating conditions.

4.3.1.2 Rated DC overload current

The rated DC overload current is the maximum direct current that the bushing is required to carry for a stated duration of time and ambient temperature. The purchaser shall specify the current magnitude, duration and frequency of occurrence.

4.3.2 Combined voltage applications

In these applications, the bushing is usually required to carry AC current.

4.3.2.1 Rated continuous AC current

The rated continuous AC current is the r.m.s. equivalent of the actual current wave shape (including fundamental and harmonic frequency components) that the bushing is required to carry based on the DC rated load current commutated with zero commutating reactance.

$$I_v = I_d \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \approx I_d \cdot 0,816 \quad (1)$$

where

I_v is the r.m.s. value of the AC side current;

I_d is the DC side current.

Based on zero overlap angle at zero commutating reactance.

4.3.2.2 Rated AC overload current

The rated AC overload current is the maximum alternating current that the bushing is required to carry for a stated duration of time and ambient temperature. It shall be the r.m.s. equivalent of the actual current waveshape that the bushing is required to carry based on the DC rated overload current commutated with zero commutating reactance.

4.3.2.3 Rated momentary (short-time) current

The rated momentary short-time current is the current flowing through the bushing at the major peak of the maximum cycle as determined from the envelope of the current wave. This current is expressed as the root mean-square value including the DC component. Duration of momentary current shall be 1 s unless otherwise specified.

4.4 Rated frequency

Rated frequency is the frequency of the AC system to which the bushing is connected. Rated frequency for bushings for pure DC application is "DC".

4.5 Pollution parameters

The purchaser shall specify the minimum creepage distance or the minimum USCD (see IEC 60815-1) or, alternatively, the degree of pollution severity.

The necessary creepage distance may be determined from the USCD by:

$$C \times U_1 \times k_d \quad (2)$$

where

C is the minimum nominal unified specific creepage distance (USCD), see IEC 60050-471:2007, 471-01-16;

k_d is the correction factor depending on the average diameter of the bushing.

U_1 is the rated continuous dc voltage or the r.m.s. value of the combined dc and ac phase to earth voltage, depending on the point of application of the bushing in the electrical scheme (kV);

For combined voltages:

$$U_1 = \sqrt{\left((N - 0,5) \times U_{dm} \right)^2 + \left(\frac{U_{vm}}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (3)$$

For indoor bushings, the minimum USCD value shall be 17 mm/kV.

If artificial pollution tests are required, they shall be performed in accordance with 10.1.

NOTE Values for USCD and k_d for outdoor bushings are under consideration by IEC TC 36: Insulators.

5 Operating conditions

5.1 General

Bushings conforming to this standard shall, unless otherwise stated, be suitable for operation at rated values under conditions defined in IEC 60137 and summarized as follows:

- The ambient air temperature is within the limits specified in Table 1.
- Altitude does not exceed 1 000 m.
- The temperature of the transformer insulating oil in which the oil end of the bushing is immersed is within the limits specified in Table 1.
- The temperatures and temperature rises of external connections and metal parts in contact with insulating materials do not exceed the limits given in Table 2 of IEC 60137:2008.
- No moisture condensation is present on the outer surface of the indoor part of outdoor-indoor bushings, indoor bushings and indoor-immersed bushings.

Table 1 – Temperature of ambient air and immersion media (see 5.1)

Subject	Temperature °C
Ambient air:	
– maximum outdoors	40
– maximum indoors (valve hall)	^a
– maximum daily mean (open air)	30
– maximum daily mean (air-insulated ducting)	70
– maximum annual mean	20
– minimum indoors (valve hall)	5
– minimum outdoor	-30
Oil in transformers:	
– maximum	
• for rated power	100
• for long time emergency duty ^b	115
– maximum daily mean	90 ^d
Other media: (gaseous and non-gaseous)	^c
NOTE 1 The daily mean temperature of the immersion medium should be calculated by averaging 24 consecutive hourly readings.	
NOTE 2 By agreement between purchaser and supplier, other temperature ranges may be adopted.	
^a maximum valve hall temperature shall be specified for each specific project and that the maximum valve hall ambient temperature is normally ranging from 40 °C to 60 °C depending of the technology used. ^b The values for oil in transformers are in accordance with IEC 60076-1 and IEC 60076-2. The value for emergency duty is in accordance with IEC 60076-7. ^c In the absence of other information, reference should be made in principle to the corresponding IEC apparatus standard for which the bushing is intended, whereby particular attention should be paid to bushings one end of which is to be immersed in gas. ^d Where a maximum daily mean temperature of 95 °C is specified in accordance with IEEE Std C57.19.00, the bushing temperature rise shall be reduced appropriately.	

5.2 Factors affecting the design, testing and application

Where particular operating conditions exist, they shall be specified by the purchaser.

Examples of such conditions are as follows:

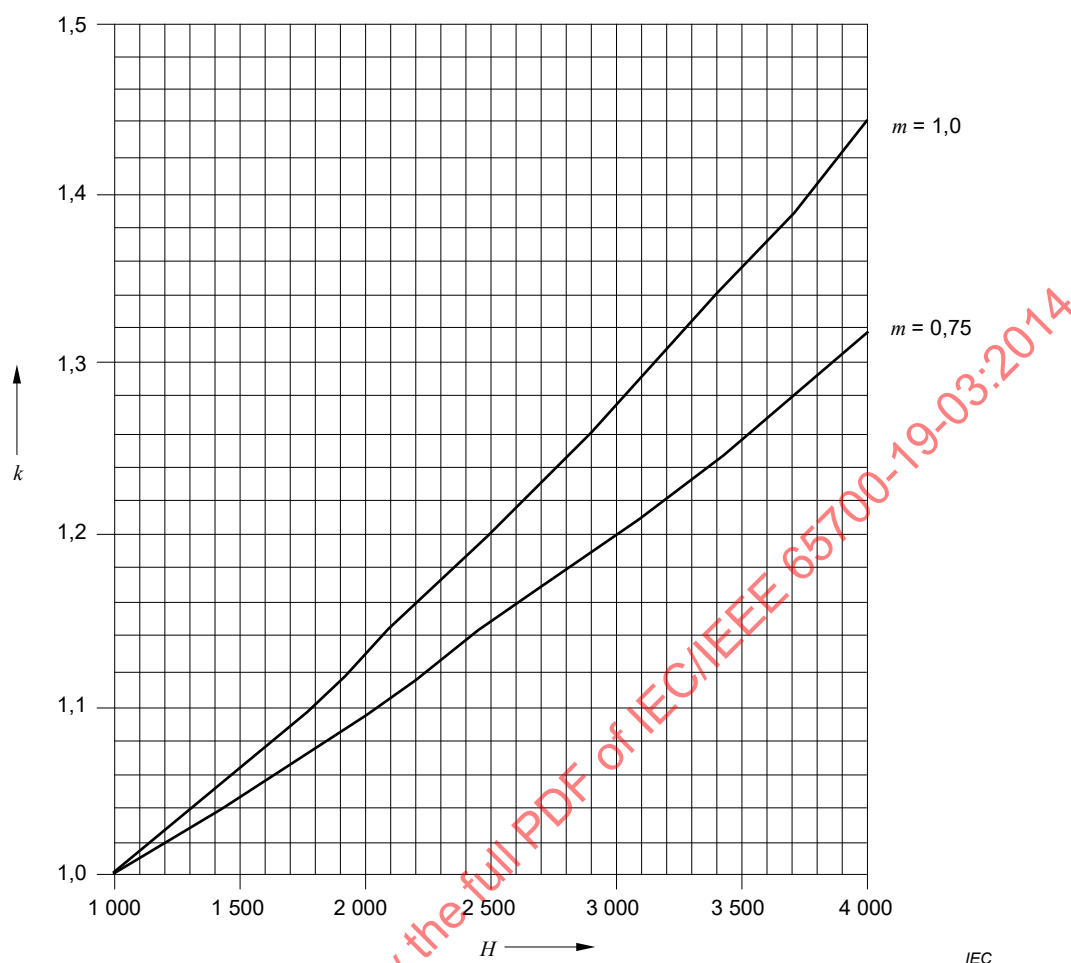
- The ambient air temperature, for bushings operating wholly or partially in the valve hall. It is common to have a maximum HVDC valve hall air temperature well over the standardised 40 °C maximum air temperature. Values up to 60 °C are of usual practice. Such high ambient air temperatures have significant effects on dielectric withstand as well as maximum operating temperature. If a valve hall air ambient temperature exceeding 40 °C is specified care should be taken regarding dielectric withstand performance as well as maximum operating temperature.
- Surface creepage distance may be achieved using shed material of porcelain, silicone rubber or other materials. Where silicone rubber is used the selection and amount of fillers may have a large impact on the useful life. The type of shed profile such as anti-fog or long-short (ratio 0,7) may improve voltage withstand conditions over even or uniform shed design

- c) Inclination.
- d) Seismic loading.
- e) Vibrations or shocks.
- f) Transportation or storage conditions.
- g) Other thermal conditions.
- h) Damaging fumes or vapours, excessively abrasive or conducting dusts, explosive mixtures of dust or gases, salt spray, icing, etc.
- i) Proximity of insulating barriers or earthed walls within the transformer or reactor.
- j) Proximity of the walls or roof of a building.
- k) Ice loading conditions.
- l) Overloads.

5.3 Altitude correction

Although the insulation level refers to sea level, bushings corresponding to this standard are declared suitable for operation at any altitude not exceeding 1 000 m. In order to ensure that the external withstand voltages of the bushing are sufficient at altitudes exceeding 1 000 m, the arcing distance normally required shall be increased by a suitable amount. It is not necessary to adjust the radial thickness of insulation or the clearance of the immersed end. The puncture strength and the flashover voltage in the immersion medium of a bushing are not affected by altitude.

For installations at an altitude higher than 1 000 m, the arcing distance under the standard reference atmospheric conditions shall be determined in order to withstand the voltages obtained by multiplying the withstand voltages required at the service location by a factor k in accordance with Figure 1.



These factors are calculated with the following equation:

$$k = e^{m(H-1\,000)/8\,150}$$

where

H is the altitude (m);

$m = 1$ for the power frequency and lightning impulse voltage;

$m = 0,75$ for the switching impulse voltage.

NOTE Limited information is available for altitude correction under DC conditions. A factor $m = 1$ is considered conservative.

Figure 1 – Altitude correction factor

Owing to the limitations of puncture strength and flashover voltage in the immersion medium, it may not always be possible to check the adequacy of the increased arcing distance by actual tests at any altitude lower than that of operation. In such a case the supplier shall demonstrate that arcing distance of the bushing is adequate.

5.4 Interchangeability

DC bushings in converter transformers and smoothing reactors are not normally interchangeable with other DC bushings of the same voltage and current. This is because the condenser foil arrangement must align properly with the insulating barriers to minimise voltage stresses. This may not apply to DC bushings without insulating barriers.

6 General requirements

6.1 Electrical requirements

- Voltage withstand tests
- Partial discharge
- Dissipation factor and capacitance
- Bushing voltage tap. Capacitance graded bushings may be provided with a voltage tap. This tap is normally intended for use as a voltage divider during normal operation and may require the use of additional capacitance to limit the output voltage and protective devices. These additional components may be mounted directly to the bushing or in the transformer control cubicle.
- Bushing test tap. Capacitance graded bushings may be provided with a bushing test tap. This tap is normally grounded and is intended for measurement of dissipation factor, capacitance from conductor to tap, and partial discharge. Since the capacitance from tap to ground is not controlled, the tap is not intended for use as a voltage divider during normal operation. Bushing test tap functionalities may be integrated in voltage tap.
- When not in use the voltage tap and test tap shall be effectively grounded throughout the life of the bushing
- Creepage distance

6.2 Mechanical requirements

- Dimensions
- Cantilever strength
- Internal pressure and vacuum
- Apparatus bushings shall be designed to withstand full vacuum when mounted in the apparatus tank
- Draw lead bushing cap pressure

The liquid or gas for internal insulation of the bushing shall comply with their relevant material standards:

- IEC 60376 for new SF₆ or IEC 60480 for used SF₆.
- IEC 60296 for oil, or.
- IEC 60836 or IEC 60867 for synthetic fluid.

6.3 Nameplate markings

The following information shall appear on all bushing nameplates:

- Manufacturer's name, identification number, type, year of manufacture and serial number.
- Rated continuous DC voltage (for bushings for pure DC application, see 4.1.1).
- Rated peak voltage (for bushings for combined voltage applications, see 4.1.2).
- Rated continuous DC current, where applicable.
- Rated continuous AC current, where applicable.
- Dry lightning impulse voltage withstand.
- Dry/wet switching impulse voltage withstand or dry power-frequency voltage withstand.
- Capacitance, C_1 and C_2 , on all bushings equipped with voltage taps, and C_1 on all bushings equipped with test taps.
- Dissipation factor measured from conductor to tap, where applicable.

- Type of insulating gas, and minimum pressure, where applicable.
- Mass if greater than 100 kg.
- Maximum angle of mounting if exceeding 30° from vertical.

7 Test requirements

7.1 General requirements

The tests shall be made in accordance with Clause 7 of IEC 60137:2008 (Test requirements), except where described differently below. Where applicable, reference shall also be made to IEC 61378-2, IEC 61462 and to IEC 62155.

- Most of the dielectric routine and type tests can be carried out with the bushing axis at any inclination, regardless of its intended service angle where appropriate.
- The wet switching impulse voltage withstand test and the thermal, mechanical and special tests shall be carried out with the bushing mounted at its intended service angle, unless other arrangements have been agreed and if shown compatible and sufficient.
- DC tests on converter transformer and reactor bushings shall be carried out with external insulation (barriers) and ground planes surrounding the lower end of the bushing in a position as similar as possible to that of the intended service condition. The simulation of the insulation arrangement may be agreed between the manufacturer and the purchaser.
- In cases where a bushing is exposed to DC applied voltage withstand and Polarity Reversal tests and it is tested with a temporary insulating barrier system in oil, it is recommended that the conductivity and fibre content of the oil are recorded.
- DC tests on wall (roof) bushings shall be carried out with wall ground plane and mounting arrangements as similar as possible to that of the intended service condition.
- Except for mechanical tests, all tests shall be carried out with the bushing mounted on a supporting structure with their ends in the media of the type in which they are intended to operate.

7.2 Test Conditions

7.2.1 Air temperature

The ambient temperature at the time of test shall be between 10 °C and 40 °C.

7.2.2 Humidity

The absolute humidity at the time of test shall be between 1,0 g/m³ and 15,0 g/m³.

7.2.3 Correction factors

Correction factors shall be in accordance with IEC 60137:2008, Table 7. In addition the following may be applied

- DC voltage withstand test: correction factors $k_1 \times k_2$.
- Polarity reversal test: no correction.

For cases where the maximum specified valve hall ambient air temperature exceeds 40 °C, test voltages shall be corrected for the high ambient temperature and specified minimum ambient air humidity. Equivalent "reference ambient air" test voltages shall be calculated by dividing test voltages by calculated k_1 and/or k_2 where applicable. Reference ambient air is considered to be 20 °C, a relative humidity of 60 % (11g/m³) and atmospheric air pressure of 101,3 kPa. Test voltages shall be further corrected for differences between atmospheric conditions within the test bay and reference ambient air conditions.

7.3 Test classification

7.3.1 Type (or design) tests

Type tests are those made to determine the adequacy of the design of a particular type, style, or model of power apparatus bushing; to meet its assigned ratings, to operate satisfactorily under usual service conditions or under special conditions if specified, and to demonstrate compliance with appropriate standards of the industry.

Type tests are made only on representative bushings to substantiate the ratings assigned to all bushings of the same design. These tests are not intended to be made as a part of normal production. The applicable portions of these tests may also be used to evaluate modifications of a previous design and to assure that performance has not been adversely affected. Test data from previous designs may be used for current designs where appropriate. Once made, the tests need not be repeated unless the design is changed so as to modify performance.

During the type tests, the bushing will be stressed higher than usually encountered in service and must withstand these tests without evidence of partial or complete failure. Hidden damage that may occur during type testing can usually be detected by comparing initial and final values of capacitance, dissipation factor and partial discharge quantity.

Type tests are included in Table 2; applicability to particular bushing types is detailed in the relevant clause.

Table 2 – Type, routine and special tests

Test	Clause		
	Type	Routine	Special
Measurement of dissipation factor and capacitance		9.1	
Power-frequency voltage withstand	8.1	9.3	
Dry lightning impulse voltage withstand	8.2	9.2	
Dry or wet switching impulse voltage withstand	8.3	9.6	
DC applied voltage withstand with partial discharge measurement	9.4	9.4	
DC polarity reversal	9.5	9.5	
Electromagnetic compatibility (EMC)	8.4		
Temperature rise	8.5		
Cantilever load withstand	8.6		
Tightness test on liquid-filled, compound-filled and liquid-insulated bushings	8.7		
Internal pressure test on gas-filled, gas insulated and gas impregnated bushings	8.8		
Verification of dimensions	8.9	9.12	
Draw-lead bushing cap pressure	8.10		
Test of tap insulation		9.7	
Internal pressure test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings		9.8	
Tightness test on liquid-filled, compound-filled and liquid-insulated bushings		9.9	
Tightness test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings		9.10	
Tightness test at flange or other fixing device		9.11	
Artificial pollution withstand			10.1
Even wetting DC voltage withstand			10.2
Uneven wetting DC voltage withstand			10.3

7.3.2 Routine tests

Routine tests are included in Table 2; applicability to particular bushing types is detailed in the relevant clause. The sequence of tests is not specified and may be agreed between purchaser and supplier. It is recommended that tests of tap insulation and tightness tests are performed before dielectric test. Measurement of dissipation factor and capacitance shall be performed before and after withstand tests to verify no change in the condition of the bushing.

7.3.3 Special tests

Special tests are included in Table 2 and shall only be performed when contractually agreed upon between purchaser and supplier. These tests are applicable only to outdoor bushings.

8 Type tests

8.1 Dry power-frequency voltage withstand test with partial discharge measurement

8.1.1 Applicability

This test is applicable to all types of bushings.

8.1.2 Test method and requirements

The testing shall be performed as specified in 9.3.2 except that the voltage U_{ac} in step c) shall be applied for 1 h. Partial discharge measurements shall be made continuously and a recording shall be taken at 5 min intervals.

8.1.3 Acceptance

The acceptance criteria in respect of partial discharge levels are in accordance with 9.3.3. If a flashover occurs outside the insulating envelope, the test may be repeated. If the repeat test also results in a flashover, the bushing shall be deemed to have failed.

Flashovers that are proven to be external to the test object shall be disregarded.

8.2 Dry lightning impulse voltage withstand test (BIL)

8.2.1 Applicability

This test is applicable to all types of bushings.

8.2.2 Test method and requirements

The full-wave test voltage shall be as specified by the purchaser.

The tests shall be performed with the following sequence of applications:

- 15 full lightning impulses of positive polarity, followed by
- 15 full lightning impulses of negative polarity

of the standard lightning impulse 1,2/50 μ s.

Bushings for transformers of BIL greater than 550 kVp shall be subjected to

- 15 full lightning impulses of positive polarity, followed by
- 1 full lightning impulse of negative polarity at 110 % of the rated BIL, followed by
- 5 chopped lightning impulses of negative polarity at 121 % of the rated BIL, and by
- 14 full lightning impulses of negative polarity at 110 % of the rated BIL.

The time to sparkover on the chopping device shall be between 2 μ s and 6 μ s.

It is permissible, after changing polarity, to apply some impulses of minor amplitude before the application of the test impulses. The time intervals between consecutive applications of the voltage shall be sufficient to avoid effects from the previous applications of voltage.

8.2.3 Acceptance

The bushing shall be deemed to have passed the test if the criteria given in IEC 60137:2008 (8.3.3) are met.

8.3 Dry or wet switching impulse voltage withstand test (SIL)

8.3.1 Applicability

The dry test is applicable to all bushings. The wet test is applicable to outdoor bushings. When a wet test is made, a dry test is not necessary.

8.3.2 Test method and requirements

To simulate the service condition, the bushing shall comply with the conditions as mentioned in 7.1. Artificial rainfall conditions shall comply with Table 1 of IEC 60060-1:2010 (Precipitation conditions for standard procedure).

NOTE Even distribution of rain over very long insulators is difficult and special agreement may be needed.

The test voltage value shall be as specified by the purchaser. The test procedure shall be in accordance with the requirements given in IEC 60137:2008 (8.4.2).

8.3.3 Acceptance

The bushing shall be deemed to have passed the test if the criteria given in IEC 60137:2008 (8.4.3) are met.

8.4 Electromagnetic compatibility tests (EMC)

8.4.1 Emission test

8.4.1.1 Applicability

This test is applicable for all types of bushings having a rated continuous DC voltage equal to and above 150 kV.

8.4.1.2 Test method and requirements

The test setup shall be prepared as described under the equivalent clause in IEC 60137. Calibration methods for the measuring instrument and for the measuring circuit are given in CISPR 16-1 and CISPR 18-2 respectively.

An AC voltage equal to $1,1 U_p/\sqrt{2}$ shall be applied to the bushing and maintained for at least 5 min, U_p being the rated peak voltage (see clause 4.1.2). The voltage shall then be decreased

by steps down to $0,3 U_p/\sqrt{2}$, raised again by steps to the initial value and finally decreased by steps to $0,3 U_p/\sqrt{2}$. At each step a radio interference measurement shall be taken and the radio interference level, as recorded during the last series of voltage reductions, shall be plotted versus the applied voltage; the curve so obtained is the radio interference characteristic of the bushing. The amplitude of voltage steps shall be approximately $0,1 U_p/\sqrt{2}$.

