

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**High-voltage test techniques –
Part 1: General definitions and test requirements**

**Technique des essais à haute tension –
Partie 1: Définitions et exigences générales**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60060-1

Edition 3.0 2010-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**High-voltage test techniques –
Part 1: General definitions and test requirements**

**Technique des essais à haute tension –
Partie 1: Définitions et exigences générales**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE **XB**
CODE PRIX

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-88912-185-4

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
3.1 Definitions related to characteristics of discharges	8
3.2 Definitions relating to characteristics of the test voltage	8
3.3 Definitions relating to tolerance and uncertainty	9
3.4 Definitions relating to statistical characteristics of disruptive-discharge voltage values	9
3.5 Definitions relating to classification of insulation in test objects	10
4 General requirements	11
4.1 General requirements for test procedures.....	11
4.2 Arrangement of the test object in dry tests	11
4.3 Atmospheric corrections in dry tests	12
4.3.1 Standard reference atmosphere.....	12
4.3.2 Atmospheric correction factors for air gaps	12
4.3.3 Application of correction factors.....	13
4.3.4 Correction factor components	13
4.3.5 Measurement of atmospheric parameters	16
4.3.6 Conflicting requirements for testing internal and external insulation.....	17
4.4 Wet tests	18
4.4.1 Wet test procedure	18
4.4.2 Atmospheric corrections for wet tests	19
4.5 Artificial pollution tests	19
5 Tests with direct voltage	19
5.1 Definitions for direct voltage tests.....	19
5.2 Test voltage	20
5.2.1 Requirements for the test voltage	20
5.2.2 Generation of the test voltage.....	20
5.2.3 Measurement of the test voltage.....	20
5.2.4 Measurement of the test current	21
5.3 Test procedures	21
5.3.1 Withstand voltage tests	21
5.3.2 Disruptive-discharge voltage tests	22
5.3.3 Assured disruptive-discharge voltage tests	22
6 Tests with alternating voltage	22
6.1 Definitions for alternating voltage tests.....	22
6.2 Test Voltage.....	22
6.2.1 Requirements for the test voltage	22
6.2.2 Generation of the test voltage.....	23
6.2.3 Measurement of the test voltage.....	24
6.2.4 Measurement of the test current	25
6.3 Test procedures	25
6.3.1 Withstand voltage tests	25
6.3.2 Disruptive-discharge voltage tests	25
6.3.3 Assured disruptive-discharge voltage tests	25

7	Tests with lightning-impulse voltage	26
7.1	Definitions for lightning-impulse voltage tests	26
7.2	Test Voltage	33
7.2.1	Standard lightning-impulse voltage	33
7.2.2	Tolerances	34
7.2.3	Standard chopped lightning-impulse voltage	34
7.2.4	Special lightning-impulse voltages	34
7.2.5	Generation of the test voltage	34
7.2.6	Measurement of the test voltage and determination of impulse shape	34
7.2.7	Measurement of current during tests with impulse voltages	35
7.3	Test Procedures	35
7.3.1	Withstand voltage tests	35
7.3.2	Procedures for assured disruptive-discharge voltage tests	36
8	Tests with switching-impulse voltage	36
8.1	Definitions for switching-impulse voltage tests	36
8.2	Test voltage	38
8.2.1	Standard switching-impulse voltage	38
8.2.2	Tolerances	38
8.2.3	Time-to-peak evaluation	38
8.2.4	Special switching-impulse voltages	38
8.2.5	Generation of the test voltage	38
8.2.6	Measurement of test voltage and determination of impulse shape	39
8.2.7	Measurement of current during tests with impulse voltages	39
8.3	Test procedures	39
9	Tests with combined and composite voltages	39
9.1	Definitions for combined- and composite-voltage tests	39
9.2.4	Tolerances	42
9.2.5	Generation	42
9.2.6	Measurement	42
9.3	Composite test voltages	43
9.3.1	Parameters	43
9.3.2	Tolerances	43
9.3.3	Generation	43
9.3.4	Measurement	43
9.4	Test procedures	43
	Annex A (informative) Statistical treatment of test results	45
	Annex B (normative) Procedures for calculation of parameters of standard lightning-impulse voltages with superimposed overshoot or oscillations	54
	Annex C (informative) Guidance for implementing software for evaluation of lightning-impulse voltage parameters	59
	Annex D (informative) Background to the introduction of the test voltage factor for evaluation of impulses with overshoot	62
	Annex E (informative) The iterative calculation method in the converse procedure for the determination of atmospheric correction factor	68
	Bibliography	73

Figure 1 – Recommended minimum clearance D of extraneous live or earthed objects to the energized electrode of a test object, during an a.c. or positive switching impulse test at the maximum voltage U applied during test

Figure 2 – k as a function of the ratio of the absolute humidity h to the relative air density ρ (see 4.3.4.2 for limits of applicability)	14
Figure 3 – Values of exponents m and w	16
Figure 4 – Absolute humidity of air as a function of dry- and wet-bulb thermometer readings	17
Figure 5 – Full lightning-impulse voltage	26
Figure 6 – Test voltage function.....	28
Figure 7 – Full impulse voltage time parameters	29
Figure 8 – Voltage time interval	30
Figure 9 – Voltage integral.....	30
Figure 10 – Lightning-impulse voltage chopped on the front.....	31
Figure 11 – Lightning-impulse voltage chopped on the tail	32
Figure 12 – Linearly rising front chopped impulse	32
Figure 13 – Voltage/time curve for impulses of constant prospective shape	33
Figure 14 – Switching-impulse voltage	37
Figure 15 – Circuit for a combined voltage test	40
Figure 16 – Schematic example for combined and composite voltage	41
Figure 17 – Circuit for a composite voltage test	42
Figure 18 – Definition of time delay Δt	43
Figure A.1 – Example of a multiple-level (Class 1) test	48
Figure A.2 – Examples of decreasing and increasing up-and-down (Class 2) tests for determination of 10 % and 90 % disruptive-discharge probabilities respectively.....	49
Figure A.3 – Examples of progressive stress (Class 3) tests	50
Figure B.1 – Recorded and base curve showing overshoot and residual curve.....	55
Figure B.2 – Test voltage curve (addition of base curve and filtered residual curve).....	55
Figure B.3 – Recorded and test voltage curves	56
Figure D.1 – “Effective” test voltage function in IEC 60060-1:1989.....	63
Figure D.2 – Representative experimental points from European experiments and test voltage function	65
Figure E.1 – Atmospheric pressure as a function of altitude.....	69
Table 1 – Values of exponents, m for air density correction and w for humidity correction, as a function of the parameter g	15
Table 2 – Precipitation conditions for standard procedure	19
Table A.1– Discharge probabilities in up-and-down testing	52
Table E.1 – Altitudes and air pressure of some locations	69
Table E.2 – Initial K_t and its sensitivity coefficients with respect to U_{50} for the example of the standard phase-to-earth a.c. test voltage of 395 kV	70
Table E.3 – Initial and converged K_t values for the example of the standard phase-to-earth a.c. test voltage of 395 kV	72

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES –**Part 1: General definitions and test requirements**

FOREWORD

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

International Standard IEC 60060-1 has been prepared by IEC technical committee 42: High-voltage test techniques.

This third edition of IEC 60060-1 cancels and replaces the second edition, published in 1989, and constitutes a technical revision.

The significant technical changes with respect to the previous edition are as follows:

- a) The general layout and text was updated and improved to make the standard easier to use.
- b) Artificial pollution test procedures were removed as they are now described in IEC 60507.
- c) Measurement of impulse current has been transferred to a new standard on current measurement (IEC 62475).
- d) The atmospheric correction factors are now presented as formulas.

- e) A new method has been introduced for the calculation of the time parameters of lightning impulse waveforms. This improves the measurement of the time parameters of lightning impulses with oscillations or overshoot.

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

FDIS	Report on voting
42/277/FDIS	42/282/RVD

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

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

A list of all the parts in the IEC 60060 series, under the general title *High-voltage test techniques*, can be found on the IEC website.

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

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

HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES –

Part 1: General definitions and test requirements

1 Scope

This part of IEC 60060 is applicable to:

- dielectric tests with direct voltage;
- dielectric tests with alternating voltage;
- dielectric tests with impulse voltage;
- dielectric tests with combinations of the above.

This part is applicable to tests on equipment having its highest voltage for equipment U_m above 1 kV.

NOTE 1 Alternative test procedures may be required to obtain reproducible and significant results. The choice of a suitable test procedure should be made by the relevant Technical Committee.

NOTE 2 For voltages U_m above 800 kV meeting some specified procedures, tolerances and uncertainties may not be achievable.

2 Normative references

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

IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

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

IEC 60507:1991, *Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems*

IEC 61083-1, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments*

IEC 61083-2, *Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests – Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms*

IEC 62475, *High-current test techniques: Definitions and requirements for test currents and measuring systems*

3 Terms and definitions

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

3.1 Definitions related to characteristics of discharges

3.1.1

disruptive discharge

failure of insulation under electric stress, in which the discharge completely bridges the insulation under test, reducing the voltage between electrodes to practically zero

NOTE 1 Non-sustained disruptive discharge in which the test object is momentarily bridged by a spark or arc may occur. During these events the voltage across the test object is momentarily reduced to zero or to a very small value. Depending on the characteristics of the test circuit and the test object, a recovery of dielectric strength may occur and may even allow the test voltage to reach a higher value. Such an event should be interpreted as a disruptive discharge unless otherwise specified by the relevant Technical Committee.

NOTE 2 A disruptive discharge in a solid dielectric produces permanent loss of dielectric strength; in a liquid or gaseous dielectric the loss may be only temporary.

3.1.2

sparkover

disruptive discharge that occurs in a gaseous or liquid dielectric

3.1.3

flashover

disruptive discharge that occurs over the surface of a dielectric in a gaseous or liquid dielectric

3.1.4

puncture

disruptive discharge that occurs through a solid dielectric

3.1.5

disruptive-discharge voltage value of a test object

value of the test voltage causing disruptive discharge, as specified, for the various tests, in the relevant clauses of the present standard

3.1.6

non-disruptive discharge

discharge between intermediate electrodes or conductors where the test voltage does not collapse to zero

NOTE 1 Such an event should not be interpreted as a disruptive discharge unless so specified by the relevant Technical Committee.

NOTE 2 Some non-disruptive discharges are termed “partial discharges” and are dealt with in IEC 60270.

3.2 Definitions relating to characteristics of the test voltage

3.2.1

prospective characteristics of a test voltage

characteristics which would have been obtained if no disruptive discharge had occurred. When a prospective characteristic is used, this shall always be stated.

3.2.2

actual characteristics of a test voltage

those characteristics which occur during the test at the terminals of the test object

3.2.3

value of the test voltage

as defined in the relevant clauses of this standard

3.2.4

withstand voltage of a test object

specified prospective voltage value which characterizes the insulation of the object with regard to a withstand test

NOTE 1 Unless otherwise specified, withstand voltages are referred to standard reference atmospheric conditions (see 4.3.1).

NOTE 2 This applies to external insulation only.

3.2.5

assured disruptive-discharge voltage of a test object

specified prospective voltage value which characterizes its performance with regard to a disruptive-discharge test

3.3 Definitions relating to tolerance and uncertainty

3.3.1

tolerance

constitutes the permitted difference between the measured value and the specified value

NOTE 1 This difference should be distinguished from the uncertainty of a measurement.

NOTE 2 A pass/fail decision is based on the measured value, without consideration of the measurement uncertainty.

3.3.2

uncertainty (of measurement)

parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could be reasonably attributed to the measurand

[IEV 311-01-02]

NOTE 1 In this standard, all uncertainty values are specified at a level of confidence of 95 %.

NOTE 2 Uncertainty is positive and given without sign.

NOTE 3 It should not be confused with the tolerance of a test-specified value or parameter.

3.4 Definitions relating to statistical characteristics of disruptive-discharge voltage values

3.4.1

disruptive-discharge probability of a test object

p

probability that one application of a certain prospective voltage value of a given shape will cause disruptive discharge in the test object

NOTE The parameter p may be expressed as a percentage or a proper fraction.

3.4.2

withstand probability of a test object

q

probability that an application of a certain prospective voltage value of a given shape does not cause a disruptive discharge on the test object

NOTE If the disruptive-discharge probability is p , the withstand probability q is $(1 - p)$.

3.4.3

p % disruptive-discharge voltage of a test object

U_p

prospective voltage value which has p % probability of producing a disruptive discharge on the test object

NOTE 1 Mathematically the p % disruptive-discharge voltage is the quantile of the order p (or p quantile) of the breakdown voltage.

NOTE 2 U_{10} is called the “statistical withstand voltage” and U_{90} is called the “statistical assured disruptive-discharge voltage”.

3.4.4
50 % disruptive-discharge voltage of a test object

U_{50}
prospective voltage value which has a 50 % probability of producing a disruptive discharge on the test object

3.4.5
arithmetic mean value of the disruptive-discharge voltage of a test object,

U_a

$$U_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i$$

where

U_i is the measured disruptive-discharge voltage and

n is the number of observations (discharges).

NOTE For symmetric distributions U_a is identical to U_{50} .

3.4.6
standard deviation of the disruptive voltage of a test object

s

a measure of the dispersion of the disruptive voltage estimated by

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_a)^2}$$

where

U_i is the i^{th} measured disruptive voltage and

U_a is the arithmetic mean of the disruptive voltages (in most cases it is identical to U_{50}).

n is the number of observations (discharges).

NOTE 1 It can also be evaluated by the difference between the 50 % and 16 % disruptive-discharge voltages (or between the 84 % and 50 % disruptive-discharge voltages). It is often expressed in per unit or percentage value referred to the 50 % disruptive-discharge voltage.

NOTE 2 For successive disruptive-discharge tests the standard deviation s is defined by the formula. For multiple level and up-and-down tests it is defined by the difference of the quantiles. The methods are equivalent because, between $p = 16$ % and $p = 84$ % all distribution functions are nearly identical.

3.5 Definitions relating to classification of insulation in test objects

3.5.1
external insulation

air insulation and the exposed surfaces of solid insulation of the equipment, which are subject both to dielectric stresses and to the direct effects of atmospheric and other external conditions

3.5.2
internal insulation

internal solid, liquid or gaseous elements of the insulation of equipment protected from the direct effects of external conditions such as pollution, humidity and vermin

3.5.3

self-restoring insulation

insulation which completely recovers its insulating properties after a disruptive discharge caused by the application of a test voltage

[IEV 604-03-04, modified]

3.5.4

non-self-restoring insulation

insulation which loses its insulating properties, or does not recover them completely, after a disruptive discharge caused by the application of a test voltage

[IEV 604-03-05, modified]

NOTE In high-voltage apparatus, parts of both self-restoring and non-self-restoring insulation are always operating in combination and some parts may be degraded by repeated or continued voltage applications. The behaviour of the insulation in this respect should be taken into account by the relevant Technical Committee when specifying the test procedures to be applied.

4 General requirements

4.1 General requirements for test procedures

The test procedures applicable to particular types of test objects, for example, the test voltage, the polarity to be used, the preferred order if both polarities are to be used, the number of applications and the interval between applications shall be specified by the relevant Technical Committee, having regard to such factors as:

- the required accuracy of the test results;
- the random nature of the observed phenomena;
- any polarity dependence of the measured characteristics and
- the possibility of progressive deterioration with repeated voltage applications.

At the time of a test, the test object shall be complete in all essential details, and it should have been processed in the normal manner for similar equipment.

At the time of a test, the test object should have become acclimatised as much as practicable to the ambient atmospheric conditions of the test area. The period allocated to reach equilibrium should be recorded.

4.2 Arrangement of the test object in dry tests

The disruptive-discharge characteristics of a test object with external insulation may be affected by its general arrangement (for example, proximity effects such as distance in air from other live or earthed structures, height above ground level and the arrangement of its high-voltage lead). The general arrangement should be specified by the relevant Technical Committee.

NOTE 1 A clearance to extraneous structures not less than 1,5 times the length of the shortest possible discharge path on the test object usually makes such proximity effects negligible. In wet or pollution tests, or wherever the voltage distribution along the test object and the electric field around its energized electrode are sufficiently independent of external influences, smaller clearances may be acceptable, provided that discharges do not occur to extraneous structures.

NOTE 2 In the case of a.c. or positive switching-impulse voltage tests above 750 kV (peak) the influence of an extraneous structure may be considered as negligible if its distance from the energized electrode is also not less than the height of this electrode above the ground plane. A guide for recommended minimum clearance is given in Figure 1, as a function of the highest test voltage. Significant shorter clearances may be suitable in individual

cases. However, an experimental adaptation or a field calculation, taking into account a voltage dependent maximum field strength as described in the literature [1, 2]¹, is recommended.

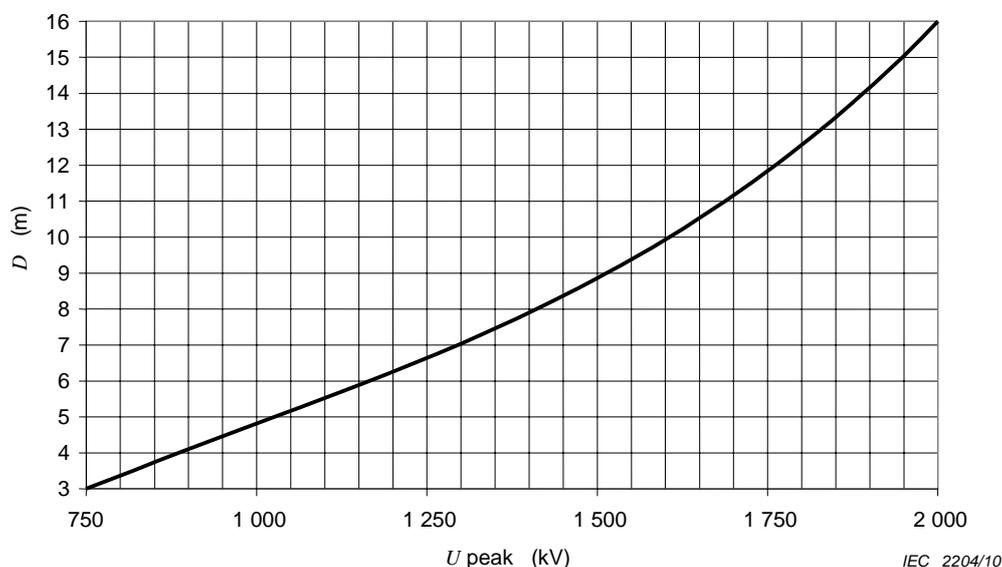


Figure 1 – Recommended minimum clearance *D* of extraneous live or earthed objects to the energized electrode of a test object, during an a.c. or positive switching impulse test at the maximum voltage *U* applied during test

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the test should be made at ambient atmospheric conditions in the test area without extraneous precipitation or pollution. The procedure for voltage application shall be as specified in the relevant clauses of this standard.

4.3 Atmospheric corrections in dry tests

4.3.1 Standard reference atmosphere

The standard reference atmosphere is:

- temperature $t_0 = 20 \text{ °C}$;
- absolute pressure $p_0 = 1\,013 \text{ hPa}$ (1 013 mbar) ;
- absolute humidity $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$.

NOTE 1 An absolute pressure of 1 013 hPa corresponds to the height of 760 mm of the mercury column in a mercury barometer at 0 °C. If the barometer height is *H* mm of mercury, the atmospheric pressure in hectopascal is approximately:

$$p = 1,333 H \text{ hPa}$$

Correction for temperature with respect to the height of the mercury column is considered to be negligible.

NOTE 2 Instruments automatically correcting pressure to sea level are not suitable and should not be used.

4.3.2 Atmospheric correction factors for air gaps

The disruptive discharge of external insulation depends upon the atmospheric conditions. Usually, the disruptive-discharge voltage for a given path in air is increased by an increase in either air density or humidity. However, when the relative humidity exceeds about 80 %, the disruptive-discharge voltage becomes irregular, especially when the disruptive discharge occurs over an insulating surface.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

NOTE Atmospheric corrections do not apply to flashover, only to sparkover.

The disruptive-discharge voltage is proportional to the atmospheric correction factor K_t that results from the product of two correction factors:

- the air density correction factor k_1 (see 4.3.4.1);
- the humidity correction factor k_2 (see 4.3.4.2).

$$K_t = k_1 k_2$$

4.3.3 Application of correction factors

4.3.3.1 Standard procedure

By applying correction factors, a disruptive-discharge voltage measured in given test conditions (temperature t , pressure p , humidity h) may be converted to the value, which would have been obtained under the standard reference atmospheric conditions (t_0 , p_0 , h_0).

Disruptive-discharge voltages, U , measured at given test conditions are corrected to U_0 corresponding to standard reference atmosphere by dividing by K_t :

$$U_0 = U / K_t$$

The test report shall always contain the actual atmospheric conditions during the test and the correction factors applied.

4.3.3.2 Converse procedure

Conversely, where a test voltage is specified for standard reference conditions, it shall be converted into the equivalent value under the test conditions and this may require an iterative procedure.

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the voltage U to be applied during a test on external insulation is determined by multiplying the specified test voltage U_0 by K_t ;

$$U = U_0 K_t$$

However, as U enters into the calculation of K_t , an iterative procedure might have to be used (see Annex E).

NOTE 1 The test for the correct choice of U for the calculation of K_t is to divide U by K_t . If the result is the specified test voltage, U_0 , then a correct choice of U has been made. If U_0 is too high, U has to be reduced but if it is too low, it has to be increased.

NOTE 2 When K_t is close to unity, iterative calculation is not necessary.

NOTE 3 In correcting power-frequency voltage the peak value has to be used, because the discharge behaviour is based on the peak value.

4.3.4 Correction factor components

4.3.4.1 Air density correction factor, k_1

The air density correction factor k_1 depends on the relative air density δ and can be generally expressed as:

$$k_1 = \delta^m$$

where m is an exponent given in 4.3.4.3.

When the temperatures t and t_0 are expressed in degrees Celsius and the atmospheric pressures p and p_0 are expressed in the same units, the relative air density is:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \times \frac{273+t_0}{273+t}$$

The correction is considered reliable for $0,8 < k_1 < 1,05$.

4.3.4.2 Humidity correction factor, k_2

The humidity correction factor may be expressed as:

$$k_2 = k^w$$

where w is an exponent given in 4.3.4.3 and k is a parameter that depends on the type of test voltage and may be obtained as a function of the ratio of absolute humidity, h , to the relative air density, δ , using the following equations (Figure 2):

DC $k = 1 + 0,014(h/\delta - 11) - 0,00022(h/\delta - 11)^2$ for $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3$

AC $k = 1 + 0,012(h/\delta - 11)$ for $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3$

Impulse $k = 1 + 0,010(h/\delta - 11)$ for $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 20 \text{ g/m}^3$

NOTE The impulse equation is based on experimental results for positive lightning-impulse waveforms. This equation also applies to negative lightning-impulse voltages and switching-impulse voltages.

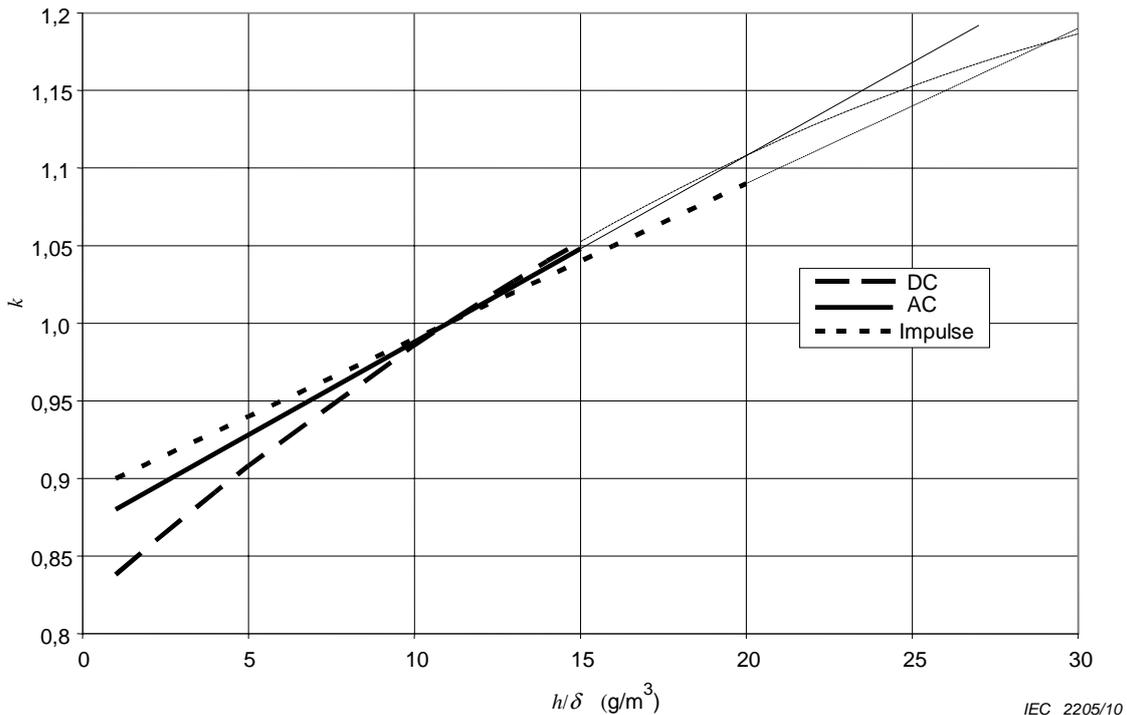


Figure 2 – k as a function of the ratio of the absolute humidity h to the relative air density δ (see 4.3.4.2 for limits of applicability)

For U_m below 72,5 kV (or approximately gap lengths $l < 0,5$ m) no humidity correction can at present be specified.

NOTE For specific apparatus, the relevant Technical Committee has specified other procedures (e.g. IEC 62271-1).

4.3.4.3 Exponents m and w

As the correction factors depend on the type of pre-discharges, this fact can be taken into account by considering the parameter:

$$g = \frac{U_{50}}{500 L \delta k}$$

where U_{50} is the 50 % disruptive-discharge voltage (measured or estimated) at the actual atmospheric conditions, in kilovolt peak,

L is the minimum discharge path in m,

δ is the relative air density and

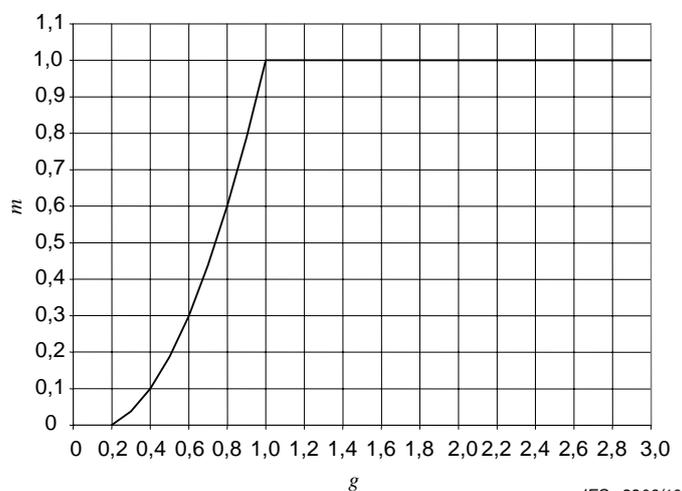
k is the dimension less parameter defined in 4.3.4.2.

In the case of a withstand test where an estimate of the 50 % disruptive-discharge voltage is not available, U_{50} can be assumed to be 1,1 times the test voltage, U_0 .

The exponents, m and w , are obtained from Table 1 for the specified ranges of g (Figure 3).

Table 1 – Values of exponents, m for air density correction and w for humidity correction, as a function of the parameter g

g	m	w
$<0,2$	0	0
0,2 to 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 to 1,2	1,0	1,0
1,2 to 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
$>2,0$	1,0	0



IEC 2206/10

Figure 3a – Values of exponent m for air density correction as a function of parameter g

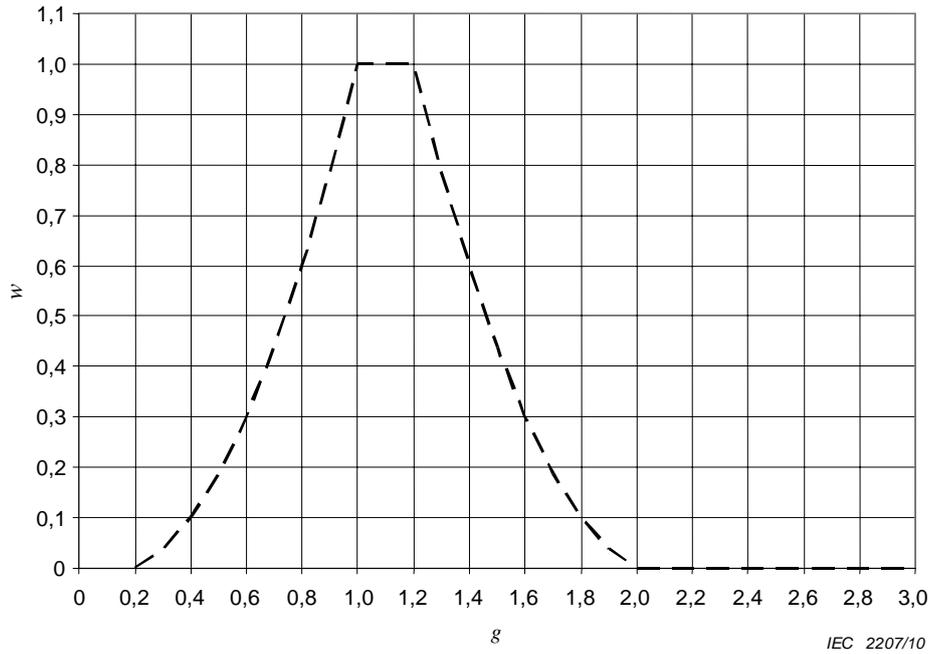


Figure 3b – Values of exponent *w* for humidity correction as a function of parameter *g*

Figure 3 – Values of exponents *m* and *w*

4.3.5 Measurement of atmospheric parameters

4.3.5.1 Humidity

The humidity should preferably be determined with an instrument measuring directly the absolute humidity with an expanded uncertainty not larger than 1 g/m³.