8.4.1.3 Acceptance

The bushing shall be considered to have passed the test if the radio interference level at $1,1 U_p/\sqrt{2}$ does not exceed $2\,500\,\mu\text{V}$. Temporary discharge activities, which can rise up during major voltage adjustments, may be neglected.

If it can be shown that the bushing, without external shielding, is partial discharge free, i.e. there is no discharge above the background noise level specified in 9.3.2, it can be considered to pass the emission test requirements without the need for test.

8.4.2 Immunity test

DC bushings are not affected by possible electro-magnetic emissions. This test is therefore not required

8.5 Temperature rise test

8.5.1 Applicability

This test is applicable to all types of bushings.

8.5.2 Test method and requirements

Testing shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (8.7). Other test conditions may be used which reflect the particular service conditions (see 5).

The temperature of the surrounding air shall be between $10\,^{\circ}\text{C}$ and $40\,^{\circ}\text{C}$. No corrections for variation of the ambient temperature within this range shall be applied. For projects where the HVDC valve hall air ambient temperature exceeds $40\,^{\circ}\text{C}$ the valve hall bushing air side should preferably be enclosed during the temperature rise test. The enclosure should be large enough not to interfere with thermal convection of air along the bushing surface, and simulate the maximum specified valve hall ambient air temperature with a tolerance of $\pm 2\,^{\circ}\text{C}$. If the thermal test is performed without simulating the valve hall ambient air temperature, for example, performed at normal laboratory air temperature (between $10\,^{\circ}\text{C}$ and $40\,^{\circ}\text{C}$), then the maximum allowable bushing hot-spot and air terminal temperatures shall be reduced by a pre-defined quantity. This quantity depends on the media to which the bushing is in contact during the test. It may be set to the difference between the maximum valve hall ambient air temperature and the ambient temperature during test. If it can be demonstrated by calculations basing on real tests that the influence of the hall air ambient temperature on the bushing hot-spot is lower than this simple difference, the reduction quantity may be lower.

The use of a typical service connector is recommended during the temperature rise test as the air side terminal working temperature could be the critical point at the high ambient air temperatures prevailing in the HVDC valve hall.

DC bushings (wall and transformer bushings) are subject to significant harmonic current content. Such harmonic current can not be easily reproduced in laboratories. Equivalent DC and AC power frequency current (50 Hz or 60 Hz) shall then be used. The amplitude of the equivalent test current shall produce the same total watt losses calculated for the specified harmonic current spectrum.

The equivalent test current shall be calculated as follows or by other agreed methods:

$$I_{\text{eq,DC}} = \sqrt{\frac{I_{\text{DC}}^2 x R_{\text{DC}} + \sum_{h=1}^n I_h^2 x R_h}{R_{\text{DC}}}} \quad (4)$$

In the case of power frequency test

$$I_{\text{eq,AC}} = \sqrt{\frac{I_{\text{DC}}^2 x R_{\text{DC}} + \sum_{h=1}^n I_h^2 x R_h}{R_{\text{AC}}}} \quad (5)$$

See the list of variables in 3.2.

The R_h values should be determined by measurements or calculations. The calculation method outlined in IEEE Std C37.23 may be used. Other calculation methods involving finite element models may be used if they have been proven to be adequate. The calculation method should be agreed upon.

NOTE Annex B gives further information on the determination of equivalent current.

8.5.3 Acceptance

The bushing shall be deemed to have passed the test if the limits of IEC 60137:2008 (Table 2) are met.

8.6 Cantilever load withstand test

8.6.1 Applicability

The test is applicable to all types of bushings (air side).

8.6.2 Test method and requirements

The test values shall be in accordance with Table 3.

The test shall be carried out in accordance with the requirements given in IEC 60137:2008 (8.9.2).

For bushings having more than one terminal at the air end, the full test load shall be applied to each terminal successively. For wall bushings each side shall be tested separately.

Table 3 – Minimum values of cantilever withstand load

Rated lightning impulse withstand voltage kV	Rated current A					
	≤ 1 250		> 1 250 to < 3 150		≥ 3 150	
	Cantilever operating load N (Newton)					
	Normal load	Heavy load	Normal load	Heavy load	Normal load	Heavy load
< 450	625	1 000	1 000	1 575	2 000	2 000
450 to 650	800	1 575	1 250	2 000	2 000	2 000
750 to 950	800	2 000	1 250	2 500	2 000	2 500
≥ 1 050	1 250	2 000	1 575	2 500	2 500	2 500
	Cantilever test load N (Newton)					
	Normal load	Heavy load	Normal load	Heavy load	Normal load	Heavy load
< 450	1 250	2 000	2 000	3 150	4 000	4 000
450 to 650	1 600	3 150	2 500	4 000	4 000	4 000
750 to 950	1 600	4 000	2 500	5 000	4 000	5 000
≥ 1 050	2 500	4 000	3 150	5 000	5 000	5 000
NOTE 1 These values are modified from IEC 60137:2008, Table 1 for harmonization and regrouped.						
NOTE 2 Cantilever operating loads include terminal load and wind pressure (70 Pa), see IEC 61463.						
NOTE 3 For bushings operating at an angle >30° to the vertical, the effect of bushing self weight should be considered. The values given above correspond to vertical bushings that are to be tested in a vertical position. If a tilted or horizontal bushing is to be tested vertically, then an equivalent force shall be added to achieve the bending moment at the flange caused by the weight of the bushing in its operating position. If a vertical bushing is to be tested horizontally, then the test load can be reduced in the same manner. Equipment not attached during test, such as shielding arrangement, should be compensated for with corresponding mass attached in similar way as in operation						
NOTE 4 For bushings, where upper and lower insulating envelopes are assembled by clamping force on the central fixing conductor, it is recommended to choose the cantilever test load taking into account the thermal expansion of the conductor due to the rated current flow.						
NOTE 5 Other cantilever operating loads may be specified but the test load should always be at least twice the operating load.						
NOTE 6 To convert from Newton to pound-force multiply the values of cantilever withstand load by 0,225.						

8.6.3 Acceptance

The bushing shall be deemed to have passed the test if the criteria given in IEC 60137:2008 (8.9.3) are met.

8.7 Tightness test on liquid-filled, compound-filled and liquid-insulated bushings

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (8.10).

8.8 Internal pressure test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (8.11), IEC 61462 or IEC 62155, where appropriate.

8.9 Verification of dimensions

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (8.13).

8.10 Draw-lead bushing cap pressure test

8.10.1 Applicability

This test is applicable to all immersed bushings having a draw-lead conductor.

8.10.2 Test method and requirements

The bushing shall be assembled as for normal operation. A pressure of 1 bar gauge $\pm 0,1$ bar shall be applied inside the bushing cap assembly and draw-lead central tube for a period of 1 h.

8.10.3 Acceptance

The bushing shall be considered to have passed the test if there is no evidence of leakage.

9 Routine tests

9.1 Measurement of dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and capacitances

9.1.1 Applicability

This test is applicable to all capacitance graded bushings.

9.1.2 Test method and requirements

Dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and capacitance measurements shall be made before and after the dry power-frequency voltage withstand test and the DC tests (7.3.2) and in accordance with IEC 60137:2008 (9.1).

These measurements shall be made at a voltage between 2 kV and 20 kV and at a voltage not exceeding the dry power-frequency withstand voltage. The $\tan \delta$ and the capacitance measurement methods shall be in accordance with IEC 60137:2008 (9.1.2).

9.1.3 Acceptance

The bushing shall be deemed to have passed the test if the changes are within the limits stated in Table 4.

Table 4 – Maximum values of $\tan \delta$ and $\tan \delta$ increase

Type of bushing insulation	Maximum Value of $\tan \delta$			Capacitance
	Value at highest test voltage	Increase between 10 kV and highest test voltage	Acceptable change ^a	Acceptable change % ^b
Oil-impregnated paper	0,005	0,000 2	+0,000 2	+1,0
Resin-impregnated paper	0,007	0,000 4	+0,000 4	+1,0
Gas	0,005	0,000 2	+0,000 2	+1,0
^a The arithmetic difference in $\tan \delta$ measured at 10 kV or at highest test voltage before and after withstand voltage tests shall be within the specified limits. For example, if the $\tan \delta$ of oil-impregnated paper bushing was 0,40 % before the withstand tests, the maximum acceptable $\tan \delta$ after the tests shall be 0,42 %.				
^b The percentage change in capacitance after the withstand voltage tests based on the initial value shall be within the specified limit. The measurement shall be made at a voltage given in 9.1.2. The limit for capacitance-graded bushings is based on an arrangement of 100 capacitive layers. If the number of capacitive layers differs from 100 then the limit shall be $(1/\text{number of layers}) \times 100$.				

9.2 Dry lightning impulse voltage withstand test (BIL)

9.2.1 Applicability

This test is applicable to all DC bushings with dry lightning impulse voltage withstand of 550 kV or greater. Where the rated SIL exceeds 83 % of the BIL then, by agreement between purchaser and supplier, a routine dry lightning and/or dry switching impulse voltage withstand test may be carried out (see 9.6).

9.2.2 Test method and requirements

The test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (9.2.2).

The test voltage shall be as specified by the purchaser.

9.2.3 Acceptance

The bushing shall be deemed to have passed the test if there is no flashover or puncture of the insulation. To prove the absence of puncture during the test recording of the grounding current is advisable.

9.3 Dry power-frequency voltage withstand test with partial discharge measurement

9.3.1 Applicability

This test is applicable to all bushings.

9.3.2 Test method and requirements

The test shall be performed generally as specified in IEC 60137 and IEC 60270 and as specified below. The test shall be made at a frequency of 50 Hz or 60 Hz.

a) Measurement of partial discharges at a test voltage U_{ac} r.m.s., calculated as follows:

- For converter transformer bushings:

$$U_{AC} = 1,15 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times \left[(N - 0,5) \times U_{dm} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_{vm} \right] \quad (6)$$

- For smoothing reactor bushings:

$$U_{AC} = 1,15 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times N \times U_{dm} \quad (7)$$

- For wall (roof) bushings, the test voltages shall be calculated as above, as applicable, except that the factor 1,15 shall be reduced to 1,0.
- Converter transformer side:

$$U_{AC} = 1,0 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times \left[(N - 0,5) \times U_{dm} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_{vm} \right] \quad (8)$$

- DC side:

$$U_{AC} = 1,0 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times N \times U_{dm} \quad (9)$$

- b) A 1 min dry withstand test shall be carried out at AC r.m.s. voltage level equal to the dry lightning impulse withstand voltage level divided by 2,1. If BIL/2,1 is less than U_{ac} for the bushing, then proceed with U_{ac} for 60 s as the power frequency withstand test level. No partial discharge measurements are required during this test.
- c) Repeat measurements of partial discharge at voltage equivalent to U_{ac} shall be made.

9.3.3 Acceptance

The bushing shall be considered to have passed the test if no flashover or puncture occurs and the partial discharge quantity does not exceed 10 pC as shown in Table 5. If there is a puncture, the bushing shall be considered to have failed the test. For capacitance graded bushings, it is assumed that a puncture has occurred if the capacitance measured after the test rises above the capacitance previously measured by about the amount attributable to the capacitance of one layer. If a flashover occurs the test shall be repeated once only. If, during the repetition of the test, no flashover or puncture occurs, the bushing shall be considered to have passed the test.

Table 5 – Maximum values of partial discharge quantity

Type of bushing insulation	Maximum discharge quantity pC measured at
	U_{ac}
Oil-impregnated paper	10
Resin-impregnated paper	10
Gas	10

9.4 DC applied voltage withstand test with partial discharge measurement

9.4.1 Applicability

This test is applicable to all DC bushings with a rated DC continuous voltage of 150 kV or higher. For DC bushings having rated voltage less than 150 kV, the DC routine tests shall be performed as sample tests. For such tests, one bushing out of 6 bushings belonging to the

same manufacturing lot shall be DC tested. If the bushing failed one of the DC tests, two further bushings belonging to the same manufacturing lot shall be subjected to DC tests. If one of the additional two bushings fails one of the tests all bushings of the manufacturing lot shall be DC tested.

9.4.2 Test method and requirements

During the test, the temperature of the oil shall be between 10 °C and 40 °C.

For wall bushings, no preconditioning of the insulation structure at a lower voltage level is permitted and the DC voltage shall be raised to the test level within a period not exceeding 1 min. For bushings to be installed on converter transformers or on smoothing reactors, the DC voltage shall be raised to the converter transformer or the smoothing reactor DC voltage test level within a period not exceeding 1 min and then raised to the bushing DC voltage test level within the next minute. For all cases, the DC voltage shall then be held for 2 h, after which the voltage shall be reduced to zero within a period not exceeding 1 min.

Partial discharge measurements using measuring equipment as specified in IEC 60270 shall be performed during the entire DC applied voltage withstand test. Positive polarity shall be used.

The DC test voltage shall be calculated as follows:

- For converter transformer bushings:

$$U_{dc} = 1,15 \times 1,5 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,7 \times U_{vm}] \quad (10)$$

- For smoothing reactor bushings:

$$U_{dc} = 1,15 \times 1,5 \times N \times U_{dm} \quad (11)$$

- For wall bushings, the test voltage shall be as for the appropriate plant to which it is connected except that the multiplier 1,15 shall be reduced to 1,0.

- Converter transformer side:

$$U_{dc} = 1,0 \times 1,5 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,7 \times U_{vm}] \quad (12)$$

- DC side:

$$U_{dc} = 1,0 \times 1,5 \times N \times U_{dm} \quad (13)$$

9.4.3 Acceptance

The bushing shall be considered to have passed the test if:

- No more than 10 pulses of partial discharge with magnitude equal to or greater than 2 000 pC are recorded during the last 30 min of the test. Pulses that are proven to be external to the test object shall be disregarded. If this condition is not met, then the test may be extended for 30 min, with the aforementioned criteria applying. There may be only one 30 min extension.
- No flashover or puncture shall occur. If there is a puncture, the bushing shall be considered to have failed the test. For capacitance graded bushings, it is assumed that a puncture has occurred if the capacitance measured after the test rises above the capacitance previously measured by about the amount attributable to the capacitance of one layer. If a flashover occurs, the test shall be repeated once only. If, during the repetition of the test, no flashover or puncture occurs, the bushing shall be considered to have passed the test.

NOTE The use of a partial discharge v time distribution curve may be useful in comparing the performance of bushings of a similar type.

9.5 Polarity reversal test with partial discharge measurement

9.5.1 Applicability

This test is applicable to all DC bushings with a rated DC continuous voltage of 150 kV or higher. For DC bushings having rated voltage less than 150 kV, the DC routine tests shall be performed as sample tests. For such tests, one bushing out of 6 bushings belonging to the same manufacturing lot shall be DC tested. If the bushing failed one of the DC tests, two further bushings belonging to the same manufacturing lot shall be subjected to DC tests. If one of the additional two bushings fails one of the tests all bushings of the manufacturing lot shall be DC tested.

9.5.2 Test method and requirements

During the test, the temperature of the oil, if applicable, shall be between 10 °C and 40 °C.

A double reversal test shall be used as shown in Figure 2.

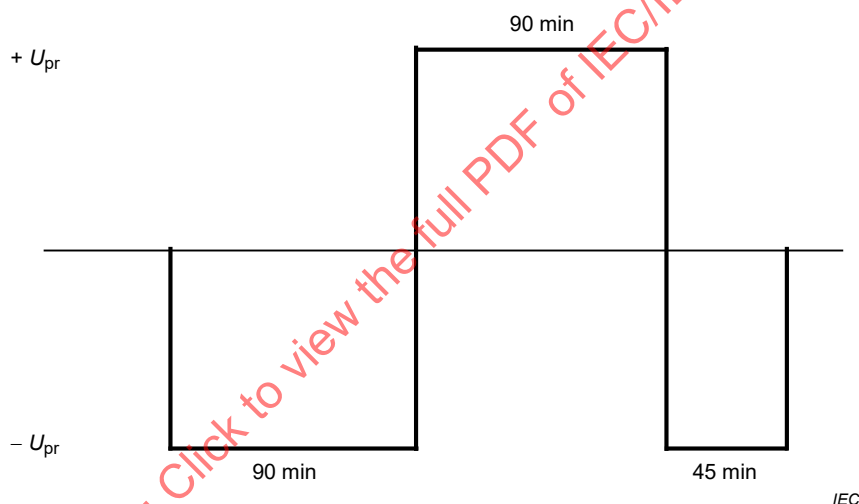


Figure 2 – Polarity reversal test profile

The polarity reversal test shall be performed after the DC applied voltage withstand test.

No preconditioning of the insulation structure at lower voltage is permitted. After the DC applied voltage withstand test, the bushing shall normally be earthed and completely discharged before the polarity reversal test is initiated. The time duration required for a complete discharge shall be agreed between the parties according to the type of bushing and shall be long enough to avoid any undue influence of the trapped charges on the results of this test.

However, in order to save time during routine tests and upon agreement between the parties, the polarity reversal test may be initiated at any time after the DC applied voltage withstand test.

The test sequence shall comprise:

- 90 min at negative polarity followed by
- 90 min at positive polarity followed by

- 45 min at negative polarity and
- reduce the voltage to zero.

The time for the polarity reversal shall be as short as possible, consistent with the testing equipment available, but in no case more than 2 min. The polarity reversal shall be considered to be complete when the voltage has reached 100 % of the test value. The partial discharge levels shall be monitored during the entire test sequence.

Partial discharge measurements shall be made with equipment as specified in IEC 60270.

The polarity reversal test voltage shall be calculated as follows:

- For converter transformer bushings:

$$U_{pr} = 1,15 \times 1,25 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,35 \times U_{vm}] \quad (14)$$

- For smoothing reactor bushings:

$$U_{pr} = 1,15 \times 1,25 \times N \times U_{dm} \quad (15)$$

- For wall bushings, the test voltage shall be as for the appropriate plant to which it is connected except that the multiplier 1,15 shall be reduced to 1,0.

– Converter transformer side:

$$U_{pr} = 1,0 \times 1,25 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,35 \times U_{vm}] \quad (16)$$

– DC side:

$$U_{pr} = 1,0 \times 1,25 \times N \times U_{dm} \quad (17)$$

9.5.3 Acceptance

The bushing shall be considered to have passed the test if:

- No more than 10 pulses of partial discharge with magnitude equal to or greater than 2 000 pC are recorded during any sliding 30 min window of the test time excluding the reversal periods.
- No flashover or puncture shall occur. If there is a puncture, the bushing shall be considered to have failed the test. For capacitance graded bushings, it is assumed that a puncture has occurred if the capacitance measured after the test rises above the capacitance previously measured by about the amount attributable to the capacitance of one layer. If a flashover occurs the test shall be repeated once only. If, during the repetition of the test, no flashover or puncture occurs, the bushing shall be considered to have passed the test.

NOTE The use of a partial discharge v time distribution curve may be useful in comparing the performance of bushings of a similar type.

9.6 Dry Switching impulse withstand test

9.6.1 Applicability

This test is applicable to all DC bushings with dry lightning impulse voltage withstand of 550 kV or greater, where the rated SIL exceeds 83 % of the BIL. By contractual agreement a routine dry lightning and/or dry switching impulse voltage withstand test may be carried out.

9.6.2 Test method and requirements

The test shall be carried out in accordance with 8.3 except that five negative polarity impulses only shall be applied.

The test voltage shall be as specified by the purchaser.

9.6.3 Acceptance

The bushing shall be deemed to have passed the test if there is no flashover or puncture of the insulation.

9.7 Test of tap insulation

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (9.5).

9.8 Internal pressure test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (9.6) and IEC 61462 or IEC 62155, where appropriate.

9.9 Tightness test on liquid-filled, compound-filled and liquid-insulated bushings

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (9.7).

9.10 Tightness test on gas-filled, gas-insulated and gas-impregnated bushings

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (9.8).

9.11 Tightness test at the flange or other fixing device

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (9.9).

9.12 Visual inspection and dimensional check

This test shall be carried out in accordance with IEC 60137:2008 (9.10).

10 Special tests

On agreement between purchaser and manufacturer, special tests shall be performed only when the electrical strength of DC insulation of bushings under pollution (see 10.1) and even wetting surface conditions (see 10.2) determine the dimensions and the design of the insulation. In addition, it may be agreed to perform uneven wetting tests on wall bushings under conditions that reproduce certain peculiar positions in service as close as possible to reality (see 10.3).

NOTE 1 The electrical strength of a wall bushing may be affected by uneven wetting of the outdoor insulator surfaces which can take place when the mounting flange of bushing is shielded by the building wall, creating a dry zone.

NOTE 2 The uneven wetting of the insulator wall bushing surfaces may lead to flashover at much lower voltages than those obtained during pollution or wet test with uniformly wetted surfaces. In addition, the local current surging due to the uneven voltage distribution could overstress the internal insulation of the bushing, which may be detrimental for its integrity.

10.1 Artificial pollution test

10.1.1 Applicability

An artificial pollution test may be applied to bushings having porcelain insulators to be used outdoors and exposed to polluted atmospheres.

10.1.2 Test method and requirements

If a test is deemed necessary, the specific test method to be applied and the degree of pollution withstand shall be specified or agreed upon between purchaser and manufacturer at the time of ordering. Proposals for artificial pollution test methods are described in IEC 61245.

NOTE The reproducibility of artificial pollution tests on bushings, with weather sheds of silicon rubber, performed in different laboratories has not been established in a manner consistent with other standardized tests. However, further guidance will become available as research continues and when appropriate inter-laboratory comparisons are made. The problem is under consideration by IEC TC 36: Insulators.

The DC withstand test voltage shall be specified. In general, it coincides with the rated continuous DC voltage. The tests are usually carried out at negative polarity.

10.1.3 Acceptance

The object of this test is to confirm withstand at the specified degree of pollution and specified test voltage. The specified characteristics of the bushing are confirmed if no flashover or puncture occurs during three consecutive individual tests performed in accordance with the specified or agreed procedure. If there is a puncture, the bushing shall be considered to have failed the test. If only one flashover occurs, a fourth test shall be performed and the bushing shall then be considered to have passed the test if no further flashover or puncture occurs.

10.2 Even wetting DC voltage test

10.2.1 Applicability

The even wetting test may be applied to all outdoor bushings.

10.2.2 Test method and requirements

The condition of the bushing and its mounting arrangement for the test shall be in accordance with the requirements prescribed in 7.1. Otherwise, the angle of mounting of the bushing for this test shall be the subject of a special agreement between purchaser and manufacturer.

The test circuit shall be in accordance with IEC 60060-1.

The standard even wetting test procedure described in IEC 60060-1 shall be used, except for the test duration.

If the actual atmospheric conditions deviate from the values given in IEC 60060-1, correction shall be made in accordance with IEC 60137:2008 (Table 7).

The test voltage to be applied to the bushing shall be equal to 1,25 times the rated continuous DC voltage at both positive and negative polarity.

The test voltage shall be maintained at this value for 1 h.

Rain with different characteristics representing very light or light conductive layers on the insulator surface or having different precipitation rates may be agreed between manufacturer and purchaser. The rain precipitation shall be adjusted before starting the test.

10.2.3 Acceptance

The bushing shall be considered to have passed the test if no flashover or puncture occurs. If there is a puncture, the bushing shall be considered to have failed the test. If a flashover occurs, the test shall be repeated once only, after verifying the rain conditions.

The bushing shall be considered to have passed the test if no further flashover or puncture occurs.

10.3 Uneven wetting DC voltage test

10.3.1 Applicability

This test may be applicable to all outdoor bushings but it shall be agreed between purchaser and manufacturer.

10.3.2 Test method and requirements

The uneven wetting test is applicable to horizontal wall bushings for which the peculiar mounting arrangement in service may determine the reduction of the bushing's electrical strength. The condition of the bushing, the mounting arrangement representing service conditions and the dry zone width for the test shall be agreed between purchaser and manufacturer at the time of ordering.

NOTE The reproducibility of uneven wetting test made in different laboratories has not been established in a manner consistent with other standardized tests. However, further guidance will become available as research continues and when appropriate inter-laboratory comparisons are made.

As a guide, the following testing techniques may be adopted for the test. The dry zone located at groundside may be obtained by shielding the bushing from rain. It may be obtained by providing a rain-insulated shelter of suitable dimensions as close as possible to the bushing. The clearance between the shelter and the bushing shall be sufficient to avoid direct flashover to it. The rain water characteristics and precipitation rate shall be in accordance with the standard wetting test procedure described in IEC 60060-1. Rain with different characteristics, representing very light or light conductive layers on insulator surfaces, may be agreed between purchaser and manufacturer. The rain precipitation shall be adjusted before starting the test.

The test circuit shall be in accordance with IEC 60060-1.

The standard reference atmospheric conditions in accordance with IEC 60060-1 are not applicable and the actual atmospheric conditions shall be recorded.

The test voltage to be applied to the wall bushing shall be equal to 1,25 times the rated continuous DC voltage.

The wall bushing in its test position, and with the sheltered insulator surface still completely dry, is subjected to the specified test voltage and then the rain generation shall start. The test voltage shall be maintained until a total flashover occurs. Otherwise, it shall be maintained for at least 15 min from the start of the rain.

10.3.3 Acceptance

The bushing shall be considered as having passed the test if no flashover or puncture occurs. If there is a puncture, the bushing shall be considered to have failed the test. If a flashover occurs, the test shall be repeated once only, after verifying the rain conditions. The bushing shall be considered to have passed the test if no further flashover or puncture occurs.

11 Recommendations for transport, storage, erection, operation and maintenance

It is essential that the transport, storage and installation of bushings, as well as their operation and maintenance in service, be performed in accordance with instructions given by the manufacturer.

Consequently, the manufacturer should provide instructions for the transport, storage, installation, operation and maintenance of bushings. The instructions for the transport and storage should be given at a convenient time before delivery, and the instructions for the installation, operation and maintenance should be given by the time of delivery at the latest.

It is impossible, here, to cover in detail the complete rules for the installation, operation and maintenance of each one of the different types of apparatus manufactured, but the following information is given relative to the most important points to be considered for the instructions provided by the manufacturer.

11.1 Conditions during transport, storage and installation

A special agreement should be made between manufacturer and user if the services conditions defined in the order, cannot be guaranteed during transport and storage. Special precautions may be essential for the protection of insulation during transport, storage and installation, and prior to energising, to prevent moisture absorption due, for instance, to rain, snow or condensation. Vibrations during transport should be considered. Appropriate instructions should be given.

Gas impregnated and gas-insulated bushings should be filled to a pressure sufficient to maintain positive pressure during transportation. A factory filling pressure of $1,3 \times 10^5$ Pa at 20 °C is appropriate for all temperature categories. If sulphur hexafluoride is used for filling the bushing during transportation it should comply with IEC 60376.

11.2 Installation

For each type of bushing the instructions provided by the manufacturer should at least include the items listed below.

11.3 Unpacking and lifting

Required Information for unpacking and lifting safely, including details of any special lifting and positioning devices necessary should be given.

At the arrival on site and before the final filling, the bushing should be checked according to the manufacturer instructions. For gas impregnated and gas insulated bushings, the gas pressure measured at ambient temperature should be above the atmospheric pressure.

11.4 Assembly

When the bushing is not fully assembled for transport, all transport units should be clearly marked. Drawings showing assembly of these parts should be provided with the bushing.

11.4.1 Mounting

Instructions for mounting of bushing shall be agreed between supplier and purchaser, these instructions should indicate:

- the total mass of the bushing;
- the mass of the bushing (or heaviest part if to be assembled on site) if exceeding 100 kg;
- the centre of gravity.

The gas impregnated and gas insulated bushings should be filled with the specified gas, for example new sulphur hexafluoride complying with IEC 60376. The pressure of the gas at the end of filling, at the standard atmospheric air conditions (20 °C and 101,3 kPa), should be the rated filling pressure.

11.4.2 Connections

Instructions should include information on:

- connection of conductors, comprising the necessary advice to prevent overheating and unnecessary strain on the bushing and to provide adequate clearance distances;
- connection of any auxiliary circuits;
- connection of liquid or gas systems, if any, including size and arrangement of piping;
- connection for earthing.

11.4.3 Final installation inspection

Instructions should be provided for inspection and tests that should be made after the bushing has been installed and all connections have been completed.

These instructions should include:

- a schedule of recommended site tests to establish correct operation;
- procedures for carrying out any adjustment that may be necessary to obtain correct operation;
- recommendations for any relevant measurements that should be made and recorded to help with future maintenance decisions;
- instructions for final inspection and putting into service.

The results of the tests and inspection should be recorded in a commissioning report.

Gas impregnated and gas insulated bushings should be submitted to the following final checking:

- Measurement of gas pressure: the pressure of the gas measured at the end of filling and standard atmospheric air conditions (20 °C and 101,3 kPa) should be not less than the minimum functional pressure and not greater than the rated filling pressure of gas for insulation.
- Measurement of the dew point: the gas dew point at rated filling pressure should not exceed –5 °C when measured at 20 °C. Adequate corrections should be applied for measurement at the other temperatures.
- Enclosure tightness check: the check should be performed with the probing method for closed pressurised systems as specified for the routine test (see 9.8). The check should be started at least one hour after the filling of the bushing in order to reach a stabilised leakage flow. The check can be limited to gaskets, over pressure device, valves, terminals, manometers, temperature sensors, using a suitable leak detector.

11.5 Operation

The instructions given by the manufacturer should contain the following information:

- a general description of the equipment with particular attention to the technical description of its characteristics and all operation features provided, so that the user has an adequate understanding of the main principles involved;
- a description of the safety features of the equipment and their operation;
- as relevant, a description of the action to be taken to manipulate the equipment for maintenance and testing.

11.6 Maintenance

11.6.1 General

The effectiveness of maintenance depends mainly on the way instructions are prepared by the manufacturer and implemented by the user

11.6.2 Recommendation for the manufacturer

The manufacturer should issue a maintenance manual including the following information:

- 1) schedule maintenance frequency;
- 2) detailed description of the maintenance work;
 - recommended place for the maintenance work (indoor, outdoor, in factory, on site, etc.);
 - procedures for inspection, diagnostic tests, examination, overhaul, function check out (e.g. limits of values and tolerances);
 - reference to drawings;
 - reference to part numbers (when applicable);
 - use of special equipment or tools (cleaning and degreasing agents);
 - precautions to be observed (e.g.; cleanliness).
- 3) comprehensive drawings of the details of the bushing important for maintenance, with clear identification (part number and description) of assemblies, sub-assemblies and significant parts;

NOTE Exploded view drawings which indicate the relative position of components in assemblies and subassemblies are a recommended illustration method.

- 4) list of recommended spare-parts (description, reference number quantities) and advice for storage;
- 5) estimate of active scheduled maintenance time;
- 6) how to proceed with the equipment at the end of its operating life, taking into consideration environmental requirements.

The manufacturer should inform the users of a particular type of bushing about corrective actions required by possible systematic defects and failures.

Availability of spares: The manufacturer should be responsible for ensuring the continued availability of recommended spare parts required for maintenance for a period not less than 10 years from the date of the final manufacture of the bushing.

11.6.3 Recommendations for the user

- a) If the user wishes to carry out his own maintenance, he should ensure that his staff has sufficient qualifications as well as a detailed knowledge of the bushing.
- b) The user should record the following information:
 - the serial number and the type of the bushing;
 - the date when the bushing is put in service;
 - the results of all measurements and tests including diagnostic tests carried out during the life of the bushing;
 - dates and extent of the maintenance work carried out;
 - the history of service, records of the bushing measurements during and following a special operating condition (e.g. fault and post fault operating state);
 - references to any failure report.
- c) In case of failure and defects, the user should make a failure report and should inform the manufacturer by stating the special circumstances and measures taken. Depending upon

the nature of the failure, an analysis of the failure should be made in collaboration with the manufacturer.

- d) In case of disassembling for reinstallation in the future, the user must record the time and storage conditions.

11.6.4 Failure report

The purpose of the failure report is to standardise the recording of bushing failures with the following objectives:

- to describe the failure using a common terminology;
- to provide data for the user statistics;
- to provide a meaningful feedback to the manufacturer;

The following gives guidance on how to make a failure report.

A failure report should include the following whenever such data is available:

- a) Identification of the bushing, which failed:
- substation name;
 - identification of the bushing (manufacturer, type, serial number, ratings);
 - bushing family (oil, resin or SF6 insulation,);
 - location (indoor, outdoor).
- b) History of the bushing:
- history of the storage;
 - date of commissioning of the equipment;
 - date of failure/defect;
 - date of last maintenance;
 - date of the last visual checking of the oil level indicator
 - details of any changes made to the equipment since manufacture;
 - condition of the bushing when the failure/defect was discovered (in service, maintenance, etc.).
- c) Identification of the sub-assembly/component responsible for the primary failure/defect:
- high-voltage stressed components;
 - tapping;
 - other components.
- d) Stresses presumed contributing to the failure/defect
- environmental conditions (temperature, wind, snow, ice, pollution, lightning, etc.);
 - grid conditions (switching operations, failure of other equipment, etc.);
 - others.
- e) Classification of the failure/defect
- major failure;
 - minor failure;
 - defect.
- f) Origin and cause of the failure/defect
- origin (mechanical, electrical, tightness etc.);
 - cause in the opinion of the person having established the report (design, manufacture, inadequate instructions, incorrect mounting, incorrect maintenance, stresses beyond those specified, etc.).

g) Consequences of the failures or defect

- equipment down-time;
- time consumption for repair;
- labour cost;
- spare parts cost.

A failure report may include the following information:

- drawings, sketches;
- photographs of defective components;
- single-line station diagram;
- records or plots;
- references to maintenance manual.

12 Safety

High-voltage equipment can be safe only when installed in accordance with the relevant installations rules, and used and maintained in accordance with the manufacturer's instructions.

High-voltage equipment is normally only accessible by instructed persons. It should be operated and maintained by skilled persons. When unrestricted access is available to bushings, additional safety features may be required.

The following specifications in subclauses 12.1 to 12.3 provide personal safety measures for equipment against various hazards:

12.1 Electrical aspects

- insulation of the isolating distance
- earthing (indirect contact)
- IP coding (direct contact)

12.2 Mechanical aspects

- pressurised components
- mechanical impact protection

12.3 Thermal aspects

- flammability

13 Environmental aspects

The need to minimise the impact of the natural environment of bushings during all phases of their life is now recognised.

IEC Guide 109 gives guidance in this respect in term of life cycle impacts and recycling and disposal at the end of life.

The manufacturer should specify information regarding the relation between operation during service life, dismantling of the equipment and environmental aspects.

Annex A **(informative)**

A.1 Bushings used in voltage source converters (VSC) HVDC schemes

A.1.1 Introduction

This standard applies primarily to HVDC bushings of condenser type utilized with line commutated HVDC converters (LCC).

Recently new HVDC converter schemes using voltage source converter (VSC) technologies have been put in operation. The principle of operation of such converter technology is quite different than the usual technologies using line commutated converters. However, for DC bushings, this standard is applicable also for VSC HVDC schemes, even if the ratings may be different. The important thing is to be aware that new applications may result in special service conditions requiring additional information in the specification by the purchaser.

Different technologies regarding topologies and switching strategies may be used for voltage source DC converters. In a two- or three-level topology the valves act like controllable switches connecting the stiff DC voltage to the ac side, see Figure A.1. An alternative technology is that the valves are divided in modules, each module with its own DC capacitor. In this case each module acts like a two-level controllable voltage source, see Figure A.2. This is defined as a multi-level VSC.

It must be noted that any of the technologies, two-level or multi-level VSC, may be used in any of the configurations. Thus, these figures show only typical examples of VSC schemes. Other schemes are also feasible. Furthermore, depending on the specific conditions for each scheme, some of the equipment shown in the figures may be omitted.

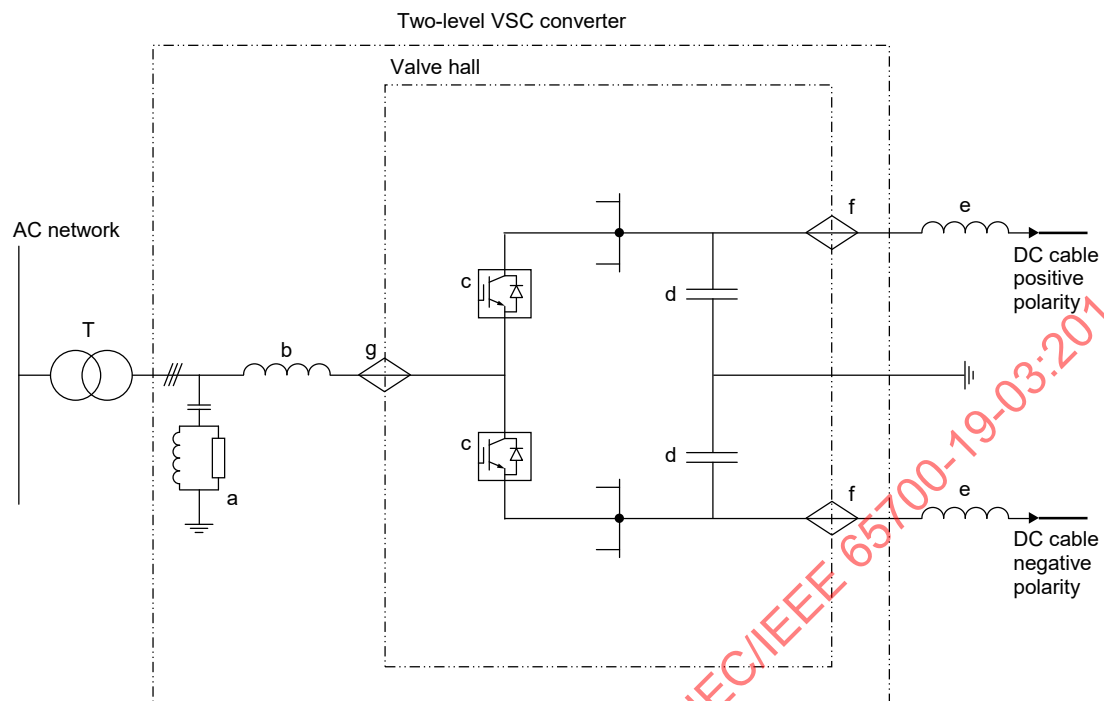
The technical requirements for bushings for VSC HVDC may differ from those for classic HVDC with line commutated converters. However, the same parameters have to be specified.

Even if the requirements differ from traditional LCC HVDC schemes, this standard also applies to the DC bushings in VSC schemes when the specification is adapted to the operation conditions and stresses applicable for the scheme.

Figure A.1 below shows a simplified VSC HVDC application circuit for two-level converter topology with the locations for the bushings.

The converter bushings in Figure A.1 are continually exposed to transient voltage stresses in the form of repetitive large voltage steps. Furthermore, the harmonic currents are significant. In these aspects the operation conditions for the converter bushings in a two- and three-level VSC scheme differ significantly from the operation condition for bushings in an LCC HVDC scheme. These specific stresses for this application must be considered and specified by the purchaser.

The DC bushings in Figure A.1 are mainly exposed to direct voltage and direct current, with a small amount of voltage and current harmonics, in a similar way as for LCC.



IEC

Key

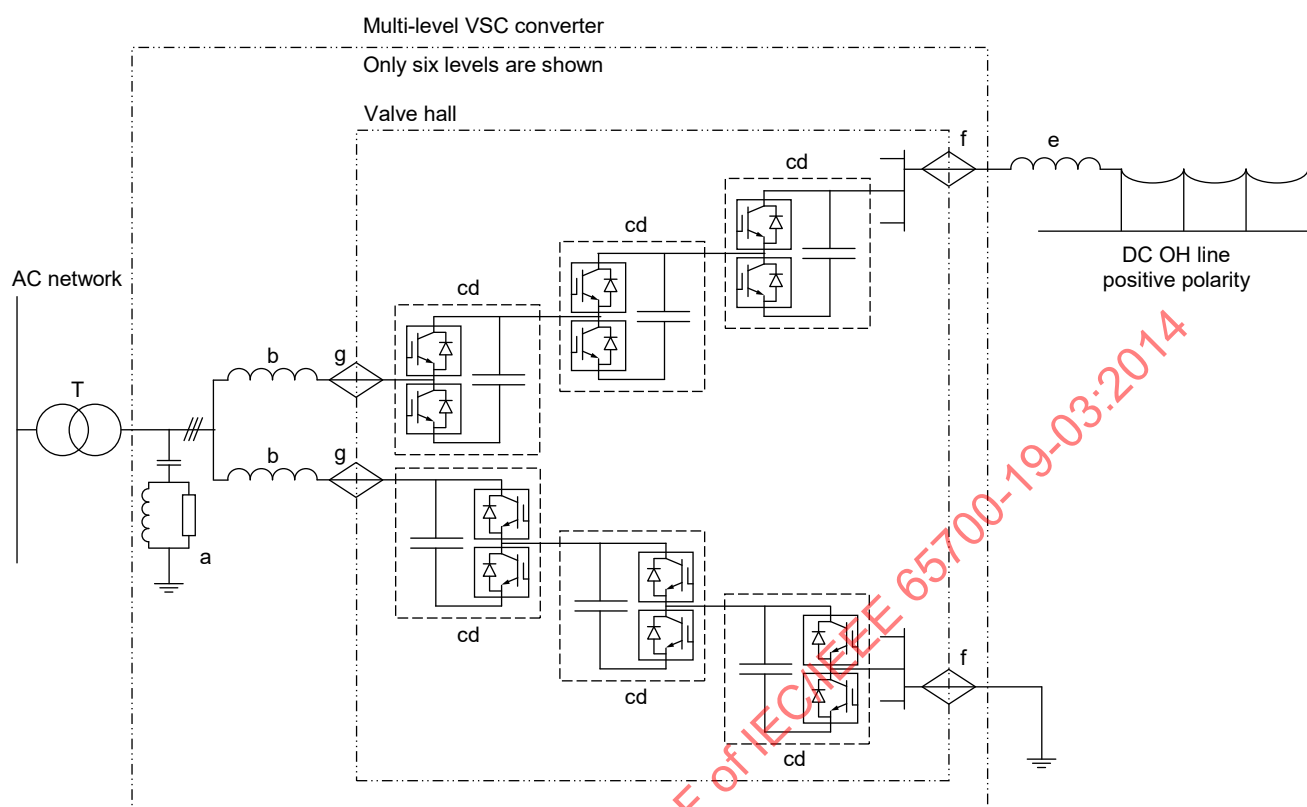
- a) AC filter
- b) Converter reactor
- c) Converter valve
- d) DC capacitor
- e) Smoothing reactor
- f) DC bushings
- g) Converter bushings
- T) Transformer

Figure A.1 – Two-level VSC HVDC converter station applied in a bipolar scheme with DC cable transmission

Figure A.2 below shows a simplified VSC HVDC application circuit for multi-level converter topology with the locations for the bushings.