Measurement of relative humidity and the ambient temperature can also be used for the determination of the absolute humidity, using the formula below, provided that the accuracy of the absolute humidity determination in this case is the same as required above.

$$h = \frac{6,11 \times R \times e^{\frac{17,6 \times t}{243+t}}}{0,4615 \times (273 + t)}$$

where

- h* is the absolute humidity in g/m³,
- R* is the relative humidity in percent and
- t* is the ambient temperature in °C.

NOTE This measurement may also be made by means of a ventilated wet and dry bulb hygrometer. The absolute humidity as a function of the thermometer readings is determined from Figure 4, which also permits determination of the relative humidity. It is important to provide adequate airflow so as to reach a steady state and to read the thermometers carefully in order to avoid excessive errors in the determination of the humidity.

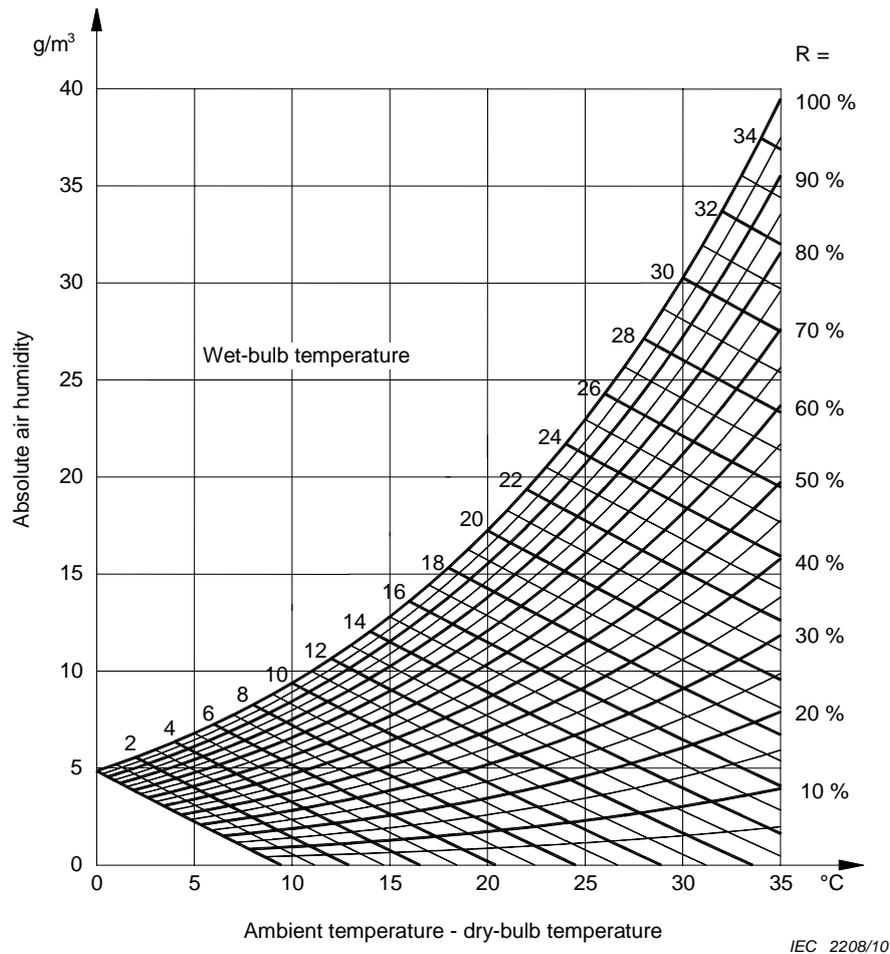


Figure 4 – Absolute humidity of air as a function of dry- and wet-bulb thermometer readings

4.3.5.2 Temperature

The ambient temperature should be measured with an expanded uncertainty of not larger than 1 °C.

4.3.5.3 Absolute pressure

The ambient absolute pressure should be measured with an expanded uncertainty of not larger than 2 hPa.

4.3.6 Conflicting requirements for testing internal and external insulation

While withstand levels are specified under standard reference atmospheric conditions, cases will arise where the application of atmospheric corrections (due to atmospheric conditions differing from the standard reference ones) results in the withstand level for internal insulation appreciably in excess of that for the associated external insulation. In such cases measures to enhance the withstand level of the external insulation shall be adopted to permit application of the correct test voltage to the internal insulation. These measures should be specified by the relevant Technical Committee with reference to the requirements of particular classes of apparatus and could include immersion of the external insulation in liquids or compressed gases.

For those cases where the test voltage of the external insulation is higher than that of the internal insulation, the external insulation can only be correctly tested when the internal

insulation is especially designed with increased strength. If not, the internal insulation should be tested with the rated value and the external insulation be tested by means of test fixtures unless the relevant Technical Committee states otherwise, in which case it shall specify the test procedure to be used.

4.4 Wet tests

4.4.1 Wet test procedure

This wet test procedure is intended to simulate the effect of natural rain on external insulation. It is recommended for tests with all types of test voltages and on all types of apparatus.

The relevant Technical Committee should specify the arrangement of the test object during the test.

The test object shall be sprayed with water of prescribed resistivity and temperature (see Table 2) falling on it as droplets (avoiding fog and mist) and directed so that the vertical and horizontal components of the spray intensity are approximately equal. These intensities are measured with a divided collecting vessel having openings of 100 cm² to 750 cm², one horizontal and one vertical with the vertical opening facing the spray.

The position of the test object relative to the vertical and horizontal rain components shall be specified by the relevant Technical Committee.

In general, the reproducibility of wet test results is less than that for other high-voltage discharge or withstand tests. To minimize the dispersion, the following precautions shall be taken:

- The collecting vessel shall be placed close to the test object, but avoiding the collection of drops or splashes from it. During the measuring period, it should be moved slowly over a sufficient area to average the effect of non-uniformities of the spray from individual nozzles. This measuring zone shall have a width equal to that of the test object and a maximum height of 1 m.
- For test objects between 1 m and 3 m in height, the individual measurements shall be made at the top, centre and bottom of the test object. Each measuring zone shall cover only one third of the height of the test object.
- For test objects exceeding 3 m in height, the number of measuring zones shall be increased to cover the full height of the test object without overlapping.
- The above procedures shall be suitably adapted for test objects having large horizontal dimensions.
- The spread of results may be reduced if the test object is cleaned with a surface-active detergent, which has to be removed before the beginning of wetting.
- The spread of results may also be affected by local anomalous (high or low) precipitation rates. It is recommended to detect these by localized measurements and to improve the uniformity of the spray, if necessary.

The spray apparatus shall be adjusted to produce, within the specified tolerances, precipitation conditions at the test object given in Table 2.

Any type and arrangement of nozzles meeting the requirements given in Table 2 may be used.

Table 2 – Precipitation conditions for standard procedure

Precipitation condition	Unit	Range
Average precipitation rate of all measurements:	[mm/min]	1,0 to 2,0
– vertical component	[mm/min]	1,0 to 2,0
– horizontal component		
Limits for any individual measurement and for each component	[mm/min]	±0,5 from average
Temperature of water	[°C]	Ambient temperature ±15
Conductivity of water	[µS/cm]	100 ± 15

The water temperature and resistivity shall be measured on a sample collected immediately before the water reaches the test object. They may also be measured at other locations (e.g., in a storage reservoir) provided that a check ensures that no significant change occurs by the time the water reaches the test object.

The test object shall be pre-wetted initially for at least 15 min under the above-specified conditions and these conditions shall remain within the specified tolerances throughout the test, which should be performed without interrupting the wetting. The pre-wetting time shall not include the time needed for adjusting the spray. It is also possible to perform an initial pre-wetting by unconditioned mains water for 15 min, followed without interruption of the spray by a second pre-wetting for at least 2 min before the test begins, using water with all the correct precipitation conditions, which should be measured immediately before starting the test.

Unless otherwise specified by the relevant Technical Committee, the test procedure for wet tests shall be the same as that specified for the corresponding dry tests. The test duration for an a.c. test shall be 60 s, if not otherwise specified. In general, for alternating and direct voltage wet withstand tests, it is recommended that one flashover should be permitted provided that in a repeat test no further flashover occurs.

NOTE For a.c. apparatus of large dimensions, such as those having a maximum rated voltage, U_m , higher than 800 kV, no appropriate wet test procedure is available at present.

4.4.2 Atmospheric corrections for wet tests

A density correction factor shall be applied as specified in 4.3, but no humidity correction factor shall be applied for wet tests.

4.5 Artificial pollution tests

Artificial pollution tests are intended to provide information on the behaviour of external insulation under conditions representative of pollution in service, although they do not necessarily simulate any particular service conditions. They are described in IEC 60507.

5 Tests with direct voltage

5.1 Definitions for direct voltage tests

5.1.1

value of the test voltage

arithmetic mean value

5.1.2

ripple

periodic deviation from the arithmetic mean value of the test voltage

5.1.3

ripple amplitude

half the difference between the maximum and minimum values

NOTE In cases where the ripple shape is nearly sinusoidal, true r.m.s. values multiplied by $\sqrt{2}$ are acceptable for determination of the ripple amplitude.

5.1.4

ripple factor

ratio of the ripple amplitude to the value of test voltage

5.1.5

voltage drop

instantaneous reduction of the test voltage for a short duration of up to a few seconds

NOTE Voltage drop may be caused by non-disruptive discharges.

5.2 Test voltage

5.2.1 Requirements for the test voltage

5.2.1.1 Voltage shape

The test voltage, as applied to the test object, should be a direct voltage with not more than 3 % ripple factor, unless otherwise specified by the relevant Technical Committee.

NOTE Increasing ripple amplitude is directly related to increasing resistive load currents. Dielectric testing where heavy streamers are present may cause excessive ripple and/or voltage drop. Wet testing and pollution testing by their very nature require sources suitable for high resistive currents, see IEC 60507.

5.2.1.2 Tolerances

For test durations not exceeding 60 s, the measured values of the test voltage shall be maintained within ± 1 % of the specified level throughout the test. For test durations exceeding 60 s, the measured value of the test voltage shall be maintained within ± 3 % of the specified level throughout the test.

NOTE It is emphasized that the tolerance constitutes the permitted difference between the specified value and that actually measured. This difference should be distinguished from the uncertainty of a measurement (see 3.3.1).

The source characteristics should be sufficient to allow charging of the capacitance of the test object in a reasonably short time. In the case of wet or pollution tests, the source, including its storage capacitance, should also be adequate to supply the transient discharge currents of the test object with a voltage drop of < 10 %.

5.2.2 Generation of the test voltage

The test voltage is generally obtained by means of transformer rectifier circuits. The requirements to be met by the test-voltage source depend considerably upon the type of apparatus that is to be tested and on the test conditions. These requirements are determined mainly by the value and nature of the test current to be supplied, the important constituents of which are indicated in 5.2.4.

5.2.3 Measurement of the test voltage

The measurement of the arithmetic mean value, the ripple factor and any transient in the test voltage shall be made with approved measuring systems (see IEC 60060-2).

Attention is drawn to the requirements the on response characteristics of converting devices used for measuring ripple, transients or voltage stability.

5.2.4 Measurement of the test current

When measurements of current are made through the test object, a number of separate components may be recognized. These differ from each other by several orders of magnitude for the same test object and test voltage. They consist of:

- the capacitive current, due to the initial application of the test voltage and to any ripple or other fluctuations imposed on it;
- the dielectric absorption current, due to slow charge displacements within the insulation and persisting for periods of a few seconds up to several hours. This process is partially reversible, currents of the opposite polarity being observed when the test object is discharged and short-circuited;
- the continuous leakage current, which is the final steady direct current attained at constant applied voltage after the above components have decayed to zero;
- partial discharge currents.

Measurement of the first three components necessitates the use of instruments covering a wide range of current magnitudes. It is important to ensure that the instrument, or the measurement of any one component of the current, is not adversely affected by the other components. Information concerning the condition of the insulation may sometimes be obtained by observing current variations with respect to time, during non-destructive tests.

The relative magnitude and the importance of each component of current depend on the type and the condition of the test object, the purpose for which the test is being made and the duration of the test. Accordingly, the measurement procedures should be specified by the relevant Technical Committee, especially when it is required to distinguish a particular component.

Current measurements shall be made with a calibrated measuring system.

Measurements of partial discharge pulse currents are made with special instruments, which are dealt with in IEC 60270.

NOTE Voltage protective devices should always be used in d.c. current measurement circuits due to the possibility of disruptive-discharge currents occurring that are much larger than the normal currents.

5.3 Test procedures

5.3.1 Withstand voltage tests

The voltage should be applied to the test object starting at a value sufficiently low to prevent any effect of overvoltage due to switching transients. It should be raised sufficiently slowly to permit reading of the measuring instruments, but not so slowly as to cause unnecessary prolongation of stress to the test object near the test voltage U . These requirements are in general met if the rate of rise is about 2 % of U per second when the applied voltage is above 75 % of U . It shall be maintained for the specified time and then reduced by discharging the circuit capacitance, including that of the test object, through a suitable resistor.

The test duration shall be specified by the relevant Technical Committee taking into consideration that the time to reach the steady-state voltage distribution depends on the resistances and capacitances of the test object components. When not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the duration of a withstand test shall be 60 s.

The polarity of the voltage or the order in which voltages of each polarity are applied, and any required deviation from the above specifications, shall be specified by the relevant Technical Committee.

The requirements of the test are satisfied if no disruptive discharge occurs on the test object.

5.3.2 Disruptive-discharge voltage tests

The voltage shall be applied and raised continuously, as for a withstand voltage test, until a disruptive discharge occurs on the test object. The last value of the test voltage recorded before the instant of the disruptive discharge shall be recorded. This shall be repeated for the number of times n specified in the test procedure to give a set of n measured voltages.

The relevant Technical Committee shall specify the rate of voltage rise, the number of voltage applications and the procedure for evaluating the test results (see Annex A).

5.3.3 Assured disruptive-discharge voltage tests

The voltage shall be applied and raised continuously, as for a withstand voltage test, until a disruptive discharge occurs on the test object. The last value of the test voltage reached just before the instant of the disruptive discharge shall be recorded. This shall be repeated for the number of times n specified in the test procedure to give a set of n measured voltages.

The requirements of the test are satisfied if no voltage in this set exceeds the assured disruptive-discharge voltage.

The relevant Technical Committee shall specify the number of voltage applications and the rate of voltage rise.

6 Tests with alternating voltage

6.1 Definitions for alternating voltage tests

6.1.1

peak value of an alternating voltage

average of the magnitudes of the positive and negative peak values

NOTE In many cases instruments measuring only one polarity peak are used. Measuring only one polarity is acceptable as long as waveform symmetry is within the limits set in 6.2.1.1.

6.1.2

value of the test voltage

its peak value divided by $\sqrt{2}$

NOTE The relevant Technical Committee may require a measurement of the r.m.s. value of the test voltage instead of the peak value for cases where the r.m.s. value may be of importance, for instance, when thermal effects are involved.

6.1.3

r.m.s. value

square root of the mean value of the square of the voltage values during a complete cycle

6.1.4

voltage drop

instantaneous reduction of the test voltage for a short duration of up to a few periods

6.2 Test Voltage

6.2.1 Requirements for the test voltage

6.2.1.1 Voltage waveshape

The test voltage shall be an alternating voltage generally having a frequency in the range 45 Hz to 65 Hz, normally referred to as power-frequency test voltage. Special tests may be required at frequencies considerably below or above this range, as specified by the relevant Technical Committee.

NOTE IEC 60060-3 describes alternating test voltages for frequencies from 10 Hz to 500 Hz.

The voltage waveshape shall approximate to a sinusoid with the difference of the magnitudes of the positive and negative peak values being less than 2 %.

The results of a high-voltage test are thought to be unaffected by small deviations from a sinusoid if the ratio of peak to r.m.s. values equals $\sqrt{2}$ within ± 5 %.

For some test circuits in common use greater deviations have to be accepted. Note that the test object, especially if it has non-linear characteristics, may considerably affect the deviation from a sinusoid.

NOTE In addition to the above requirement, the total harmonic distortion (THD) can be used to characterize the wave shape distortion as this might be important for partial discharge pattern recognition measurements. Specifications may be given by the relevant Technical Committee.

6.2.1.2 Tolerances

For test durations not exceeding 60 s, the measured values of the test voltage shall be maintained within ± 1 % of the specified level throughout the test. For test durations exceeding 60 s the measured value of the test voltage shall be maintained within ± 3 % of the specified level throughout the test.

The test voltage source including the supporting capacitances should be adequate to supply the transient discharge currents also in the case of wet and pollution tests with a voltage drop of ≤ 20 %.

NOTE It is emphasized that the tolerance constitutes the permitted difference between the specified value and that actually measured. This difference should be distinguished from the uncertainty of a measurement (see 3.1.1).

6.2.2 Generation of the test voltage

6.2.2.1 General requirements

The test voltage is generally supplied from a step-up transformer. Alternatively, it may be generated by means of a series-resonant or parallel-resonant circuit.

The voltage in the test circuit shall be stable enough to be practically unaffected by varying leakage currents. Non-disruptive discharges in the test object shall not reduce the test voltage to such an extent and for such a time that the measured disruptive-discharge voltage of the test object is significantly affected.

NOTE Attention is drawn to the possibility that such non-disruptive discharges may cause large over swings of voltage between the terminals of the test object. This phenomenon may cause failure of the test object or of the testing source. Introduction of a resistance to the high-voltage circuit can dampen such overvoltage transients but the resistance should be of a sufficiently low value so as not to affect the test voltage delivered to the test object.

The total capacitance of the test object and of any additional capacitor should be sufficient to ensure that the measured disruptive-discharge voltage is unaffected by non-disruptive partial discharges or pre-discharges in the test object. A capacitance in the range from 0,5 nF to 1,0 nF is generally sufficient.

6.2.2.2 Requirements for the transformer test circuit

High-voltage tests normally result in load currents with superimposed time varying current pulses as voltage is increased. The magnitude and duration of the current pulses is influenced by the test arrangement, the conductors used to connect the test object, atmospheric conditions, the characteristics of the test source and other factors. It is normal for apparatus to produce some current pulses since the test voltages are much higher than the operational voltages and these devices often lack large electrodes and ground shields to keep the test object electrically quiet. Since the current pulses are of short duration, voltage drops may be unrecognized by conventional AC measuring systems. The voltage stability of an a.c. test

system used in tests with time varying leakage current pulses can be verified by using a voltage measuring system with sufficient bandwidth.

For dry tests below 100 kV on samples of solid insulation, insulating liquids or combinations of the two a test source rated current of >100 mA and a system (transformer, regulator, etc. or generator) short circuit impedance of <20 % is generally sufficient.

For dielectric tests above 100 kV on external self-restoring insulation (low capacitance test objects such as insulators, circuit breakers and switches) a test source rated current of >100 mA and a system short circuit impedance of <20 % is generally sufficient for dry tests where no streamers are present.

For dielectric tests above 100 kV test system current ratings of 1 A and system short circuit impedances <20 % may be necessary if continuous streamers are encountered or if wet tests are performed. When continuous streamers are present it is recommended that faster responding voltage measurements are made to ensure that the test voltage is held within the voltage drop limit for the duration of the test. Alternatively, counter measures such as increasing electrode diameters or using larger connecting conductors can be used to reduce the streamers.

Short duration current pulses encountered at any test voltage are mostly supplied from the charge stored in capacitance in the test circuit. It is recommended that for tests above 100 kV a circuit capacitance greater than or equal to 1 000 pF be installed.

For tests under artificial pollution, steady state current ratings of 1 A to 5 A may be necessary. See IEC 60507.

6.2.2.3 The series-resonant circuit

The series-resonant circuit consists essentially of an inductor in series with a capacitive test object or load connected to a medium-voltage power source. Alternatively it may consist of a capacitor in series with an inductive test object. By varying the circuit parameters or the supply frequency, the circuit can be tuned to resonance, when a voltage considerably greater than that of the source and of substantially sinusoidal shape is applied to the test object.

The stability of the resonance conditions and of the test voltage depends on the stability of the supply frequency and of the test system characteristic, described by the quality factor, which is the ratio between test reactive power and power loss.

When a discharge occurs, the circuit capacitance discharges instantaneously and then the follow-through current from the source is relatively low. The limited follow-through current generally results in less damage to the test object.

The series-resonant circuit is especially useful when testing capacitive objects in which the leakage currents on the external insulation are small in comparison with the capacitive currents through the test object or the energy to form a disruptive discharge is very small. A series resonant circuit can supply higher leakage currents as additional capacitance is added to the circuit. A series-resonant circuit is also useful for testing reactors with sufficient circuit capacitance.

The series resonant circuit may be unsuitable for testing external insulation under wet or polluted conditions, unless the requirements of 6.2.2.1 are satisfied. In general, wet tests can be performed with adequate preload capacitance added.

6.2.3 Measurement of the test voltage

The measurement of the value of the test voltage, the r.m.s. value, and the transient drops shall be made with an approved measuring system (see IEC 60060-2).

6.2.4 Measurement of the test current

The current is usually measured by a conventional current transformer coupled to the ground lead of the test object. It can also be measured in the high-voltage lead to the test object.

Current measurements shall be made with a calibrated measuring system.

NOTE The current can also be measured in the earthed lead of the step-up transformer or resonance reactor, provided the current of any parallel capacitor can be neglected.

6.3 Test procedures

6.3.1 Withstand voltage tests

The voltage shall be applied to the test object starting at a value sufficiently low to prevent any effect of overvoltages due to switching transients or due to uncontrolled resonance conditions. It should be raised sufficiently slowly to permit reading of the measuring instrument but not so slowly as to cause unnecessary prolongation of the stressing of the test object near to the test voltage U . These requirements are in general met if the rate of rise is about 2 % of U per second, when the applied voltage is above 75 % of U . It shall be maintained for the specified time and then rapidly decreased, but not suddenly interrupted as this may generate switching transients, which could cause damage or erratic test results.

The test duration shall be specified by the relevant Technical Committee and shall be independent of the frequency in the range from 45 Hz to 65 Hz. If not specified by the relevant Technical Committee the duration of a withstand test shall be 60 s.

The requirements of the test are satisfied if no disruptive discharge occurs on the test object.

6.3.2 Disruptive-discharge voltage tests

The voltage shall be applied and raised continuously, as for a withstand voltage test, until a disruptive discharge occurs on the test object. The last value of the test voltage recorded before the instant of the disruptive discharge shall be recorded. This shall be repeated for the number of times n specified in the test procedure to give a set of n measured voltages.

The relevant Technical Committee shall specify the rate of rise of the voltage, the number of voltage applications and the procedure for evaluating the test results (see Annex A).

6.3.3 Assured disruptive-discharge voltage tests

The voltage shall be applied and raised continuously, as for a withstand voltage test, until a disruptive discharge occurs on the test object. The last value of the test voltage recorded before the instant of the disruptive discharge shall be recorded. This shall be repeated for the number of times n specified in the test procedure to give a set of n measured voltages.

The requirements of the test are satisfied if no voltage in this set exceeds the assured disruptive-discharge voltage.

The relevant Technical Committee shall specify the number of voltage applications and the rate of rise of the voltage.

7 Tests with lightning-impulse voltage

7.1 Definitions for lightning-impulse voltage tests

7.1.1 impulse voltage

intentionally applied aperiodic transient voltage, which usually rises rapidly to a peak value and then falls more slowly to zero

NOTE For special purposes, impulses having approximately linearly rising fronts or transients of oscillating or approximately rectangular form are used.

7.1.2 lightning-impulse voltage

impulse voltage with a front time less than 20 μs

7.1.3 full lightning-impulse voltage

lightning-impulse voltage, which is not interrupted by a disruptive discharge (see Figure 5)

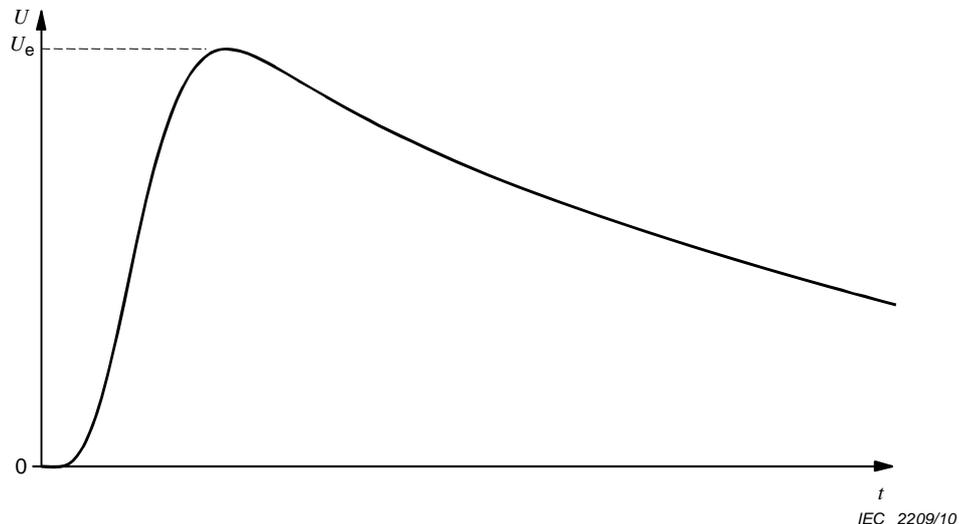


Figure 5 – Full lightning-impulse voltage

7.1.4 overshoot

increase of amplitude of an impulse voltage due to a damped oscillation at the peak caused by the circuit

NOTE Such oscillations (frequency range usually 0,1 MHz to 2 MHz) are caused by circuit inductance and sometimes cannot be avoided in large circuits or for inductive test objects. Methods for evaluation of overshoot are given in Annex B.

7.1.5 recorded curve

graphical or digital representation of the test data of an impulse voltage

7.1.6 base level

level of a record of an impulse measuring system when there is zero input to the recording instrument

7.1.7**base curve**

estimate of a full lightning-impulse voltage without a superimposed oscillation (see Annex B)

7.1.8**residual curve** $R(t)$

difference between the recorded curve and the base curve (see Annex B)

7.1.9**extreme value** U_e

maximum value of the recorded curve measured from the base level in the same sense as the applied impulse

7.1.10**base curve maximum** U_b

maximum value of the base curve

7.1.11**test voltage function**

amplitude-frequency function which is defined to represent the response of insulation to impulses with overshoot. It is given by:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2}$$

where f is the frequency in MHz (see Figure 6).

NOTE 1 Different test voltage curves for different types of insulation may be specified by the relevant Technical Committee when more test data becomes available.

NOTE 2 Applying this function as a filter to the residual voltage curve allows the calculation of the value of the test voltage of the equivalent full lightning-impulse voltage (see Annex B, Annex C and Annex D).

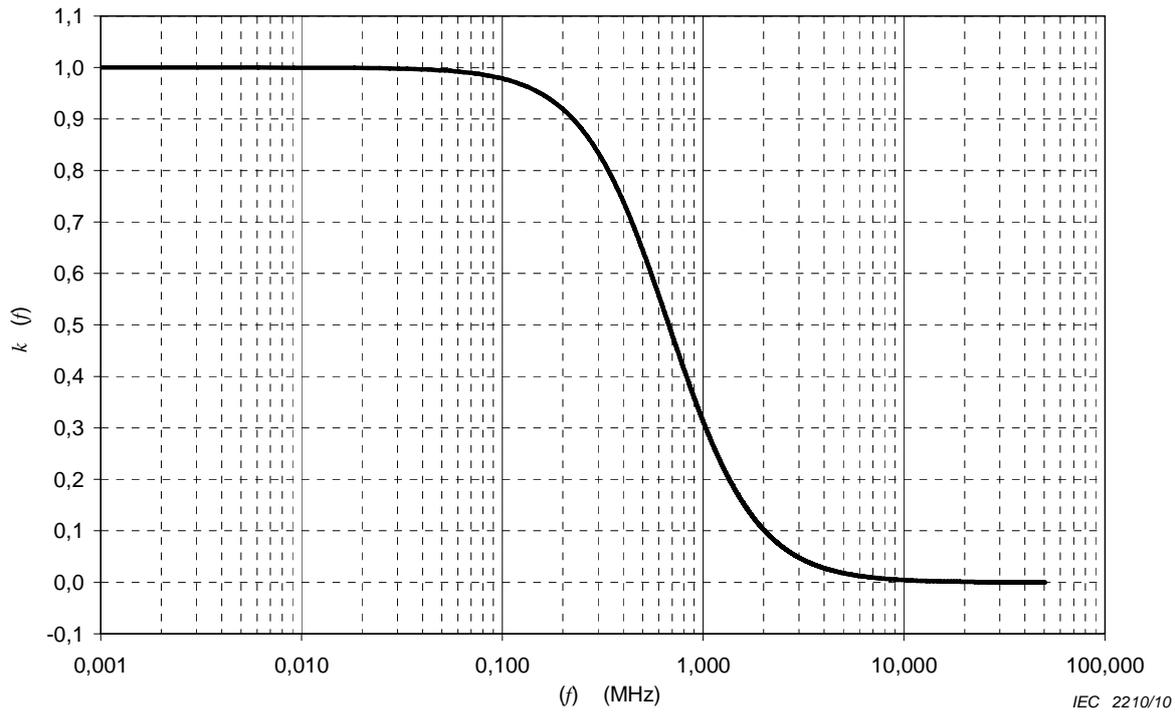


Figure 6 – Test voltage function

7.1.12

filtered residual curve

$R_f(t)$

residual curve filtered by the test voltage function

7.1.13

test voltage curve

summation of the base curve and the filtered residual curve

NOTE This is a mathematical representation of the filtering process and is not a physical entity or an equivalent impulse.