For the multi-level application the converter bushings are mainly exposed to DC and fundamental frequency currents. If required any additional harmonic contribution is to be considered and specified by the purchaser. As Figure A.2 shows the application in a monopolar HVDC scheme, the converter bushings are exposed to DC voltages to ground, as is the case for traditional HVDC bushings. In general the voltage stress of the bushings is to be specified depending on their location and configuration of the HVDC link.

The upper DC bushing in Figure A.2 (connected to the DC OH line) is mainly exposed to direct voltage and direct current, with a small amount of voltage and current harmonics, in a similar way as for LCC.



IEC

Key

- a) AC filter (if applicable)
- b) Converter reactor
- cd) Power modules including DC capacitance
- e) Smoothing reactor
- f) DC bushings
- g) Converter bushings
- T) Transformer

NOTE The figure is simplified. A 20-level VSC converter requires 20 power modules.

Figure A.2 – Multi-level VSC HVDC converter station applied in a monopolar scheme with DC overhead line transmission

A.1.2 Design

In VSC converter applications there are no commutation failures leading to the discharge of the complete DC side capacitance. On the other hand, in some VSC topologies there is no possibility to reduce the DC side fault current by control actions in case of DC side short circuit. In such topologies short circuit current will be fed in from the AC network via diodes of the valves, until cleared by the AC side breakers, see Figures A.1 and A.2. In topologies that can interrupt DC side fault current the converter or DC breaker interrupts the fault current. Furthermore, discharge currents from large DC side capacitors have to be considered, when applicable, depending on circuit configuration. Consequently, maximum fault currents shall be specified in accordance with 4.3.2.2 and 4.3.2.3 of this standard.

As for line commutated applications, the harmonic currents through bushings used in VSC applications are low compared to the DC currents, but often in a higher frequency range.

Especially for the converter bushings in Figure A.1, the current harmonics are more significant. The current harmonic spectrum shall be specified by the purchaser.

The transient voltage stresses and the voltage harmonic stresses should be considered in the design of the bushings. This is especially important for converter bushings used in a two- or three-level topology, see Figure A.1, but it should also be considered for other bushings. The purchaser should specify the voltage waveform for the switching transients and the voltage harmonic spectrum. Both the dielectric and thermal stresses should be considered. Bushings with low capacitance and dielectric dissipation factor at the frequency of the voltage transients are preferred in order to limit the heating that is caused by the voltage harmonics.

A.1.3 Tests

VSC HVDC transmission schemes are operated at fixed polarity, independent of the DC power direction. Therefore the polarity reversal test is not applicable to bushings used in VSC HVDC schemes where the polarity is fixed.

Besides the polarity reversal test, the test program should be similar as for line commutated HVDC applications

A.1.4 Supporting Published Material

Asplund, G., Erikson, K., Svenson, K. *DC transmission based on voltage source converters*, CIGRE SC 14 Colloquium, South Africa 1997.

Cigré technical brochure 269 by SC B4 WG B4.37, *VSC Transmission*.

Dorn, J., Huang, H., Retzmann, D., *A new multilevel voltage-sourced converter topology for HVDC applications*, Paper B4-304 Cigré, August 24-29, 2008, Paris.

Ronstrom, L., Hoffstein, M.L., Pajo, R., Lahtinen, M. *The estlink HVDC light transmission system*, CIGRE Regional Meeting, June 18-20, 2007, Tallinn, Estonia.

Annex B (informative)

B.1 Temperature rise test methods for the determination of the equivalent test current

B.1.1 Introduction

Bushings for HVDC may be subject to significant harmonics currents. In particular the bushings connected to the transformer valve windings are subject to the same harmonics current that flow inside the transformer. DC wall bushings are less influenced by the harmonics because the current flowing to the DC yard has normally a low harmonic content.

To correctly evaluate the thermal effect of the distorted current during the design stage and to calculate the equivalent current for the temperature rise test it is necessary that the purchaser will specify the maximum current harmonic spectrum.

The numerator of Formulas (4) and (5) in 8.5.2, summarized in Formula (B.1), is composed by two terms, the first represents the losses due to the DC component in the current (if any) and the second the AC losses in distorted operation:

$$I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^h I_h^2 \times R_h \quad (B.1)$$

where

$I_{DC}^2 \times R_{DC}$ are the losses caused by the DC component in the bushing current; and

$\sum_{h=1}^h I_h^2 \times R_h$ are the losses caused by the AC and harmonic components in the bushing current (i.e. AC losses in distorted operation).

Concerning the way to calculate the AC losses in distorted operation, generally intended as sinusoidal plus the effect of the harmonics, there are different applicable methodologies:

- Analytical calculation.
- Finite element method calculation.
- Calculation by enhancement factors as described in IEC 61378-1.

This Annex B will describe the above points and will provide some calculation examples.

B.2 Basics concerning the losses in distorted operation

It is well known that in a conductor subject to an alternating current, losses are higher with respect to those generated by a DC current with the same r.m.s. value. This is caused by interaction between the current and the magnetic field that changes the current distribution inside the conductor moving the current toward the surface of the conductor (skin effect).

The total losses are normally calculated as two components, the first based on the DC resistance and the r.m.s. value of the current, the second calculated as an additional component named Eddy or additional losses that take into account of the increasing by the skin effect.

The theoretical study of the Eddy losses is quite complex, the basic of the theory is described in IEC 61378-1 and IEC 61378-3.

B.3 Analytical calculation

The calculation of the ratio between AC and DC resistance can be done at each harmonic frequency based on the Dwight's curves reported in IEEE Std C37.23.

A simpler formula, based on a simplified version of the traditional hyperbolic functions, has been described by H. B. Dwight in his paper *Skin effect in tubular and flat conductors*, A.I.E.E., 1918.

Here is a version of the original formula, modified to take into account of metric units:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{m \times t (r_{in} + r_{out})}{20 r_{out} \sqrt{2}} \left(1 + \frac{10}{m \times r_{out} \sqrt{2}} + \frac{300}{8 m^2 r_{out}^2} \right) \quad (B.2)$$

where

- f is the frequency (Hz);
- ρ is the conductor resistivity (Ω m);
- r_{in} is the inner radius of the conductor tube (mm);
- r_{out} is the outer radius of the tube (mm);
- t is the conductor tube wall thickness (mm); and
- m is calculated as:

$$m = \sqrt{\frac{8\pi^2 f}{10^{11} \rho}} \quad (B.3)$$

Formula (B.2) gives the same results of the curves reported in IEEE Std C37.23 for $m \times t > 40$.

Formula (B.2) is applicable also to solid cylindrical rods.

The method described above can be used for the evaluation of the AC resistance at fundamental frequency and for each harmonic.

B.4 Finite element method calculation

Thanks to the progress of computers and mathematical theory of this method, the finite element method is now one of the most popular and reliable engineering verification tools.

Concerning the evaluation of the conductor losses, a 2D axial symmetric solver is adequate. 3D software could be applicable to very sophisticated analysis of some details like conductors with different profiles or particular coupling joints etc.

Due to the fact that normally the bushings do not have massive structures made by magnetic material software packages for non-linear problems are not necessary.

On the other hand the software has to be able to solve the magnetic problem under excitation sources, typically sinusoidal, and also take into account skin effect. This solution is named time harmonic.

The software should have meshing software able to set very accurate meshes with manual and automatic functions for the mesh adaption.

To achieve reliable results it is fundamental to follow some simple rules in the modelling:

- Try to identify conditions of symmetry, both geometrical and magnetic, that allow simplification of the model. As a consequence the overall geometry can be 'sliced' in a smaller model that will be less 'heavy' for the numerical calculation.
- Enclose the model in a suitable space that defines the borderline of the field. On the external face of this container a condition Zero magnetic field will be applied. The proper size of this container can be assessed by setting several tentative solutions as a compromise of the accuracy of the results, the meshing capabilities and the overall calculation time.
- The mesh must be accurately refined in the metallic parts that are subject to the investigation, in particular the zone affected by the skin effect. As a practical rule, it is necessary that the area of the part most subject to the skin effect, i.e. practically equal to the skin depth for the given material at the given frequency, must be modelled with a triangular mesh that gives a minimum of 4 to 5 mesh elements in this zone.

In order to ensure a good accuracy in the areas involved by the skin effect during the runs at different frequencies, it is fundamental to check that the mesh solution at the various harmonics still remains well refined in the areas subject to the skin effect, in case it is necessary to improve it.

At this point it is possible to proceed with two different methodologies:

- Run the model at different harmonic frequencies but at equal current for each harmonic. The output for each run will be the losses at the given harmonic frequency and constant current. By making the ratio of each of these harmonic loss and the DC losses, calculated on the basis of the same r.m.s. value of the total injected current, it is possible to calculate the ratio $R_{AC,h} / R_{DC}$ for each harmonic, to be used in Formulas (4) and (5) in 8.5.2.
- Run the model at different harmonic currents and frequencies and get the losses for each harmonic. The total sum of these losses gives directly the AC losses in distorted operation to be used in Formulas (4) and (5) in 8.5.2.

B.5 Calculation by enhancement factors as described in IEC 61378–1

IEC 61378-1 follows a different concept based on the calculation of the losses in distorted operation based on the use of harmonics enhancement factors.

This calculation methodology is very simple, is normally applied to the convertor transformers and is particularly indicated for the transformer bushings.

In this paragraph the IEC 61378-1 designation rules will be followed.

The starting point is the calculation of the AC losses of the conductor at fundamental frequency and harmonic current (P_{C1}) and of the corresponding DC losses calculated at fundamental harmonic current ($R_C \times I_1^2$).

The calculation of P_{C1} can be done either by finite element method or by the analytical method, while the DC losses are calculated on the basis of the DC resistance (R_C) and the r.m.s. value of the fundamental harmonic current (I_1).

The Eddy losses at fundamental frequency (P_{CE1}) are calculated by difference between the two values:

$$P_{CE1} = P_{C1} - (R_C \times I_1^2) \quad (B.4)$$

To the Eddy losses component a harmonic enhancement factor will be applied that is calculated as:

$$F_{CE} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8} \quad (\text{B.5})$$

As a consequence, the total losses in distorted operation (P_N) are:

$$P_N = (I_{LN}^2 \times R_C) + (F_{CE} \times P_{CE1}) \quad (\text{B.6})$$

Where the term I_{LN} is the r.m.s. value of the current including the harmonics.

The above calculated parameter P_N can be used directly in Formulas (4) and (5) in 8.5.2 as AC losses in distorted operation component.

B.6 Examples of calculation

The starting point for the evaluation of the losses under distorted operation is the harmonic spectrum of the current that flows into the bushing. Table B.1 shows an example of the harmonic spectrum of the current of a valve side connected bushing.

Table B.1 – Valve side connected bushing current harmonic spectrum

Harmonic current spectrum	
Harmonic (h)	$I_h \%$
DC	0,00
1	100,00
5	17,44
7	10,77
11	4,18
13	2,37
17	0,60
19	0,69
23	0,92
25	0,86
29	0,51
31	0,32
35	0,17
37	0,25
41	0,32
43	0,29
47	0,16

The harmonics listed in the above spectrum are referred to the fundamental harmonic. This spectrum has a Total harmonic distortion (THD %) equal to 21,2 % and the total distorted current equivalent r.m.s. value is 102,21 % of the first harmonic.

The following examples of calculations are referred to a copper rod with the following characteristics:

- ρ_{Cu} Conductor resistivity at 75 °C = $1,99 \times 10^{-8} \Omega m$;
Rod diameter = 70 mm;
 l Conductor length = 1 m;
 I_1 First harmonic current (r.m.s.) = 2000 A;
 I_h Table B.1 spectrum (%);
 F Network frequency (equal to fundamental frequency) = 50 Hz

NOTE For convenience all calculations have been done on a conductor of 1 m length.

Based on the above data the conductor has a DC resistance (R_{dc}) at 75 °C of $5,17197 \mu\Omega$.

This value will be the same for all the three different calculation methodologies.

B.6.1 Calculation based on the analytical method

Table B.2 shows the complete calculation of R_h and of the total losses due to the various harmonics.

The calculation is valid as $m \times t$ is > 40 for each harmonic.

Table B.2 – Calculation based on the analytical method

Harmonic (h)	f_h [Hz]	I_h [A]	R_h calculation based on Dwight's formula				$R_h \times I_h^2$ [W]
			M	$m \times t$	R_h/R_{DC}	R_h [Ω]	
1	50	2 000,0	1,0	49,3	2,020	$1,045 \times 10^{-5}$	41,78
5	250	348,74	3,1	110,2	4,159	$2,151 \times 10^{-5}$	2,62
7	350	215,44	3,7	130,4	4,871	$2,519 \times 10^{-5}$	1,17
11	550	83,52	4,7	163,5	6,038	$3,123 \times 10^{-5}$	0,22
13	650	47,31	5,1	177,7	6,541	$3,383 \times 10^{-5}$	0,08
17	850	11,93	5,8	203,2	7,442	$3,849 \times 10^{-5}$	0,01
19	950	13,85	6,1	214,9	7,853	$4,061 \times 10^{-5}$	0,01
23	1150	18,38	6,8	236,4	8,613	$4,455 \times 10^{-5}$	0,02
25	1250	17,14	7,0	246,5	8,969	$4,639 \times 10^{-5}$	0,01
29	1450	10,29	7,6	265,4	9,640	$4,986 \times 10^{-5}$	0,01
31	1550	6,45	7,8	274,4	9,958	$5,150 \times 10^{-5}$	0,00
35	1750	3,43	8,3	291,6	10,560	$5,464 \times 10^{-5}$	0,00
37	1850	4,94	8,6	299,8	10,860	$5,614 \times 10^{-5}$	0,00
41	2050	6,31	9,0	315,6	11,410	$5,903 \times 10^{-5}$	0,00
43	2150	5,76	9,2	323,2	11,680	$6,042 \times 10^{-5}$	0,00
47	2350	3,29	9,7	337,9	12,200	$6,311 \times 10^{-5}$	0,00
I_L (r.m.s) [A]		2044,10	$\sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h =$				45,92

Then the calculations of the equivalent test currents are:

$$I_{eq,DC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h}{R_{DC}}} = \sqrt{\frac{0 + 45,92}{5,17197 \times 10^{-6}}} = 2979,7 \quad [A]$$

This is according to Formula (4) in 8.5.2. Instead, concerning Formula (5):

$$I_{eq,DC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h}{R_{AC}}} = \sqrt{\frac{0 + 45,92}{10,450 \times 10^{-6}}} = 2096,2 \quad [A]$$

B.6.2 Calculation based on Finite Element Method

Table B.3 shows the value of each harmonic loss as it is calculated by the software:

Table B.3 – Calculation based on Finite Element Method

Harmonic (h)	f _h [Hz]	I _h [A]	Losses P _h [W]
1	50	2 000,00	41,735
5	250	348,74	2,616
7	350	215,44	1,168
11	550	83,52	0,218
13	650	47,31	0,075
17	850	11,93	0,008 48
19	950	13,85	0,007 79
23	1 150	18,38	0,015 0
25	1 250	17,14	0,013 6
29	1 450	10,29	0,005 3
31	1 550	6,45	0,002 14
35	1 750	3,43	0,000 64
37	1 850	4,94	0,001 37
41	2 050	6,31	0,002 35
43	2 150	5,76	0,002
47	2 350	3,29	0,000 68
I _L (r.m.s) [A]		2044,10	$\sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h = 45,7$

To apply the formulas of 8.5.2 it is necessary to evaluate the AC resistance at fundamental harmonics (R_{ac}). This can be done on the basis of the losses at fundamental harmonic P_1 .

$$R_{AC} = \frac{P_1}{I_1^2} = \frac{41,735}{2000^2} = 10,433\,75 \quad [\mu\Omega]$$

Then the calculations of the equivalent test currents are:

$$I_{eq,DC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h}{R_{DC}}} = \sqrt{\frac{0 + 45,87}{5,17197 \times 10^{-6}}} = 2\,978 \quad [A]$$

This is according to Formula (4) in 8.5.2. Instead, concerning Formula (5):

$$I_{eq,AC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h}{R_{AC}}} = \sqrt{\frac{0 + 45,87}{10,433\,75 \times 10^{-6}}} = 2096,7 \quad [A]$$

B.6.3 Calculation based on the enhancement factor according IEC 61378–1

Table B.4 shows the calculation of the enhancement factor F_{CE} :

Table B.4 – Calculation based IEC 61378-1 enhancement factor F_{CE}

Harmonic (h)	f_h [Hz]	I_h [A]	$(I_h/I_1)^2 \times h^{0,8}$
1	50	2 000,00	1
5	250	348,74	0,110
7	350	215,44	0,055
11	550	83,52	0,012
13	650	47,31	0,004
17	850	11,93	0,000
19	950	13,85	0,001
23	1 150	18,38	0,001
25	1 250	17,14	0,001
29	1 450	10,29	0,000
31	1 550	6,45	0,000
35	1 750	3,43	0,000
37	1 850	4,94	0,000
41	2 050	6,31	0,000
43	2 150	5,76	0,000
47	2 350	3,29	0,000
		I_L (r.m.s) [A]	$F_{CE} =$
		2044,10	1,185

In this example the eddy losses and at fundamental frequency are calculated on the basis of the Finite Element Method:

$$P_{CE1} = P_{C1} - R_C \times I_1^2 = 41,735 - 5,171\,97 \times 10^{-6} \times 2000^2 = 21,0471 \quad [\text{W}]$$

Then it is possible to calculate the AC losses in distorted operation:

$$P_N = \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h = I_{LN}^2 \times R_C + F_{CE} \times P_{CE1} = 2044,1^2 \times 5,17197 \times 10^{-6} + 1,185 \times 21,0471 = 46,551 \quad [\text{W}]$$

Finally the calculations of the equivalent test currents are:

$$I_{eq,DC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h}{R_{DC}}} = \sqrt{\frac{0 + 46,551}{5,17197 \times 10^{-6}}} = 3000,1 \quad [\text{A}]$$

This is according to Formula (4) in 8.5.2. Instead, concerning Formula (5):

$$I_{eq,AC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h}{R_{AC}}} = \sqrt{\frac{0 + 46,551}{10,43375 \times 10^{-6}}} = 2112,2 \quad [\text{A}]$$

B.7 References

IEC 61378-1, *Converter transformers – Part 1: Transformers for Industrial Applications*

IEC 61378-2, *Converter transformers – Part 2: Transformers for HVDC Applications*

IEC 61378-3, *Converter transformers – Part 3: Application guide*

IEEE Std C37.23™, *Standard for Metal-Enclosed Bus-1*

Dwight, H. B. *Skin effect in tubular and flat conductors*. American Institute of Electrical Engineers, Transactions. Vol. XXXVII, Issue 2, 1918, pp. 1379-1403.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 65700-19-03:2014

Bibliography

IEC 60296, *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*

IEC 60376, *Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF₆) for use in electrical equipment*

IEC 60480, *Guidelines for the checking and treatment of sulphur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specification for its re-use*

IEC 60836, *Specification for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes*

IEC 60867, *Insulating liquids – Specifications for unused liquids based on synthetic aromatic hydrocarbons*

IEC 61463, *Bushings – Seismic qualification*

IEC Guide 109, *Environmental aspects – Inclusion in electrotechnical product standards*

IEEE Std C37.23™-2008, *Metal-Enclosed Bus*

IEEE Std C57.19.01™-2000, *IEEE Standard Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings (ANSI)*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 65700-19-03:2014

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	58
INTRODUCTION	60
1 Domaine d'application	62
2 Références normatives	62
3 Termes, définitions et symboles	63
3.1 Termes et définitions	63
3.2 Liste des variables	66
4 Caractéristiques assignées	66
4.1 Tensions assignées	66
4.1.1 Tension continue permanente assignée	66
4.1.2 Tension de crête assignée	66
4.2 Niveaux d'isolement	67
4.3 Courants assignés	67
4.3.1 Applications à courant continu pures	67
4.3.2 Applications de tension combinées	67
4.4 Fréquence assignée	68
4.5 Paramètres de pollution	68
5 Conditions de service	68
5.1 Généralités	68
5.2 Facteurs influant sur la conception, l'essai et l'application	69
5.3 Correction de l'altitude	70
5.4 Interchangeabilité	71
6 Exigences générales	72
6.1 Exigences électriques	72
6.2 Exigences mécaniques	72
6.3 Marquages de la plaque d'identification	72
7 Exigences d'essai	73
7.1 Exigences générales	73
7.2 Conditions d'essai	73
7.2.1 Température ambiante	73
7.2.2 Humidité	73
7.2.3 Facteurs de correction	74
7.3 Classification des essais	74
7.3.1 Essais de type (ou de conception)	74
7.3.2 Essais individuels de série	75
7.3.3 Essais spéciaux	75
8 Essais de type	76
8.1 Essai de tenue en tension à fréquence industrielle à sec avec mesurage des décharges partielles	76
8.1.1 Applicabilité	76
8.1.2 Méthode d'essai et exigences	76
8.1.3 Acceptation	76
8.2 Essai de tenue en tension aux chocs de foudre à sec (BIL)	76
8.2.1 Applicabilité	76
8.2.2 Méthode d'essai et exigences	76

8.2.3	Acceptation	77
8.3	Essai de tenue en tension de chocs de manœuvre à sec ou sous pluie (SIL)	77
8.3.1	Applicabilité	77
8.3.2	Méthode d'essai et exigences	77
8.3.3	Acceptation	77
8.4	Essais de compatibilité électromagnétique (CEM)	77
8.4.1	Essai d'émission	77
8.4.2	Essai d'immunité	78
8.5	Essai d'échauffement	78
8.5.1	Applicabilité	78
8.5.2	Méthode d'essai et exigences	78
8.5.3	Acceptation	79
8.6	Essai de tenue à la charge de flexion	79
8.6.1	Applicabilité	79
8.6.2	Méthode d'essai et exigences	79
8.6.3	Acceptation	80
8.7	Essai d'étanchéité sur des traversées à remplissage de liquide, à remplissage de mélange et à isolation liquide	80
8.8	Essai de pression interne des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse	80
8.9	Vérification des dimensions	80
8.10	Essai de pression du capot d'une traversée à conducteur démontable	81
8.10.1	Applicabilité	81
8.10.2	Méthode d'essai et exigences	81
8.10.3	Acceptation	81
9	Essais individuels de série	81
9.1	Mesurage du facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) et de la capacité	81
9.1.1	Applicabilité	81
9.1.2	Méthode d'essai et exigences	81
9.1.3	Acceptation	81
9.2	Essai de tenue en tension aux chocs de foudre à sec (BIL)	82
9.2.1	Applicabilité	82
9.2.2	Méthode d'essai et exigences	82
9.2.3	Acceptation	82
9.3	Essai de tenue en tension à fréquence industrielle à sec avec mesurage des décharges partielles	82
9.3.1	Applicabilité	82
9.3.2	Méthode d'essai et exigences	82
9.3.3	Acceptation	83
9.4	Essai de tenue à la tension continue appliquée avec mesurage des décharges partielles	83
9.4.1	Applicabilité	83
9.4.2	Méthode d'essai et exigences	83
9.4.3	Acceptation	84
9.5	Essai de polarité inverse avec mesurage des décharges partielles	84
9.5.1	Applicabilité	84
9.5.2	Méthode d'essai et exigences	85
9.5.3	Acceptation	86
9.6	Essai de tenue aux chocs de manœuvre à sec	86
9.6.1	Applicabilité	86

9.6.2	Méthode d'essai et exigences.....	87
9.6.3	Acceptation.....	87
9.7	Essai de l'isolement des prises.....	87
9.8	Essai de pression interne des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse.....	87
9.9	Essai d'étanchéité sur des traversées à remplissage de liquide, à remplissage de mélange et à isolation liquide.....	87
9.10	Essai d'étanchéité des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse.....	87
9.11	Essai d'étanchéité de la bride ou autre dispositif de fixation.....	87
9.12	Examen visuel et vérification des dimensions.....	87
10	Essais spéciaux.....	87
10.1	Essai de pollution artificielle.....	88
10.1.1	Applicabilité.....	88
10.1.2	Méthode d'essai et exigences.....	88
10.1.3	Acceptation.....	88
10.2	Essai de tension continue sous humidité uniforme.....	88
10.2.1	Applicabilité.....	88
10.2.2	Méthode d'essai et exigences.....	88
10.2.3	Acceptation.....	89
10.3	Essai de tension continue sous humidité non uniforme.....	89
10.3.1	Applicabilité.....	89
10.3.2	Méthode d'essai et exigences.....	89
10.3.3	Acceptation.....	90
11	Recommandations pour le transport, le stockage, le montage, l'exploitation et la maintenance.....	90
11.1	Conditions applicables au transport, au stockage et à l'installation.....	90
11.2	Installation.....	90
11.3	Déballage et levage.....	90
11.4	Assemblage.....	91
11.4.1	Montage.....	91
11.4.2	Connexions.....	91
11.4.3	Examen final de l'installation.....	91
11.5	Exploitation.....	92
11.6	Maintenance.....	92
11.6.1	Généralités.....	92
11.6.2	Recommandations au fabricant.....	92
11.6.3	Recommandations à l'utilisateur.....	93
11.6.4	Compte-rendu de panne.....	93
12	Sécurité.....	94
12.1	Aspects électriques.....	95
12.2	Aspects mécaniques.....	95
12.3	Aspects thermiques.....	95
13	Aspects liés à l'environnement.....	95
Annexe A (informative)		96
A.1	Traversées utilisées dans les schémas CCHT à convertisseurs de source de tension (VSC).....	96
A.1.1	Introduction.....	96
A.1.2	Conception.....	98

A.1.3	Essais.....	99
A.1.4	Documentation d'appui publiée.....	99
Annexe B (informative).....		100
B.1	Méthodes d'essai d'échauffement pour la détermination du courant équivalent d'essai	100
B.1.1	Introduction.....	100
B.2	Éléments fondamentaux concernant les pertes dans les opérations de distorsion	100
B.3	Calcul analytique.....	101
B.4	Calcul selon la méthode des éléments finis.....	102
B.5	Calcul par le biais des facteurs d'accroissement décrits dans --l'IEC 61378-1.....	103
B.6	Exemples de calculs.....	103
B.6.1	Calcul basé sur la méthode analytique.....	104
B.6.2	Calcul basé sur la méthode des éléments finis	105
B.6.3	B.6.3 Calcul basé sur le facteur d'accroissement de l'IEC 61378-1.....	107
B.7	Références	108
Bibliographie		109
Figure 1 – Facteur de correction d'altitude		71
Figure 2 – Profil d'essai de polarité inverse		85
Figure A.1 – Station de conversion VSC CCHT à deux niveaux appliquée dans un schéma bipolaire avec transmission par câble à courant continu.....		97
Figure A.2 – Station de conversion VSC CCHT multiniveau appliquée dans un schéma unipolaire avec transmission par ligne aérienne à courant continu		98
Tableau 1 – Température de l'air ambiant et des milieux d'immersion (voir 5.1)		69
Tableau 2 – Essais de type, individuels de série et spéciaux.....		75
Tableau 3 – Valeurs minimales de la tenue à la charge de flexion.....		79
Tableau 4 – Valeurs maximales de $\tan \delta$ et de l'augmentation de $\tan \delta$		81
Tableau 5 – Valeurs maximales de la quantité de décharges partielles		83
Tableau B.1 – Spectre harmonique de courant d'une traversée raccordée côté valve		103
Tableau B.2 – Calcul basé sur la méthode analytique		105
Tableau B.3 – Calcul basé sur la méthode des éléments finis		106
Tableau B.4 – Calcul basé sur le facteur d'accroissement F_{CE} de l'IEC 61378-1		107

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRAVERSÉES POUR APPLICATION EN COURANT CONTINU AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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. À 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.

Les documents normatifs de l'IEEE sont développés au sein des sociétés de l'IEEE et des Comités de Coordination des normes du Conseil des normes de l'Association des normes IEEE (IEEE-SA). L'IEEE développe ses normes par le biais d'un processus de développement de consensus approuvé par l'American National Standard Institute, qui rassemble des volontaires représentant divers points de vue et divers intérêts pour parvenir au produit final. Les volontaires ne sont pas nécessairement des membres de l'Institut et aucune compensation ne leur est attribuée. Bien que l'IEEE administre le processus et établisse des règles pour favoriser l'équité au cours du processus de développement du consensus, l'IEEE n'évalue pas, ne teste pas ou ne vérifie pas de manière indépendante l'exactitude des informations contenues dans ses normes. L'utilisation de normes de l'IEEE est entièrement volontaire. Les documents de l'IEEE sont disponibles à des fins d'utilisation, à condition d'être assortis d'avis importants et de clauses de non-responsabilité (voir <http://standards.ieee.org/IPR/disclaimers.html> pour de plus amples informations).

L'IEC collabore étroitement avec l'IEEE, selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations. Cette norme internationale double logo a été élaborée conjointement par l'IEC et l'IEEE, conformément aux dispositions de cet accord.

- 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. Les décisions ou accords officiels de l'ISO concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés étant donné que les comités intéressés sont représentés dans chaque comité membre de l'ISO. Une fois le consensus établi entre les Sociétés de l'IEEE et les Comités de coordination des normes, les décisions officielles de l'IEEE relatives aux questions techniques sont déterminées en fonction du vote exprimé par un groupe à la composition équilibrée, composé de parties intéressées qui manifestent leur intérêt pour la révision des normes proposées. L'approbation finale de la norme de l'IEEE est soumise au Conseil de normalisation de l'IEEE Standards Association (IEEE-SA).
- 3) Les Publications de l'IEC/IEEE se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC/Sociétés de l'IEEE. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC/IEEE s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ou l'IEEE 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 (y compris les Publications IEC/IEEE) dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications IEC/IEEE et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC et l'IEEE elles-mêmes ne fournissent 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 et l'IEEE ne sont responsables 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 ou l'IEEE, à leurs administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris leurs experts particuliers et les membres de leurs comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, ou des bénévoles des Sociétés de l'IEEE et des Comités de Coordination des normes du Conseil des normes de l'IEEE Standards Association (IEEE-SA), 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/IEEE ou toute autre publication de l'IEC ou de l'IEEE, 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/IEEE peuvent faire l'objet de droits de brevet. En publiant cette norme, aucun parti n'est pris concernant l'existence ou la validité de droits de brevet y afférents. Ni l'IEC ni l'IEEE ne peuvent être tenus d'identifier les revendications de brevet essentielles pour lesquelles une autorisation peut s'avérer nécessaire, d'effectuer des recherches sur la validité juridique ou l'étendue des revendications des brevets, ou de déterminer le caractère raisonnable ou non discriminatoire des termes ou conditions d'autorisation énoncés dans le cadre d'un Certificat d'assurance, lorsque la demande d'un tel certificat a été formulée, ou contenus dans tout accord d'autorisation. Les utilisateurs de cette norme sont expressément informés du fait que la détermination de la validité de tous les droits de propriété industrielle, ainsi que les risques qu'implique la violation de ces droits, relèvent entièrement de leur seule responsabilité.

La présente Norme internationale a été établie par un groupe de travail commun du sous-comité 36A: Traversées isolées, du comité d'études 36 de l'IEC: Isolateurs, et du sous-comité «Bushing» (Traversées) du comité «Transformer» (Transformateurs) de l'IEEE-PES¹.

La présente version bilingue (2019-01) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2014-07.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 36A/173/FDIS et 36A/174/RVD.

Le rapport de vote 36A/174/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "http://webstore.iec.ch" dans les données relatives à la publication recherchée. À cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

¹ Une liste des participants de l'IEEE peut être consultée à l'adresse universelle suivante:
http://standards.ieee.org/downloads/65700/65700-19-03-2014/65700-19-03-2014_wq-participants.pdf.

INTRODUCTION

Dans cette première édition de l'IEC/IEEE 65700-19-03, les exigences relatives aux expériences de fonctionnement et au marché établi ont été harmonisées avec des normes IEC et IEEE existantes, principalement:

IEC 60137, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

IEC 62199, *Traversées pour application en courant continu*

IEEE Std C57.19.00™, *IEEE Standard General Requirements and Test Procedures for Outdoor Power Apparatus Bushings* (disponible en anglais seulement)

IEEE Std C57.19.03™, *IEEE Standard Requirements, Terminology and Test Code for Bushings for DC Application* (disponible en anglais seulement)

La présente norme à deux chiffres remplace les normes IEC et IEEE précédentes relatives aux traversées à courant continu.

Le cas échéant, une référence est aussi faite aux normes suivantes:

IEC 61462, *Isolateurs composites creux – Isolateurs avec ou sans pression interne pour utilisation dans des appareillages électriques de tensions nominales supérieures à 1 000 V – Définitions, méthodes d'essais, critères d'acceptation et recommandations de conception*

IEC 62155, *Isolateurs creux avec ou sans pression interne, en matière céramique ou en verre, pour utilisation dans des appareillages prévus pour des tensions nominales supérieures à 1 000 V*

Les isolateurs des traversées en matière non céramique sont largement utilisés dans les applications à courant continu et la présente norme s'applique aux procédures similaires de qualification sur tous les types d'isolateurs, excepté pour l'essai de pollution artificielle. La préparation d'une traversée pour un essai de pollution artificielle détruit la surface d'un isolateur composite et par conséquent ne peut être exécutée sur de telles traversées.

L'étendue des essais de type et des essais individuels de série a été soigneusement planifiée, considérant que la transmission de puissance en courant continu et à haute tension (CCHT) est une technologie mature, mais reste avec une expérience de fonctionnement limitée comparé aux systèmes alternatifs. En outre, la coordination de tensions peut varier selon les différentes pratiques de conception CCHT des systèmes.

Les travaux concernant l'édition 1 de l'IEEE Std C57.19.03 ont débuté en 1988 au sein du Groupe de travail relatif aux Traversées pour les applications à courant continu du Sous-comité Bushing (Traversées) du Comité Transformers (Transformateurs) de l'IEEE. Le groupe de travail a décidé d'inclure des exigences relatives à ces traversées dans un document à part entière, car de nombreux problèmes spécifiques à ce type de traversée ont été observés dans le secteur et les autres normes disponibles concernant les traversées n'étaient pas appropriées à cet effet. La principale référence correspondant au document résultant est constituée par ses équivalents pour les traversées à courant alternatif: l'IEEE Std C57.19.00-1991 et l'IEC 60137. Les exigences ont également été coordonnées avec le Groupe de travail commun 12/14.10 du CIGRE ainsi que le Sous-comité HVDC Converter Transformer and Smoothing Reactor (Transformateurs de conversion CCHT et bobines de lissage) du Comité Transformers (Transformateurs) de l'IEEE, qui ont élaboré des normes pour ces appareillages CCHT au cours de la même période.

L'IEEE Std C57.19.03:1996 a été approuvée le 20 juin 1996 par le Conseil de normalisation de l'IEEE-SA et est parue le 6 janvier 1997. Pendant le processus de reconfirmation du présent document en 2002, plusieurs erreurs ont été signalées dans le document. Toutes les erreurs connues ont été corrigées dans un corrigendum en décembre 2005. La présente norme révisée comprend les corrections apportées dans le corrigendum.

Les travaux concernant l'IEC 62199 ont débuté en 2000 par le SC 36A (Traversées isolées) de l'IEC du TC 36 de l'IEC (Isolateurs), et étaient essentiellement fondés sur l'Édition 1 de l'IEEE Std C57.19.03, parue en 2004.

Après que l'IEEE a entamé les travaux relatifs à la révision de l'IEEE Std C57.19.03, le TC 36 de l'IEC a convenu lors de sa réunion à Sao Paulo en 2008 de prendre contact avec l'IEEE en vue de former un groupe de maintenance commun dans le cadre de la procédure d'une norme double logo. Ceci a été approuvé et les travaux relatifs au nouveau document IEC/IEEE 65700-19-03 ont débuté en 2009.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 65700-19-03:2014

TRAVERSÉES POUR APPLICATION EN COURANT CONTINU

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux traversées d'extérieur et d'intérieur de toute tension utilisées sur des systèmes à courant continu, à répartition capacitive ou isolées au gaz, pour une utilisation comme composants des transformateurs de conversion remplis d'huile et des bobines de lissage, ainsi qu'aux traversées à courant continu air-à-air. La présente norme ne s'applique pas aux:

- sorties de câble (extrémités étanches);
- traversées pour transformateurs de mesure;
- traversées pour alimentations d'essai;
- traversées appliquées à l'isolation gazeuse (autre que la pression atmosphérique) extérieure à la traversée;
- traversées pour application industrielle;
- traversées pour application de traction;
- traversées pour transformateurs de classe de distribution.

La présente norme fait référence à l'IEC 60137 pour les termes généraux et les conditions générales et définit les termes spéciaux utilisés, les conditions de service, les caractéristiques assignées, les procédures d'essai tout comme les exigences générales dans le domaine mécanique et électrique concernant les traversées pour application en courant continu.

2 Références normatives

Les documents ci-après, dans leur intégralité ou non, sont des références normatives indispensables à l'application 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 60050, *Vocabulaire Électrotechnique International (IEV)*. Disponible à l'adresse: <http://www.electropedia.org/>

IEC 60060-1:2010, *Technique des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et exigences générales*

IEC 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

IEC 60071-5, *Coordination de l'isolement – Partie 5: Procédures pour les stations de conversion à courant continu haute tension (CCHT)*

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

IEC 60076-2, *Transformateurs de puissance – Partie 2: Échauffement des transformateurs immergés dans le liquide*

IEC 60076-7, *Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers* (disponible en anglais seulement)

IEC 60137:2008, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

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

IEC 60296, *Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion*

IEC 60376, *Spécification de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre (SF₆) et des gaz complémentaires à employer dans les mélanges de SF₆ pour utilisation dans les appareils électriques*

IEC 60480, *Lignes directrices relatives au contrôle et au traitement de l'hexafluorure de soufre (SF₆) prélevé sur le matériel électrique et spécification en vue de sa réutilisation*

IEC 60836, *Spécifications pour liquides isolants silicones neufs pour usages électrotechniques*

IEC 60867, *Isolants liquides – Spécifications pour liquides neufs à base d'hydrocarbures aromatiques de synthèse*

IEC 61245, *Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on d.c. systems* (disponible en anglais seulement)

IEC 61378-2, *Transformateurs de conversion – Partie 2: Transformateurs pour applications CCHT*

IEC 61462, *Isolateurs composites creux – Isolateurs avec ou sans pression interne pour utilisation dans des appareillages électriques de tensions nominales supérieures à 1 000 V – Définitions, méthodes d'essais, critères d'acceptation et recommandations de conception*

IEC 62155, *Isolateurs creux avec ou sans pression interne, en matière céramique ou en verre, pour utilisation dans des appareillages prévus pour des tensions nominales supérieures à 1 000 V*

CISPR 16-1 (toutes les parties), *Spécification des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques*

CISPR 18-2, *Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment – Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits* (disponible en anglais seulement)

IEEE Std C57.19.00™-2004, *IEEE General Requirements and Test Procedures for Outdoor Apparatus Bushings* (ANSI)

IEEE Standards Dictionary Online²

3 Termes, définitions et symboles

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60137, l'IEEE Std C57.19.00, l'IEC 60050-471 et l'IEEE Standards Dictionary Online, ainsi que les suivants, s'appliquent.

² L'abonnement est disponible à l'adresse
http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

3.1.1

traversée à courant continu

traversée soumise à une contrainte de tension en courant continu, c'est-à-dire, traversée appliquée au côté d'un enroulement à valve d'un transformateur de conversion, traversée appliquée à une bobine de lissage à courant continu, traversée de paroi ou traversée appliquée à une valve de convertisseur

3.1.2

traversée pour application à courant continu pure

traversée à courant continu soumise à une tension continue avec seulement une petite ondulation de tension alternative, telle qu'appliquée sur le côté haute tension d'une valve de convertisseur continu

3.1.3

traversée pour application de tension combinée

traversée à courant continu soumise à une tension alternative importante en superposition sur une tension de polarisation continue, telle qu'une traversée appliquée au côté d'un enroulement à valve d'un transformateur de conversion

3.1.4

traversée de paroi

traversée de plafond

traversée destinée à être montée sur la paroi (plafond) d'un édifice tel qu'un convertisseur à foyer de valve

3.1.5

traversée inclinée

traversée conçue pour être montée à un angle compris entre 20° et 70° par rapport à la verticale

3.1.6

traversée verticale

traversée conçue pour être montée verticalement ou à un angle ne dépassant pas 20° par rapport à la verticale

3.1.7

traversée horizontale

traversée conçue pour être montée horizontalement ou à un angle compris entre 70° et 90° par rapport à la verticale

3.1.8

traversée à conducteur démontable

traversée permettant l'utilisation d'un conducteur démontable

3.1.9

conducteur démontable

câble ou conducteur solide dont une extrémité est raccordée au transformateur ou à l'enroulement d'une bobine d'inductance et l'autre extrémité est introduite dans le tube central de la traversée et raccordée au sommet de la traversée

3.1.10

isolation principale

matériau d'isolation assurant des propriétés diélectriques nécessaires au maintien d'une bonne isolation entre le conducteur sous tension et le potentiel de terre, comprenant l'isolation interne et l'enveloppe ou les enveloppes isolantes

3.1.11

isolation interne

matériau d'isolation fourni dans une direction radiale autour du conducteur sous tension afin de l'isoler du potentiel de terre

3.1.12

courant de charge

courant capacitif

courant résultant de la charge absorbée par le condensateur formé par la capacité de la traversée

3.1.13

facteur de dissipation

tangente de l'angle de perte diélectrique

Note 1 à l'article: Pour de faibles valeurs de perte diélectrique, le facteur de dissipation est virtuellement égal au facteur de puissance d'isolation.

3.1.14

facteur de puissance d'isolation

rapport de la puissance dissipée dans l'isolation, en watts, au produit de la tension effective et du courant, en voltampères, dans des conditions d'essai à une tension sinusoïdale et dans des conditions spécifiées

Note 1 à l'article: Le facteur de puissance d'isolation est égal au cosinus de l'angle de phase entre la tension et le courant résultant lorsque la tension et le courant sont tous deux sinusoïdaux.

3.1.15

décharge partielle

décharge qui n'établit pas complètement l'isolation entre les électrodes

Note 1 à l'article: Le terme «effet de couronne» est, de préférence, utilisé pour les décharges partielles dans l'air environnant un conducteur, pas dans un ensemble de traversées.