7.1.14

equivalent smooth impulse

estimated lightning-impulse voltage without overshoot having a peak value equal to the maximum value of the test voltage curve and the same front time and time to half-value as the related test voltage curve

NOTE An equivalent smooth impulse has the same dielectric breakdown behaviour as the recorded curve.

7.1.15

value of the test voltage

U_t

maximum value of the test voltage curve measured from the base level in the same sense as the applied impulse

7.1.16

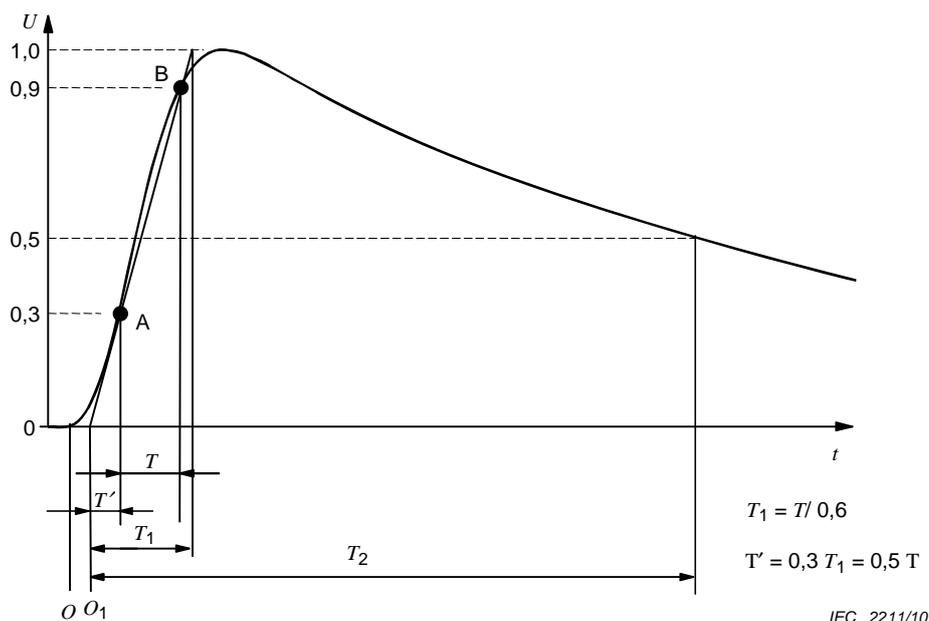
overshoot magnitude

β

difference between the extreme value of the recorded curve and the maximum value of the base curve

7.1.17**relative overshoot magnitude** β'

ratio of the overshoot magnitude to the extreme value, usually expressed as a percentage

7.1.18**front time** T_1 virtual parameter defined as 1/0,6 times the interval T between the instants when the impulse is 30 % and 90 % of the peak value on the test voltage curve (points A and B, Figure 7)**Figure 7 – Full impulse voltage time parameters****7.1.19****virtual origin** O_1 instant preceding that corresponding to point A, of the test voltage curve (see Figure 7) by a time $0,3 T_1$

NOTE For records having linear time scales, this is the intersection with the time axis of a straight line drawn through the reference points A and B on the front.

7.1.20**average rate of rise**

slope of the best fitting straight line, calculated from the recorded curve, using all the data points between the 30 % and 90 % of the extreme value levels and usually expressed in kilovolts per microsecond

NOTE In the case of noise or oscillations at the 30 % and 90 % levels, the data set is bounded by the first point after the last crossing of the 30 % level and by the last point before the first crossing of the 90 % level.

7.1.21**peak time** T_e extreme value, U_e , divided by the average rate of rise

7.1.22
time to half-value

T_2
virtual parameter defined as the time interval between the virtual origin, O_1 , and the instant when the test voltage curve has decreased to half the test voltage value (see Figure 7)

7.1.23
voltage time interval

T_λ
time interval for which the recorded curve exceeds λU_e where $0 < \lambda < 1$ (see Figure 8)

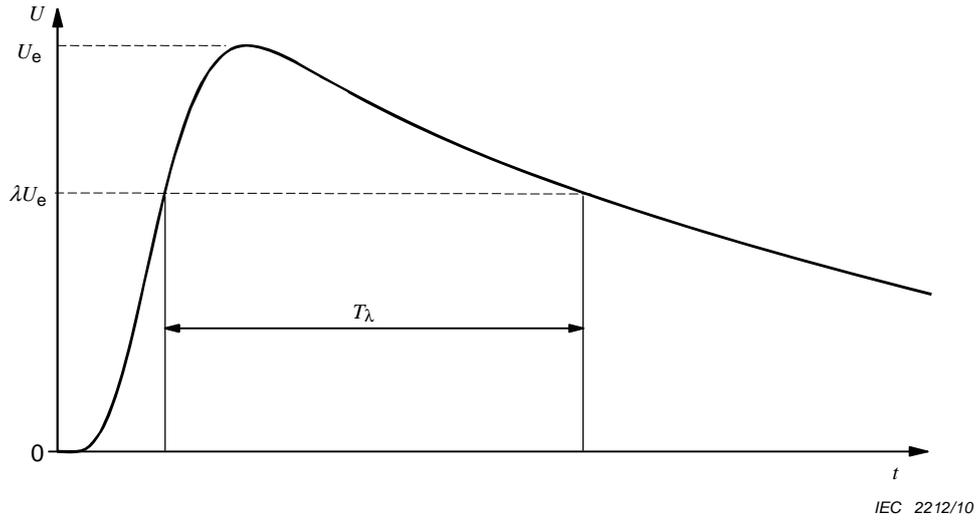


Figure 8 – Voltage time interval

7.1.24
voltage integral

integral of the recorded curve with respect to time over a specified time interval (see Figure 9).

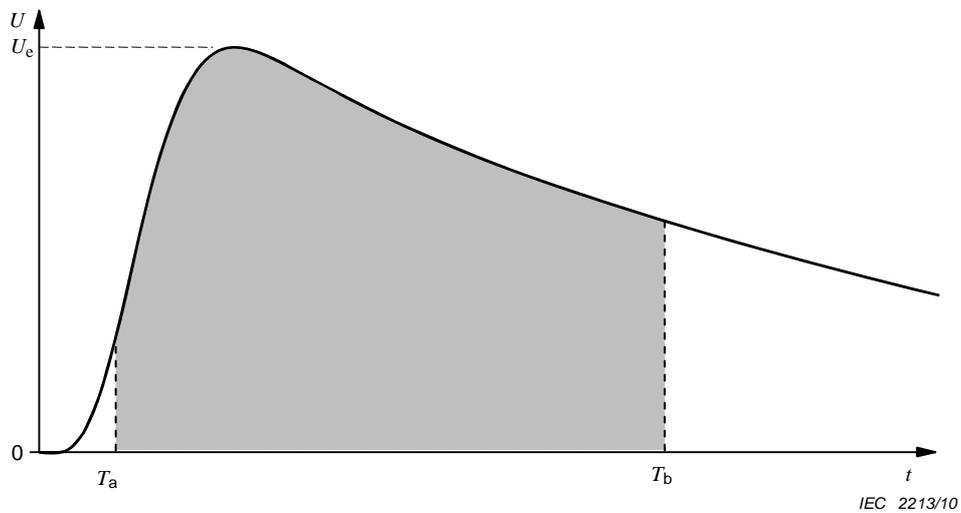


Figure 9 – Voltage integral

7.1.25**chopped lightning-impulse voltage**

lightning-impulse voltage during which a disruptive discharge causes a rapid collapse of the voltage, practically to zero value (see Figure 10 to Figure 12).

7.1.26**instant of chopping**

instant at which the extrapolation of the line between the 70 % and 10 % points (C and D) on the voltage collapse crosses the level immediately before the collapse (see Figure 10 and Figure 11).

7.1.27**time to chopping** T_C

virtual parameter defined as the time interval between the virtual origin O_1 and the instant of chopping (see Figure 10 and Figure 11).

7.1.28**characteristics related to the voltage collapse during chopping**

two points C and D at 70 % and 10 % of the voltage immediately before the voltage collapse (see Figure 11)

NOTE 1 The duration of the voltage collapse is defined as 1/0,6 times the time interval between points C and D. The steepness of the voltage collapse is the ratio of the voltage at the instant of chopping to the duration of voltage collapse.

NOTE 2 The use of points C and D is for definition purposes only; it is not implied that the duration and steepness of chopping can be measured with any degree of accuracy using conventional measuring systems.

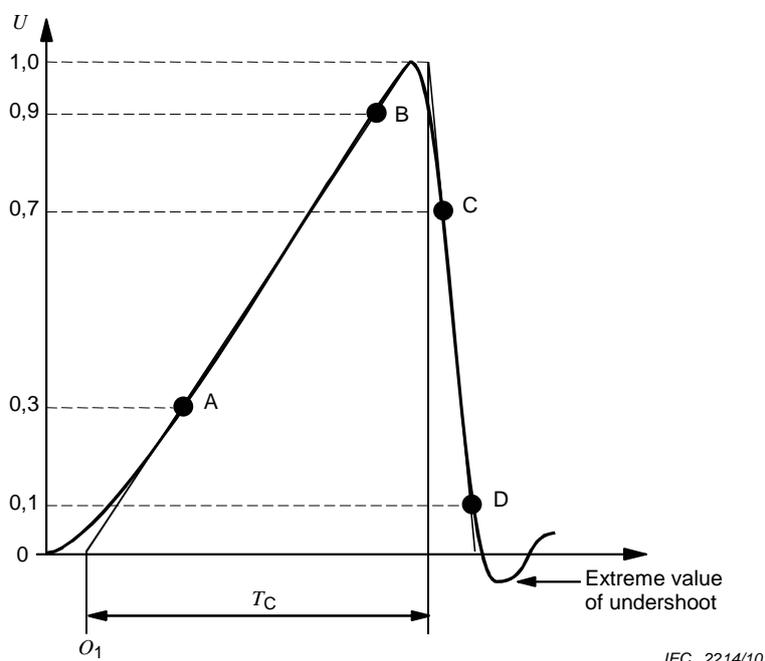


Figure 10 – Lightning-impulse voltage chopped on the front

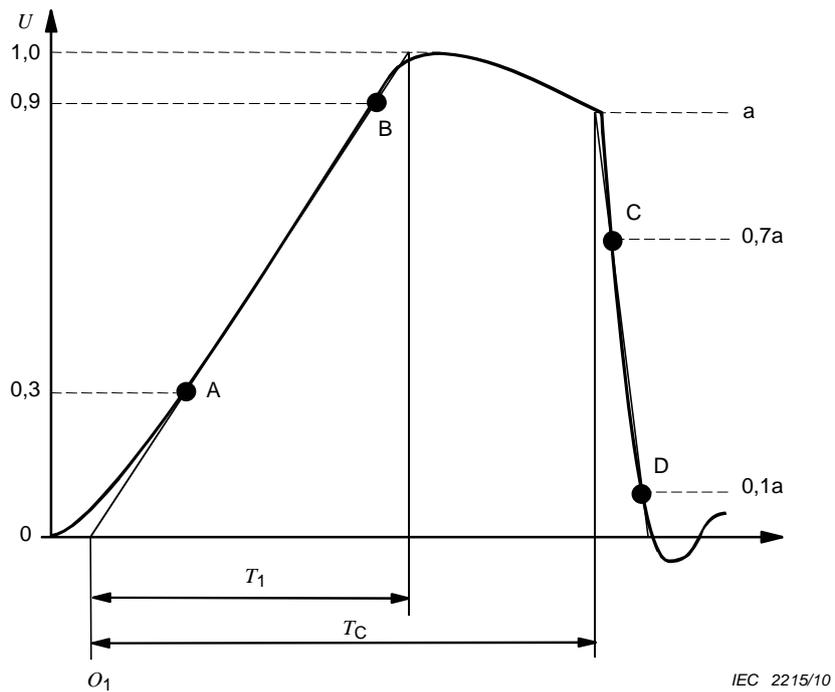


Figure 11 – Lightning-impulse voltage chopped on the tail

7.1.29

extreme value of the undershoot of an impulse

maximum amplitude measured from the base level in the opposite sense to the applied impulse (see Figure 10).

7.1.30

linearly rising front-chopped impulse

voltage rising with approximately constant steepness, until it is chopped by a disruptive discharge

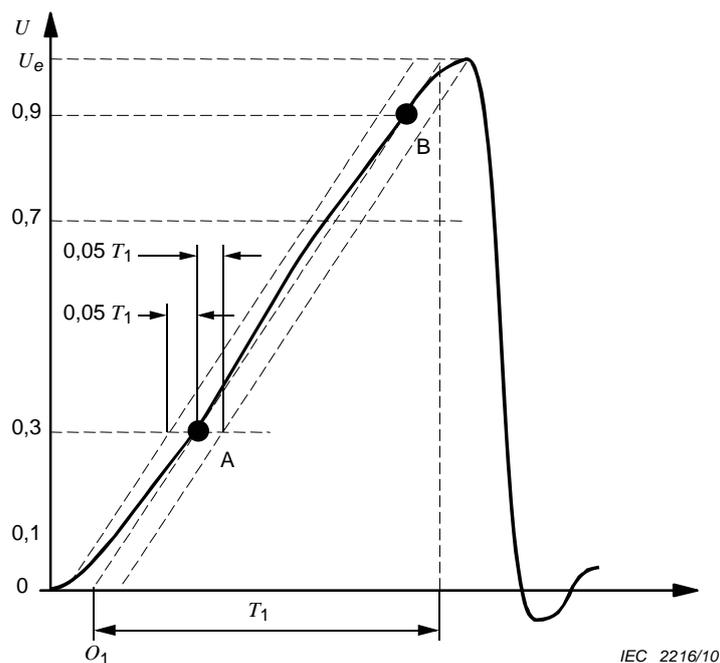


Figure 12 – Linearly rising front chopped impulse

NOTE 1 To define such an impulse, the best fitting straight line is drawn through the part of the front between 30 % and 90 % of the peak magnitude; the intersections of this with the 30 % and 90 % voltage values then being designated A and B, respectively (see Figure 12).

The impulse is defined by:

- the maximum voltage U_e ;
- the front time T_1 and
- the virtual steepness S : $S = U_e/T_1$.

This is the slope of the straight line drawn through the points A and B, usually expressed in kilovolts per microsecond.

This chopped impulse is considered to be approximately linearly rising if the front, from 30 % amplitude up to the instant of chopping, is entirely enclosed between two lines parallel to the line AB, but displaced from it in time by $\pm 0,05 T_1$ (see Figure 12).

NOTE 2 The value and the tolerance on the virtual steepness S should be specified by the relevant Technical Committee.

7.1.31 Definitions for voltage/time curves

7.1.31.1 voltage/time curve for linearly rising impulse voltage curve relating the discharge voltage to the front time T_1

NOTE The curve is obtained by applying impulse voltages of different steepness (see Figure 13).

7.1.31.2 voltage/time curve for impulse voltage of constant prospective shape curve relating the disruptive-discharge voltage of the test object to the time to chopping, which may occur on the front, at the peak or on the tail

NOTE The curve is obtained by applying impulse voltages with different prospective peak values (see Figure 13).

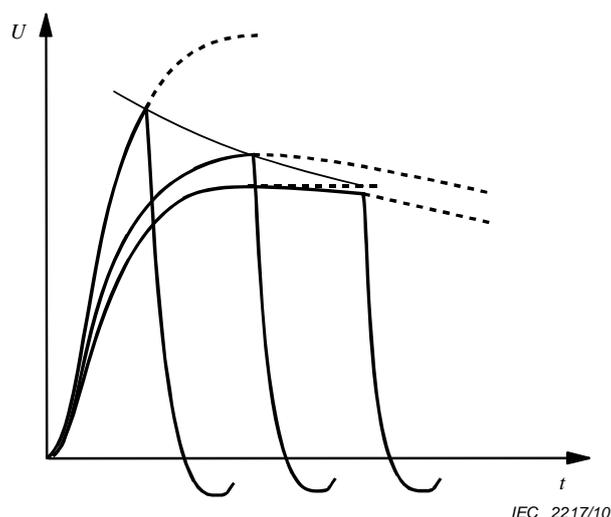


Figure 13 – Voltage/time curve for impulses of constant prospective shape

7.2 Test voltage

7.2.1 Standard lightning-impulse voltage

The standard lightning-impulse voltage is a smooth full lightning-impulse voltage having a front time of $1,2 \mu\text{s}$ and a time to half-value of $50 \mu\text{s}$ and described as a 1,2/50 impulse.

7.2.2 Tolerances

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the following differences are accepted between specified values for the standard impulse and those calculated from the test voltage curve:

- Test voltage value: $\pm 3\%$.
- Front time: $\pm 30\%$.
- Time to half-value: $\pm 20\%$.

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the relative overshoot magnitude shall not exceed 10 %.

For certain test circuits and test objects, standard waveshapes within the stated tolerances may be impossible to realise. In such cases extension of front time T_1 or overshoot may be necessary. Guidance for such cases should be given by the relevant Technical Committee.

NOTE The peak time, T_e , the voltage time interval, T_λ and the voltage integral are parameters under consideration for alternate characterization of lightning-impulse voltages. Values may be assigned by the relevant Technical Committee.

7.2.3 Standard chopped lightning-impulse voltage

This is a standard impulse chopped by an external gap with a time-to-chopping value between 2 μs to 5 μs .

Other times to chopping may be specified by the relevant Technical Committee. The duration of voltage collapse should be much faster than the front time of the impulse and limits may be set by the relevant Technical Committee. The requirements for measurement and the associated uncertainties are given in IEC 60060-2.

7.2.4 Special lightning-impulse voltages

In some cases oscillating lightning-impulse voltages may be applied. This offers the possibility of producing impulses with shorter front times or with extreme values corresponding to a generator efficiency greater than 1.

NOTE For details see IEC 60060-3.

7.2.5 Generation of the test voltage

The impulse is usually produced by an impulse generator consisting essentially of a number of capacitors that are charged in parallel from a direct voltage source, then switched into series and discharged into an impulse-forming circuit that includes the test object.

7.2.6 Measurement of the test voltage and determination of impulse shape

The measurement of the test voltage value, the time parameters and the overshoot or oscillations on the test voltage shall be made with approved measuring systems (see IEC 60060-2). The measurement shall be made with the test object in the circuit and, in general, the impulse shape shall be checked for each test object. Where a number of test objects of the same design and size are tested under identical conditions, the shape needs only to be verified once.

For a chopped lightning impulse the collapse can occur on the front, at the peak or on the tail. For a front chopped lightning-impulse voltage the test voltage curve is the recorded curve. Impulses chopped on the tail are treated as full waves for the evaluation of test voltage and front time, which can be determined from reduced voltage impulses (e.g. $\leq 50\%$) that do not cause chopping. The chopping can be accomplished by an external chopping gap or may occur due to a disruptive-discharge in the internal or external insulation of the test object.

With some test objects or test arrangements there may be a flattening of the peak or a rounding off of the voltage before the final voltage collapse. Similar effects may also be observed due to the imperfections of the measuring system. Exact determination of the parameters related to chopping requires the presence of both a sharp discontinuity and a fast measuring system. Other cases are left to the relevant Technical Committees for consideration.

Determination of the impulse shape by calculation from the test circuit parameters is not considered to be satisfactory.

7.2.7 Measurement of current during tests with impulse voltages

The relevant Technical Committee shall specify the characteristics of a current flowing in the test object that should be measured during tests with high impulse voltages. When this type of measurement is used for comparative purposes wave shape is of importance and the measurement of the absolute value of this current may be of lesser importance. For guidance see IEC 62475.

7.3 Test procedures

7.3.1 Withstand voltage tests

The recommended test procedure depends on the nature of the test object, as defined in 3.5. The relevant Technical Committee shall specify which procedure shall be applied. In procedures A, B and C the voltage applied to the test object is only the specified withstand value, while in procedure D several voltage levels have to be applied.

NOTE The statistical precision of the procedures is different, but for insulation coordination (IEC 60071) it is assumed that the outcome of the tests is identical.

7.3.1.1 Withstand voltage test: Procedure A

Three impulses of the specified shape and polarity at the specified withstand voltage level are applied to the test object. The requirements of the test are satisfied if no indication of failure is obtained, using methods of detection specified by the relevant Technical Committee.

NOTE This procedure is recommended for tests on degradable or non-self-restoring insulation.

7.3.1.2 Withstand voltage test: Procedure B

Fifteen impulses of the specified shape and polarity at the specified withstand voltage level are applied to the test object. The requirements of the test are satisfied if not more than two disruptive discharges occur in the self-restoring part of the insulation and if no indication of failure in the non-self-restoring insulation is obtained by the detection methods specified by the relevant Technical Committee.

NOTE If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, it could be taken as an indication that no failure has happened in the non-self-restoring insulation, when the last three impulses have not led to a disruptive discharge. In case of a disruptive discharge at one of the impulse numbers 13 to 15, up to three additional pulses can be applied (maximum 18). When no further disruptive discharge occurs, the test object has passed the test.

7.3.1.3 Withstand voltage test: Procedure C

Three impulses of the specified shape and polarity at the specified withstand voltage level are applied to the test object. If no disruptive discharge occurs the test object has passed the test. If more than one disruptive discharge occurs the test object has failed to pass the test. If one disruptive discharge occurs in the self-restoring part of the insulation, then nine additional impulses are applied and if no disruptive discharge occurs the test object has passed the test.

If any detection of failure in a non-self-restoring part of insulation is observed with the detection methods specified by the relevant Technical Committee during any part of the test, the test object has failed to pass the test.

7.3.1.4 Withstand voltage test: Procedure D

For self-restoring insulation the 10 % impulse disruptive-discharge voltage U_{10} , may be evaluated by using statistical test procedures described in Annex A.

These test methods permit either direct evaluation of U_{10} , and U_{50} or indirect evaluation of U_{10} .

In the latter case U_{10} is derived from the U_{50} value using the relationship:

$$U_{10} = U_{50}(1 - 1,3s)$$

The relevant Technical Committee shall specify the value to be assumed for the standard deviation s of the disruptive-discharge voltage. For dry tests on air insulation, without any other insulation involved, the per-unit value $s = 0,03$ can be used.

The test object is deemed to be satisfactory if U_{10} is not less than the specified impulse withstand voltage.

The following test methods can be used to evaluate U_{50} :

- a) the multiple-level method (see Clause A.1.1) with $m \geq 4$ voltage levels, and $n_i \geq 10$ impulses per level;
- b) the up-and-down method (see Clause A.1.2) with $n = 1$ impulse per group and $m \geq 20$ useful applications.

To evaluate U_{10} the up-and-down withstand method, with $n = 7$ impulses per group and at least eight useful groups, can be used.

In all cases the voltage interval between levels ΔU should be approximately from 1,5 % to 3 % of the estimated value of U_{50} .

7.3.2 Procedures for assured disruptive-discharge voltage tests

The procedures for an assured disruptive-discharge voltage test are similar to those described in 7.3.1 with the appropriate changes between discharge and withstand conditions.

The relevant Technical Committee may also specify other procedures for specific test objects.

8 Tests with switching-impulse voltage

8.1 Definitions for switching-impulse voltage tests

8.1.1

switching-impulse voltage

impulse voltage with a front time of 20 μs or longer

8.1.2

value of the test voltage

maximum value, if not otherwise specified by the relevant Technical Committee

8.1.3

time to peak

T_p

time interval from the true origin to the time of maximum value of a switching-impulse voltage

NOTE Because of the long duration of the maximum voltage, there can be practical problems in determining this time and methods are given in 8.2.3.

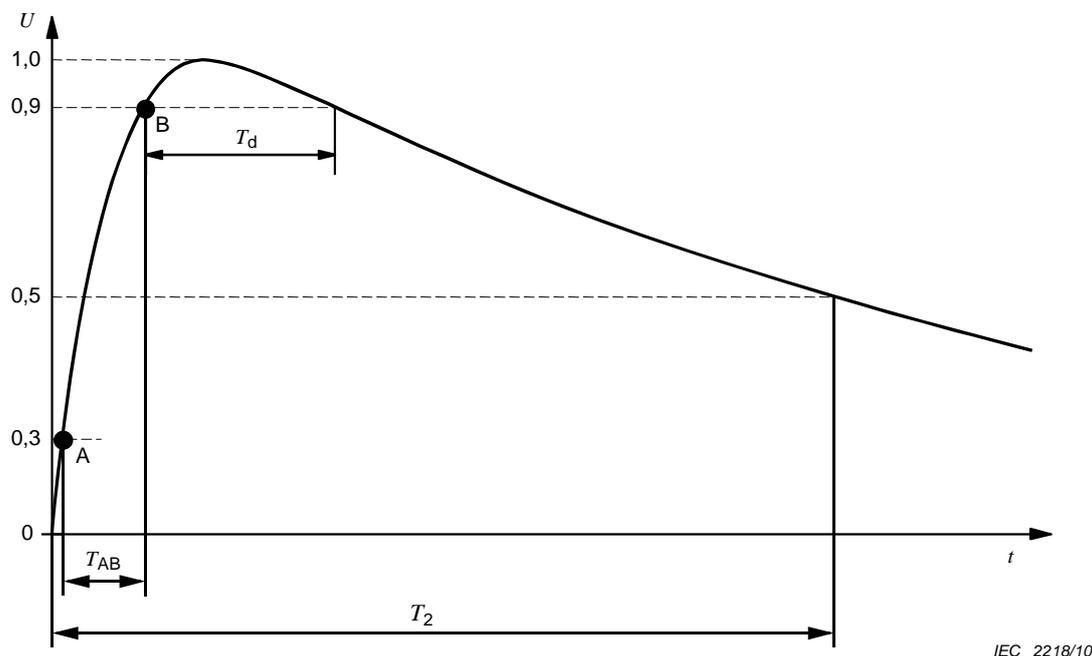


Figure 14 – Switching-impulse voltage

8.1.4

true origin

O

instant where the recorded curve begins a monotonic increase (or decrease)

8.1.5

time to half-value

T_2

time interval between the true origin and the instant when the voltage has first decreased to half the maximum value (see Figure 14)

8.1.6

time above 90 %

T_d

time interval during which the switching-impulse voltage exceeds 90 % of its maximum value (see Figure 14)

8.1.7

time to zero

T_z

time interval between the true origin and the instant when the voltage has its first passage through zero

NOTE Specification of the time above 90 % and time to zero instead of the time to half-value is found useful, for instance, when the form of the impulse is dictated by saturation phenomena in the test object or the test circuit, or where the severity of the test on important parts of internal insulation of the test object is considered to be highly dependent on these parameters. When specifying a switching-impulse voltage, only one set of parameters related to the waveshape is generally given. The particular time parameters defined should be clearly indicated by reference, for example, to a T_p/T_2 or $T_p/T_d/T_z$, impulse.

Additional parameters may be specified by the relevant Technical Committee when considering specific tests.

8.2 Test voltage

8.2.1 Standard switching-impulse voltage

The standard switching-impulse voltage is an impulse having a time to peak T_p of 250 μs and a time to half-value T_2 of 2 500 μs . It is described as a 250/2 500 impulse.

8.2.2 Tolerances

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee, the following differences are accepted between specified values and those actually recorded, both for standard and special impulses:

Value of the test voltage	$\pm 3 \%$
Time to peak	$\pm 20 \%$
Time to half-value	$\pm 60 \%$

In certain cases, for instance with low impedance test objects, it may be difficult to adjust the shape of the impulse to within the tolerances recommended. In such cases other tolerances or other impulse shapes may be specified by the relevant Technical Committee.

8.2.3 Time-to-peak evaluation

8.2.3.1 Standard switching-impulse voltages

For standard switching-impulse voltages:

$$T_p = K T_{AB},$$

where K is a dimensionless constant given by

$$K = 2,42 - 3,08 \times 10^{-3} T_{AB} + 1,51 \times 10^{-4} T_2$$

and where T_{AB} and T_2 are in microseconds and $T_{AB} = t_{90} - t_{30}$.

NOTE In IEC 60060-3 $T_p = 2,4 T_{AB}$, is used for standard switching-impulse voltages.

8.2.3.2 Non-standard impulses

For non-standard impulses, the time to peak can be determined by various methods of digital curve fitting dependant on the actual shape.

NOTE If required by uncertainty considerations, the method of time-to-peak evaluation should be stated.