3.1.16

effet de couronne

décharge externe partielle due à l'ionisation de l'air environnant un conducteur survenant lorsqu'un gradient de tension dépasse une valeur critique

3.1.17

tension de perturbation radioélectrique

RIV

tension à haute fréquence produite par suite d'une décharge partielle ou d'un effet de couronne, pouvant être propagée par conduction, induction, rayonnement ou par un effet combiné de ces trois moyens de propagation

Note 1 à l'article: L'abréviation «RIV» est dérivée du terme anglais développé correspondant «radio-interference voltage».

3.1.18

polarité

polarité de la tension continue par rapport à la terre, par exemple, positive ou négative

3.1.19

polarité inverse

passage de la polarité de la tension de positive à négative ou de négative à positive

3.1.20

barrières d'isolation

ensemble de barrières qui font partie de la structure d'isolation du transformateur de conversion ou de la bobine de lissage à l'extrémité de la traversée à courant continu située du côté de l'huile

Note 1 à l'article: Les barrières d'isolation sont généralement utilisées pour les réseaux à courant continu de tension nominale supérieure à 150 kV.

3.1.21

courant de fuite

courant de conduction

courant résultant de la résistance de l'isolation diélectrique et de la fuite en surface

3.2 Liste des variables

$I_{eq,DC}$	est le courant continu (ou d'essai) total équivalent;
I_h	est l'amplitude du h^e courant harmonique dans le transformateur;
$I_{test,AC}$	est le courant alternatif à la fréquence fondamentale appliqué pendant l'essai thermique;
R_{AC}	est la résistance des parties sous tension de la traversée à l'essai à la fréquence fondamentale (ou d'essai);
R_{DC}	est la résistance en courant continu du courant de charge traversant la partie de la traversée à l'essai;
R_h	est la résistance en courant alternatif du courant de charge traversant la partie de la traversée au h^e harmonique;
U_1	est la tension assignée (voir 4.1.1 et 4.1.2);
U_{AC}	est la tension d'essai efficace alternative pour le mesurage des décharges partielles;
U_{dm}	est la tension continue la plus élevée par pont à valve;
U_{DC}	est la tension continue d'essai de tenue;
U_{pr}	est la tension d'essai pour la polarité inverse (tension continue);
U_{vm}	est la tension maximale de service alternative entre phases des enroulements à valve du transformateur de conversion sur lequel la traversée sera assemblée. Ce paramètre s'applique également aux traversées de paroi installées du côté courant alternatif de la valve du convertisseur;
N	est le nombre de ponts de six impulsions en série du neutre de la ligne continue au pont redresseur connecté à la traversée lorsqu'il est monté sur le transformateur de conversion. Ce paramètre s'applique également aux traversées de paroi installées du côté courant alternatif de la valve du convertisseur.

4 Caractéristiques assignées

4.1 Tensions assignées

4.1.1 Tension continue permanente assignée

La tension continue permanente assignée est la tension continue permanente maximale assignée à la traversée par le fabricant pour les conditions spécifiées de service.

4.1.2 Tension de crête assignée

La tension de crête assignée est la valeur maximale de la combinaison de la tension continue plus la tension alternative de crête à laquelle il est exigé que la traversée résiste dans des conditions spécifiées de service.

4.2 Niveaux d'isolement

Conformément à l'IEC 60071-5, les niveaux d'isolement pour les traversées utilisées dans des applications à courant continu ne suivent généralement pas les valeurs normales du niveau d'isolement indiqué dans l'IEC 60071-1. L'acheteur doit spécifier les niveaux d'isolement. Les méthodes de calcul pour les tensions d'essai sont données dans les articles appropriés de la présente norme.

4.3 Courants assignés

La définition du courant assigné dépend de l'application de la traversée. Si la traversée est destinée à une application à courant continu pure, les caractéristiques assignées sont définies en 4.3.1. Si la traversée est destinée à une application de tension combinée, les caractéristiques assignées sont définies en 4.3.2.

4.3.1 Applications à courant continu pures

4.3.1.1 Courant continu permanent assigné

Le courant continu permanent assigné est le courant continu permanent maximal qu'il est exigé que la traversée supporte dans des conditions spécifiées de service.

4.3.1.2 Courant continu de surcharge assignée

Le courant continu de surcharge assigné est le courant continu maximal qu'il est exigé que la traversée supporte pendant une durée et à une température ambiante établies. L'acheteur doit spécifier l'amplitude du courant, la durée et la fréquence d'occurrence.

4.3.2 Applications de tension combinées

Dans ces applications, la traversée est généralement exigée pour transporter un courant alternatif.

4.3.2.1 Courant alternatif permanent assigné

Le courant alternatif permanent assigné est l'équivalent, en valeur efficace, de la forme d'onde du courant réel (y compris les composantes fondamentales et de fréquence harmonique) qu'il est exigé que la traversée transporte, basé sur le courant continu de charge assigné commuté avec la réactance de commutation zéro.

$$I_v = I_d \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \approx I_d \cdot 0,816 \quad (1)$$

où

I_v est la valeur efficace du courant côté courant alternatif;

I_d est le courant côté courant continu.

D'après l'angle d'empiètement nul à la réactance de commutation zéro.

4.3.2.2 Courant alternatif de surcharge assigné

Le courant alternatif de surcharge assigné est le courant alternatif maximal qu'il est exigé que la traversée transporte pendant une durée et à une température ambiante établies. Ce courant doit être l'équivalent, en valeur efficace, de la forme d'onde du courant réel qu'il est exigé que la traversée transporte, basé sur le courant continu de surcharge assigné, commuté avec la réactance de commutation zéro.

4.3.2.3 Courant momentané (de courte durée) assigné

Le courant momentané de courte durée assigné est le courant qui circule dans la traversée lorsque le pic principal du cycle maximal tel que déterminé selon l'enveloppe de l'onde de courant est atteint. Ce courant est exprimé en valeur efficace comprenant la composante en courant continu. Sauf spécification contraire, la durée du courant momentané doit être de 1 s.

4.4 Fréquence assignée

La fréquence assignée est la fréquence du réseau en courant alternatif à laquelle la traversée est raccordée. La fréquence assignée des traversées pour application à courant continu pure est «DC» (courant continu).

4.5 Paramètres de pollution

L'acheteur doit spécifier la ligne de fuite minimale ou la ligne de fuite spécifique unifiée minimale (voir l'IEC 60815-1) ou, en variante, le degré de sévérité de pollution.

La ligne de fuite nécessaire peut être déterminée à partir de la ligne de fuite spécifique unifiée, comme suit:

$$C \times U_1 \times k_d \quad (2)$$

où

C est la ligne de fuite spécifique unifiée (USCD - *unified specific creepage distance*) nominale minimale, voir l'IEC 60050-471:2007, 471-01-16;

k_d est le facteur de correction dépendant du diamètre moyen de la traversée;

U_1 est la tension continue permanente assignée ou la valeur efficace de la tension phase-terre combinée courant continu/courant alternatif, selon le point d'application de la traversée dans le schéma électrique (kV);

Pour les tensions combinées:

$$U_1 = \sqrt{\left((N - 0,5) \times U_{dm} \right)^2 + \left(\frac{U_{vm}}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (3)$$

Pour les traversées d'intérieur, la valeur minimale de l'USCD doit être de 17 mm/kV.

Si des essais sous pollution artificielle sont exigés, ils doivent être effectués selon 10.1.

NOTE Les valeurs de l'USCD et de k_d pour les traversées d'extérieur sont à l'étude par le TC 36 de l'IEC: Isolateurs.

5 Conditions de service

5.1 Généralités

Les traversées conformes à la présente norme doivent, sauf indication contraire, être appropriées pour fonctionner à des valeurs assignées dans des conditions définies dans l'IEC 60137 et résumées comme suit:

- La température de l'air ambiant est à l'intérieur des limites spécifiées dans le Tableau 1.
- L'altitude ne dépasse pas 1 000 m.

- c) La température de l'huile isolante du transformateur, dans laquelle l'extrémité de la traversée située du côté de l'huile est immergée, est à l'intérieur des limites spécifiées dans le Tableau 1.
- d) Les températures et les échauffements des connexions extérieures et les parties métalliques en contact avec les matériaux isolants ne dépassent pas les limites données dans le Tableau 2 de l'IEC 60137:2008.
- e) Aucune condensation d'humidité n'est présente sur la surface extérieure de la partie intérieure des traversées d'extérieur/d'intérieur, les traversées d'intérieur et les traversées d'intérieur immergées.

Tableau 1 – Température de l'air ambiant et des milieux d'immersion (voir 5.1)

Sujet	Température °C
Air ambiant:	
– maximale à l'extérieur	40
– maximale à l'intérieur (foyer à valve)	^a
– maximale journalière moyenne (en plein air)	30
– maximale journalière moyenne (dans des conduits isolés à l'air)	70
– maximale annuelle moyenne	20
– minimale à l'intérieur (foyer à valve)	5
– minimale à l'extérieur	-30
Huile dans les transformateurs:	
– maximale	
• pour un régime de puissance assignée	100
• pour un régime d'urgence de longue durée ^b	115
– maximale journalière moyenne	90 ^d
Autres milieux: (gazeux et non gazeux)	^c
NOTE 1 Il convient de calculer la température journalière moyenne du milieu d'immersion par un calcul de la moyenne de 24 relevés horaires consécutifs.	
NOTE 2 D'autres plages de températures peuvent être adoptées par un accord entre l'acheteur et le fournisseur.	
^a La température maximale en foyer à valve doit être spécifiée pour chaque projet spécifique. Il doit également être spécifié que la température ambiante maximale en foyer à valve est normalement comprise entre 40 °C et 60 °C en fonction de la technologie utilisée.	
^b Les valeurs correspondant à l'huile dans les transformateurs sont conformes à l'IEC 60076-1 et l'IEC 60076-2. La valeur correspondant au régime d'urgence est conforme à l'IEC 60076-7.	
^c En l'absence d'autres informations, il convient, en principe, de se référer à la norme d'appareillages IEC correspondante pour laquelle la traversée est prévue. Il convient par ailleurs d'accorder une attention particulière aux traversées dont une des extrémités doit être immergée dans le gaz.	
^d Lorsqu'une température maximale journalière moyenne de 95 °C est spécifiée conformément à l'IEEE Std C57.19.00, l'échauffement de la traversée doit être réduit de manière appropriée.	

5.2 Facteurs influant sur la conception, l'essai et l'application

Lorsque des conditions particulières de service existent, elles doivent être spécifiées par l'acheteur.

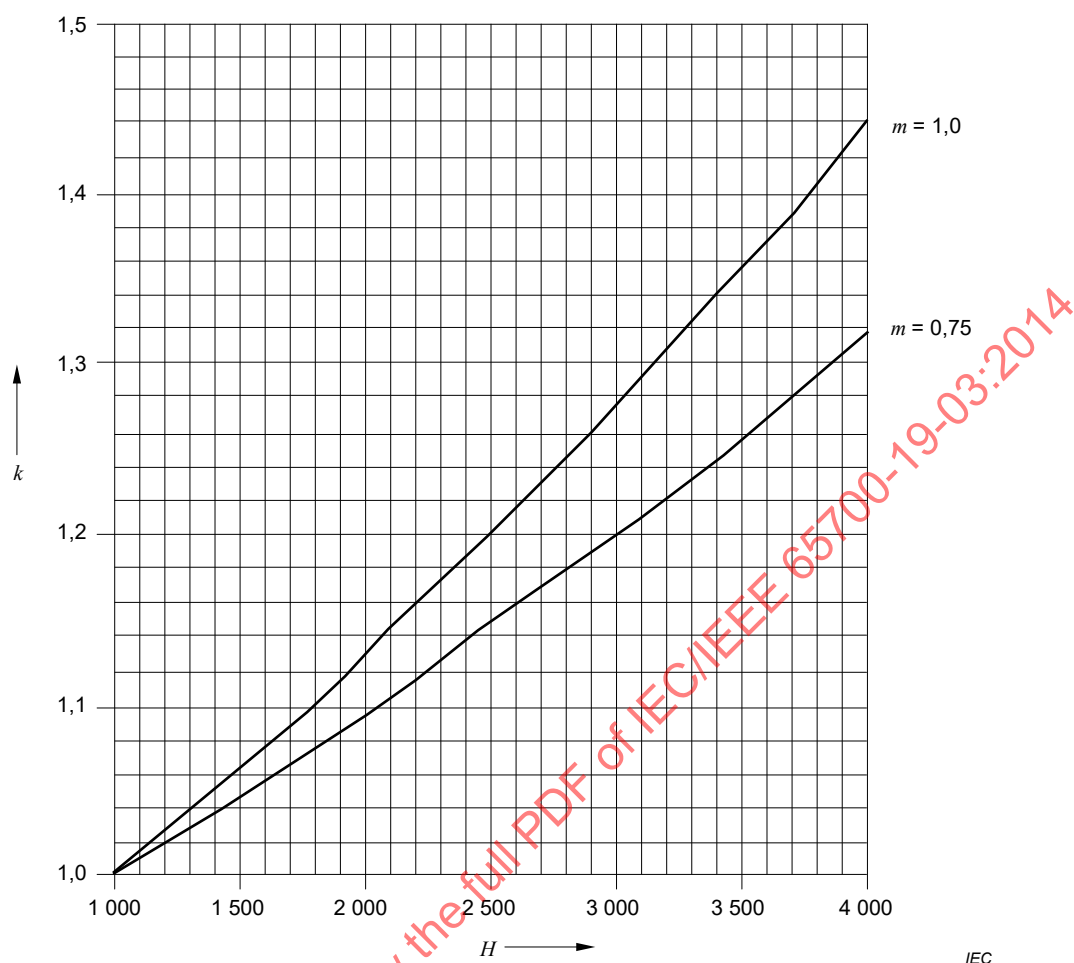
Les exemples de telles conditions sont les suivants:

- a) La température de l'air ambiant, pour les traversées fonctionnant entièrement ou partiellement dans le foyer à valve. Il est fréquent que les températures CCHT maximales de l'air dans les valves dépassent largement la température normale maximale de l'air de 40 °C. Les valeurs jusqu'à 60 °C sont courantes. Ces températures élevées de l'air, ainsi que la température maximale de service, ont des effets significatifs sur la tenue diélectrique. Si une température de l'air ambiant en foyer à valve dépassant 40 °C est spécifiée, il convient de porter une attention particulière aux performances de tenue diélectrique ainsi qu'à la température maximale de service.
- b) La ligne de fuite externe peut être obtenue à l'aide d'ailettes de porcelaine, de caoutchouc de silicone ou d'autres matériaux. Lorsque le caoutchouc de silicone est utilisé, le choix et la quantité de matières de remplissage peuvent avoir une incidence considérable sur la durée de vie utile. Le type de profil des ailettes, tel qu'antibuée ou long-court (rapport 0,7), peut améliorer les conditions de tenue en tension par rapport à une conception d'ailettes homogène ou uniforme.
- c) L'inclinaison.
- d) La charge sismique.
- e) Les vibrations et les chocs.
- f) Les conditions de stockage et de transport.
- g) Les autres conditions thermiques.
- h) Des fumées ou des vapeurs corrosives, des poussières trop abrasives ou conductrices, des mélanges explosifs de poussière ou de gaz, des projections salées, du givre, etc.
- i) La proximité de barrières d'isolation ou de parois mises à la terre à l'intérieur du transformateur ou de la bobine d'inductance.
- j) La proximité des parois ou du toit d'un bâtiment.
- k) Les conditions de charge de glace.
- l) Les surcharges.

5.3 Correction de l'altitude

Bien que le niveau d'isolement fasse référence au niveau de la mer, les traversées qui relèvent de la présente norme sont déclarées adaptées à une utilisation à toute altitude ne dépassant pas 1 000 m. Pour garantir que les tensions de tenue extérieures de la traversée sont suffisantes à des altitudes supérieures à 1 000 m, la distance d'arc normalement exigée doit être augmentée selon une valeur appropriée. Il n'est pas nécessaire d'adapter l'épaisseur radiale de l'isolation ni la dimension de l'extrémité immergée. La tension de perforation et la tension de contournement dans le milieu d'immersion d'une traversée ne sont pas affectées par l'altitude.

Pour des installations à une altitude supérieure à 1 000 m, la distance d'arc dans les conditions atmosphériques normales de référence doit être déterminée afin de résister aux tensions obtenues en multipliant les tensions de tenue exigées à l'emplacement de service par un facteur k , conformément à la Figure 1.



Ces facteurs sont calculés par l'équation suivante:

$$k = e^{m(H-1\,000)/8\,150}$$

où

H est l'altitude (m);

$m = 1$ pour la fréquence industrielle et la tension de tenue aux chocs de foudre;

$m = 0,75$ pour la tension de tenue aux chocs de manœuvre.

NOTE Des informations limitées sont disponibles concernant la correction de l'altitude en courant continu. Un facteur $m = 1$ est jugé sécuritaire.

Figure 1 – Facteur de correction d'altitude

En raison des limitations de la résistance à la perforation et de la tension de contournement dans les milieux d'immersion, il peut ne pas toujours s'avérer possible de vérifier le caractère approprié de la distance d'arc augmentée par des essais réels à une altitude quelconque inférieure à celle de service. Dans ce cas, le fournisseur doit démontrer que la distance d'arc de la traversée est appropriée.

5.4 Interchangeabilité

Les traversées à courant continu dans les transformateurs de conversion et les bobines de lissage ne sont normalement pas interchangeables avec d'autres traversées à courant continu de même tension et de même intensité. Ceci est dû au fait que les feuilles du condensateur

doivent être alignées de manière appropriée avec les barrières d'isolation afin de réduire le plus possible les contraintes de tension. Ceci peut ne pas s'appliquer aux traversées à courant continu sans barrières d'isolation.

6 Exigences générales

6.1 Exigences électriques

- Essais de tenue en tension
- Décharges partielles
- Facteur de dissipation et capacité
- Prise de tension de traversée. Les traversées à répartition capacitive peuvent être équipées d'une prise de tension. Cette prise est normalement conçue pour être utilisée comme diviseur de tension en fonctionnement normal et peut exiger l'utilisation d'une capacité supplémentaire pour limiter la tension de sortie et les dispositifs de protection. Ces composants supplémentaires peuvent être montés directement sur la traversée ou dans l'armoire de manœuvre du transformateur.
- Prise de mesure de traversée. Les traversées à répartition capacitive peuvent être équipées d'une prise de mesure de traversée. Cette prise est normalement mise à la terre et est conçue pour mesurer le facteur de dissipation, la capacité du conducteur à la prise, et les décharges partielles. Étant donné que la capacité de la prise à la terre n'est pas commandée, la prise n'est pas conçue pour être utilisée comme diviseur de tension en fonctionnement normal. Les fonctionnalités de la prise de mesure de traversée peuvent être intégrées à la prise de tension.
- Lorsqu'elles ne sont pas utilisées, la prise de tension et la prise de mesure doivent être mises à la terre de manière efficace tout au long de la durée de vie de la traversée.
- Ligne de fuite

6.2 Exigences mécaniques

- Dimensions
- Tenue à la flexion
- Pression interne et vide
- Les traversées d'appareillages doivent être conçues pour résister à un vide complet lorsqu'elles sont montées dans le corps d'un appareillage
- Pression du capot d'une traversée à conducteur démontable

Le liquide ou le gaz d'une isolation interne de traversée doit être conforme aux normes applicables de matériaux:

- l'IEC 60376 pour SF₆ neuf ou l'IEC 60480 pour SF₆ usagé.
- l'IEC 60296 pour l'huile, ou
- l'IEC 60836 ou l'IEC 60867 pour les fluides de synthèse.

6.3 Marquages de la plaque d'identification

Les renseignements suivants doivent apparaître sur toutes les plaques d'identification de traversées:

- Le nom du fabricant, le numéro d'identification, le type, l'année de fabrication et le numéro de série.
- La tension continue permanente assignée (pour les traversées pour les applications à courant continu pures, voir 4.1.1).
- La tension de crête assignée (pour les traversées pour applications de tension combinées, voir 4.1.2).

- Le courant continu permanent assigné, le cas échéant.
- Le courant alternatif permanent assigné, le cas échéant.
- La tenue en tension aux chocs de foudre à sec.
- La tenue en tension aux chocs de manœuvre à sec ou sous pluie ou la tenue en tension à fréquence industrielle à sec.
- Les capacités, C_1 et C_2 , sur toutes les traversées équipées de prises de tension, et C_1 sur toutes les traversées équipées de prises de mesure.
- Le facteur de dissipation mesuré du conducteur vers la prise, le cas échéant.
- Le type de gaz isolant, et la pression minimale, le cas échéant.
- La masse si elle est supérieure à 100 kg.
- L'angle maximal de montage s'il excède 30° de la verticale.

7 Exigences d'essai

7.1 Exigences générales

Les essais doivent être réalisés conformément à l'Article 7 de l'IEC 60137:2008 (Exigences d'essai), sauf indication différente ci-après. Le cas échéant, une référence doit aussi être faite à l'IEC 61378-2, l'IEC 61462 et l'IEC 62155.