8.2.4 Special switching-impulse voltages

For special purposes, when the use of the standard switching-impulse voltage is not considered sufficient or appropriate, special switching-impulse voltages of either aperiodic or oscillating form may be prescribed by the relevant Technical Committee.

NOTE For details of oscillating switching-impulse voltages see IEC 60060-3.

8.2.5 Generation of the test voltage

Switching-impulse voltages are usually generated by a conventional impulse generator.

NOTE They can also be generated by the application of a voltage impulse to the low-voltage winding of a testing transformer (or of a transformer to be tested) but it is difficult to reach the standard parameters as specified in 8.2.1 and 8.2.2.

The elements of a circuit for generating switching-impulse voltages should be chosen so as to avoid excessive distortion of the impulse shape due to non-disruptive-discharge currents in the test object. Such currents can reach quite large values, especially during pollution tests on external insulation at high voltages. In test circuits having high internal impedance, they may cause severe distortion of the voltage or even prevent a disruptive discharge from occurring.

8.2.6 Measurement of test voltage and determination of impulse shape

The measurement of the maximum voltage value and the time parameters shall be made with approved measuring systems (see IEC 60060-2). The measurement shall be made with the test object in the circuit and, in general, the impulse shape shall be checked for each test object. Where a number of test objects of the same design and size are tested under identical conditions, the shape needs only to be verified once.

8.2.7 Measurement of current during tests with impulse voltages

The relevant Technical Committee shall specify the characteristics of a current flowing in the test object that should be measured during tests with high impulse voltages. When this type of measurement is used for comparative purposes wave shape is of importance and the measurement of the absolute value of this current may be of lesser importance. For guidance see IEC 62475.

8.3 Test procedures

The test procedures are in general the same as for lightning-impulse voltage testing and similar statistical considerations apply (see 7.3 and Annex A). Unless otherwise specified by the relevant Technical Committee, the standard deviation, in per unit value, of the disruptive-discharge voltage for dry and wet tests on air insulation, without any other insulation involved, can be assumed to be:

$$s = 0,06$$

Correspondingly larger voltage intervals ΔU may be used when applying the multiple level or the up-and-down procedures.

NOTE With switching-impulse voltages, disruptive discharges frequently occur at random times well before the peak. In presenting the results of discharge tests made in accordance with 7.3.1.4, the relationship between disruptive-discharge probability and voltage is generally expressed in terms of the prospective maximum value. However, another method is also in use in which the actual disruptive-discharge voltage for every impulse is measured; the probability distribution of the measured voltage values is then determined by the method described for Class 3 tests in Annex A.

9 Tests with combined and composite voltages

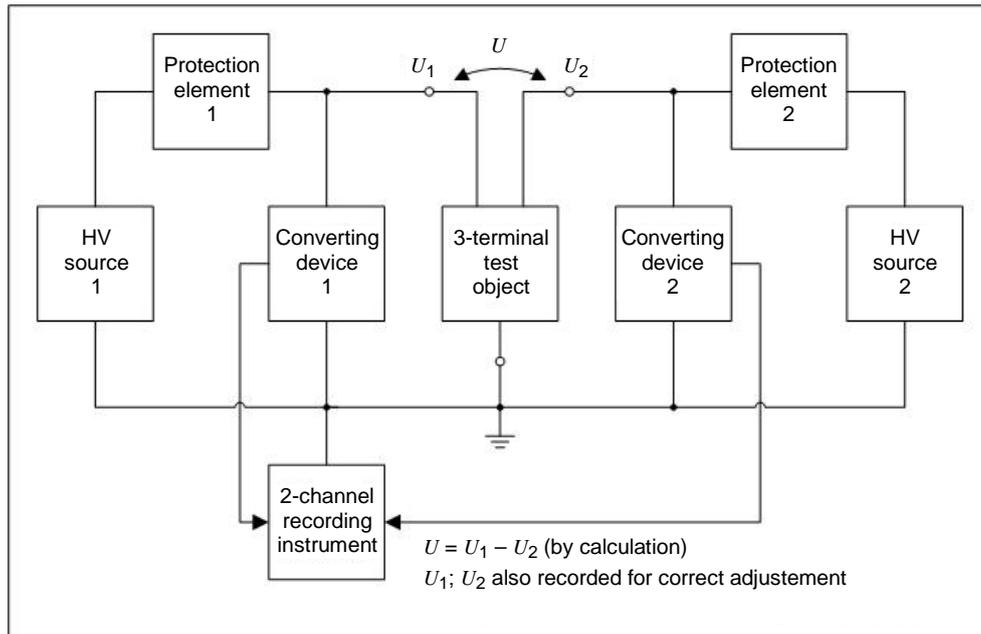
9.1 Definitions for combined- and composite-voltage tests

9.1.1

combined voltage

test voltage which appears between the two energized terminals of a three-terminal test object with the third terminal earthed, when energizing is provided by two different test voltages (see Clauses 5 to 8) generated by two separate test voltage sources (see Figure 15).

NOTE Combined voltages are applied for testing, for example, the longitudinal insulation of switching equipment and the phase-to-phase insulation of three-phase systems and equipment. The voltages are applied on different terminals of the test object.



IEC 2219/10

Figure 15 – Circuit for a combined voltage test

9.1.2

value of a combined voltage

maximum potential difference between the two energized terminals of the test object (see Figure 16a)

9.2

composite voltage

superposition of two different test voltages (see Clauses 5 to 8) generated by the suitable connection of two separate test voltages sources (see Figure 16b and Figure 17)

NOTE Both voltages are applied at one terminal of the test object.

9.2.1

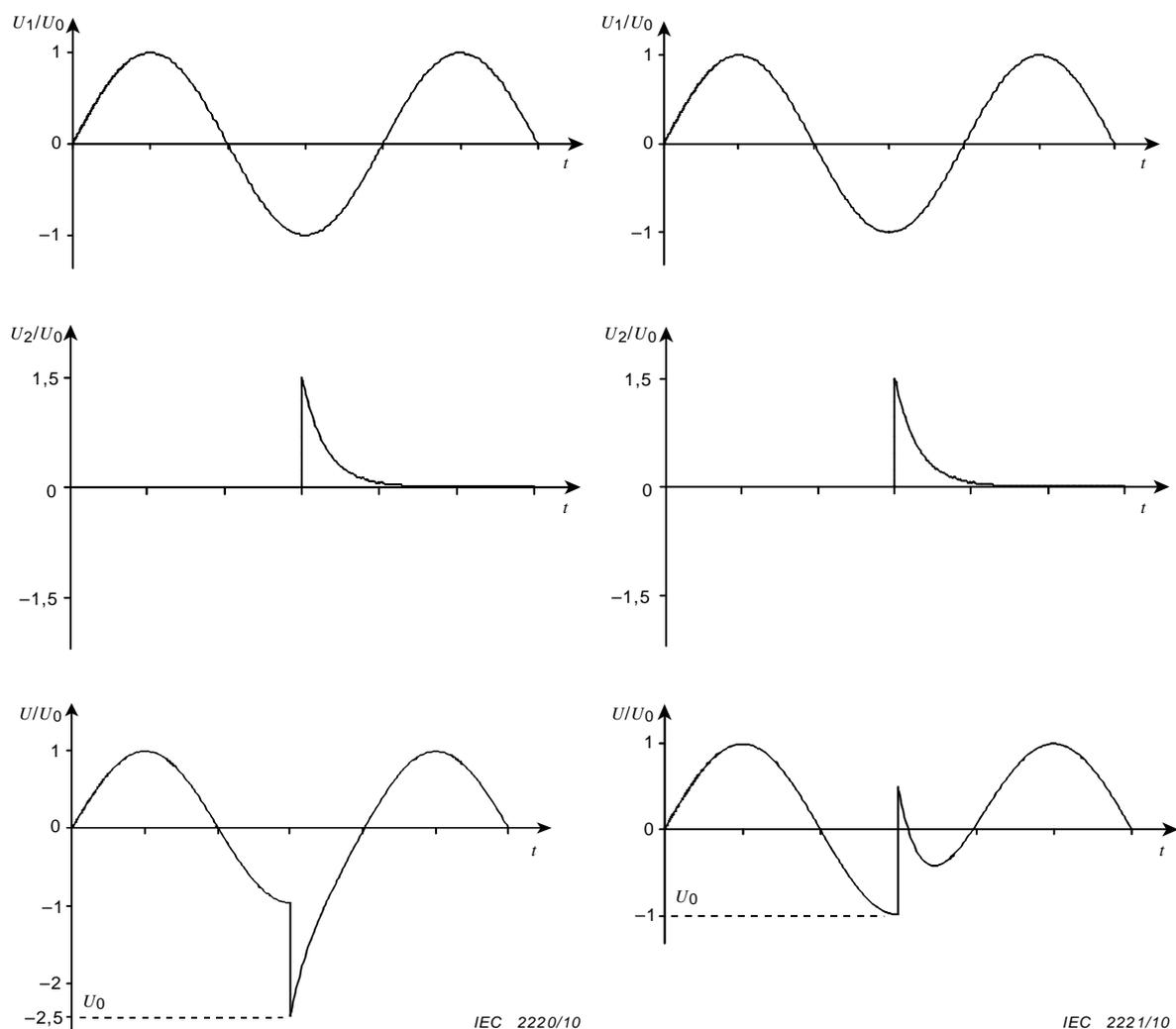
value of a composite voltage

maximum absolute value measured at the test object (see Figure 16b)

9.2.2

voltage components

two test voltages, characterized according to the relevant clauses of this standard and causing the combined or composite test voltage stress at the test object



NOTE 1 In Figure 16a, the combined voltage is $U = U_1 - U_2$.

NOTE 2 In Figure 16b, the combined voltage is $U = U_1 + U_2$.

Figure 16a – Combined voltage between two HV terminals

Figure 16b – Combined voltage between one HV terminal and earth

Figure 16 – Schematic example for combined and composite voltage

9.2.3 time delay

Δt

time interval between the instants when the two voltage components reach their maximum values (see Figure 18)

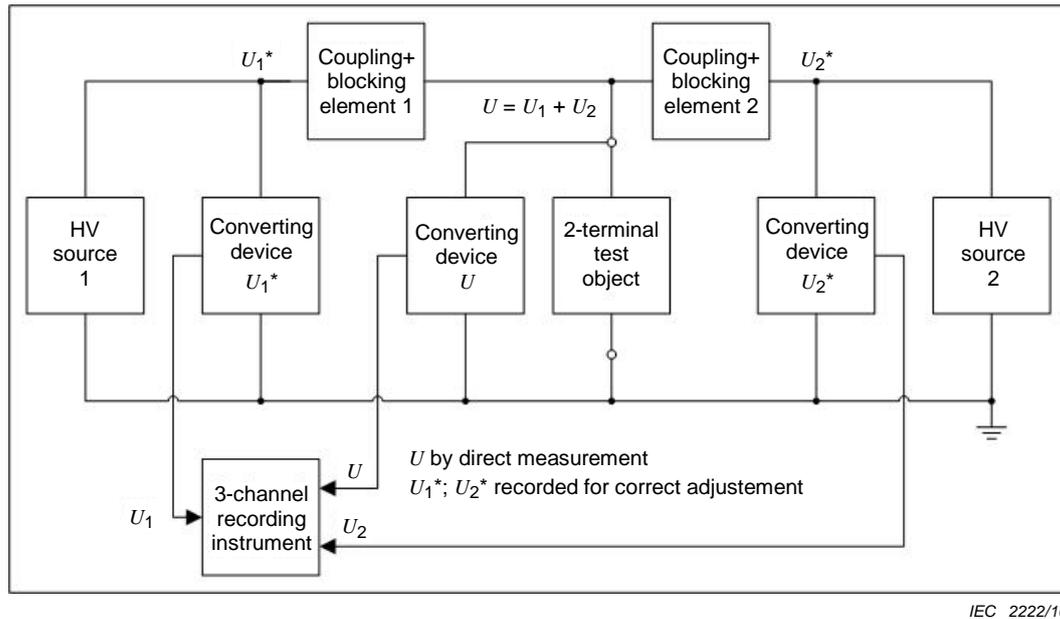


Figure 17 – Circuit for a composite voltage test

9.2.4 Tolerances

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee a difference of $\pm 5\%$ between a specified and the actually recorded voltage value is acceptable.

The tolerance of the time delay is $\pm 0,05 T_p$, where T_p is the front time or the time to peak of an impulse or a quarter of a cycle of an alternating voltage. T_p is the longer time of the two voltages involved.

9.2.5 Generation

For generation two single voltage sources are connected, each via a protecting element to one of the HV terminals of the test object (Figure 15). The protecting element shall be selected so that the related source in case of a disruptive discharge of the test object is protected against the voltage stress of the other source.

Due to the coupling of the two sources the shapes and amplitudes of the two voltage components will differ from those generated by the same sources used separately. The permitted limits for voltage drop on the a.c. component shall be specified by the relevant Technical Committee.

NOTE See, for example, IEC 62271-1[E5].

9.2.6 Measurement

Both voltage measurement systems arranged between each of the HV terminals of the test object and earth shall fulfil the requirements of IEC 60060-2 for the measurement of both voltage components, because the systems are coupled. See Figure 15. It is recommended to record them by a dual-channel recording instrument according to IEC 61083-1 that enables the direct evaluation of the combined voltage from its two voltage components. The result can be displayed as shown in Figure 16a.

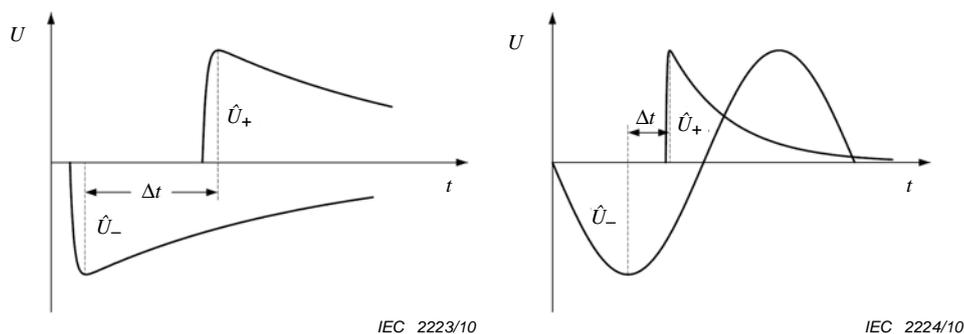


Figure 18a – Combination of two impulse voltages

Figure 18b – Combination of an impulse voltage and a power-frequency alternating voltage

Figure 18 – Definition of time delay Δt

9.3 Composite test voltages

9.3.1 Parameters

A composite test voltage, generated by two voltage components both according to this standard, shall be characterized by the following parameters:

- by its voltage value;
- by the time delay;
- by the parameters of its two components according to the relevant clauses of this standard.

9.3.2 Tolerances

If not otherwise specified by the relevant Technical Committee a difference of $\pm 5\%$ between a specified and the actually recorded voltage value is accepted.

The tolerance of the time delay is $\pm 0,05 T_p$, where T_p is the front time or the time to peak of an impulse or a quarter of a cycle of an alternative voltage. T_p is the longer time of the two voltages involved.

9.3.3 Generation

For generation two single voltage sources are connected together and the HV terminal of the test object is at the connection point. See Figure 17. Each connection is realised by an element, which couples one voltage and blocks the other. The interaction of the two sources shall be considered. For the sources itself, see the relevant clauses of this standard.

9.3.4 Measurement

The voltage and time characteristic of the composite voltage shall be measured against earth with a measuring system arranged at the connection point of the test object. See Figure 17. The measuring system shall fulfil the requirements of IEC 60060-2 for both voltage components. It is recommended to also measure the output voltage of each voltage source directly (see Figure 17) and to record the three voltages synchronously.

9.4 Test procedures

Test procedures and arrangement of test objects with combined and composite voltages are left to the relevant Technical Committee.

For atmospheric corrections the parameter g (4.3.4.3) shall be calculated considering the combined or composite test voltage value. The parameter k_1 and k_2 (4.3.4.1 and 4.3.4.2) shall be calculated for the higher of the two test voltages and be applied to both.

Annex A (informative)

Statistical treatment of test results

A.1 Classification of tests

Disruptive-discharge test procedures can be divided into three classes for the purpose of statistical evaluation.

A.1.1 Class 1: Multiple-level tests (Figure A.1)

In a Class 1 test, n_i voltage applications (e.g. lightning-impulse voltages), causing $k_i \leq n_i$ disruptive discharges, are applied at each of m voltage levels, U_i ($i = 1, 2, \dots, m$), with the difference between adjacent voltage levels being $\Delta U = U_{i+1} - U_i$ ($i=1,2,\dots,m-1$). While this procedure is usually employed with impulse voltages, tests with alternating and direct voltages of specified stressing time also fall into this class.

NOTE The parameters should be selected as follows: $m \geq 5$, $n_i \geq 10$ for all $i=1,2,\dots,m$; $\Delta U = (0,01 \text{ to } 0,06) U_{50}$.

The test results are the n_i voltage applications and the corresponding number, k_i , of disruptive discharges at each voltage level U_i ($i=1,2,\dots, m$).

A.1.2 Class 2: Up-and-down tests (Figure A.2)

In a Class 2 test, m accepted groups of n essentially equal voltage stresses are applied at voltage levels U_i ($i=1,2,\dots, l$). The voltage level for each succeeding group of stresses is increased or decreased by a small amount ΔU according to the result of the previous group of stresses.

Two testing procedures are commonly used: the withstand procedure, aimed at finding voltage levels corresponding to low disruptive-discharge probabilities and the discharge procedure, which finds voltage levels corresponding to high disruptive-discharge probabilities. In the withstand procedure, the voltage level is increased by an amount ΔU if no disruptive discharge occurs in a group of n voltage applications, otherwise the voltage level is decreased by the same amount. In the discharge procedure, the voltage level is increased by ΔU if one or more withstands occur; otherwise it is decreased by the same amount.

When $n = 1$, the two procedures converge to the procedure of the up-and-down 50 % disruptive-discharge voltage test.

Tests with other values of n are also used to determine voltages corresponding to other disruptive-discharge probabilities. The results are the k_i number of stress groups applied at the voltage levels U_i . The first U_i level to be taken into account is that at which at least two preceding groups of stresses have been applied. The total number of useful groups is

$$m = \sum_{i=1}^l k_i \text{ at the voltage levels } i=1\dots l.$$

NOTE Tests with $n = 7$ give the 10 % and the 90 % disruptive-discharge voltages which are defined as withstand and disruptive voltages respectively (see clause 7.3.1.4). The other parameters should be selected as follows $\Delta U = (0,01 \text{ to } 0,03) U_{50}$ and $m > 15$.

A.1.3 Class 3: Progressive stress tests (Figure A.3)

In a Class 3 test, a procedure always leading to a disruptive discharge on the test object is applied n times. The test voltage may be increased continuously or in steps until a disruptive discharge occurs at a voltage U_i or held constant at a level until a disruptive discharge at time t_i is observed. The results are the n values of voltage U_i or time t_i at which the disruptive discharge has occurred ($n \geq 10$).

Such tests are made with continuously or stepwise increased direct and alternating or stepwise increased impulse voltages. Tests with disruptive discharges occurring on the front of an impulse fall into this class.

A.2 Statistical behaviour of disruptive discharge

When p , the probability of a disruptive discharge during a given test procedure, depends only on the test voltage, U , the behaviour of the test object can be characterized by a function $p(U)$ determined by the processes of discharge development. In practice, this function, the disruptive-discharge probability function, can be represented mathematically by a theoretical probability distribution function characterised by at least two parameters, e. g. U_{50} and s . U_{50} is the estimate of the 50 % discharge voltage for which $p(U) = 0,5$ and s is the estimate of the standard deviation (see 3.4.4 and 3.4.6).

NOTE 1 Examples of $p(U)$ can be derived from the Gaussian (or Normal), the Weibull or the Gumbel probability distribution functions. Experience shows that for $0,16 < p < 0,84$, most theoretical distributions can be considered equivalent. For details see the relevant literature [A1-A4].

NOTE 2 Sometimes p is a function of two or more parameters, e.g., U and dU/dt . In such cases, no simple function can be used to describe p . Details of such cases may be found in the technical literature [A1-A4].

The function $p(U)$ and the parameters U_{50} and s can be estimated from tests with sufficient numbers of voltage applications, provided that the characteristics of the test object remain constant throughout the tests. In practice, the number of voltage applications is usually limited and the estimates of U_{50} and s based on an assumed form of $p(U)$ will be subject to statistical uncertainties.

A.2.1 Confidence limits

If a parameter y is estimated from n test results, upper and lower confidence limits (y_{upper} and y_{lower}) can be defined, with the probability C that the true value of y lies within these limits. C is also called the level of confidence and the range (y_{upper} to y_{lower}) defines the width of the confidence band.

Usually C is taken as either 0,95 or 0,90 and the corresponding limits are called the 95 % or 90 % confidence limits respectively.

For a given C value, the width of the confidence band depends on both n and the value of the standard deviation s . The standard deviation s should be estimated when possible from tests made under realistic conditions. In general, the larger the number of tests made, the better will be the estimate of s . It should, however, be remembered that during a prolonged test series, ambient conditions may change to an extent which offsets the gain in accuracy from the increased number of tests.

Since accurate estimation of s from a limited number of tests is not possible, values estimated from the pooled results of many tests are often specified by the relevant Technical Committees.

A.3 Analysis of test results

This Clause is applicable to cases where the results of tests can be regarded as independent estimates, i.e., where a result of a test is not influenced by what may have occurred in any preceding test.

NOTE For checking the independence of a series of test results see the relevant literature [A1-A4].

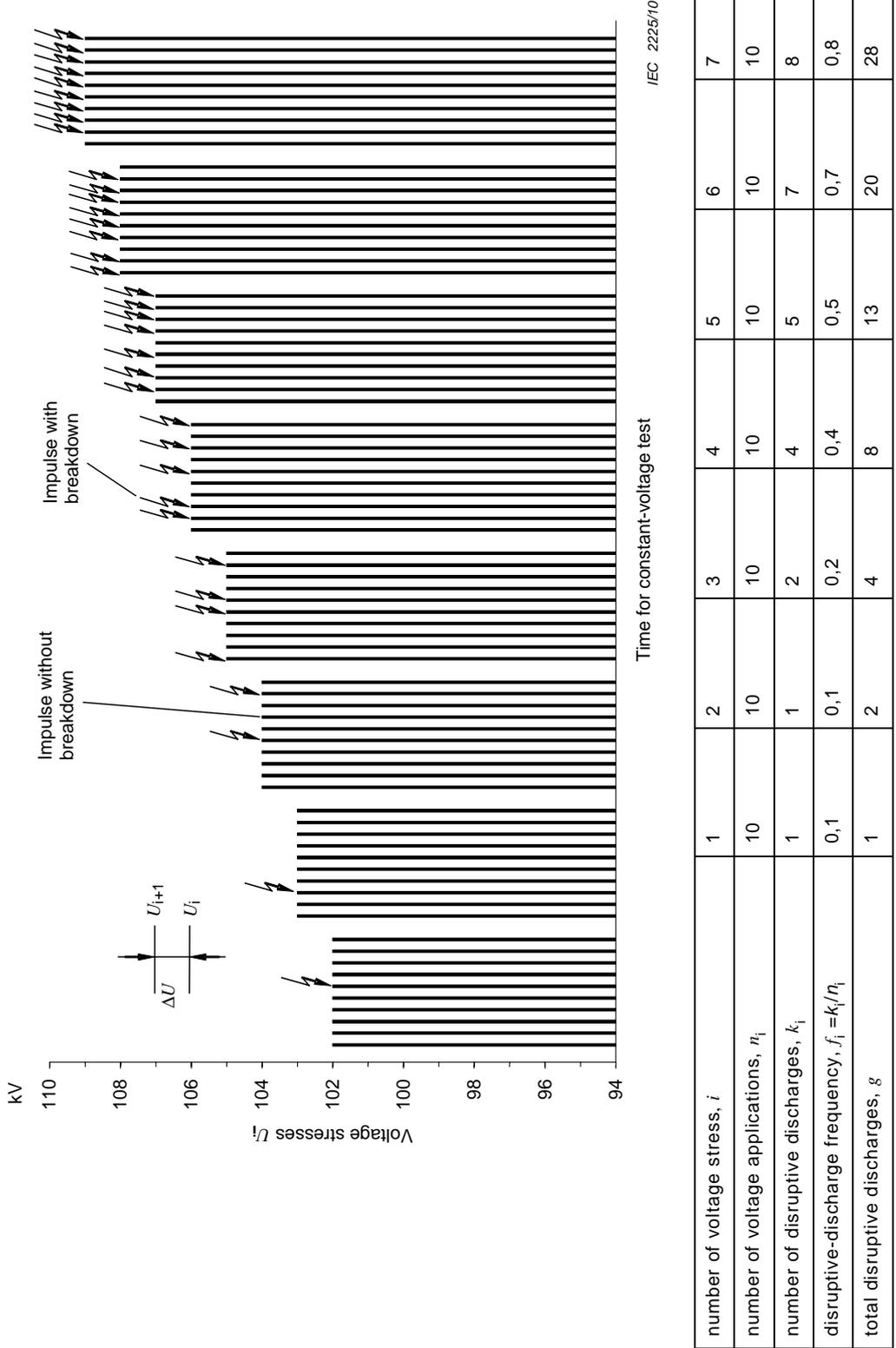


Figure A.1 – Example of a multiple-level (Class 1) test

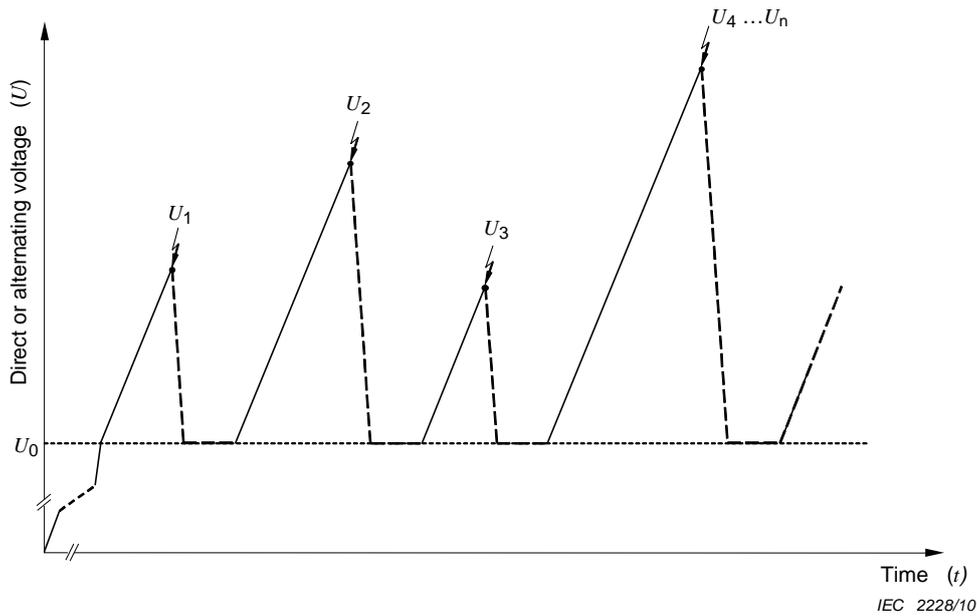


Figure A.3a – Continuous voltage increase

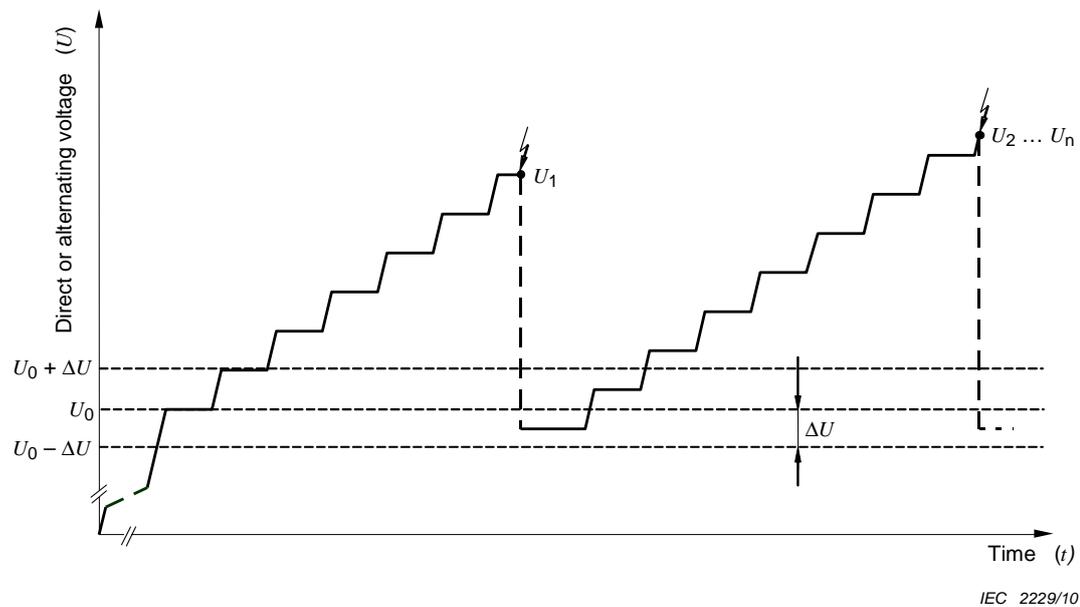


Figure A.3b – Stepwise voltage increase

Figure A.3 – Examples of progressive stress (Class 3) tests

A.3.1 Treatment of results from Class 1 tests

In this case, the discharge frequency $f_i = d_i/n_i$ at a voltage level U_i ($i=1,2,\dots,m$) is taken as an estimate of $p(U_i)$, the disruptive-discharge probability at the voltage level U_i . The m estimates of $p(U_i)$ obtained in a Class 1 test can then be fitted to an assumed probability distribution function $p(U)$ and its parameters U_{50} and $s = U_{50} - U_{16} = U_{84} - U_{50}$ are determined.

This has been traditionally done by plotting f_i versus U_i on special graph paper designed to give a straight line plot when the probability estimates conform to a particular probability distribution function $p(U)$. A well-known example is Gaussian or Normal probability paper that yields a straight-line plot for estimates conforming to the Gaussian distribution function:

$$p(U) = (1/s\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^U \exp[-(u-U_{50})^2/2s^2] du$$

NOTE 1 Normal probability papers do not have ordinate scales embracing the values $p = 0$ or $p = 1$. Accordingly, tests at voltage levels always causing discharges, i.e., $d_i = n_i$, or tests at levels causing no discharges, i.e., $d_i = 0$, cannot be plotted directly. A possible way of using these results is to combine them with values obtained for an adjacent voltage level and to plot them as the weighted mean voltage.

Currently, computer programs using analytical fitting techniques, involving the least-squares method or the maximum likelihood method (see [A4]), may be used to find U_{50} , s (as well as the parameters of other applied distribution functions) and the related confidence limits of these estimates. They contain adequate methods (such as conventional regression coefficients or confidence limits) to check if the assumed probability function fits the measured points with sufficient accuracy. For details consult the relevant literature [A1-A4].

As a general guide, the width of the confidence band tends to vary inversely with the square root of the number n_i of voltage applications at each level U_i and inversely with the number of test levels m . Note also as an example that if all values of f_i are not zero or unity, with 10 voltage applications ($n_i = 10$) at each of five levels ($m = 5$), the 95 % confidence limits would be:

For U_{50} :

$$U_{50}^* - 0,72s^* \leq U_{50} \leq U_{50}^* + 0,72s^*$$

and for s :

$$0,4 s^* \leq s \leq 2,0 s^*$$

where U_{50}^* and s^* are the estimates of U_{50} and s obtained by fitting the test results to an assumed discharge probability distribution function $p(U)$.

NOTE 2 The width of the confidence band tends to be smallest for estimates of U_p in the vicinity of $p = 0,5$ or 50 %.

A.3.2 Treatment of results from Class 2 tests

A Class 2 test provides an estimate of U_p , the voltage at which the disruptive-discharge probability is p . U_p^* , the estimate of U_p , is given by the following approximate formula (for a more accurate formula, see the technical literature):

$$U_p^* = \sum_{i=1}^l (k_i U_i) / m$$

where k_i is the number of groups of stresses each consisting of n voltage applications at the voltage level U_i and m the total number of useful groups. The appropriate value of n is given by the formulas below for a desired probability p . To avoid appreciable errors, the lowest voltage level taken into account should not differ from U_p^* by more than $2\Delta U$.

The withstand procedure described in A.1.2 provides an estimate of U_p for a disruptive-discharge probability p given by:

$$p = 1 - (0,5)^{l/n}$$

while the discharge procedure gives U_p for:

$$p = (0,5)^{1/n}$$

The values of p for which U_p can be estimated in up-and-down tests are limited by the requirement that n be an integer. Examples are given in Table A.1.

Table A.1– Discharge probabilities in up-and-down testing

$n =$	70	34	14	7	4	3	2	1	
$p =$	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,50	(withstand procedure)
$p =$	0,99	0,98	0,95	0,90	0,85	0,80	0,70	0,50	(discharge procedure)

Procedures for estimating s and its confidence limits are also available but are not recommended for general use.

A.3.3 Treatment of results from Class 3 tests

The result of a Class 3 test is usually a series of n voltages U_i from which parameters U_{50} and s of a disruptive-discharge probability function are to be determined. For a Gaussian (or Normal) distribution, estimates of the parameters U_{50} and s are given by

$$U_{50}^* = \sum U_i/n$$

$$s^* = \left[\sum (U_i - U_{50}^*)^2 / (n - 1) \right]^{1/2}$$

For other distributions, the maximum likelihood methods can be employed to estimate the relevant parameters (see Clause A.4). The same expressions and methods apply in cases where times to the occurrence of a disruptive discharge t_i are to be analyzed.

The confidence limits for Gaussian distributions (of U_{50}^* and s^*) may be found using the Student's t or Chi-squared distributions as described in the technical literature.

As an example, in the case of a Gaussian distribution, the 95 % confidence limits for the estimates of U_{50} and s obtained from a test with $n = 20$ are:

$$(U_{50}^* - 0,47s^*) \leq U_{50} \leq (U_{50}^* + 0,47s^*)$$

and

$$0,74s^* \leq s \leq 1,48s^*$$

A.4 Application of maximum likelihood methods

Maximum likelihood methods may be used for the evaluation of the results of all of the above classes of tests by any type of probability function. These methods permit estimation of the parameters and hence quantiles of the breakdown voltage U_p . Furthermore, it is possible to use all the results obtained and the confidence limits corresponding to any desired confidence level C can be found. In the following only the principle is explained. See the relevant literature [A1-A4] and available software.

For Class 1 and Class 2 tests the numbers of discharges, d_i and the numbers of withstands w_i found at each voltage level U_i are known. If the form of the disruptive-discharge probability

distribution function, e. g. of $p(U; U_{50}, s)$, is assumed, the probability of a discharge at the level U_i is $p(U_i; U_{50}, s)$ and the probability of a withstand is $(1 - p(U_i; U_{50}, s))$. The likelihood function L_i corresponding to d_i discharges and w_i withstands occurring at a voltage level U_i is then:

$$L_i = p(U_i; U_{50}, s)^{d_i} (1 - p(U_i; U_{50}, s))^{w_i}$$

As U_i , d_i and w_i are known, L_i is a function of the parameters (e. g. U_{50} and s) only.

The likelihood of a complete set of results embracing n values of U_i then becomes:

$$L = L_1 L_2 \dots L_i \dots L_n = L(U_{50}, s)$$

For Class 3 tests with stepwise increased voltage levels each voltage level U_i which appears in the results, corresponds to a disruptive discharge. In general, a voltage level U_i will appear m_i times where $m_i \geq 1$. The log-likelihood $\log L$ then becomes:

$$\log L = m_1 \log[f(U_1; U_{50}, s)] + m_2 \log[f(U_2; U_{50}, s)] + \dots + m_n \log[f(U_n; U_{50}, s)]$$

where f characterizes the probability density function in the vicinity of U_i ($i = 1, \dots, n$).

Methods for calculating L from extensive sets of results by considering groups of results lying in a number of voltage intervals can be found in the literature.

The best estimates of the parameters (e. g. U_{50} , s) are those values (U_{50}^* and s^*) that maximise L . This shall be made by numerical methods. Related software is available.

The maxima may be found by using a computer to make iterative calculations of L for assumed parameter values (U_{50}^* and s^*). With parameter estimates fixed, U_p corresponding to any desired value of disruptive-discharge probability, p , can be found from the assumed disruptive-discharge probability distribution function. Methods for determining the confidence limits of U_{50}^* and s^* are to be found in the literature. For the case of $C = 0,9$ the equation $L(U_{50}; s) = 0,1 L_{\max}$ permits determination of these confidence limits.

NOTE In addition to the analysis based on the Gaussian distribution (see A.3.1) the maximum likelihood method also delivers reliable results for other theoretical probability distribution functions, e.g. for the Weibull or the Gumbel distribution. For details see the relevant literature and available software.

A.5 Reference documents

- [A1] CARRARA, G., and HAUSCHILD, W. *Statistical evaluation of dielectric test results*. Electra No. 133 (1990), pp. 109-131.
- [A2] YAKOV, S. *Statistical analysis of dielectric test results*. CIGRE Brochure No. 66 (1991)
- [A3] HAUSCHILD, W., and MOSCH, W. *Statistical Techniques for HV Engineering*. IEE Power Series No. 13, Peter Peregrinus Ltd., London, 1992
- [A4] VARDEMAN, S. B. *Statistics for Engineering Problem Solving*. IEEE Press/PWS Publishing Company, Boston, 1994

Annex B (normative)

Procedures for calculation of parameters of standard lightning-impulse voltages with superimposed overshoot or oscillations

B.1 General remarks

This annex describes procedures for the calculation of parameters of all full lightning-impulse voltages, including those with superimposed overshoot. The basis is outlined in Clause B.2, the standard method on which parameter definitions are based is given in Clause B.3, and an alternative manual method is given in Clause B.4. Procedure for treatment of tail chopped impulses is given in Clause B.5.

Other methods are permitted provided the user estimates the uncertainty that the method contributes to the combined uncertainty and that the combined uncertainty is within the limits set in IEC 60060-2. The implementation of the method used shall meet the requirements of IEC 61083-2.

B.2 Basis of the procedures

The procedure is based on the empirical equation:

$$U_t = U_b + k(f)(U_e - U_b) \quad (\text{B.1})$$

which describes the test voltage, U_t , that the insulation is subjected to, under lightning-impulse voltage with an overshoot magnitude, β .

Where

U_b is the maximum value of the base curve;

U_e , is the maximum value of the original noise free recorded curve, and the test voltage function is a frequency dependent function given by:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2} \quad (\text{B.2})$$

where f is frequency in MHz.

B.3 Procedure for evaluation of parameters of full lightning impulses

This procedure is an implementation of Equation (B.1), and is used for computer aided calculation of digitally recorded impulses. The procedure is used to obtain the test voltage curve from which the impulse parameters are calculated.

The steps of the procedure are as follows:

- a) find the base level of the recorded curve by calculating the mean of the voltage values from the flat part in the beginning of the record where the input voltage is zero;
- b) remove the base level offset from the recorded curve, $U(t)$, to obtain the offset compensated recorded curve, $U_0(t)$, and use that curve for the remaining steps;
- c) find the extreme value, U_e , of the offset compensated recorded curve, $U_0(t)$ (Figure B.1);

- d) find the last sample on the front having a voltage value less than 0,2 times the extreme value, U_e ;
- e) find the last sample on the tail having a voltage value larger than 0,4 times the extreme value, U_e ;
- f) select data starting from the sample after the sample determined in step d), up to and including the sample determined in step e) for further analysis;

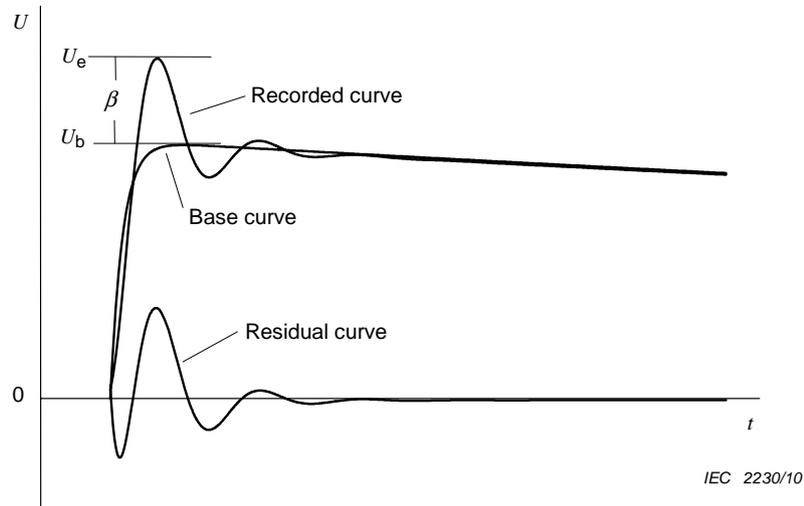


Figure B.1 – Recorded and base curve showing overshoot and residual curve

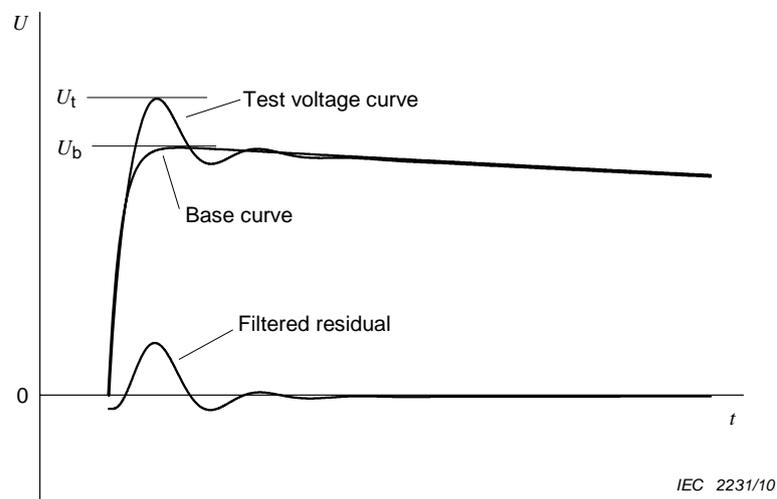


Figure B.2 – Test voltage curve (addition of base curve and filtered residual curve)

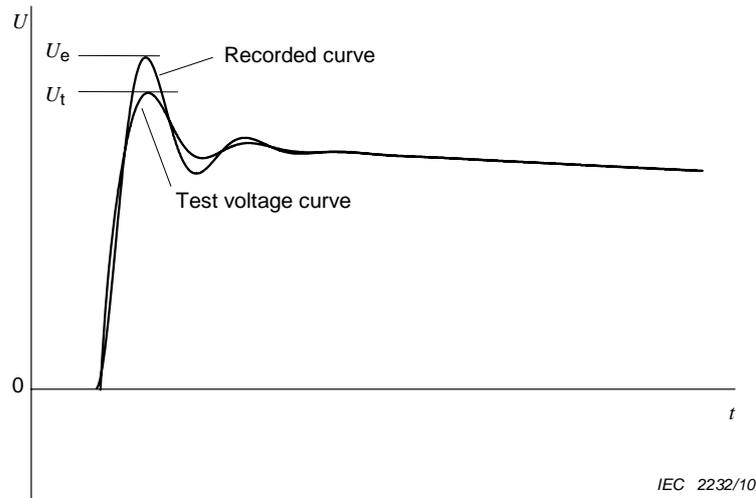


Figure B.3 – Recorded and test voltage curves

- g) fit the following function to the data selected in step f) (see Clause C.1):

$$u_d(t) = U \left(e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right)$$

Here t is time, $u_d(t)$ is the voltage function. U , τ_1 , τ_2 and t_d are the parameters to be found by fitting²;

- h) construct the base curve, $U_m(t)$, of the waveform, by using zero values for sample points up to time t_d (as calculated in step g) and values of $u_d(t)$ for sample points from time t_d up to the instant of the last sample defined in step e)) (see Figure B.1);
- i) subtract the base curve $U_m(t)$ from the offset compensated recorded curve, $U_0(t)$ to obtain the residual curve $R(t) = U_0(t) - U_m(t)$ (Figure B.2);
- j) create a digital filter (see Clause C.2) with its transfer function $H(f)$ equal to that defined by the test voltage function $k(f)$ (Equation B.2);
- k) apply the digital filter to the residual curve $R(t)$ to obtain the filtered residual curve $R_f(t)$ (see Figure B.2);
- l) add the filtered residual curve $R_f(t)$ to the base curve $U_m(t)$ to obtain the test voltage curve, $U_t(t)$;
- m) calculate the value of the test voltage, U_t , and time parameters from the test voltage curve (see Figure B.2);
- n) find the maximum value U_b of the base curve $U_m(t)$ (see Figure B.2);
- o) calculate the relative overshoot magnitude, $\beta' = 100 \cdot \frac{U_e - U_b}{U_e}$ %;
- p) display the offset compensated recorded curve, $U_0(t)$, and the test voltage curve $U_t(t)$ (see Figure B.3);
- q) determine and report the values of the test voltage, U_t , front time, T_1 , time to half value, T_2 , and relative overshoot magnitude, β' .

² U is the amplitude constant, τ_1 and τ_2 are the time constants the waveform and t_d is the time delay between the origin of the fitted curve and the triggering point of the recorded curve.

B.4 Procedure for manual calculation from graphical waveforms

This procedure is an implementation of Equation (B.1), and it is used for manual calculation of the impulse parameters from waveforms in graphical formats.

NOTE A manual evaluation will lead to less accurate results compared to the procedure for calculation from digital waveforms.

The steps of the procedure are as follows:

- a) draw a base curve, $U_m(t)$, manually through the recorded curve, $U(t)$, so as to remove oscillations on the front and peak;
- b) find the maximum value of $U_m(t)$, U_b ;
- c) find the maximum value U_e of the recorded curve, $U(t)$;
- d) calculate the duration, t , of the overshoot by finding the difference in time values at the two crossing points of $U(t)$ and $U_m(t)$ curves on both side of the maximum peak of $U(t)$, and calculate the overshoot frequency $f_0 = 1/2t$;
- e) calculate the value of test voltage function $k(f)$ from equation (B.2);
- f) calculate the value of the test voltage, U_t using equation (B.1);
- g) calculate the relative overshoot magnitude, $\beta' = 100 \frac{U_e - U_b}{U_e} \%$;
- h) determine the time parameters from the base curve using U_t as the peak voltage to determine the 30 %, 90 % and 50 % values;
- i) report the value of the test voltage, U_t , front time, T_1 , time to half value, T_2 , and relative overshoot magnitude, β' .

B.5 Procedure for evaluation of parameters of tail chopped lightning impulses

This procedure is an adaptation of the algorithm given in Clause B.3 for evaluation of full lightning impulses. This procedure can be used when the chopping happens after 95 % of the extreme value level.

For this adapted procedure two records are needed:

- 1) The tail chopped impulse to be evaluated.
- 2) A full reference impulse recorded (usually) on lower voltage without changing the setup.

The procedure is as follows:

Apply steps a) to c) to both the full reference impulse and the chopped impulse:

- a) find the base level of the recorded curve by calculating the mean of the voltage values from the flat part in the beginning of the record where the input voltage is zero;
- b) remove the base level offset from the recorded curve, $U(t)$, to obtain the offset compensated recorded curve, $U_0(t)$, and use that curve for the remaining steps;
- c) find the extreme value, U_e , of the offset compensated recorded curve, $U_0(t)$;

Apply steps d) to h) to the full reference impulse:

- d) find the last sample on front having a voltage value less than 0,2 times the extreme value, U_e ;
- e) find the last sample on the tail having a voltage value larger than 0,4 times the extreme value, U_e ;

- f) select data starting from the sample after the sample determined in step d), up to and including the sample determined in step e) for further analysis;
- g) fit the following function to the data selected in step f):

$$u_d(t) = U \left(e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right)$$

Here t is time, $u_d(t)$ is the voltage function, and U , τ_1 , τ_2 and t_d are the parameters to be found by fitting;

- h) construct the base curve, $U_m(t)$, of the waveform, by using zero values for sample points up to time t_d (as defined in step d) and values of $u_d(t)$ for sample points from time t_d up to the instant of the last sample defined in step e);

Apply steps 1) to 7) to the tail chopped impulse:

- 1) find the instant of chopping;
 - 2) find the point where the chopped waveform starts to deviate from the full reference waveform;
 - 3) select data up to and including that point for further analysis;
 - 4) find the time lag t_l between the records of full reference and chopped impulse (e.g. by using cross correlation techniques, or by matching the 30 %, 50 % and 80 % levels on the front);
 - 5) adjust the time lag between full and chopped impulses to zero;
 - 6) find the ratio E between the amplitudes of the chopped and full impulses (e.g. by dividing the peak values, or by dividing average values calculated over specified interval on both records);
 - 7) scale the amplitude of the base curve by this factor E .
- i) subtract the scaled base curve $U_m(t)$ from the offset compensated recorded curve, $U_0(t)$ to obtain the residual curve $R(t) = U_0(t) - U_m(t)$;
 - j) create a digital filter (see Annex C) with its transfer function $H(f)$ equal to that defined by the test voltage factor function $k(f)$ (Equation (B.2));
 - k) apply the digital filter to the residual curve $R(t)$ to obtain the filtered residual curve $R_f(t)$;
 - l) add the filtered residual curve $R_f(t)$ to the base curve $U_m(t)$ to obtain the test voltage curve, $U_t(t)$;
 - m) calculate the value of the test voltage, U_t , and time parameters from the test voltage curve;
 - n) find the maximum value U_b of the base curve $U_m(t)$;
 - o) calculate the relative overshoot magnitude, $\beta' = 100 \cdot \frac{U_e - U_b}{U_e} \%$;
 - p) display the recorded curve $U(t)$ and the test voltage curve $U_t(t)$.
 - q) report the value of the test voltage, U_t , front time, T_1 , time to chopping, T_C , and relative overshoot magnitude, β' .

Annex C (informative)

Guidance for implementing software for evaluation of lightning-impulse voltage parameters

C.1 Guidance for implementing base curve fitting

The function to be fitted to the recorded curve has four free parameters (U , τ_1 , τ_2 and t_d):

$$u_d(t) = U \left(e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right) \quad (\text{C.1})$$

The Levenberg-Marquardt algorithm and its derivatives have been successfully used for fitting this function on the recorded curve. The following are examples of software packages that have been used for this purpose:

Software package (tested version)	Function used for fitting
Matlab [®] , ³ and its Optimization toolbox (Version 7.0.4)	lqscurvefit
GNU Octave ⁴ (Version 3.2.0)	leasqr
LabVIEW [™] 5 (LabVIEW 8 Professional)	Nonlinear Curve Fit
LabWindows [™] /CVI ⁶ (Version 6.0)	NonLinearFit

Setting the initial guess for the free parameters shortens the computation time. Initial guess given for the fitting function could be for example:

U : The extreme value of the curve

τ_1 : 70 μ s

τ_2 : 0,4 μ s

³ MATLAB[®] is the trade name of a product supplied by The MathWorks, Inc.

⁴ GNU Octave is freely redistributable software under GNU General Public License by John W. Eaton et. al. <http://www.gnu.org/software/octave/>.

⁵ NI LabVIEW[™] is the trade name of a product supplied by National Instruments Corporation.

⁶ NI LabWindows[™]/CVI is the trade name of a product supplied by National Instruments Corporation.

The above information is given for the convenience of users of this standard and does not constitute an endorsement by IEC of the product named. Equivalent products may be used if they can be shown to lead to the same results.

t_d : True or virtual origin of the curve

Normalizing the data (i.e. scaling it so that both voltage and time scales span approximately from 0 to 1) has been found to improve the convergence of the algorithm. The fitted parameters then need to be scaled back to the original voltage and time scales.

The Newton-Raphson algorithm has been proven to produce results which are equal to those obtained by Levenberg-Marquardt algorithm.

C.2 An example of a digital filter for implementation of the test voltage function

For implementation of the test voltage function a digital filter with its amplitude-frequency response being equal to the test voltage function (equation B.2 in Annex B) has to be constructed. The example given here is an efficient and accurate implementation of a zero-phase Infinite Impulse Response (IIR) filter. Other filters, such as Finite Impulse Response (FIR) filters built by a frequency sampling method or window-based arbitrary response filter design algorithms and commercial software, can also be used.

A zero phase IIR filter designed by forward calculation is described in [C1]. In this approach the attenuation of the filter is only half of what is needed, but the data is passed through the filter twice, first forward and then in reverse order. This filtering gives an output that matches the test voltage function with negligible amplitude error and phase shift.

Only two filter coefficients are needed to implement the forward filter, the derived equations given in [C1] for constructing this filter are:

$$\begin{aligned}
 y(i) &= b_0x(i) + b_1x(i-1) + a_1y(i-1) \\
 b_0 = b_1 &= \frac{x}{1+x} \\
 a_1 &= \frac{1-x}{1+x} \\
 x &= \tan\left(\frac{\pi T_S}{\sqrt{a}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{C.2}$$

where a equals $2,2 \times 10^{-12}$ (the -3 dB point of the K-factor filter), T_S is the sampling interval used when recording the signal, $x(i)$ is the input sample array (voltage) to the filter and $y(i)$ the output sample array of the filter.

For example, for 10 ns sampling interval this gives the following coefficients:

$$a_1 = -0,9585113 \text{ and } b_0 = b_1 = 0,02074434$$

The filtering is then performed twice (once in forward and once in backward direction) using the IIR forward filter with the following difference equation:

$$y(i) = 0,02074434(x(i) + x(i-1)) + 0,9585113y(i-1) \tag{C.3}$$

In order to avoid numerical problems often typical for IIR filters, large enough number (in this case preferably ≥ 6) of significant digits has to be used for filter coefficients.

C.3 Reference documents

- [C1] LEWIN, Paul L., TRAN, Trung N., SWAFFIELD, David J., and HÄLLSTRÖM, Jari K. *Zero Phase Filtering for Lightning Impulse Evaluation: A K-factor Filter for the Revision of IEC60060-1 and -2*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, pages 3-12, January 2008.

Annex D (informative)

Background to the introduction of the test voltage factor for evaluation of impulses with overshoot

D.1 Previous version (IEC 60060-1:1989)

In the late 1980s, most laboratories used oscilloscopes to record impulses and the amount of time taken to read oscillograms and the limits on the resolution of oscillograms set practical restrictions for the requirements that could be set for testing laboratories. The previous version of this standard (IEC60060-1:1989) classified full lightning-impulse voltages into two classes: smooth full lightning-impulse voltages and full lightning-impulse voltages with damped oscillations. In practice, all impulses have some oscillations and the user had to make a subjective judgement as to when the oscillations were such that the impulse should be treated as a full lightning-impulse voltage with damped oscillations. Full lightning-impulse voltages with damped oscillations were analysed by “drawing a mean curve through the oscillations”: the user had to make a subjective judgement as to which was the correct smooth curve. A limit on “the single peak amplitude” of 5 % of the peak value (of the impulse) was set.

The analysis depended on the duration or the frequency of the overshoot: 19.2 states:

“With some test circuits, oscillations or an overshoot may occur at the peak of the impulse, if the frequency of such oscillations is not less than 0,5 MHz or the duration of overshoot not more than 1 μ s, a mean curve should be drawn and, for the purpose of measurement, the maximum amplitude of this curve is chosen as the peak value defining the value of the test voltage.”

This gave an abrupt transition but was accepted as a reasonable method for oscillograms when the overshoot was limited to 5 %. A graph of the transition is shown in Figure D.1.

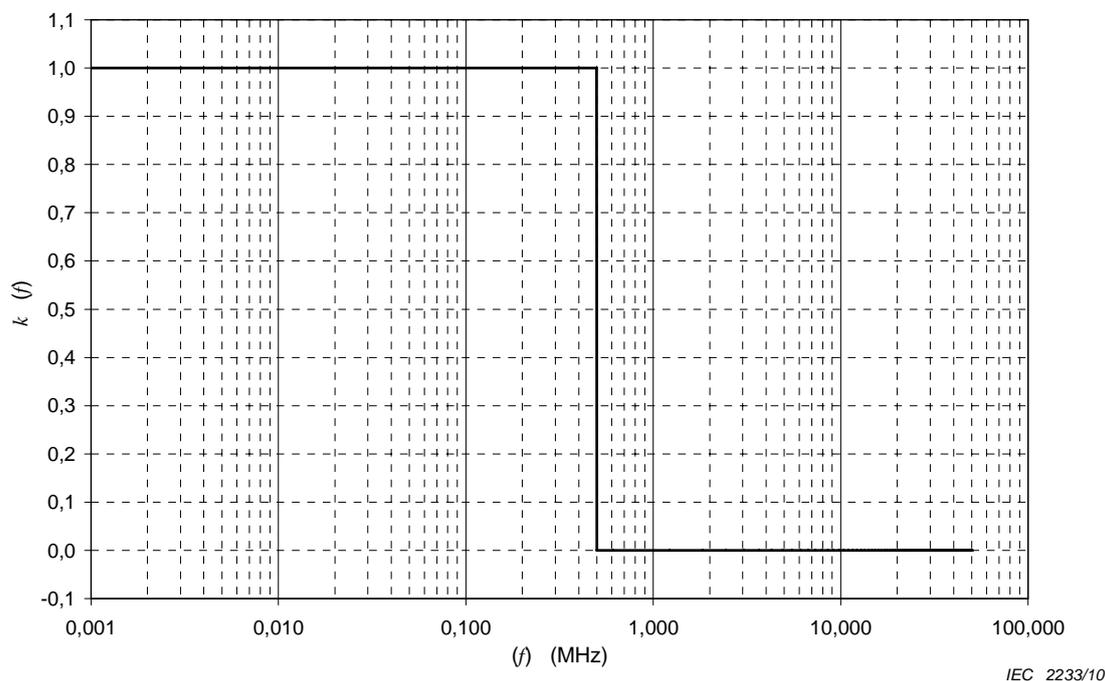


Figure D.1 – “Effective” test voltage function in IEC 60060-1:1989

This has caused three problems in the consistency of measurement:

- a) The sharp transition from “maximum value” to “mean curve maximum” leads to very large errors when the frequency of the overshoot is near the transition frequency of 500 kHz. This sharp transition does not describe the behaviour of insulating materials well. It is also difficult to accurately determine the frequency.
- b) The choice of the mean curve has been subjective. This contributes significant additional uncertainty in evaluating the parameters of full lightning-impulse voltages with damped oscillations.
- c) It is not precisely specified how to determine if an impulse is smooth or if it has very small superimposed oscillations.