- La plupart des essais diélectriques individuels et des essais de type peuvent être effectués avec l'axe de la traversée à toutes les inclinaisons sans tenir compte de son angle prévu de service, le cas échéant.
- L'essai de tenue en tension aux chocs de manœuvre sous pluie et les essais thermiques, mécaniques, et spéciaux doivent être effectués avec la traversée montée sur son angle prévu de service, à moins que d'autres dispositions n'aient été convenues et qu'elles s'avèrent compatibles et suffisantes.
- Les essais en courant continu sur les traversées de transformateurs de conversion et de bobines d'inductance doivent être effectués avec une isolation externe (barrières) et des plans de masse entourant la partie inférieure de la traversée dans une position se rapprochant autant que possible de celle de la condition prévue de service. La simulation de la disposition d'isolation peut faire l'objet d'un accord entre le fabricant et l'acheteur.
- Lorsqu'une traversée est soumise à des essais de tenue à une tension continue appliquée et à des essais de polarité inverse et qu'elle est soumise à l'essai avec un système temporaire de barrières d'isolation dans de l'huile, il est recommandé de consigner la conductivité et la teneur en fibres de l'huile.
- Les essais en courant continu sur les traversées à paroi (plafond) doivent être effectués avec des dispositions de plans de masse et montées de façon aussi proche que possible des conditions prévues de service.
- A l'exception des essais mécaniques, tous les essais doivent être effectués avec la traversée montée sur une structure de support et ses extrémités se trouvant dans le milieu du type dans lequel elles sont destinées à fonctionner.

7.2 Conditions d'essai

7.2.1 Température ambiante

La température ambiante au moment de l'essai doit être comprise entre 10 °C et 40 °C.

7.2.2 Humidité

L'humidité absolue au moment de l'essai doit être comprise entre 1,0 g/m³ et 15,0 g/m³.

7.2.3 Facteurs de correction

Les facteurs de correction doivent être conformes au Tableau 7 de l'IEC 60137:2008. En outre, les paramètres suivants peuvent être appliqués

- Essai de tenue à la tension continue: facteurs de correction $k_1 \times k_2$.
- Essai de polarité inverse: aucune correction.

Lorsque la température maximale de l'air ambiant spécifiée dans un foyer à valve dépasse 40 °C, les tensions d'essai doivent être corrigées pour la température ambiante élevée et l'humidité minimale spécifiée de l'air ambiant. Les tensions équivalentes d'essai «de l'air ambiant de référence» doivent être calculées en divisant les tensions d'essai par le facteur calculé k_1 et/ou k_2 , le cas échéant. L'air ambiant de référence est réputé avoir une température de 20 °C, une humidité relative de 60 % (11 g/m³) et une pression atmosphérique de 101,3 kPa. Les tensions d'essai doivent être corrigées davantage en cas d'écarts entre les conditions atmosphériques dans l'enceinte d'essai et les conditions de l'air ambiant de référence.

7.3 Classification des essais

7.3.1 Essais de type (ou de conception)

Les essais de type sont les essais effectués pour déterminer le caractère approprié de la conception d'une traversée d'appareillage de type, style, ou modèle de puissance particulier, pour satisfaire à ses caractéristiques assignées, pour fonctionner de manière satisfaisante en conditions habituelles de service ou dans des conditions particulières si elles sont spécifiées, et pour démontrer la conformité aux normes appropriées de l'industrie.

Les essais de type sont effectués uniquement sur des traversées représentatives afin de vérifier les caractéristiques assignées à toutes les traversées de même conception. Ces essais ne sont pas destinés à être effectués dans le cadre d'une production normale. Les parties applicables de ces essais peuvent également être utilisées pour évaluer les modifications d'une conception précédente et pour assurer que les performances n'ont pas été dégradées. Les données d'essai obtenues avec les conceptions précédentes peuvent être utilisées pour les conceptions actuelles, le cas échéant. Une fois ces essais effectués, il n'est pas nécessaire de les répéter, sauf si la conception a changé de sorte à modifier les performances.

Pendant les essais de type, la traversée est soumise à des contraintes plus élevées que celles rencontrées habituellement en service et elle doit supporter ces essais sans défaillance partielle ou complète. Les dommages dissimulés qui peuvent se produire durant les essais de type peuvent souvent être détectés en comparant les valeurs initiales et finales de capacité, le facteur de puissance et la quantité de décharges partielles.

Les essais de type sont inclus dans le Tableau 2; l'applicabilité à des types particuliers de traversées est décrite en détail dans l'article pertinent.

Tableau 2 – Essais de type, individuels de série et spéciaux

Essai	Article		
	Type	Individuel de série	Spécial
Mesurage du facteur de dissipation et de la capacité		9.1	
Tenue en tension à fréquence industrielle	8.1	9.3	
Tenue en tension aux chocs de foudre à sec	8.2	9.2	
Tenue en tension aux chocs de manœuvre à sec ou sous pluie	8.3	9.6	
Tenue à la tension continue appliquée avec mesurage des décharges partielles	9.4	9.4	
Polarité inverse en courant continu	9.5	9.5	
Compatibilité électromagnétique (CEM)	8.4		
Échauffement	8.5		
Tenue à la charge de flexion	8.6		
Essai d'étanchéité sur des traversées à remplissage de liquide, à remplissage de mélange et à isolation liquide	8.7		
Essai de pression interne des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse	8.8		
Vérification des dimensions	8.9	9.12	
Pression du capot d'une traversée à conducteur démontable	8.10		
Essai de l'isolement des prises		9.7	
Essai de pression interne des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse		9.8	
Essai d'étanchéité sur des traversées à remplissage de liquide, à remplissage de mélange et à isolation liquide		9.9	
Essai d'étanchéité des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse		9.10	
Essai d'étanchéité de la bride ou autre dispositif de fixation		9.11	
Tenue à la pollution artificielle			10.1
Essai de tension continue sous humidité uniforme			10.2
Essai de tension continue sous humidité non uniforme			10.3

7.3.2 Essais individuels de série

Les essais individuels de série sont inclus dans le Tableau 2; l'applicabilité à des types particuliers de traversées est décrite en détail dans l'article pertinent. La séquence d'essais n'est pas spécifiée et peut être convenue entre l'acheteur et le fournisseur. Il est recommandé d'effectuer les essais d'isolement des prises et d'étanchéité avant l'essai diélectrique. Le mesurage du facteur de dissipation et de la capacité doit être effectué avant et après les essais de tenue afin de vérifier l'absence de modification de l'état de la traversée.

7.3.3 Essais spéciaux

Les essais spéciaux sont inclus dans le Tableau 2 et doivent être effectués uniquement lorsqu'ils font l'objet d'un accord contractuel entre l'acheteur et le fournisseur. Ces essais sont applicables uniquement aux traversées d'extérieur.

8 Essais de type

8.1 Essai de tenue en tension à fréquence industrielle à sec avec mesurage des décharges partielles

8.1.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à tous les types de traversées.

8.1.2 Méthode d'essai et exigences

Les essais doivent être effectués comme spécifié en 9.3.2, sauf que la tension U_{ac} à l'étape c) doit être appliquée pendant 1 h. Les mesurages des décharges partielles doivent être effectués en continu et les valeurs relevées doivent être consignées toutes les 5 min.

8.1.3 Acceptation

Les critères d'acceptation selon les niveaux de décharges partielles sont conformes à 9.3.3. Si un contournement se produit à l'extérieur de l'enveloppe isolante, l'essai peut être répété. Si ce nouvel essai aboutit également à un contournement, la traversée doit être considérée comme n'ayant pas satisfait à l'essai.

Les contournements démontrés comme étant externes à l'objet d'essai doivent être ignorés.

8.2 Essai de tenue en tension aux chocs de foudre à sec (BIL)

8.2.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à tous les types de traversées.

8.2.2 Méthode d'essai et exigences

La tension d'essai de choc plein doit être comme spécifiée par l'acheteur.

Les essais doivent être effectués avec les séquences suivantes d'applications:

- 15 chocs pleins, de polarité positive, suivis de
- 15 chocs pleins, de polarité négative

du choc de foudre normal 1,2/50 μ s.

Les traversées pour transformateurs de BIL supérieure à 550 kVp doivent être soumises à

- 15 chocs pleins, de polarité positive, suivis de
- 1 choc plein de polarité négative à 110 % de la BIL assignée, suivi de
- 5 chocs entrecoupés de polarité négative à 121 % de la BIL assignée, suivis de
- 14 chocs pleins de polarité négative à 110 % de la BIL assignée.

La durée d'amorçage du dispositif de coupure doit être comprise entre 2 μ s et 6 μ s.

Après avoir changé de polarité, il est admis d'appliquer quelques chocs de faible amplitude avant l'application des chocs d'essai. Les intervalles de temps entre les applications successives de la tension doivent être suffisants pour éviter l'influence de l'application précédente de tension.

8.2.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si les critères donnés dans l'IEC 60137:2008 (8.3.3) sont satisfaits.

8.3 Essai de tenue en tension de chocs de manœuvre à sec ou sous pluie (SIL)

8.3.1 Applicabilité

L'essai à sec s'applique à toutes les traversées. L'essai sous pluie s'applique aux traversées d'extérieur. Lorsqu'un essai sous pluie est effectué, il n'est pas nécessaire d'effectuer un essai à sec.

8.3.2 Méthode d'essai et exigences

Pour simuler les conditions de service, la traversée doit être conforme aux conditions mentionnées en 7.1. Les conditions artificielles de chute de pluie doivent être conformes au Tableau 2 de l'IEC 60060-1:2010 (Caractéristiques d'aspersion pour la procédure normalisée).

NOTE Une répartition uniforme de la pluie sur de très longs isolateurs s'avère difficile et un accord spécial peut être nécessaire.

La valeur de la tension d'essai doit être comme spécifiée par l'acheteur. La procédure d'essai doit être conforme aux exigences données dans l'IEC 60137:2008 (8.4.2).

8.3.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si les critères donnés dans l'IEC 60137:2008 (8.4.3) sont satisfaits.

8.4 Essais de compatibilité électromagnétique (CEM)

8.4.1 Essai d'émission

8.4.1.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à tous les types de traversées dont la tension continue permanente assignée est supérieure ou égale à 150 kV.

8.4.1.2 Méthode d'essai et exigences

La configuration d'essai doit être préparée tel que décrit dans l'article pertinent de l'IEC 60137. Les méthodes d'étalonnage de l'instrument de mesure et des circuits de mesure sont données, respectivement, dans la CISPR 16-1 et la CISPR 18-2.

Une tension alternative égale à $1,1 U_p/\sqrt{2}$ doit être appliquée à la traversée et maintenue pendant au moins 5 min, U_p étant la tension de crête assignée (voir 4.1.2). La tension doit ensuite être diminuée par pas jusqu'à $0,3 U_p/\sqrt{2}$, de nouveau augmentée par pas jusqu'à la valeur initiale, et finalement diminuée par pas jusqu'à $0,3 U_p/\sqrt{2}$. À chaque pas, un mesurage de perturbation radioélectrique doit être effectué et le niveau de perturbation radioélectrique, tel que consigné pendant la dernière série de réductions de tension, doit être tracé en fonction de la tension appliquée; la courbe ainsi obtenue est la caractéristique de la perturbation radioélectrique de la traversée. L'amplitude des pas de tension doit être d'environ $0,1 U_p/\sqrt{2}$.

8.4.1.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si le niveau de perturbation radioélectrique à $1,1 U_p/\sqrt{2}$ ne dépasse pas $2\,500\,\mu\text{V}$. Les activités temporaires de décharge, pouvant survenir pendant les ajustements majeurs de tension, peuvent être négligées.

S'il peut être démontré que la traversée, sans blindage externe, ne présente pas de décharges partielles, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de décharges au-dessus du niveau de bruit de fond spécifié en 9.3.2, elle peut être considérée comme satisfaisant aux exigences de l'essai d'émission sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des essais.

8.4.2 Essai d'immunité

Les traversées à courant continu ne sont pas affectées par d'éventuelles émissions électromagnétiques. Par conséquent, cet essai n'est pas exigé.

8.5 Essai d'échauffement

8.5.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à tous les types de traversées.

8.5.2 Méthode d'essai et exigences

L'essai doit être effectué conformément aux exigences de l'IEC 60137:2008 (8.7). D'autres conditions d'essai qui reflètent les conditions particulières de service (voir l'Article 5) peuvent être utilisées.

La température de l'air environnant doit être comprise entre 10 °C et 40 °C. Aucune correction relative à la variation de la température ambiante comprise dans cette plage ne doit être appliquée. Pour les projets au cours desquels la température de l'air ambiant dans les foyers à valve CCHT dépasse 40 °C, il convient, de préférence, que le côté air de la traversée du foyer à valve soit sous enveloppe pendant l'essai d'échauffement. Il convient que l'enveloppe soit suffisamment grande pour éviter toute interférence avec la convection thermique d'air le long de la surface de la traversée, et simuler la température maximale spécifiée de l'air ambiant dans le foyer à valve avec une tolérance de ± 2 °C. Si l'essai thermique est effectué sans simulation de la température de l'air ambiant dans le foyer à valve, par exemple, s'il est effectué à la température ambiante normale d'un laboratoire (entre 10 °C et 40 °C), alors les températures maximales admissibles du point chaud et des bornes de la traversée doivent être réduites d'une grandeur prédéfinie. Cette grandeur dépend du milieu avec lequel la traversée est en contact pendant l'essai. Il peut s'agir de l'écart entre la température maximale de l'air ambiant dans le foyer à valve et la température ambiante pendant l'essai. S'il peut être démontré, par des calculs basés sur des essais réels, que l'influence de la température de l'air ambiant dans le foyer à valve sur le point chaud de la traversée est inférieure à ce simple écart, la grandeur de réduction peut être inférieure.

L'utilisation d'un connecteur type de service est recommandée pendant l'essai d'échauffement étant donné que la température de travail du côté de la borne peut se trouver au point critique aux températures élevées de l'air ambiant qui prévalent dans le foyer à valve CCHT.

Les traversées à courant continu (traversées à paroi et de transformateurs) sont soumises à une quantité importante de courants harmoniques. Ces courants harmoniques ne peuvent pas être facilement reproduits en laboratoire. Le courant continu ou alternatif équivalent à fréquence industrielle (50 Hz ou 60 Hz) doit alors être utilisé. L'amplitude du courant équivalent d'essai doit produire les mêmes puissances totales absorbées calculées pour le spectre spécifié de courant harmonique.

Le courant équivalent d'essai doit être calculé comme suit ou par d'autres méthodes convenues:

$$I_{eq,DC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 x R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 x R_h}{R_{DC}}} \quad (4)$$

En cas d'essai à fréquence industrielle

$$I_{eq,AC} = \sqrt{\frac{I_{DC}^2 \times R_{DC} + \sum_{h=1}^n I_h^2 \times R_h}{R_{AC}}} \quad (5)$$

Voir la liste des variables en 3.2.

Il convient de déterminer les valeurs de R_h par des mesurages ou des calculs. La méthode de calcul mise en évidence dans l'IEEE Std C37.23 peut être utilisée. D'autres méthodes de calcul impliquant des modèles d'éléments finis peuvent être utilisées s'il a été prouvé qu'elles sont appropriées. Il convient que la méthode de calcul fasse l'objet d'un accord.

NOTE L'Annexe B donne des informations complémentaires sur la détermination du courant équivalent.

8.5.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si les limites de l'IEC 60137:2008 (Tableau 2) sont respectées.

8.6 Essai de tenue à la charge de flexion

8.6.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à tous les types de traversées (côté air).

8.6.2 Méthode d'essai et exigences

Les valeurs d'essai doivent être conformes au Tableau 3.

L'essai doit être effectué conformément aux exigences données dans l'IEC 60137:2008 (8.9.2).

Pour les traversées ayant plus d'un raccord à leur extrémité côté air, la pleine charge d'essai doit être appliquée consécutivement à chaque raccord. Pour les traversées de paroi, chaque côté doit être soumis à l'essai séparément.

Tableau 3 – Valeurs minimales de la tenue à la charge de flexion

Tension de tenue assignée aux chocs de foudre kV	Courant assigné A					
	≤ 1 250		> 1 250 à < 3 150		≥ 3 150	
	Charge de flexion de service N (Newton)					
	Charge normale	Charge élevée	Charge normale	Charge élevée	Charge normale	Charge élevée
< 450	625	1 000	1 000	1 575	2 000	2 000
450 à 650	800	1 575	1 250	2 000	2 000	2 000
750 à 950	800	2 000	1 250	2 500	2 000	2 500
≥ 1 050	1 250	2 000	1 575	2 500	2 500	2 500

Tension de tenue assignée aux chocs de foudre kV	Courant assigné A					
	≤ 1 250		> 1 250 à < 3 150		≥ 3 150	
	Charge de flexion d'essai N (Newton)					
	Charge normale	Charge élevée	Charge normale	Charge élevée	Charge normale	Charge élevée
< 450	1 250	2 000	2 000	3 150	4 000	4 000
450 à 650	1 600	3 150	2 500	4 000	4 000	4 000
750 à 950	1 600	4 000	2 500	5 000	4 000	5 000
≥ 1 050	2 500	4 000	3 150	5 000	5 000	5 000

NOTE 1 Ces valeurs sont modifiées par rapport à celles du Tableau 1 de l'IEC 60137:2008, à des fins d'harmonisation et de regroupement.

NOTE 2 Les charges de flexion de service comprennent l'effort sur les raccords et la pression du vent (70 Pa), voir l'IEC 61463.

NOTE 3 Pour les traversées fonctionnant avec un angle >30° par rapport à la verticale, il convient de prendre en compte l'effet du propre poids de la traversée. Les valeurs données ci-dessus correspondent à des traversées verticales, qui doivent être soumises à l'essai en position verticale. Lorsqu'une traversée inclinée ou horizontale doit être soumise à l'essai verticalement, une force équivalente doit alors être ajoutée pour réaliser le moment de flexion au niveau de la bride, du fait du poids de la traversée dans sa position de fonctionnement. Si une traversée verticale doit être soumise à l'essai horizontalement, la charge d'essai peut alors être réduite de la même manière. Il convient de compenser les matériels non fixés pendant l'essai, tels que les dispositifs de blindage, avec une masse correspondante fixée comme en service.

NOTE 4 Pour les traversées pour lesquelles les enveloppes isolantes supérieure et inférieure sont montées par effort de serrage sur le conducteur central de fixation, il est recommandé de choisir la charge de flexion d'essai en tenant compte de la dilatation thermique du conducteur due au passage du courant assigné.

NOTE 5 D'autres charges de flexion de service peuvent être spécifiées, mais il convient que la charge d'essai soit toujours au moins deux fois supérieure à la charge de service.

NOTE 6 Pour effectuer une conversion Newton/livre-force, multiplier les valeurs de la tenue à la charge de flexion par 0,225.

8.6.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si les critères donnés dans l'IEC 60137:2008 (8.9.3) sont satisfaits.

8.7 Essai d'étanchéité sur des traversées à remplissage de liquide, à remplissage de mélange et à isolation liquide

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (8.10).

8.8 Essai de pression interne des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (8.11), l'IEC 61462 ou l'IEC 62155, le cas échéant.

8.9 Vérification des dimensions

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (8.13).

8.10 Essai de pression du capot d'une traversée à conducteur démontable

8.10.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à toutes les traversées immergées ayant un conducteur démontable.

8.10.2 Méthode d'essai et exigences

La traversée doit être montée comme en fonctionnement normal. Une pression de 1 bar de pression relative $\pm 0,1$ bar doit être appliquée à l'intérieur du capot de la traversée et du tube central du conducteur démontable pendant 1 h.

8.10.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai s'il n'existe aucune trace de fuite.

9 Essais individuels de série

9.1 Mesurage du facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) et de la capacité

9.1.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à toutes les traversées à répartition capacitive.

9.1.2 Méthode d'essai et exigences

Les mesurages du facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) et de la capacité doivent être effectués avant et après l'essai de tenue en tension à fréquence industrielle à sec et les essais en courant continu (7.3.2) et conformément à l'IEC 60137:2008 (9.1).

Ces mesurages doivent être effectués à une tension comprise entre 2 kV et 20 kV et à une tension non supérieure à la tension de tenue à fréquence industrielle à sec. Les méthodes de mesure du $\tan \delta$ et de la capacité doivent être conformes à l'IEC 60137:2008 (9.1.2).

9.1.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si les modifications sont dans les limites indiquées dans le Tableau 4.

Tableau 4 – Valeurs maximales de $\tan \delta$ et de l'augmentation de $\tan \delta$

Type d'isolation de la traversée	Valeur maximale de $\tan \delta$			Capacité
	Valeur à la tension d'essai la plus élevée	Augmentation comprise entre 10 kV et la tension d'essai la plus élevée	Variation acceptable ^a	Variation acceptable % ^b
Papier imprégné d'huile	0,005	0,000 2	+0,000 2	+1,0
Papier imprégné de résine	0,007	0,000 4	+0,000 4	+1,0
Gaz	0,005	0,000 2	+0,000 2	+1,0

^a L'écart arithmétique de $\tan \delta$ mesuré à 10 kV ou à la tension d'essai la plus élevée avant et après les essais de tenue à la tension doit être dans les limites spécifiées. Par exemple, si le $\tan \delta$ de la traversée du papier imprégné d'huile était de 0,40 % avant les essais de tenue, le $\tan \delta$ maximal acceptable après les essais doit être de 0,42 %.

^b La variation de la capacité en pourcentage après les essais de tenue en tension par rapport à la valeur initiale doit être dans les limites spécifiées. Le mesurage doit être effectué à une tension indiquée en 9.1.2. La limite des traversées à répartition capacitive se base sur la disposition de 100 couches capacitives. S'il n'y a pas 100 couches capacitives, la limite doit être $(1/\text{nombre de couches}) \times 100$.