In the last two decades the use of digitizers has become widespread. Digitizers used with software analysis are capable of delivering much higher precision than oscilloscopes but their application is hindered by the imprecise specifications of IEC60060-1:1989. Users have developed a variety of software programs and these programs can be tested by waveforms of the test data generator (TDG) in IEC 61083-2 but their use for testing is still limited by the imprecise definitions of IEC 60060-1: 1989. The differences between the values of parameters calculated by a particular software program and those given in IEC 61083-2 give an additional component for the estimation of uncertainty.

D.2 Research and development to provide a solution

CIGRE WG D 1.33 (formerly known as CIGRE WG 33.03) has fostered work over the last two decades to address these problems and IEC TC 42 MT4 has been working on them from its inception.

An investigation, funded by the European Community, was conducted by 5 research institutes in the period from 1997 to 1999, on the effect of oscillations of varying frequency and

amplitude superimposed on a full lightning-impulse voltage on the breakdown strength of 5 types of insulation [D1]. Breakdown voltage probability was determined for a smooth full lightning-impulse voltage whose shape was close to a sum of two exponential functions form. Breakdown voltage probability was also determined for the same impulse with superposed oscillations of varying frequency and amplitude and the voltage of the equivalent smooth full lightning-impulse voltage was found. The effect of a superimposed oscillation of frequency f is reduced by a factor $k(f)$ – that is, the peak value of the equivalent impulse is equal to the peak value of the applied smooth impulse plus $k(f)$ times the peak value of the oscillation. Experimentally determined values of $k(f)$ plotted against frequency are shown in Figure D.2.

Although the data for different types of insulation was quite scattered, the main conclusion was quite clear. The effect of the superimposed oscillation is frequency dependent. In other words, there is a gradual, not a sharp, transition in the frequency dependence of the overshoot magnitude on the dielectric strength.

The researchers introduced the “k-factor”, $k(f)$, to represent this gradual transition. In the standard, this is now called the test voltage function,

$$U_t = U_b + k(f)(U_e - U_b) \quad (\text{D.1})$$

where

U_t , is the test voltage value to be determined;

U_b is the maximum value of the fitted base curve;

U_e , is the maximum value of the original recorded curve.

The test voltage value (U_t) is the maximum value of the equivalent smooth full lightning-impulse voltage. The "test voltage curve" is used to calculate the time parameters as this method is precise, reproducible, and robust. The test voltage curve is a mathematical artefact and is not the physical representation of the equivalent smooth lightning impulse. The large tolerances on the time parameters are based on decades of experience and the evidence in the European experiment also supports the fact that values of the time parameters are not very critical for determining breakdown. Hence the new estimates of the time parameters are close enough to the values that would be determined by applying the old methods.

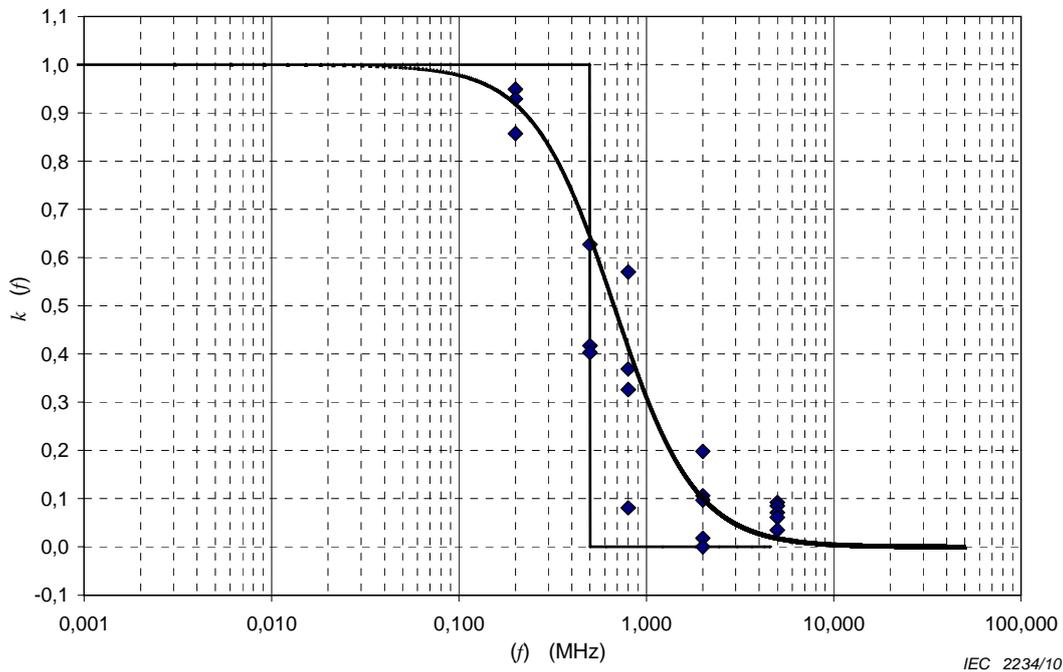


Figure D.2 – Representative experimental points from European experiments and test voltage function

There was much discussion on the most suitable formula for $k(f)$ within CIGRE. When it was found, by calculation, that the roll-on and roll-off frequencies did not have a large influence on the results and because they were in the extreme regions of the probable overshoot frequencies, a simple formula was proposed [D2] and was accepted for the standard. This formula is:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2} \quad (\text{D.2})$$

where f is the frequency in MHz. This is shown in Figure D.2.

Because the original data were obtained from oscillations superimposed on a full lightning-impulse voltage, the method of “residual filtering”, where the k -factor function is applied to the difference between the measured impulse and a fitted base curve, which is the sum of two exponential functions, has been used in the standard. It has been found that the choice of the two exponential functions gives good consistency for evaluation of the test voltage value but to obtain consistency in evaluations of the time parameters it has been necessary to specify the method for fitting of this function (see Annex B). Furthermore, it was found that it is convenient and mathematically valid to apply the $k(f)$ function as a digital filter. This enables accurate and automatic calculation of equation (D.1) without the need to determine the frequency (or frequencies) of the overshoot.

So now the three problems, mentioned in the beginning, have been solved:

- a) A gradual transition function has replaced the previous sharp one. It is also not necessary to determine the frequency of the overshoot.
- b) The difficulty in choosing the mean curve has been solved by the introduction of a well-defined base curve.

- c) All lightning-impulse voltages are treated in the same manner so it is no longer necessary to determine if an impulse is smooth.

In addition, since the definitions are more precise and based on the defined processing of digital records, digitizers may be used with much lower uncertainties of measurement (this has been demonstrated by calculations in several laboratories during the drafting of this part of IEC 60060).

Consideration has also been given to the consistency of the results from the new procedure when other forms of distortions are present. These distortions include:

- d) oscillation on the impulse front;
- e) oscillation superimposed on overshoot;
- f) oscillation on the tail;
- g) high frequency noise.

Using the test voltage curve leads to the following consequences:

- h) All high frequency noise will be removed. The oscillation on the impulse front will be removed. These are in line with the intention of the previous version of IEC 60060-1. However, other digital filters or curve fitting procedures are no longer required. Removal of these disturbances is now automatically achieved when the test voltage curve is calculated. As a consequence, the results of the impulse parameters are more consistent when these disturbances are present
- i) Any low frequency variation of the waveform will be preserved. That is, the overall shape of impulse, which may be significantly different from that of the base curve, will be preserved. The base curve in this method is only an intermediate curve which is used to extract the residual curve (the oscillation). Any low frequency component of the residual curve will be preserved, which leads to the preservation of the low frequency component in the test voltage curve. This is, in principle, in line with the previous second edition of IEC 60060-1. However, the procedure in this third edition gives much more consistent results.
- j) In the case of smooth impulses, only noise will be removed, the parameters of the impulse are accurately preserved.
- k) In general, the same procedure should be applied to all lightning impulses (excluding front chopped).

D.3 Limit on overshoot

It is desirable to identify the limit that will be equivalent to that used in the previous version of this standard (IEC60060-1: 1989). The subjective nature of the “mean curve” leads to high uncertainties and these are estimated as 2 %. The sum of two exponential functions curve will lie below the “smooth curve” by about 3 % on average. To include nearly all (97,5 %) of the impulses with damped oscillations that were allowed by the previous version of this standard the relative overshoot is set at 10 %. This will allow the same impulses as before but allow analysis that is more precise.

NOTE In some cases (e. g. for power transformers), the overshoot cannot determine the maximum stresses on insulation, and the increase in tolerance on relative overshoot magnitude to 10 % may lead to under-testing of the equipment. This should be taken into account by the relevant Technical Committee.

D.4 Impulses outside the limit

The European study [D1] used damped oscillations with amplitudes up to about 20 % so the effects on insulation are proven. However, for general testing it should not be necessary to exceed the 10 % limit. For special cases, it is left to the relevant Technical Committee to determine the best approach. The residual curve can be used as an indicator of distortion.

It should be noted that this method is based on studies of insulation (as was IEC 60060-1:1989) and it does not consider the effects of high rates of voltage rise on the field distribution in the apparatus.

This part of IEC 60060-1 includes the definition of some new parameters (such as the extreme value and average rate of rise) recommended by the CIGRE Task Force WG 33.03 (joint activity with CIGRE SC 12).

D.5 Reference documents

- [D1] GARNACHO, F., SIMON, P., GOCKENBACH, E., HACKEMACK, K., BERLIJN, S., and WERLE, P. *Evaluation of lightning-impulse voltages based on experimental results*. Electra No. 204, October 2002.

- [D2] HÄLLSTRÖM, JK. et al, *Applicability of different implementations of k-factor filtering schemes for the revision of IEC60060-1 and -2*. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005, paper B-32, p 92.

Annex E (informative)

The iterative calculation method in the converse procedure for the determination of atmospheric correction factor

E.1 Introductory remark

It has been found that the error in the calculated atmospheric correction factor K_t is significant if K_t is significantly lower than unity (e.g., $K_t=0,95$ or lower) if the iterative calculation procedure (4.3.3.2) is not used. A low K_t is in most cases due to low air pressure, which is typical at high altitude test locations. The errors caused by temperatures and humidity variations are negligible.

The examples given here show that the use of the procedure (4.3.3.2) is necessary when the atmospheric pressure is significantly lower than the standard level. The examples also show that the iterative calculation procedure is normally not needed for tests carried out close to sea level.

E.2 Change of atmospheric pressure with altitude

Air pressure decreases almost linearly from sea level to an altitude up to 10 000 m above sea level. The atmospheric pressure at a given altitude can be calculated according to the following formula:

$$p = 1013 \cdot e^{-\frac{H}{8150}}$$

where p is the atmospheric pressure in hPa, H the height from sea level in metres. A plot of the air pressure p against altitude H is shown in Figure E.1. Table E.1 lists the altitudes and the normal air pressure of three locations.

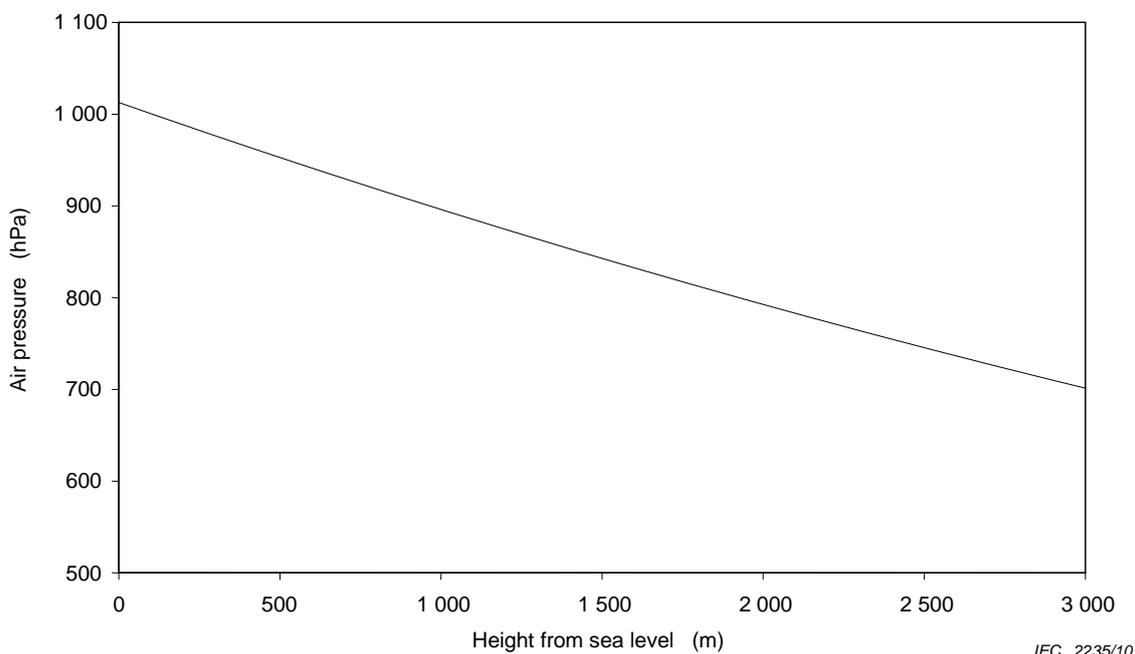


Figure E.1 – Atmospheric pressure as a function of altitude

Table E.1 – Altitudes and air pressure of some locations

Location	A	B	C
Altitude (m)	0	1 540	2 240
Air Pressure (hPa)	1 013,0	838,6	769,6

E.3 Sensitivity of K_t to U_{50}

The 50 % disruptive-discharge voltage U_{50} is an input to the calculation of the atmospheric correction factor K_t . For a 50 % disruptive-discharge test, U_{50} is the result of the test and may be used directly for the K_t calculation. Negligible error of K_t occurs due to the error of U_{50} .

However, if K_t is to be determined for correcting test voltage for a voltage withstand test, the value of U_{50} is unknown. Therefore, it is recommended in 4.3.4.3 to estimate U_{50} by multiplying the specified test voltage U_0 by 1,1, i.e.,

$$U_{50} = 1,1 U_0$$

and use the estimated U_{50} for calculation of K_t .

Using the estimated U_{50} may lead to error in calculated K_t and hence the corrected test voltage $U = K_t U_0$.

The K_t error depends on how sensitive K_t is to the change of U_{50} , i.e., the value of the sensitivity coefficient [E1, E2] $\partial K_t / \partial U_{50}$. Numerical calculation shows that the sensitivity coefficient of K_t with respect to U_{50} is very low in the range of the air pressures close to sea level, typically an error of 5 % in U_{50} will cause less than 0,1 % error in K_t . The sensitivity

coefficient increases significantly with a decrease of air pressure. At about 2 000 m above sea level, an error of 5 % in U_{50} will cause approximately 1 % error in K_t .

Table E.2 lists the initial K_t values calculated (no iterative calculation procedure applied) and its sensitivity coefficient with respect to U_{50} for a withstand test at the specified a.c. test voltage of 395 kV.

NOTE This is the a.c., r.m.s test voltage for phase-to-earth insulation of 300 kV disconnectors specified in IEC 62271-1 [E5].

Table E.2 – Initial K_t and its sensitivity coefficients with respect to U_{50} for the example of the standard phase-to-earth a.c. test voltage of 395 kV

Altitude (m)	Air pressure, p (hPa)	Air temperature, T (°C)	Relative humidity (% RH)	Discharge Length, L (m)	Initial K_t	$\partial K_t / \partial U_{50}$ (1/kV)
0	1 013,0	25,4	35	2,57	0,9904	$- 4,1 \times 10^{-5}$
1 540	838,6	20	35	2,57	0,9308	$- 2,7 \times 10^{-4}$
2 240	769,6	15	35	2,57	0,8849	$- 4,3 \times 10^{-4}$

E.4 Calculation with the iterative calculation procedure

In the iterative calculation procedure, the K_t is calculated by iteration until it converges to a constant value with the residual error limit set by considering the total uncertainty budget of the test voltage.

The parameter U_{50} is used for calculating K_t (4.3.2). Take the a.c. withstand test of the 300 kV disconnector at the altitude of 2 240 m as an example (other parameters are as given in Table E.2), the first K_t value $K_{t,0}$ and the first peak test voltage value $U_{t,0}$ are calculated from the initial estimation of 50 % disruptive voltage, $U_{50,0}$, as follows:

Peak value of the specified test voltage is:

$$U_{0p} = \sqrt{2}U_0 = \sqrt{2} \times 395 \text{ kV} = 558,61 \text{ kV}$$

Then,

$$U_{50,0} = 1,1U_{0p} = 1,1 \times 558,61 \text{ kV} = 614,48 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,0}}{500 L \delta k} = 0,6600$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9069$$

$$k_2 = k^w = 0,9757$$

$$K_{t,0} = k_1 k_2 = 0,8849$$

$$U_{t,0} = K_{t,0} \cdot U_{0p} = 0,8849 \times 558,61 \text{ kV} = 494,30 \text{ kV}$$

The calculation of $K_{t,i}$ and $U_{t,i}$ in the iteration step i uses U_{50} value obtained from the K_t value of the previous step $i-1$, $K_{t,i-1}$, i.e.,

$$U_{50,i} = 1,1 U_{t,i-1} = 1,1 K_{t,i-1} \cdot U_{0p}$$

The next iteration of the test voltage value $U_{t,i}$ is calculated as

$$U_{t,i} = K_{t,i} \cdot U_{0p}$$

Therefore to continue the above example, we have

$$U_{50,1} = 1,1 U_{t,0} = 1,1 K_{t,0} \cdot U_{0p} = 1,1 \times 0,8849 \times 558,61 \text{ kV} = 543,72 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,1}}{500 L \delta k} = 0,5840$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9303$$

$$k_2 = k^w = 0,9820$$

$$K_{t,1} = 0,9136$$

$$U_{t,1} = K_{t,1} \cdot U_{0p} = 0,9136 \times 558,61 \text{ kV} = 510,36 \text{ kV}$$

$$U_{50,2} = 1,1 \cdot U_{t,1} = 1,1 \times 510,36 \text{ kV} = 561,40 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,2}}{500 L \delta k} = 0,6030$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9247$$

$$k_2 = k^w = 0,9805$$

$$K_{t,2} = 0,9067$$

$$U_{t,2} = K_{t,2} U_{0p} = 0,9067 \times 537,40 \text{ kV} = 506,52 \text{ kV}$$

$$U_{50,3} = 1,1 \cdot U_{t,2} = 1,1 \times 506,52 \text{ kV} = 557,17 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,3}}{500 L \delta k} = 0,5985$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9261$$

$$k_2 = k^w = 0,9809$$

$$K_{t,3} = 0,9084$$

$$U_{t,3} = K_{t,3} U_{0p} = 0,9084 \times 558,61 \text{ kV} = 507,45 \text{ kV}$$

$$U_{50,4} = 1,1 \cdot U_{t,3} = 1,1 \times 507,45 \text{ kV} = 558,19 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,4}}{500 L \delta k} = 0,5996$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9258$$

$$k_2 = k^w = 0,9808$$

$$K_{t,4} = 0,9080$$

$$U_{t,4} = K_{t,4} U_{0p} = 0,9080 \times 558,61 \text{ kV} = 507,22 \text{ kV}$$

The difference between the test voltage peak values of the last two iterations is now

$$507,45 \text{ kV} - 507,22 \text{ kV} = 0,23 \text{ kV}$$

which is less than 0,1 % of the test voltage peak value of the last iteration. A convergence limit of 0,1 % may be considered reasonable and is easily achievable using automation of calculation.

The error in the first estimated K_t , ΔK_t (%), and the error in the first peak test voltage, ΔU_t (%), may be calculated as

$$\Delta K_t(\%) = 100 \times (0,8849 - 0,9080) / 0,8849 = - 2,61 \%$$

$$\Delta U_t(\%) = 100 \times (494,30 - 507,22) / 494,30 = - 2,61 \%$$

The final a.c. test voltage (r.m.s value) to be applied can be then calculated from the final converged a.c. peak test voltage value, which in this example is equal to

$$507,22 \text{ kV} / \sqrt{2} = 358,66 \text{ kV}$$

NOTE This is the test voltage to be applied at an altitude of 2 240 m for testing insulation to be used in the standard reference atmosphere (near sea level). This is not the test voltage to be applied at the standard reference atmosphere for testing the insulation to be used at the altitude of 2 240 m.

Table E.3 lists the initial and converged K_t values calculated with the iterative calculation procedure for the other altitudes with the same relative humidity and discharge length as shown in Table E.2. The errors which would result without using the iterative procedure are given in the last column. The results also show that the effect of temperature on the error is normally negligible.

Table E.3 – Initial and converged K_t values for the example of the standard phase-to-earth a.c. test voltage of 395 kV

Altitude (m)	Pressure (hPa)	Temperature (°C)	Initial K_t	Converge K_t	ΔK_t (%) or ΔU_t (%)
0	1013,0	25,4	0,9904	0,9907	– 0,03
0	1013,0	15	0,9871	0,9876	– 0,05
1540	838,6	20	0,9308	0,9404	– 1,03
1540	838,6	15	0,9272	0,9377	– 1,14
2240	769,6	20	0,8907	0,9120	– 2,39
2240	769,6	15	0,8849	0,9081	– 2,62

E.5 Comment

The error ΔK_t due to incorrect initial U_{50} input value becomes significant when the value K_t is lower than 0,95, which cannot be normally attributed to abnormal weather at sea level. A low K_t is primarily caused by testing at a high altitude location. The examples show that the error in the corrected test voltage level can be as high as 1,1 % even at an altitude of 1 500 m above sea level if the iterative calculation procedure is not used. This error increases to 2,6 % at a level of 2 240 m. At sea level, the error would normally be insignificant.

E.6 Reference documents

- [E1] ISO *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1995
- [E2] IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems, Annex A.*
- [E3] IEC 60060-3, *High-voltage test techniques – Part 3: Definitions and requirements for on-site testing.*
- [E4] IEC 60071-1: 2006, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules.*
- [E5] IEC 62271-1, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications*

Bibliography

- [1] FESER, K. *Dimensioning of electrodes in the UHV range - Illustrated with the example of toroid electrodes for voltage dividers*. ETZ-A 96 (1975), 4 pp, 206-210.
 - [2] HAUSCHILD, W. *Engineering the electrodes of HV test systems on the basis of the physics of discharges in air*. 9th ISH Graz (1995), Invited Lecture 9002.
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	78
1 Domaine d'application	80
2 Références normatives.....	80
3 Termes et définitions	80
3.1 Les définitions qui relate à caractéristiques relatives aux décharges	81
3.2 Les définitions qui relate à caractéristiques relatives à la tension d'essai	81
3.3 Les définitions qui relate à tolérance et incertitude	82
3.4 Les définitions qui relate à statistiques des valeurs des tensions de décharge disruptive	82
3.5 Les définitions qui relate à classification des isolations en des objets en essai	84
4 Exigences générales	84
4.1 Exigences générales pour les procédures d'essai.....	84
4.2 Disposition de l'objet en essai dans les essais à sec	84
4.3 Corrections atmosphériques dans les essais à sec.....	85
4.3.1 Atmosphère normalisée de référence	85
4.3.2 Facteurs de correction atmosphérique pour les entrefers.....	86
4.3.3 Application des facteurs de correction	86
4.3.4 Composantes du facteur de correction.....	87
4.3.5 Mesure des paramètres atmosphériques	90
4.3.6 Exigences contradictoires résultant des essais de l'isolation interne et externe	91
4.4 Essais sous pluie	91
4.4.1 Procédure d'essai sous pluie	91
4.4.2 Corrections atmosphériques pour les essais sous pluie	93
4.5 Essais de pollution artificielle	93
5 Essais en tension continue	93
5.1 Définitions concernant les essais en tension continue	93
5.2 Tension d'essai	93
5.2.1 Exigences relatives à la tension d'essai.....	93
5.2.2 Génération de la tension d'essai.....	94
5.2.3 Mesure de la tension d'essai	94
5.2.4 Mesure du courant d'essai.....	94
5.3 Procédures d'essai.....	95
5.3.1 Essais de tension de tenue.....	95
5.3.2 Essais de tension de décharge disruptive	95
5.3.3 Essais de tension de décharge disruptive assurée.....	95
6 Essais en tension alternative	96
6.1 Définitions concernant les essais en tension alternative	96
6.2 Tension d'essai	96
6.2.1 Exigences relatives à la tension d'essai.....	96
6.2.2 Génération de la tension d'essai.....	97
6.2.3 Mesure de la tension d'essai	98
6.2.4 Mesure du courant d'essai.....	99
6.3 Procédures d'essai.....	99
6.3.1 Essais de tension de tenue.....	99

6.3.2	Essais de tension de décharge disruptive	99
6.3.3	Essais de tension de décharge disruptive assurée.....	99
7	Essais en tension de choc de foudre	100
7.1	Définitions concernant les essais aux chocs de foudre	100
7.2	Tension d'essai	108
7.2.1	Tension de choc de foudre normalisée	108
7.2.2	Tolérances	108
7.2.3	Tension de choc de foudre coupée normalisée	108
7.2.4	Tensions de choc de foudre spéciales	108
7.2.5	Génération de la tension d'essai.....	108
7.2.6	Mesure de la tension d'essai et détermination de la forme du choc.....	108
7.2.7	Mesure du courant lors des essais avec des tensions de choc	109
7.3	Procédures d'essai.....	109
7.3.1	Essais de tension de tenue.....	109
7.3.2	Procédures d'essai de tension de décharge disruptive assurée	110
8	Essais avec tension de choc de manœuvre	111
8.1	Définitions concernant les essais de tension de choc de manœuvre.....	111
8.2	Tension d'essai	112
8.2.1	Tension de choc de manœuvre normalisée.....	112
8.2.2	Tolérances	112
8.2.3	Évaluation de la durée jusqu'à la crête	112
8.2.4	Tensions de choc de foudre spéciales	113
8.2.5	Génération de la tension d'essai.....	113
8.2.6	Mesure de la tension d'essai et détermination de la forme du choc.....	113
8.2.7	Mesure du courant lors des essais avec des tensions de choc	113
8.3	Procédures d'essai.....	113
9	Essais avec des tensions combinées et composites	114
9.1	Définitions concernant les essais sous tensions combinées et composites	114
9.2.4	Tolérances	116
9.2.5	Génération	116
9.2.6	Mesure	116
9.3	Tensions d'essai composites	117
9.3.1	Paramètres.....	117
9.3.2	Tolérances	117
9.3.3	Production.....	117
9.3.4	Mesure	117
9.4	Procédures d'essai.....	118
	Annexe A (informative) Traitement statistique des résultats d'essais	119
	Annexe B (normative) Procédures de calcul des paramètres des tensions de chocs de foudre normalisées avec superposition de dépassement ou d'oscillations.....	129
	Annexe C (informative) Directives pour la mise en œuvre d'un logiciel d'évaluation des paramètres de tension de choc de foudre	134
	Annexe D (informative) Arrière plan de l'introduction du facteur de tension d'essai pour l'évaluation des chocs avec dépassement.....	137
	Annexe E (informative) Méthode par calcul itératif dans la procédure réciproque pour la détermination du facteur de correction atmosphérique	143
	Bibliographie.....	149

Figure 1 – Distance minimale D recommandée entre les objets sous tension ou mis à la terre et l'électrode sous tension d'un objet en essai, pendant un essai en courant alternatif ou de surtension de manœuvre positive avec tension maximale U appliquée pendant l'essai.....	85
Figure 2 – k en fonction du rapport entre l'humidité absolue h et la densité relative de l'air δ (voir 4.3.4.2 pour les limites d'application).....	88
Figure 3 – Valeurs des exposants m et w	89
Figure 4 – Humidité absolue de l'air en fonction des indications du thermomètre à bulbes sec et humide.....	90
Figure 5 – Tension de choc de foudre plein.....	100
Figure 6 – Fonction de tension d'essai.....	102
Figure 7 – Paramètres de temps de la tension de choc pleine.....	103
Figure 8 – Intervalle temps–tension.....	104
Figure 9 – Intégrale de tension.....	104
Figure 10 – Tension de choc de foudre coupée sur le front.....	105
Figure 11 – Tension de choc de foudre coupée sur la queue.....	106
Figure 12 – Choc coupé ayant un front augmentant linéairement.....	106
Figure 13 – Courbe tension/temps pour des chocs ayant une forme présumée constante.....	107
Figure 14 – Tension de choc de commutation.....	111
Figure 15 – Circuit pour un essai sous tension combinée.....	114
Figure 16 – Exemple schématique de tension combinée et composite.....	115
Figure 17 – Circuit pour un essai sous tension composite.....	116
Figure 18 – Définition du retard de temps Δt	117
Figure A.1 – Exemple d'essai à paliers multiples (Classe 1).....	122
Figure A.2 – Exemples d'essais de diminution (Classe 2) et augmentation de haut en bas, pour la détermination des probabilités de décharges disruptives à 10 % et 90 % respectivement.....	123
Figure A.3 – Exemples d'essais de contraintes progressives (Classe 3).....	124
Figure B.1 – Courbe enregistrée et courbe de référence montrant le dépassement et la courbe résiduelle.....	130
Figure B.2 – Courbe de tension d'essai (somme de la courbe de référence et de la courbe résiduelle filtrée).....	130
Figure B.3 – Courbes enregistrée et de tension d'essai.....	131
Figure D.1 – Fonction tension d'essai « efficace » dans la CEI 60060:1989.....	138
Figure D.2 – Points expérimentaux représentatifs provenant de l'expérimentation européenne et fonction de tension d'essai.....	140
Figure E.1 – Pression atmosphérique en fonction de l'altitude.....	144
Tableau 1 – Valeurs des exposants, m pour la correction de la densité de l'air et w pour la correction de l'humidité, en fonction du paramètre g	89
Tableau 2 – Caractéristiques d'aspersion pour la procédure normalisée.....	92
Tableau A.1 – Probabilités de décharge dans les essais de montée et de descente.....	126
Tableau E.1 – Altitudes et pression atmosphérique à certains emplacements.....	144
Tableau E.2 – Valeur initiale K_t et ses coefficients de sensibilité par rapport à U_{50} pour l'exemple de la tension d'essai alternative normale de 395 kV entre phase et terre.....	145

Tableau E.3 – Valeurs initiales et après convergence K_t pour l'exemple de la tension normale d'essai en courant alternatif entre phase et terre de 395 kV 147

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TECHNIQUE DES ESSAIS À HAUTE TENSION –

Partie 1: Définitions et exigences générales

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60060-1 a été établie par le comité d'études 42 de la CEI: Techniques des essais à haute tension.

Cette troisième édition de CEI 60060-1 annule et remplace la seconde édition publiée en 1989 et constitue une révision technique.

Les changements techniques importants, par rapport à l'édition précédente, sont les suivants.

- a) L'arrangement général et les textes ont été améliorés et mis à jour pour faciliter l'utilisation de la norme.
- b) Les procédés de test de pollution artificielle ont été retirés car ils sont inclus dans la CEI 60507.

- c) La mesure de courant de choc a été transférée dans une nouvelle norme de mesure de courant (CEI 62475).
- d) Les facteurs de correction atmosphérique sont présentés sous forme de formules.
- e) Une nouvelle méthode a été introduite pour calculer les paramètres de temps des ondes de chocs de foudre. Ceci améliore la mesure des paramètres de temps des chocs de foudre qui comprennent des oscillations et des dépassements.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
42/277/FDIS	42/282/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60060, présentées sous le titre général *Technique des essais à haute tension*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous « <http://webstore.iec.ch> » dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera:

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

TECHNIQUE DES ESSAIS À HAUTE TENSION –

Partie 1: Définitions et exigences générales

1 Domaine d'application

Cette partie de CEI 60060 est applicable:

- aux essais diélectriques en tension continue;
- aux essais diélectriques en tension alternative;
- aux essais diélectriques en tension de choc;
- aux essais diélectriques combinant les essais ci-dessus.

Cette partie est applicable aux essais de matériels dont la tension la plus élevée U_m pour le matériel est supérieure à 1 kV.

NOTE 1 Des variantes aux procédures d'essais peuvent être exigées pour obtenir des résultats reproductibles et significatifs. Il convient que le choix d'une procédure d'essais appropriée soit effectué par le Comité d'études concerné.

NOTE 2 Pour les tensions U_m supérieures à 800 kV qui satisfont à certaines procédures spécifiées, les tolérances et les incertitudes peuvent ne pas être respectées.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour 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).

CEI 60060-2: *Techniques des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure*

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

CEI 60507:1991, *Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif*

CEI 61083-1, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 1: Prescriptions pour les appareils*

IEC 61083-2, *Enregistreurs numériques pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 2: Evaluation du logiciel utilisé pour obtenir les paramètres des formes d'onde de choc*

IEC 62475, *Techniques des essais à haute intensité: Définitions et exigences relatives aux courants d'essai et systèmes de mesure*

3 Termes et définitions

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

3.1 Définitions qui illustrent les caractéristiques des décharges

3.1.1

décharge disruptive

défaillance de l'isolation sous une contrainte électrique, pendant laquelle la décharge court-circuite complètement l'isolation en essai, réduisant la tension appliquée entre les électrodes à une valeur pratiquement nulle

NOTE 1 Des décharges disruptives non entretenues pendant lesquelles l'objet en essai est momentanément court-circuité par une étincelle ou un arc peuvent se produire. Pendant ces événements, la tension aux bornes de l'objet en essai est momentanément réduite à zéro ou à une très faible valeur. Selon les caractéristiques du circuit d'essai et de l'objet en essai, la rigidité diélectrique peut être rétablie et peut même permettre à la tension d'essai d'atteindre une valeur plus élevée. Il convient de considérer un tel événement comme une décharge disruptive sauf spécification contraire du Comité d'études concerné.

NOTE 2 Une décharge disruptive dans un diélectrique solide occasionne la perte définitive de la rigidité diélectrique; dans les diélectriques liquides ou gazeux, cette perte peut n'être que momentanée.

3.1.2

amorçage

décharge disruptive qui se produit dans un gaz ou un liquide

3.1.3

amorçage

décharge disruptive qui se produit à la surface d'un diélectrique dans un milieu gazeux ou liquide

3.1.4

perforation

décharge disruptive qui se produit à travers un diélectrique solide

3.1.5

valeur de la tension de décharge disruptive d'un objet en essai

valeur de la tension d'essai provoquant une décharge disruptive, comme spécifié, pour les différents essais, dans les articles correspondants de la présente norme

3.1.6

décharge non disruptive

décharge entre des électrodes ou des conducteurs intermédiaires sans réduction à zéro de la tension d'essai.

NOTE 1 Il convient de considérer un tel événement comme une décharge disruptive sauf spécification contraire du Comité d'études concerné.

NOTE 2 Certaines décharges non disruptives sont dénommées « décharges partielles » et sont traitées dans la CEI 60270.

3.2 Définitions qui illustrent les caractéristiques de la tension d'essai

3.2.1

caractéristiques présumées d'une tension d'essai

caractéristiques qui auraient été obtenues si aucune décharge disruptive ne s'était produite. Lorsqu'une caractéristique présumée est utilisée, cela doit toujours être mentionné.

3.2.2

caractéristiques réelles d'une tension d'essai

caractéristiques d'essai apparaissant pendant l'essai, aux bornes de l'objet en essai

3.2.3

valeur de la tension d'essai

définie dans les articles correspondants de cette norme

3.2.4

tension de tenue d'un objet en essai

tension présumée spécifiée qui caractérise l'isolation de l'objet par rapport à un essai de tenue

NOTE 1 Sauf spécification contraire, les tensions de tenue font référence aux conditions atmosphériques de référence normalisées (voir 4.3.1).

NOTE 2 Ceci s'applique seulement à l'isolation externe.

3.2.5

valeur assurée de la tension de décharge disruptive d'un objet en essai

tension présumée spécifiée qui caractérise ses performances par rapport à un essai de décharge disruptive

3.3 Définitions qui illustrent la tolérance et l'incertitude

3.3.1

tolérance

constitue la différence permise entre la valeur mesurée et la valeur spécifiée

NOTE 1 Il convient de distinguer cette différence de l'incertitude d'une mesure.

NOTE 2 Une décision d'acceptation ou de rejet est fondée sur la valeur mesurée, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

3.3.2

incertitude (d'une mesure)

paramètre associé à un résultat de mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande

[VEI 311-01-02]

NOTE 1 Dans la présente norme, toutes les valeurs d'incertitude sont précisées à un niveau de confiance de 95 %.

NOTE 2 L'incertitude est positive et elle est donnée sans signe.

NOTE 3 Il convient de ne pas la confondre avec la tolérance d'une valeur ou d'un paramètre spécifié d'essai.

3.4 Définitions qui illustrent les caractéristiques des valeurs des tensions de décharge disruptive

3.4.1

probabilité de décharge d'un objet en essai

p

probabilité qu'une application d'une tension d'amplitude présumée de forme donnée, conduite à une décharge disruptive sur l'objet en essai

NOTE Le paramètre *p* peut être exprimé sous forme de pourcentage ou de nombre fractionnaire.

3.4.2

probabilité de tenue d'un objet en essai

q

probabilité qu'une application d'une tension d'amplitude présumée de forme donnée, n'entraîne pas de décharge disruptive sur l'objet en essai

NOTE Si *p* est la probabilité de décharge disruptive, la probabilité de tenue *q* est $(1 - p)$.

3.4.3**tension p % de décharge disruptive d'un objet en essai** U_p

valeur de la tension présumée qui a une probabilité de p % de produire une décharge disruptive sur l'objet en essai

NOTE 1 Mathématiquement, la tension p % de décharge disruptive est le quantile de l'ordre p (ou p quantile) de la tension de claquage.

NOTE 2 U_{10} est appelée « tension de tenue statistique » et U_{90} est appelée « tension de décharge disruptive assurée statistique ».

3.4.4**tension à 50 % de décharge disruptive d'un objet en essai,** U_{50}

valeur de la tension présumée qui a une probabilité de 50 % de produire une décharge disruptive sur l'objet en essai

3.4.5**valeur arithmétique moyenne de la tension disruptive d'un objet en essai,** U_a

$$U_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i$$

où

U_i est la tension disruptive mesurée et

n est le nombre d'observations, (décharges).

NOTE Pour les distributions symétriques U_a est identique à U_{50} .

3.4.6**écart-type de la tension disruptive d'un objet en essai** s

mesure de la dispersion de la tension disruptive estimée par

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_a)^2}$$

où

U_i est la $i^{\text{ème}}$ tension disruptive mesurée et

U_a est la moyenne arithmétique des tensions disruptives (dans la plupart des cas elle est identique à U_{50}).

n est le nombre d'observations, (décharges).

NOTE 1 Il peut également être évalué par la différence entre les tensions de décharge disruptive à 50 % et à 16 % (ou entre les tensions de décharge disruptive à 84 % et à 50 %). Il est souvent exprimé en valeur par unité ou en pourcentage rapporté à la tension de décharge disruptive à 50 %.

NOTE 2 Pour les essais de décharge successifs, l'écart-type s est défini par la formule. Pour la méthode des paliers multiples et des essais de montée et descente, il est défini par la différence des quantiles. Les méthodes sont équivalentes, car entre $p = 16$ % et $p = 84$ % toutes les fonctions de distribution sont presque identiques.

3.5 Définitions qui illustrent la classification des isolations en des objets en essai

3.5.1

isolation externe

intervalles d'air et surfaces exposées des isolations solides d'un matériel qui sont soumis à la fois aux contraintes diélectriques et aux effets directs des conditions atmosphériques ou à d'autres agents externes

3.5.2

isolation interne

éléments internes solides, liquides ou gazeux de l'isolation d'un matériel, qui sont à l'abri des effets directs des conditions externes tels que la pollution, l'humidité et la faune

3.5.3

isolation autorégénératrice

isolation qui retrouve intégralement ses propriétés isolantes après une décharge disruptive produite par l'application d'une tension d'essai

[VEI 604-03-04, modifiée]

3.5.4

isolation non autorégénératrice

isolation qui perd ses propriétés isolantes, ou ne les retrouve pas intégralement après une décharge disruptive produite par l'application d'une tension d'essai

[VEI 604-03-05, modifiée]

NOTE Les appareils à haute tension comportent toujours une combinaison des isolations autorégénératrice et non autorégénératrice et certaines parties peuvent être dégradées par des applications de tensions successives ou permanentes. Il convient que le comportement de ces isolations soit considéré par le Comité d'études concerné lors de la spécification des procédures d'essais à appliquer.

4 Exigences générales

4.1 Exigences générales pour les procédures d'essai

Les procédures d'essai à appliquer pour des types particuliers d'objets en essai, par exemple, la tension d'essai, la polarité à appliquer, l'ordre préférentiel si les deux polarités sont à appliquer, le nombre d'applications et l'intervalle de temps entre chaque application, doivent être spécifiés par le Comité d'études concerné, en tenant compte des facteurs tels que:

- la précision exigée pour les résultats d'essais;
- la nature aléatoire du phénomène observé;
- toute influence de la polarité sur les caractéristiques mesurées et
- l'éventualité d'une détérioration progressive en cas d'applications répétées de la tension.

Au moment d'un essai, l'objet en essai doit être complet, avec tous ses accessoires essentiels, et il convient qu'il ait normalement subi le traitement normal pour un matériel similaire.

Au moment d'un essai, il convient d'acclimater autant que possible l'objet en essai, aux conditions atmosphériques ambiantes de la zone d'essai. Il convient d'enregistrer la période allouée pour atteindre l'équilibre.

4.2 Disposition de l'objet en essai dans les essais à sec

Les caractéristiques de décharge disruptive d'un objet en essai qui est isolé sur l'extérieur peuvent être affectées par la disposition d'ensemble de cet objet (par exemple effets de proximité tels que la distance dans l'air par rapport aux autres structures sous tension ou à la

terre, par sa hauteur au-dessus du sol et par la disposition de son conducteur haute tension). Il convient que la disposition générale soit spécifiée par le Comité d'études concerné.

NOTE 1 Une distance avec les structures externes voisines au moins égale à 1,5 fois la longueur du plus court chemin de décharge possible de l'objet en essai rend généralement ces effets de proximité négligeables. Lors des essais sous pluie ou sous pollution, ou lorsque la répartition de la tension le long de l'objet en essai et le champ électrique au voisinage de son électrode sous tension sont suffisamment indépendants des influences externes, de plus petites distances peuvent être acceptables à condition que des décharges ne se produisent pas vers des structures externes.

NOTE 2 Dans le cas d'essais en courant alternatif ou de surtensions de manœuvre positives d'une valeur supérieure à 750 kV (crête), l'influence d'une structure externe voisine peut être considérée comme négligeable si sa distance à l'électrode sous tension n'est pas non plus inférieure à la hauteur de cette électrode au-dessus du sol. Un guide pour les distances minimales recommandées est donné à la Figure 1, en fonction de la plus haute tension d'essai. Des distances significatives plus courtes peuvent convenir dans des certains cas. Toutefois, une adaptation expérimentale ou un calcul de champ, tenant compte d'une intensité de champ maximale en fonction de la tension, est recommandé, comme décrit dans les ouvrages de référence [1, 2]¹.

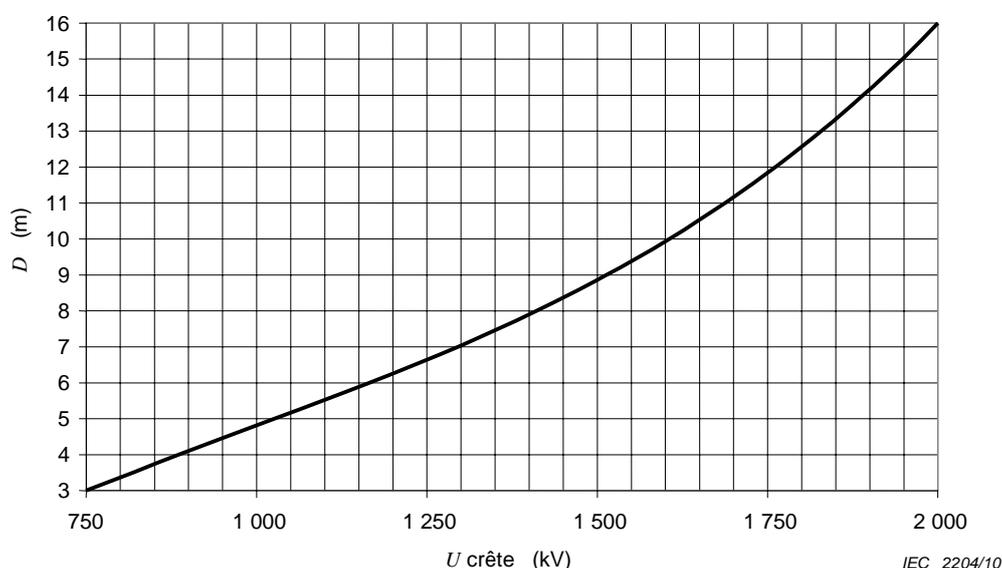


Figure 1 – Distance minimale D recommandée entre les objets sous tension ou mis à la terre et l'électrode sous tension d'un objet en essai, pendant un essai en courant alternatif ou de surtension de manœuvre positive avec tension maximale U appliquée pendant l'essai

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, il convient de réaliser l'essai dans les conditions atmosphériques ambiantes dans la zone d'essai sans précipitation ou pollution externe. La procédure d'application de tension doit être telle que définie dans les articles appropriés de la présente norme.

4.3 Corrections atmosphériques dans les essais à sec

4.3.1 Atmosphère normalisée de référence

L'atmosphère normalisée de référence correspond aux conditions suivantes:

- température $t_0 = 20 \text{ °C}$;
- pression absolue $p_0 = 1\,013 \text{ hPa}$ (1 013 mbar);
- humidité absolue $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

NOTE 1 Une pression absolue de 1 013 hPa correspond à une hauteur de 760 mm de la colonne de mercure d'un baromètre à mercure à 0 °C. Si la hauteur barométrique est H mm de mercure, la pression atmosphérique en hectopascals est approximativement:

$$P = 1,333 H \text{ hPa}$$

La correction de la hauteur de la colonne de mercure en fonction de la température est considérée comme négligeable.

NOTE 2 Les appareils corrigeant automatiquement la pression au niveau de la mer ne sont pas adaptés et il convient de ne pas les utiliser.

4.3.2 Facteurs de correction atmosphérique pour les entrefers

La décharge disruptive d'une isolation externe dépend des conditions atmosphériques. Habituellement, la tension de décharge disruptive d'un chemin donné dans l'air augmente avec l'augmentation soit de la densité de l'air, soit de l'humidité. Cependant, lorsque l'humidité relative dépasse 80 % environ, la tension de décharge disruptive devient irrégulière, en particulier lorsque la décharge disruptive se produit sur une surface isolante.

NOTE Les corrections atmosphériques ne s'appliquent pas seulement à l'amorçage.

La tension de décharge disruptive est proportionnelle au facteur de correction atmosphérique K_t , qui résulte de la multiplication de deux facteurs de correction:

- le facteur de correction de densité de l'air k_1 (voir 4.3.4.1);
- le facteur de correction de l'humidité k_2 (voir 4.3.4.2).

$$K_t = k_1 k_2$$

4.3.3 Application des facteurs de correction

4.3.3.1 Procédure normalisée

En appliquant les facteurs de correction, une tension de décharge disruptive mesurée dans des conditions d'essai données (température t , pression p , humidité h), peut être ramenée à la valeur qui aurait été obtenue dans les conditions atmosphériques de référence normalisées (t_0 , p_0 , h_0).

Les tensions de décharge disruptive, U , mesurées dans les conditions d'essai données sont ramenées à U_0 , correspondant aux conditions atmosphériques de référence normalisées, en divisant par K_t :

$$U_0 = U / K_t$$

Le rapport d'essai doit toujours mentionner les conditions atmosphériques réelles au cours de l'essai, et les facteurs de corrections appliqués.

4.3.3.2 Procédure réciproque

Réciproquement, si une tension d'essai est spécifiée pour les conditions de référence normalisées, elle doit être ramenée à la valeur équivalente dans les conditions régnant au cours de l'essai et ceci peut nécessiter une procédure itérative.

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, la tension U à appliquer pendant un essai sur une isolation externe est calculée en multipliant la tension d'essai spécifiée U_0 , par K_t :

$$U = U_0 K_t$$

Toutefois, puisque U entre dans le calcul de K_t , une procédure itérative peut devoir être utilisée (voir Annexe E).

NOTE 1 L'essai pour le choix adéquat de U pour le calcul de K_t consiste à diviser U par K_t . Si le résultat est la tension d'essai spécifiée, U_0 , alors un choix adéquat de U a été effectué. Si U_0 est trop élevée, U doit être réduite, mais si U_0 est trop faible, elle doit être augmentée.

NOTE 2 Lorsque K_t est proche de l'unité, le calcul itératif n'est pas nécessaire.

NOTE 3 En corrigeant la tension à fréquence industrielle, la valeur de crête doit être utilisée, car le comportement de décharge est basé sur la valeur de crête.

4.3.4 Composantes du facteur de correction

4.3.4.1 Facteur de correction de la densité de l'air, k_1

Le facteur de correction de la densité de l'air k_1 dépend de la densité relative de l'air δ , et peut en général être exprimé par:

$$k_1 = \delta^m$$

où m est un exposant donné en 4.2.4.3.

Si les températures t et t_0 sont exprimées en degrés Celsius et les pressions atmosphériques p et p_0 dans la même unité, la densité relative de l'air est:

$$\delta = \frac{P}{P_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

La correction est considérée fiable pour $0,8 < k_1 < 1,05$.

4.3.4.2 Facteur de correction de l'humidité, k_2

Le facteur de correction de l'humidité peut être exprimé par:

$$k_2 = k^w$$

où w est un exposant donné en 4.2.4.3 et k est un paramètre qui dépend du type de la tension d'essai et qui peut être obtenu en fonction du rapport entre l'humidité absolue, h , et la densité relative, δ , en utilisant les équations suivantes (Figure 2):CC

$$k = 1 + 0,014(h/\delta - 11) - 0,00022(h/\delta - 11)^2 \quad \text{pour } 1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3$$

CA	$k = 1 + 0,012(h/\delta - 11)$	pour $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3$
----	--------------------------------	--

de choc	$k = 1 + 0,010(h/\delta - 11)$	pour $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 20 \text{ g/m}^3$
---------	--------------------------------	--

NOTE L'équation du choc est basée sur les résultats expérimentaux pour des formes d'onde de chocs de foudre positives. Cette équation s'applique également aux tensions de choc de foudre négatives ainsi qu'aux surtensions de manœuvres.

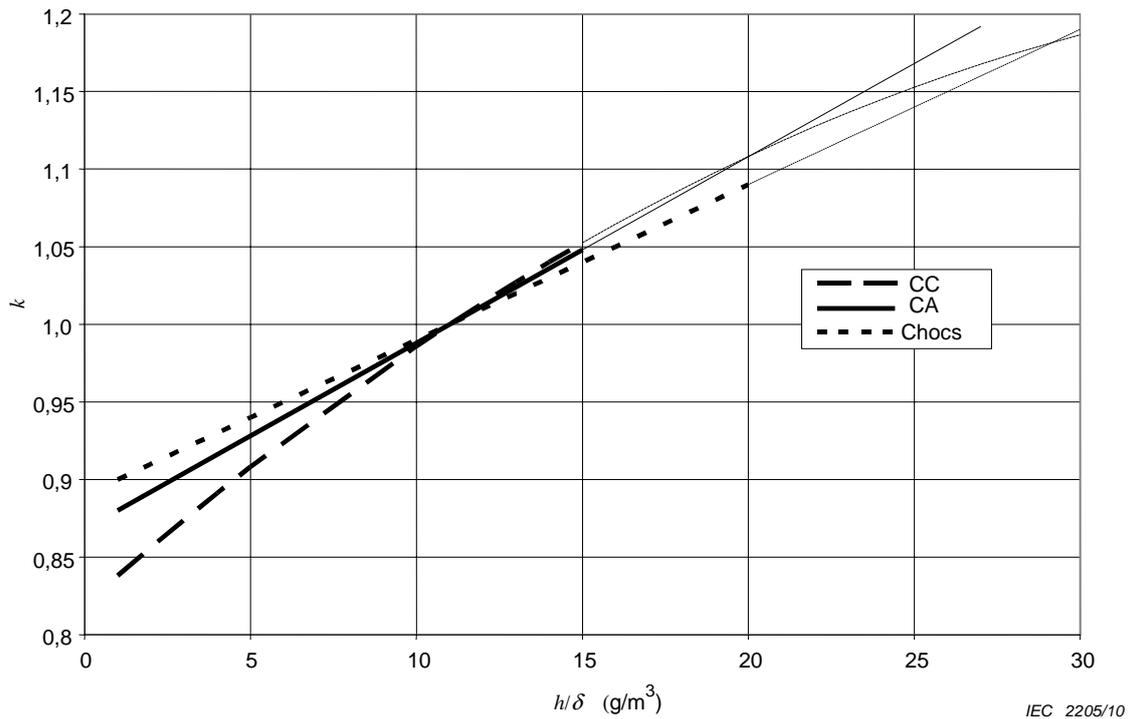


Figure 2 – k en fonction du rapport entre l'humidité absolue h et la densité relative de l'air δ (voir 4.3.4.2 pour les limites d'application)

Si U_m est inférieure à 72,5 kV (soit environ une longueur de l'entrefer $l < 0,5$ m) aucune correction d'humidité ne peut actuellement être spécifiée.

NOTE Pour des appareils spécifiques, le Comité d'études concerné a précisé d'autres procédures. (Par exemple CEI 62271-1).

4.3.4.3 Exposants m et w

On peut tenir compte du fait que les facteurs de correction dépendent du type de prédécharges en considérant le paramètre:

$$g = \frac{U_{50}}{500 L \delta k}$$

où

U_{50} est la tension de décharge disruptive à 50 % (mesurée ou estimée) dans les conditions atmosphériques réelles, en kilovolts crête.

L est le trajet de décharge minimum en m,

δ est la densité relative de l'air, et

k est le paramètre sans dimension défini en 4.3.4.2.

Dans le cas d'un essai de tenue où une estimation de la tension à 50 % de décharge disruptive n'est pas disponible, U_{50} peut être supposée égale à 1,1 fois la tension d'essai, U_0 .

Les exposants m et w sont obtenus à partir du Tableau 1 pour les gammes spécifiées de g (Figure 3).

Tableau 1 – Valeurs des exposants, m pour la correction de la densité de l'air et w pour la correction de l'humidité, en fonction du paramètre g

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 à 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 à 1,2	1,0	1,0
1,2 à 2,0	1,0	$(2,2-g)(2-g)/0,8$
>2,0	1,0	0

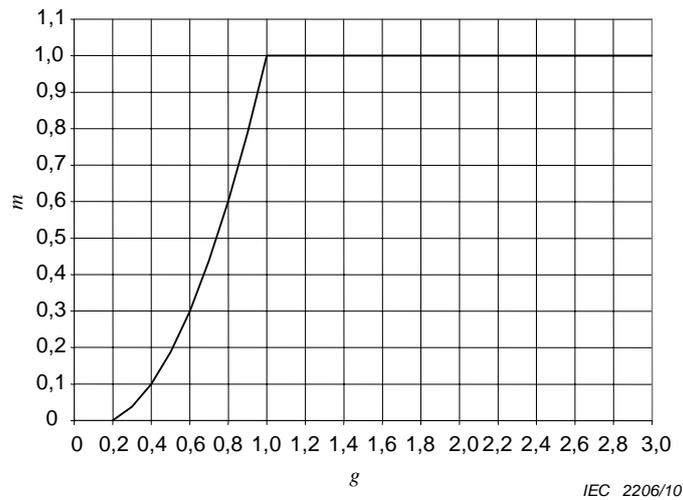


Figure 3a – Valeurs de l'exposant, m pour la correction de la densité de l'air en fonction du paramètre g

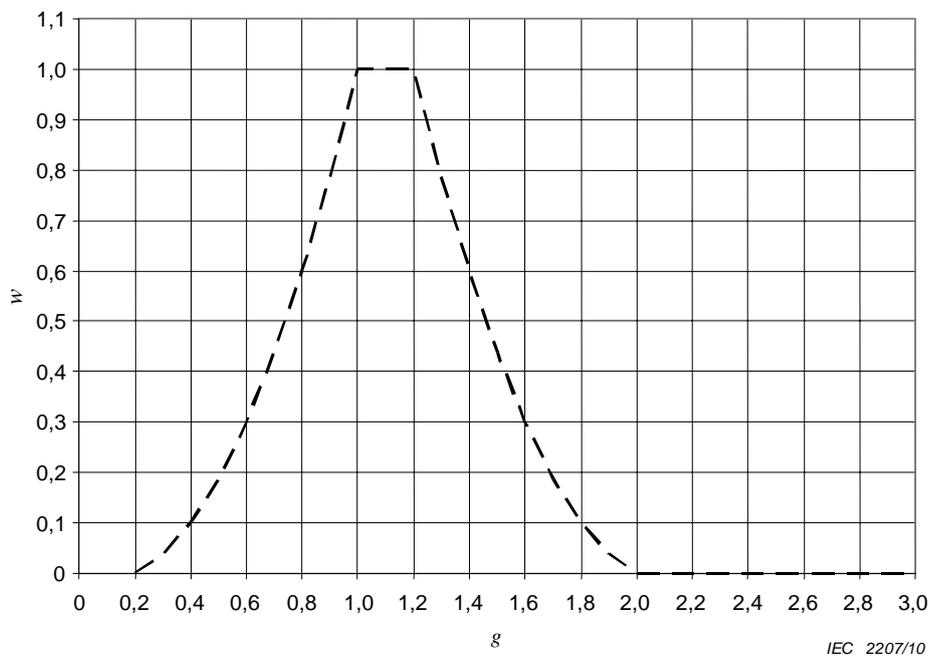


Figure 3b – Valeurs de l'exposant w pour la correction de l'humidité en fonction du paramètre g

Figure 3 – Valeurs des exposants m et w

4.3.5 Mesure des paramètres atmosphériques

4.3.5.1 Humidité

Il convient de préférence de déterminer l'humidité avec un appareil mesurant directement l'humidité absolue, avec une incertitude étendue inférieure ou égale à 1 g/m³.