9.2 Essai de tenue en tension aux chocs de foudre à sec (BIL)

9.2.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à toutes les traversées à courant continu avec une tenue en tension aux chocs de foudre à sec supérieure ou égale à 550 kV. Lorsque la SIL assignée dépasse 83 % de la BIL, par accord entre l'acheteur et le fournisseur, un essai individuel de série de tenue en tension aux chocs de foudre à sec et/ou de tenue en tension de chocs de manœuvre à sec peut être effectué (voir 9.6).

9.2.2 Méthode d'essai et exigences

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (9.2.2).

La tension d'essai doit être telle que spécifiée par l'acheteur.

9.2.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si aucun contournement ni aucune perforation de l'isolation ne se produisent. Pour prouver l'absence de perforation pendant l'essai, il est conseillé de consigner la valeur du courant de mise à la terre.

9.3 Essai de tenue en tension à fréquence industrielle à sec avec mesurage des décharges partielles

9.3.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à toutes les traversées.

9.3.2 Méthode d'essai et exigences

En règle générale, cet essai doit être effectué comme spécifié dans l'IEC 60137 et l'IEC 60270 et comme spécifié ci-après. Il doit être effectué à une fréquence de 50 Hz ou de 60 Hz.

a) Mesurage des décharges partielles à une tension d'essai efficace U_{ac} , calculée comme suit:

- Pour les traversées de transformateurs de conversion:

$$U_{AC} = 1,15 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times \left[(N - 0,5) \times U_{dm} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_{vm} \right] \quad (6)$$

- Pour les traversées de bobines de lissage:

$$U_{AC} = 1,15 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times N \times U_{dm} \quad (7)$$

- Pour les traversées à paroi (plafond), les tensions d'essai doivent être calculées comme ci-dessus, le cas échéant, sauf que le facteur de 1,15 doit être réduit à 1,0.
 - Côté transformateurs de conversion:

$$U_{AC} = 1,0 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times \left[(N - 0,5) \times U_{dm} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_{vm} \right] \quad (8)$$

- Côté courant continu:

$$U_{AC} = 1,0 \times \frac{1,5}{\sqrt{2}} \times N \times U_{dm} \quad (9)$$

- b) Un essai de tenue à sec de 1 min doit être effectué à un niveau de tension alternative efficace égal au niveau de tension de tenue aux chocs de foudre à sec divisé par 2,1. Si $BIL/2,1$ est inférieure à U_{ac} pour la traversée, effectuer l'essai avec U_{ac} comme niveau d'essai de tenue à la fréquence industrielle pendant 60 s. Aucun mesurage des décharges partielles n'est exigé pendant cet essai.
- c) Des mesurages répétés des décharges partielles à tension équivalente de U_{ac} doivent être effectués.

9.3.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai s'il ne se produit ni contournement ou perforation et que la quantité de décharges partielles ne dépasse pas 10 pC, comme présenté dans le Tableau 5. S'il se produit une perforation, la traversée doit être considérée comme n'ayant pas satisfait à l'essai. Pour les traversées à répartition capacitive, il est défini par hypothèse qu'une perforation s'est produite si la capacité, mesurée après l'essai, dépasse celle mesurée au préalable, d'une valeur correspondant environ à la capacité d'une couche. S'il se produit un contournement, l'essai doit être répété une seule fois. Si, durant la répétition de l'essai, il ne se produit ni contournement ni perforation, la traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai.

Tableau 5 – Valeurs maximales de la quantité de décharges partielles

Type d'isolation de la traversée	Quantité maximale de décharges pC
	mesurée à
	U_{ac}
Papier imprégné d'huile	10
Papier imprégné de résine	10
Gaz	10

9.4 Essai de tenue à la tension continue appliquée avec mesurage des décharges partielles

9.4.1 Applicabilité

Cet essai est applicable à toutes les traversées à courant continu avec une tension continue permanente assignée de 150 kV ou plus. Pour les traversées à courant continu dont la tension assignée est inférieure à 150 kV, les essais individuels de série en courant continu doivent être effectués en tant qu'essais «échantillons». Pour ces essais, une traversée sur six appartenant au même lot de fabrication doit être soumise à un essai en courant continu. Si la traversée n'a pas satisfait à l'un des essais en courant continu, deux autres traversées appartenant au même lot de fabrication doivent être soumises à des essais en courant continu. Si l'une des deux traversées supplémentaires n'a pas satisfait à l'un des essais, toutes les traversées du lot de fabrication doivent être soumises à un essai en courant continu.

9.4.2 Méthode d'essai et exigences

Pendant l'essai, la température de l'huile doit être comprise entre 10 °C et 40 °C.

Pour les traversées de paroi, aucun préconditionnement de la structure d'isolation à un niveau inférieur de tension n'est permis et la tension continue doit être élevée au niveau d'essai au cours d'une période ne dépassant pas 1 min. Pour les traversées à installer sur des transformateurs de conversion ou sur des bobines de lissage, la tension continue doit être élevée au niveau de l'essai de tension continue du transformateur de conversion ou de la bobine de lissage au cours d'une période ne dépassant pas 1 min et portée au niveau de

l'essai de tension continue de la traversée au cours de la minute suivante. Dans tous les cas, la tension continue doit alors être maintenue pendant 2 h, puis la tension doit être réduite à zéro au cours d'une période ne dépassant pas 1 min.

Les mesurages des décharges partielles utilisant des appareils de mesure comme spécifié dans l'IEC 60270 doivent être effectués pendant tout l'essai de tenue en tension continue appliquée. La polarité positive doit être utilisée.

La tension continue d'essai doit être calculée comme suit:

- Pour les traversées de transformateurs de conversion:

$$U_{dc} = 1,15 \times 1,5 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,7 \times U_{vm}] \quad (10)$$

- Pour les traversées de bobines de lissage:

$$U_{dc} = 1,15 \times 1,5 \times N \times U_{dm} \quad (11)$$

- Pour les traversées de paroi, la tension d'essai doit être la même que pour l'installation appropriée à laquelle elles sont connectées, sauf que le multiplicateur 1,15 doit être réduit à 1,0.

- Côté transformateurs de conversion:

$$U_{dc} = 1,0 \times 1,5 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,7 \times U_{vm}] \quad (12)$$

- Côté courant continu:

$$U_{dc} = 1,0 \times 1,5 \times N \times U_{dm} \quad (13)$$

9.4.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si:

- Pas plus de 10 chocs de décharges partielles avec une amplitude supérieure ou égale à 2 000 pC sont consignés pendant les 30 dernières minutes de l'essai. Les chocs qui sont prouvés être à l'extérieur de l'objet à l'essai doivent être ignorés. Si cette condition n'est pas satisfaite, alors l'essai peut être prolongé de 30 min, avec l'application des critères mentionnés ci-dessus. Il peut n'y avoir qu'une seule prolongation de 30 min.
- Aucun contournement ou perforation ne doit se produire. S'il se produit une perforation, la traversée doit être considérée comme n'ayant pas satisfait à l'essai. Pour les traversées à répartition capacitive, il est défini par hypothèse qu'une perforation s'est produite si la capacité, mesurée après l'essai, dépasse celle mesurée au préalable, d'une valeur correspondant environ à la capacité d'une couche. S'il se produit un contournement, l'essai doit être répété une seule fois. Si, durant la répétition de l'essai, il ne se produit ni contournement ou perforation, la traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai.

NOTE L'utilisation d'une courbe de répartition des décharges partielles en fonction du temps peut s'avérer utile lors des comparaisons des performances de traversées d'un type similaire.

9.5 Essai de polarité inverse avec mesurage des décharges partielles

9.5.1 Applicabilité

Cet essai est applicable à toutes les traversées à courant continu avec une tension continue permanente assignée de 150 kV ou plus. Pour les traversées à courant continu dont la tension assignée est inférieure à 150 kV, les essais individuels de série en courant continu doivent être effectués en tant qu'essais «échantillons». Pour ces essais, une traversée sur six appartenant

au même lot de fabrication doit être soumise à un essai en courant continu. Si la traversée n'a pas satisfait à l'un des essais en courant continu, deux autres traversées appartenant au même lot de fabrication doivent être soumises à des essais en courant continu. Si l'une des deux traversées supplémentaires n'a pas satisfait à l'un des essais, toutes les traversées du lot de fabrication doivent être soumises à un essai en courant continu.

9.5.2 Méthode d'essai et exigences

Pendant l'essai, la température de l'huile, le cas échéant, doit être comprise entre 10 °C et 40 °C.

Un double essai inverse doit être utilisé comme représenté à la Figure 2.

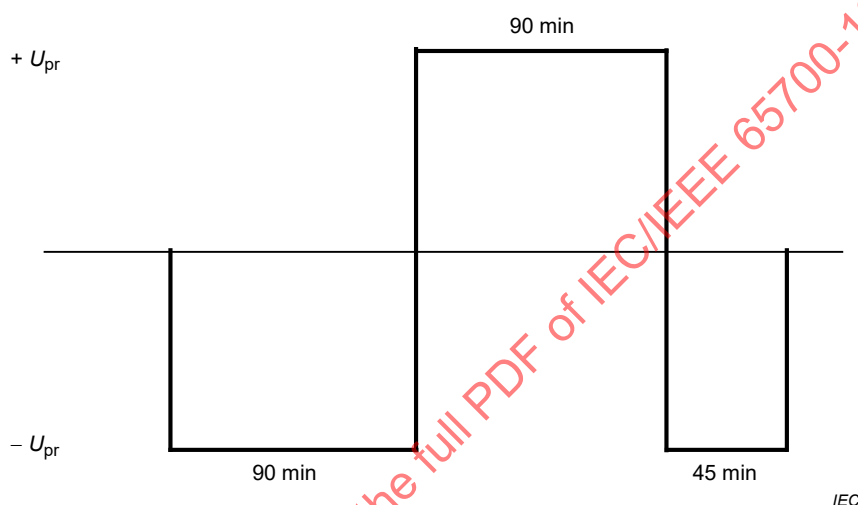


Figure 2 – Profil d'essai de polarité inverse

L'essai de la polarité inverse doit être effectué après l'essai de tenue en tension continue appliquée.

Aucun préconditionnement de la structure d'isolement à basse tension n'est permis. Après l'essai de tenue en tension continue appliquée, la traversée doit normalement être mise à la terre et être complètement déchargée avant le début de l'essai de polarité inverse. La durée exigée pour une décharge complète doit faire l'objet d'un accord entre les parties selon le type de traversée et doit être assez longue pour éviter toutes influences indues des charges piégées sur les résultats de cet essai.

Cependant, pour permettre de gagner du temps lors des essais individuels de série et par suite d'un accord entre les parties, l'essai de polarité inverse peut être commencé à n'importe quel moment après l'essai de tenue en tension continue appliquée.

La séquence d'essais doit comprendre:

- 90 min de polarité négative, suivies de
- 90 min de polarité positive, suivies de
- 45 min de polarité négative et
- une réduction de la tension à zéro.

La durée de la polarité inverse doit être aussi courte que possible, cohérente avec le matériel d'essai disponible, mais, dans tous les cas, pas plus de 2 min. La polarité inverse doit être

considérée comme complète lorsque la tension a atteint 100 % de la valeur d'essai. Les niveaux des décharges partielles doivent être surveillés pendant la séquence entière d'essais.

Les mesurages des décharges partielles doivent être effectués avec des matériels tels que spécifiés dans l'IEC 60270.

La tension d'essai de polarité inverse doit être calculée comme suit:

- Pour les traversées de transformateurs de conversion:

$$U_{pr} = 1,15 \times 1,25 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,35 \times U_{vm}] \quad (14)$$

- Pour les traversées de bobines de lissage:

$$U_{pr} = 1,15 \times 1,25 \times N \times U_{dm} \quad (15)$$

- Pour les traversées de paroi, la tension d'essai doit être la même que pour l'installation appropriée à laquelle elles sont connectées, sauf que le multiplicateur 1,15 doit être réduit à 1,0.

- Côté transformateurs de conversion:

$$U_{pr} = 1,0 \times 1,25 \times [(N - 0,5) \times U_{dm} + 0,35 \times U_{vm}] \quad (16)$$

- Côté courant continu:

$$U_{pr} = 1,0 \times 1,25 \times N \times U_{dm} \quad (17)$$

9.5.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai si:

- Pas plus de 10 chocs de décharges partielles avec une amplitude supérieure ou égale à 2 000 pC sont consignés pendant une quelconque fenêtre dynamique de 30 min du temps d'essai, en excluant les périodes inverses.
- Aucun contournement ou perforation ne doit se produire. S'il se produit une perforation, la traversée doit être considérée comme n'ayant pas satisfait à l'essai. Pour les traversées à répartition capacitive, il est défini par hypothèse qu'une perforation s'est produite si la capacité, mesurée après l'essai, dépasse celle mesurée au préalable, d'une valeur correspondant environ à la capacité d'une couche. S'il se produit un contournement, l'essai doit être répété une seule fois. Si, durant la répétition de l'essai, il ne se produit ni contournement ni perforation, la traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai.

NOTE L'utilisation d'une courbe de répartition des décharges partielles en fonction du temps peut s'avérer utile lors des comparaisons des performances de traversées d'un type similaire.

9.6 Essai de tenue aux chocs de manœuvre à sec

9.6.1 Applicabilité

Cet essai s'applique à toutes les traversées à courant continu avec une tenue en tension aux chocs de foudre à sec supérieure ou égale à 550 kV, lorsque la SIL dépasse 83 % de la BIL. Par accord contractuel, un essai individuel de série de tenue en tension aux chocs de foudre à sec et/ou de tenue en tension aux chocs de manœuvre à sec peut être effectué.

9.6.2 Méthode d'essai et exigences

Cet essai doit être effectué conformément à 8.3, sauf que seuls cinq chocs de polarité négative doivent être appliqués.

La tension d'essai doit être telle que spécifiée par l'acheteur.

9.6.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai s'il ne se produit aucun contournement ou perforation de l'isolation.

9.7 Essai de l'isolement des prises

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (9.5).

9.8 Essai de pression interne des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (9.6) et l'IEC 61462 ou l'IEC 62155, le cas échéant.

9.9 Essai d'étanchéité sur des traversées à remplissage de liquide, à remplissage de mélange et à isolation liquide

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (9.7).

9.10 Essai d'étanchéité des traversées à remplissage de gaz, à isolation gazeuse et à imprégnation gazeuse

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (9.8).

9.11 Essai d'étanchéité de la bride ou autre dispositif de fixation

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (9.9).

9.12 Examen visuel et vérification des dimensions

Cet essai doit être effectué conformément à l'IEC 60137:2008 (9.10).

10 Essais spéciaux

Selon l'accord entre l'acheteur et le constructeur, les essais spéciaux doivent être effectués seulement lorsque la tenue électrique en courant continu de l'isolation des traversées sous pollution (voir 10.1) et les conditions de surface sous humidité uniforme (voir 10.2) déterminent les dimensions et le concept de l'isolation. En complément, il peut être convenu d'exécuter des essais sous humidité non uniforme sur les traversées de paroi, dans des conditions qui reproduisent certaines positions particulières de service aussi proches de la réalité que possible (voir 10.3).

NOTE 1 La résistance électrique d'une traversée de paroi peut être affectée par l'humidité non uniforme des surfaces de l'isolateur extérieur qui peut se produire lorsque la collerette de montage de la traversée est protégée par la paroi du bâtiment, créant ainsi une zone sèche.

NOTE 2 L'humidité non uniforme des surfaces de traversées de paroi de l'isolateur peut entraîner des contournements à des tensions beaucoup plus faibles que celles obtenues durant des essais de pollution ou d'humidité avec des surfaces sous humidité uniforme. De plus, l'à-coup du courant local dû à la distribution non uniforme de tension peut solliciter l'isolation interne de la traversée de façon excessive, ce qui peut être préjudiciable à son intégrité.

10.1 Essai de pollution artificielle

10.1.1 Applicabilité

Un essai de pollution artificielle peut être appliqué aux traversées ayant des isolateurs en porcelaine, utilisées à l'extérieur et exposées aux atmosphères polluées.

10.1.2 Méthode d'essai et exigences

Si un essai est jugé nécessaire, la méthode d'essai spécifique à appliquer et le degré de tenue à la pollution doivent être spécifiés ou faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant au moment de la commande. Des propositions de méthodes d'essai de pollution artificielle sont présentées dans l'IEC 61245.

NOTE La reproductibilité des essais de pollution artificielle sur les traversées, avec des ailettes protectrices en caoutchouc de silicone, effectués dans différents laboratoires, n'a pas été établie d'une manière cohérente avec d'autres essais normalisés. Cependant, d'autres recommandations seront disponibles au fur et à mesure des recherches et lorsque les comparaisons interlaboratoires appropriées seront faites. Le problème est à l'étude par le TC 36 de l'IEC: Isolateurs.

La tension continue d'essai de tenue doit être spécifiée. En règle générale, elle coïncide avec la tension continue permanente assignée. Les essais sont généralement effectués en polarité négative.

10.1.3 Acceptation

L'objet de cet essai est de confirmer la tenue au degré de pollution et à la tension d'essai spécifiée. Les caractéristiques spécifiées de la traversée sont confirmées si aucun contournement ni perforation ne se produisent durant trois essais individuels consécutifs effectués en accord avec la procédure spécifiée ou convenue. S'il se produit une perforation, la traversée doit être considérée comme n'ayant pas satisfait à l'essai. S'il se produit un seul contournement, un quatrième essai doit être effectué et la traversée doit alors être considérée comme ayant satisfait à l'essai s'il ne se produit ni contournement ou perforation.

10.2 Essai de tension continue sous humidité uniforme

10.2.1 Applicabilité

L'essai sous humidité uniforme peut être appliqué à toutes les traversées d'extérieur.

10.2.2 Méthode d'essai et exigences

La condition de la traversée et sa disposition de montage pour l'essai doivent être conformes aux exigences spécifiées en 7.1. Autrement, l'angle de montage de la traversée pour cet essai doit faire l'objet d'un accord spécial entre l'acheteur et le fabricant.

Le circuit d'essai doit être conforme à l'IEC 60060-1.

La procédure d'essai normale sous humidité uniforme décrite dans l'IEC 60060-1 doit être utilisée, excepté pour la durée d'essai.

Si les conditions atmosphériques réelles s'écartent des valeurs données dans l'IEC 60060-1, des corrections doivent être faites conformément à l'IEC 60137:2008 (Tableau 7).

La tension d'essai à appliquer à la traversée doit être égale à 1,25 fois la tension continue permanente assignée en polarité positive et en polarité négative.

La tension d'essai doit être maintenue à cette valeur pendant 1 h.

La pluie avec des caractéristiques différentes, représentant de très légères ou de légères couches conductrices sur les surfaces de l'isolateur, ou des taux d'aspersion différents, peut faire l'objet d'un accord entre le fabricant et l'acheteur. L'aspersion de la pluie doit être ajustée avant le début de l'essai.

10.2.3 Acceptation

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai s'il ne se produit ni contournement ni perforation. S'il se produit une perforation, la traversée doit être considérée comme n'ayant pas satisfait à l'essai. S'il se produit un contournement, l'essai doit être répété une seule fois, après vérification des conditions de pluie.

La traversée doit être considérée comme ayant satisfait à l'essai s'il ne se produit ni contournement ou perforation.

10.3 Essai de tension continue sous humidité non uniforme

10.3.1 Applicabilité

Cet essai peut être applicable à toutes les traversées d'extérieur, mais il doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant.

10.3.2 Méthode d'essai et exigences

L'essai sous humidité non uniforme est applicable aux traversées horizontales de paroi pour lesquelles la disposition particulière de montage en fonctionnement peut déterminer la réduction de la tenue électrique de la traversée. La condition de la traversée, la disposition de montage représentant les conditions de fonctionnement et la largeur de la zone sèche pour l'essai doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant au moment de la commande.

NOTE La reproductibilité de l'essai sous humidité non uniforme effectué dans différents laboratoires n'a pas été établie d'une manière cohérente avec d'autres essais normalisés. Cependant, d'autres recommandations seront disponibles au fur et à mesure des recherches et lorsque les comparaisons interlaboratoires appropriées seront réalisées.

En tant que guide, les techniques d'essais suivantes peuvent être adoptées pour l'essai. La zone sèche située côté terre peut être obtenue en protégeant la traversée de la pluie. Elle peut être obtenue en fournissant un abri isolé de la pluie, de dimensions appropriées aussi proches que possible de la traversée. La distance d'isolement entre l'abri et la traversée doit être suffisante pour lui éviter le contournement direct. Les caractéristiques de l'eau de pluie et le taux d'aspersion doivent être conformes à la procédure normale d'essai sous pluie décrite dans l'IEC 60060-1. La pluie avec des caractéristiques différentes, représentant de très légères ou de légères couches conductrices sur les surfaces de l'isolateur, peut faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant. L'aspersion de la pluie doit être ajustée avant le début de l'essai.

Le circuit d'essai doit être conforme à l'IEC 60060-1.

Les conditions atmosphériques normales de référence conformes à l'IEC 60060-1 ne sont pas applicables et les conditions atmosphériques réelles doivent être consignées.

La tension d'essai à appliquer à la traversée de paroi doit être au moins égale à 1,25 fois la tension continue permanente assignée.

La traversée de paroi dans sa position d'essai, avec la surface de l'isolateur à l'abri encore complètement sèche, est soumise à la tension d'essai spécifiée et la production de la pluie doit alors débuter. La tension d'essai doit être maintenue jusqu'à ce qu'un contournement total se produise. Autrement, elle doit être maintenue pendant au moins 15 min à partir du début de la pluie.