La mesure de l'humidité relative et de la température ambiante, peut également être utilisée pour déterminer l'humidité absolue, en utilisant la formule ci-dessous à condition que la précision sur cette détermination de l'humidité absolue soit la même que celle qui est exigée ci-dessus.

$$h = \frac{6,11 \times R \times e^{\frac{17,6 \times t}{243+t}}}{0,4615 \times (273 + t)}$$

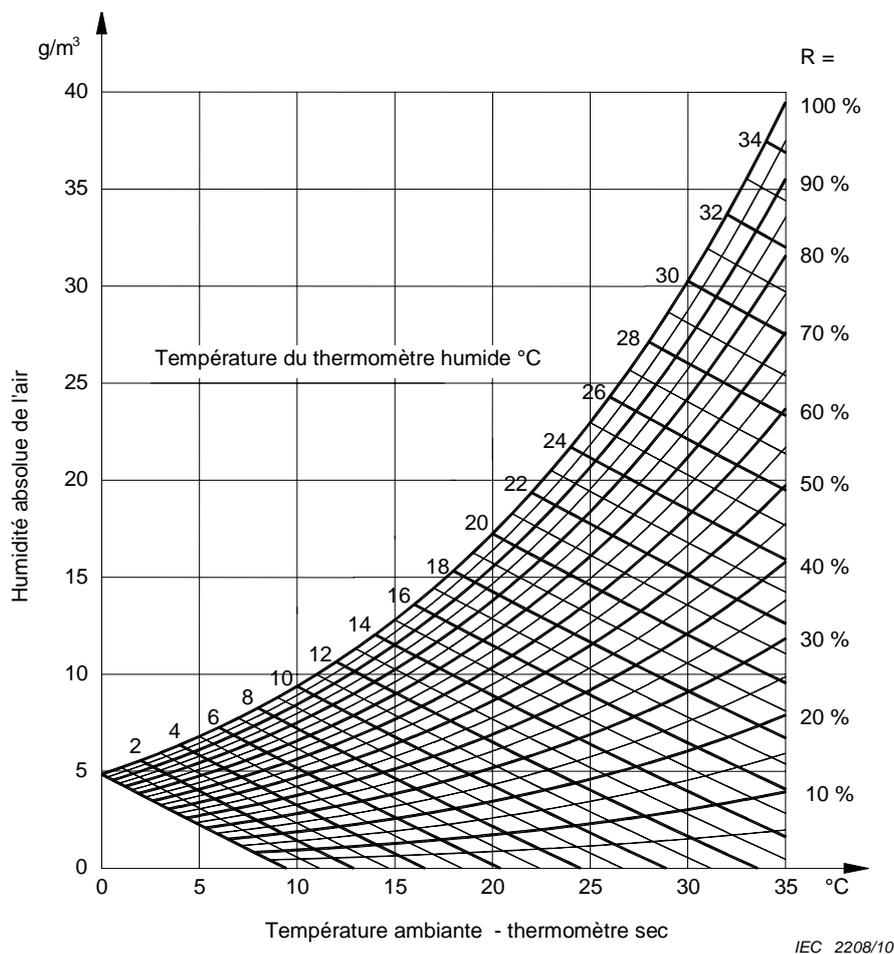
où

h est l'humidité absolue en g/m³,

R est l'humidité relative en pourcentage et

t est la température en °C.

NOTE Cette mesure peut également être effectuée au moyen d'un hygromètre à bulbes sec et humide ventilés. L'humidité absolue en, fonction de la lecture des thermomètres, est déterminée d'après la Figure 4, qui permet également de déterminer l'humidité relative. Il est important d'assurer un débit d'air suffisant pour atteindre un régime permanent et de lire soigneusement les thermomètres afin d'éviter des erreurs excessives dans la détermination de l'humidité.



IEC 2208/10

Figure 4 – Humidité absolue de l'air en fonction des indications du thermomètre à bulbes sec et humide

4.3.5.2 Température

Il convient de mesurer la température ambiante avec une incertitude étendue de 1 °C.

4.3.5.3 Pression absolue

Il convient de mesurer la pression absolue ambiante avec une incertitude étendue de 2 hPa.

4.3.6 Exigences contradictoires résultant des essais de l'isolation interne et externe

Les niveaux de tension de tenue étant spécifiés pour des conditions atmosphériques de référence normalisées, il peut arriver que l'application des corrections atmosphériques (en raison des conditions atmosphériques qui diffèrent des conditions de référence) conduise à un niveau de tension de tenue pour l'isolation interne très supérieur à celui de l'isolation externe associée. Si tel est le cas, on doit faire en sorte d'accroître le niveau de tenue de l'isolation externe pour permettre l'application de la tension d'essai appropriée à l'isolation interne. Il convient que ces mesures soient spécifiées par le Comité d'études concerné selon les exigences propres aux différentes classes d'appareils et elles pourraient inclure l'immersion de l'isolation externe dans des liquides ou des gaz sous pression.

Si la tension d'essai de l'isolation externe est supérieure à celle de l'isolation interne, l'isolation externe ne peut être correctement soumise aux essais que lorsque l'isolation interne a une conception particulière avec une résistance accrue. Dans le cas contraire, il convient de soumettre l'isolation interne aux essais à la valeur assignée et l'isolation externe au moyen de dispositifs d'essai, sauf indication contraire du Comité d'études concerné, auquel cas il doit spécifier la procédure d'essai à utiliser.

4.4 Essais sous pluie

4.4.1 Procédure d'essai sous pluie

La procédure d'essai sous pluie a pour but de simuler les effets de la pluie naturelle sur l'isolation externe. Cette méthode est recommandée pour les essais avec tous les types de tensions d'essai et tous les types d'appareils.

Il convient que le Comité d'études concerné spécifie la disposition de l'objet en essai pendant l'essai.

L'objet en essai doit être aspergé avec une eau de résistivité et de température prescrites (voir Tableau 2), qui doit tomber sous forme de gouttelettes (en évitant le brouillard et la bruine) dirigées de telle façon que les composantes verticale et horizontale de l'intensité de la pulvérisation soient approximativement égales. Ces intensités sont mesurées à l'aide d'un récipient de collecte divisé ayant des ouvertures de 100 cm² à 750 cm², l'une horizontale et l'autre verticale, cette dernière faisant face à l'aspersion.

La position de l'objet en essai par rapport aux composantes verticale et horizontale doit être spécifiée par le Comité d'études concerné.

En général, la reproductibilité des résultats d'essais sous pluie est inférieure à celle des autres essais d'amorçage ou de tenue à haute tension. Pour réduire la dispersion, les précautions suivantes doivent être prises:

- Le récipient doit être placé près de l'objet en essai mais en évitant qu'il reçoive des éclaboussures venant de l'objet. Pendant la période de mesure, il convient de déplacer lentement le récipient sur une surface assez large pour lisser l'effet des précipitations non uniformes des gicleurs individuels. La zone de mesure doit avoir une largeur égale à celle de l'objet en essai et une hauteur maximale de 1 m.

- Pour les objets de hauteur comprise entre 1 m et 3 m, les mesures individuelles doivent être réalisées en haut, au milieu et en bas de l'objet en essai. Chaque zone de mesure doit couvrir un tiers de la hauteur de l'objet en essai.
- Pour les objets dépassant 3 m de hauteur, le nombre de zones de mesure doit être augmenté pour couvrir toute la hauteur de l'objet en essai sans recouvrement.
- Les procédures définies ci-dessus doivent être convenablement adaptées aux objets en essai de grandes dimensions horizontales.
- La dispersion des résultats peut être réduite en nettoyant l'objet en essai avec un détergent tensioactif que l'on doit enlever avant le début de la pluie.
- Des taux d'aspersion localement anormaux (élevés ou faibles) peuvent également affecter la dispersion des résultats. Il est recommandé de les détecter par des mesures localisées et d'améliorer l'uniformité de l'aspersion si nécessaire.

Le dispositif d'aspersion doit être réglé pour produire sur l'objet en essai les caractéristiques d'aspersion données dans le Tableau 2, dans les limites des tolérances spécifiées.

On peut utiliser divers types et diverses dispositions de gicleurs répondant aux exigences du Tableau 2.

Tableau 2 – Caractéristiques d'aspersion pour la procédure normalisée

Condition d'aspersion	Unité	Portée
Taux d'aspersion moyen de toutes les mesures:		
– composante verticale	[mm/min]	1,0 à 2,0
– composante horizontale	[mm/min]	1,0 à 2,0
Limites pour toute mesure individuelle et pour chaque composante	[mm/min]	± 0,5 par rapport à la moyenne
Température de l'eau	[°C]	Température ambiante ± 15
Conductivité de l'eau	[µS/cm]	100 ± 15

La température et la résistivité de l'eau doivent être mesurées sur un échantillon prélevé juste avant que l'eau n'atteigne l'objet en essai. On peut également réaliser ces mesures à d'autres emplacements (au niveau de la cuve de stockage par exemple) à condition qu'une vérification atteste qu'aucune modification significative n'est apparue jusqu'à l'instant où l'eau atteint l'objet en essai.

En premier lieu, l'objet en essai doit être préaspérgé pendant au moins 15 min dans les conditions spécifiées ci-dessus et ces conditions doivent être maintenues dans les limites des tolérances spécifiées pendant tout l'essai qu'il convient de mener sans interrompre l'aspersion. Le temps de préaspersion ne doit pas inclure le temps nécessaire aux réglages. On peut également effectuer une première préaspersion avec de l'eau ordinaire pendant 15 min, suivie sans interruption par une seconde préaspersion d'une durée minimale de 2 min avant le début de l'essai, avec de l'eau satisfaisant pleinement aux conditions d'aspersion, ce qu'il convient de vérifier immédiatement avant le début de l'essai.

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, les procédures des essais sous pluie doivent être identiques à celles spécifiées pour les essais à sec correspondants. Sauf spécification contraire, la durée d'un essai sous tension alternative doit être de 60 s. En général, pour tous les essais de tenue sous pluie sous tension alternative et continue, il convient d'autoriser un amorçage à condition que, lors de la reprise de l'essai aucun autre amorçage ne se produise.

NOTE Pour les appareils à courant alternatif de grandes dimensions, tels que ceux qui ont une tension maximale assignée, U_m , supérieure à 800 kV, aucune méthode d'essai sous pluie n'est disponible actuellement.

4.4.2 Corrections atmosphériques pour les essais sous pluie

Un facteur de correction de la densité doit être appliqué comme stipulé en 4.3, mais aucun facteur de correction de l'humidité ne doit être appliqué pour les essais sous pluie.

4.5 Essais de pollution artificielle

Les essais de pollution artificielle sont destinés à fournir des informations sur le comportement de l'isolation externe dans des conditions représentatives de la pollution en service, bien qu'ils ne simulent pas nécessairement toutes les conditions de service particulières. Ces essais sont décrits dans la CEI 60507.

5 Essais en tension continue

5.1 Définitions concernant les essais en tension continue

5.1.1

valeur de la tension d'essai
valeur arithmétique moyenne

5.1.2

ondulation

écart périodique par rapport à la valeur arithmétique moyenne de la tension d'essai

5.1.3

amplitude d'ondulation

moitié de la différence entre les valeurs maximales et minimales

NOTE Si la forme de l'ondulation est proche d'une sinusoïde, les vraies valeurs efficaces multipliées par $\sqrt{2}$ sont acceptables pour la détermination de l'amplitude de l'ondulation.

5.1.4

facteur d'ondulation

rapport entre l'amplitude de l'ondulation et la valeur de la tension d'essai

5.1.5

chute de tension

réduction instantanée de la tension d'essai sur une courte durée pouvant aller jusqu'à quelques secondes

NOTE La chute de tension peut être provoquée par des décharges non disruptives.

5.2 Tension d'essai

5.2.1 Exigences relatives à la tension d'essai

5.2.1.1 Forme de la tension

Il convient que la tension d'essai appliquée à l'objet en essai, soit une tension continue ayant un facteur d'ondulation inférieur ou égal à 3 %, sauf spécification contraire du Comité d'études concerné.

NOTE L'augmentation de l'amplitude d'ondulation est directement liée à l'augmentation des courants de charge résistifs. Lorsque des flux importants existent, les essais diélectriques peuvent provoquer des ondulations et/ou une chute de tensions excessives. De par leur nature, les essais sous pluie et de pollution nécessitent des sources adaptées à des courants résistifs forts, voir la CEI 60507.

5.2.1.2 Tolérances

Pour les durées d'essais inférieures ou égales à 60 s, les valeurs mesurées de la tension d'essai doivent être maintenues à ± 1 % de la tension spécifiée tout au long de l'essai. Pour

les durées d'essais supérieures à 60 s, la valeur mesurée de la tension d'essai doit être maintenue à $\pm 3 \%$ de la tension spécifiée tout au long de l'essai.

NOTE On insiste sur le fait que la tolérance constitue la différence autorisée entre la valeur spécifiée et la valeur réellement mesurée. Il convient de faire la distinction entre les notions de différence et d'incertitude de mesure (voir 3.3.1).

Il convient que les caractéristiques de la source soient telles qu'elles permettent de charger la capacité de l'objet en essai en un temps raisonnablement court. Dans le cas des essais sous pluie ou de pollution, il convient que la source, y compris sa capacité d'accumulation soit également capable de fournir les courants de décharge transitoires de l'objet en essai avec une chute de tension $< 10 \%$.

5.2.2 Génération de la tension d'essai

La tension d'essai est généralement obtenue à l'aide de circuits transformateur-redresseur. Les exigences relatives à la source de tension d'essai dépendent beaucoup du type d'appareil à soumettre à l'essai et des conditions d'essai. Ces exigences dépendent principalement de la valeur et de la nature du courant d'essai à fournir, dont les principales composantes sont indiquées en 5.2.4.

5.2.3 Mesure de la tension d'essai

La mesure de la valeur arithmétique moyenne, du facteur d'ondulation et de tout transitoire de la tension d'essai doit être réalisée au moyen de dispositifs de mesurage approuvés (voir la CEI 60060-2).

L'attention est attirée sur les exigences relatives aux caractéristiques de réponse des dispositifs utilisés pour mesurer l'ondulation, les transitoires ou la stabilité de tension.

5.2.4 Mesure du courant d'essai

Lorsque les mesures du courant traversant l'objet en essai sont effectuées, on peut distinguer plusieurs composantes. Celles-ci diffèrent les unes des autres de plusieurs ordres de grandeur pour le même objet en essai et la même tension d'essai. Ce sont:

- le courant capacitif, dû à l'application initiale de la tension d'essai et à toute ondulation ou à toutes autres fluctuations superposées;
- le courant d'absorption diélectrique, dû au lent déplacement de charges au sein de l'isolation et durant un temps pouvant aller de quelques secondes à plusieurs heures. Ce phénomène est en partie réversible, des courants de polarité opposée étant observés lorsque l'objet en essai est déchargé et court-circuité;
- le courant de fuite permanent, qui est la valeur finale du courant continu stabilisé obtenue à tension appliquée constante lorsque les composantes précédentes ont décru jusqu'à zéro;
- les courants de décharges partielles.

La mesure des trois premières composantes nécessite l'emploi d'appareils couvrant une large gamme d'amplitudes de courant. Il est important de s'assurer que l'appareil ou que la mesure de l'une quelconque des composantes du courant ne subisse pas une influence défavorable des les autres composantes. Des informations concernant l'état de l'isolation peuvent parfois être obtenues pendant des essais non destructifs par l'observation des variations du courant dans le temps.

L'amplitude relative et l'importance de chaque composante du courant dépendent du type et de l'état de l'objet en essai, du but recherché au cours de l'essai et de la durée de l'essai. En conséquence, il convient que les exigences relatives aux mesures soient spécifiées par le Comité d'études concerné, en particulier lorsqu'il est requis de distinguer une composante particulière.

Les mesures de courant doivent être réalisées avec un système de mesure étalonné.

Les mesures des courants de choc de décharge partielle sont effectuées avec des appareils spéciaux qui sont traités dans la CEI 60270.

NOTE Il convient de toujours utiliser des dispositifs de protection de tension dans les circuits de mesure de courant en raison de la possibilité d'apparition de courants de décharges disruptives qui sont beaucoup plus importants que les courants normaux.

5.3 Procédures d'essai

5.3.1 Essais de tension de tenue

Il convient que la tension soit appliquée à l'objet en essai en commençant par une valeur suffisamment faible pour éviter tout effet de surtension dû aux transitoires de commutation. Il convient d'augmenter la tension suffisamment lentement pour permettre une lecture des instruments, mais sans qu'il en résulte pour autant une prolongation inutile de la contrainte sur l'objet en essai au voisinage de la tension d'essai U . Ces exigences sont généralement satisfaites si la vitesse de montée est d'environ 2 % de U par seconde lorsque la tension appliquée est supérieure à 75 % de U . Cette tension doit être maintenue pendant la durée spécifiée puis diminuée en déchargeant la capacité du circuit, y compris celle de l'objet en essai, à travers une résistance appropriée.

La durée de l'essai doit être spécifiée par le Comité d'études concerné en considérant que la durée nécessaire pour atteindre la répartition de tension en régime permanent dépend des résistances et des capacités des composants de l'objet en essai. Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, la durée de l'essai de tenue doit être de 60 s.

La polarité de la tension ou l'ordre dans lequel les tensions de chaque polarité sont appliquées, ainsi que toute variation exigée par rapport aux spécifications ci-dessus, doivent être spécifiées par le Comité d'études concerné.

Les exigences de l'essai sont satisfaites si aucune décharge disruptive ne se produit sur l'objet en essai.

5.3.2 Essais de tension de décharge disruptive

La tension doit être appliquée et augmentée de façon continue, comme pour un essai de tension de tenue, jusqu'à ce qu'une décharge disruptive se produise sur l'objet en essai. On doit enregistrer la dernière valeur de la tension d'essai atteinte avant la décharge disruptive. Cela doit être répété le nombre de fois n spécifié dans la procédure d'essai pour fournir un ensemble de n tensions mesurées.

Le Comité d'études concerné doit spécifier la vitesse à laquelle la tension augmente, le nombre d'applications de tension et la procédure d'évaluation des résultats d'essai (voir Annexe A).

5.3.3 Essais de tension de décharge disruptive assurée

La tension doit être appliquée et augmentée de façon continue, comme pour un essai de tension de tenue, jusqu'à ce qu'une décharge disruptive se produise sur l'objet en essai. On doit enregistrer la dernière valeur de la tension d'essai enregistrée avant la décharge disruptive. Cela doit être répété le nombre de fois n spécifié dans la procédure d'essai pour donner un ensemble de n tensions mesurées.

Les exigences de l'essai sont remplies si aucune tension de cette série ne dépasse la tension de décharge disruptive assurée.

Le Comité d'études concerné doit spécifier le nombre d'applications de tension et la vitesse à laquelle la tension augmente.

6 Essais en tension alternative

6.1 Définitions concernant les essais en tension alternative

6.1.1

valeur de crête d'une tension alternative

moyenne des amplitudes des valeurs de crête positives et négatives

NOTE Dans de nombreux cas, on utilise des instruments mesurant une seule crête de polarité. La mesure d'une seule polarité est acceptable tant que la symétrie de la forme d'onde est dans les limites fixées en 6.2.1.1.

6.1.2

valeur de la tension d'essai

sa valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$

NOTE Le Comité d'études concerné peut demander une mesure de la valeur efficace de la tension d'essai au lieu de la valeur de crête si la valeur efficace peut avoir une importance, par exemple lorsque des effets thermiques sont impliqués.

6.1.3

valeur efficace

racine carrée de la valeur moyenne des carrés des valeurs que prend la tension pendant un cycle complet

6.1.4

chute de tension

réduction instantanée de la tension de test pendant une courte durée jusqu'à quelques périodes

6.2 Tension d'essai

6.2.1 Exigences relatives à la tension d'essai

6.2.1.1 Forme d'onde de la tension

La tension d'essai doit être une tension alternative de fréquence généralement comprise entre 45 et 65 Hz, appelée normalement tension d'essai à fréquence industrielle. Des essais spéciaux peuvent être requis à des fréquences très inférieures ou très supérieures à cette gamme, comme spécifié par le Comité d'études concerné.

NOTE La CEI 60060-3 décrit d'autres tensions d'essai pour les fréquences allant de 10 Hz à 500 Hz.

La forme d'onde de la tension doit être voisine de celle d'une sinusoïde, la différence des amplitudes des valeurs de crête positives et négatives étant inférieure à 2 %.

On considère que les résultats d'un essai à haute tension ne sont pas affectés par de petits écarts par rapport à une sinusoïde, si le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace est égal à $\sqrt{2}$ à ± 5 %.

Pour certains circuits d'essai d'utilisation courante, des écarts plus grands doivent être acceptés. Noter que l'objet en essai, surtout s'il a des caractéristiques non linéaires, peut affecter considérablement l'écart par rapport à une sinusoïde.

NOTE En plus de l'exigence ci-dessus, la distorsion harmonique totale (THD) peut être utilisée pour caractériser la distorsion de forme d'onde, celle-ci pouvant être importante pour les mesures de reconnaissance des formes de décharge partielle. Des spécifications peuvent être données par le Comité d'études concerné.

6.2.1.2 Tolérances

Pour les durées d'essais inférieures ou égales à 60 s, les valeurs mesurées de la tension d'essai doivent être maintenues à $\pm 1\%$ de la tension spécifiée tout au long de l'essai. Pour les durées d'essais supérieures à 60 s, la valeur mesurée de la tension d'essai doit être maintenue à $\pm 3\%$ de la tension spécifiée tout au long de l'essai.

Dans le cas des essais sous pluie et de pollution, il convient que la source de tension d'essai, y compris ses capacités support soit capable de fournir les courants de décharge transitoires avec une chute de tension $\leq 20\%$.

NOTE On insiste sur le fait que la tolérance constitue la différence autorisée entre la valeur spécifiée et la valeur réellement mesurée. Il convient de faire la distinction entre les notions de différence et d'incertitude de mesure (voir 3.1.1).

6.2.2 Génération de la tension d'essai

6.2.2.1 Exigences générales

La tension d'essai est généralement fournie par un transformateur élévateur. En variante, elle peut être générée par un circuit résonnant série ou parallèle.

La tension du circuit d'essai doit être suffisamment stable pour ne pas être affectée en pratique par les variations des courants de fuite. Les décharges non disruptives de l'objet en essai ne doivent pas réduire la tension d'essai à un degré tel et pendant une durée telle que la tension de décharge disruptive mesurée de l'objet en essai ne soit affectée de façon significative.

NOTE On attire l'attention sur la possibilité que de telles décharges non disruptives peuvent provoquer des surtensions élevées aux bornes de l'objet en essai. Ce phénomène peut provoquer une défaillance de l'objet en essai ou de la source d'essai. L'introduction d'une résistance au circuit haute tension peut amortir de telles surtensions transitoires, mais il convient que la résistance soit d'une valeur suffisamment faible pour ne pas affecter la tension d'essai délivrée à l'objet en essai.

Il convient que la capacité totale de l'objet en essai et de tout condensateur supplémentaire soit suffisante pour garantir que la tension de décharge mesurée n'est pas affectée par les décharges ou prédécharges partielles non disruptives dans l'objet en essai. Une capacité dans la plage allant de 0,5 nF à 1,0 nF est généralement suffisante.

6.2.2.2 Exigences concernant le circuit d'essai avec transformateur

Les essais à haute tension produisent généralement des courants de charge auxquels se superposent des chocs de courant variant dans le temps à mesure que l'on augmente la tension. L'amplitude et la durée des chocs de courant sont influencées par le montage d'essai, les conducteurs utilisés pour connecter l'objet en essai, les conditions atmosphériques, les caractéristiques de la source d'essai et d'autres facteurs. Il est normal qu'un dispositif produise des chocs de courant, car les tensions d'essai sont beaucoup plus élevées que les tensions de fonctionnement et ces dispositifs sont souvent exempts de grandes électrodes et de blindages de masse permettant de maintenir l'objet en essai électriquement calme. Puisque les chocs de courant sont de courte durée, les chutes de tension peuvent ne pas être reconnues par les systèmes de mesure classiques en courant alternatif. La stabilité de tension d'un système d'essai à courant alternatif utilisé dans des essais avec des chocs de courant de fuite variant dans le temps peut être vérifiée en utilisant un système de mesure de tension ayant une bande passante suffisante.

Pour des essais à sec en dessous de 100 kV sur des échantillons d'isolation solide, de liquides isolants ou de combinaisons des deux, un courant assigné de la source d'essai supérieur à 100 mA (transformateur, régulateur, etc. ou générateur) et une impédance de court-circuit inférieure à 20 % sont généralement suffisants.

Pour les essais de diélectriques au-dessus de 100 kV sur l'isolation auto-régénératrice externe (objets en essai de faible capacité, tels que les isolants, les disjoncteurs et les interrupteurs), un courant assigné de la source d'essai supérieur à 100 mA et une impédance de court-circuit inférieure à 20 % sont généralement suffisants pour les essais à sec pour lesquels il n'y a pas de flux.

Pour les essais de diélectriques au-dessus de 100 kV, un courant assigné du système d'essai de 1 A et des impédances en court-circuit du système inférieures à 20 % peuvent être nécessaires si l'on rencontre des flux continus ou si des essais sous pluie sont effectués. Lorsque des flux continus sont présents, il est recommandé d'effectuer des mesures de tension à réponse plus rapide pour garantir que la tension d'essai est maintenue à l'intérieur des limites de chute de tension pendant la durée de l'essai. En variante, des contre-mesures telles que l'augmentation du diamètre des électrodes ou l'utilisation de conducteurs de connexion plus grands peuvent être utilisées pour réduire les flux.

Les chocs de courant de courte durée que l'on rencontre dans une quelconque tension d'essai sont principalement produits par la charge stockée dans la capacité du circuit d'essai. Pour les essais au-dessus de 100 kV, il est recommandé d'installer une capacité de circuit supérieure ou égale à 1 000 pF.

Pour les essais sous pollution artificielle, un courant en régime permanent de 1 A à 5 A peut être nécessaire. Voir la CEI 60507.

6.2.2.3 Circuit résonnant série

Un circuit résonnant série est essentiellement constitué d'une inductance en série avec une charge ou un objet en essai capacitif connecté à une source d'énergie à moyenne tension. En variante, il peut comprendre un condensateur en série dans le cas d'un objet en essai inductif. En faisant varier les paramètres du circuit ou la fréquence d'alimentation, le circuit peut être accordé à la résonance lorsqu'une tension beaucoup plus grande et de forme sensiblement sinusoïdale est appliquée à l'objet en essai.

La stabilité des conditions de résonance et de la tension d'essai dépend de la stabilité de la fréquence d'alimentation et des caractéristiques du circuit d'essai, décrites par le facteur de qualité, qui est le rapport entre la puissance réactive d'essai et les pertes de puissance.

Lorsqu'une décharge se produit, la capacité du circuit se décharge instantanément et le courant provenant de la source est ensuite relativement faible. La limitation du courant provenant de la source se traduit en général par moins de dommages pour l'objet en essai.

Le circuit résonnant série est particulièrement utile pour les essais d'objets capacitifs dans lesquels les courants de fuite sur l'isolation externe sont faibles par rapport aux courants capacitifs qui traversent l'objet en essai ou l'énergie pour former une décharge disruptive est très faible. Un circuit résonnant série peut fournir des courants de fuite plus élevés dans la mesure où une capacité supplémentaire est ajoutée au circuit. Un circuit résonnant série est également utile pour les essais de réactances avec une capacité suffisante du circuit.

Le circuit résonnant série peut ne pas convenir pour les essais sous pluie ou sous pollution des isolations externes, sauf si les exigences de 6.2.2.1 sont satisfaites. En général, les essais sous pluie peuvent être réalisés en ajoutant une capacité de pré-charge adaptée.

6.2.3 Mesure de la tension d'essai

La mesure de la valeur de la tension d'essai, valeur efficace, et des chutes transitoires doit être réalisée avec un système de mesure approuvé (voir CEI 60060-2).

6.2.4 Mesure du courant d'essai

Le courant est généralement mesuré par un transformateur de courant classique couplé au conducteur de mise à la terre de l'objet en essai. Il peut également être mesuré dans le conducteur haute tension connecté à l'objet en essai.

Les mesures de courant doivent être réalisées avec un système de mesure étalonné.

NOTE Le courant peut également être mesuré dans le conducteur de mise à la terre du transformateur élévateur ou de la bobine de réactance de résonance, à condition que le courant de tout condensateur en parallèle puisse être négligé.

6.3 Procédures d'essai

6.3.1 Essais de tension de tenue

La tension doit être appliquée à l'objet en essai en commençant par une valeur suffisamment faible pour éviter tout effet de surtension due aux transitoires de commutation ou à des conditions de résonance non contrôlées. Il convient d'augmenter assez lentement la tension pour permettre une lecture de l'appareil de mesure, mais sans qu'il en résulte pour autant une prolongation inutile de la contrainte sur l'objet en essai au voisinage de la tension d'essai U . Ces exigences sont généralement satisfaites si la vitesse de montée en tension est d'environ 2 % de U par seconde, lorsque la tension appliquée est supérieure à 75 % de U . Cette tension doit être maintenue pendant la durée spécifiée puis diminuée rapidement, mais elle ne doit pas être brutalement coupée car ceci peut produire des transitoires de commutation qui peuvent produire des dommages ou des résultats d'essai erratiques.

La durée d'essai doit être spécifiée par le Comité d'études concerné et ne doit pas dépendre de la fréquence dans la plage de 45 Hz à 65 Hz. En l'absence de spécification du Comité d'études concerné, la durée de l'essai de tenue doit être de 60 s.

Les exigences de l'essai sont satisfaites si aucune décharge disruptive ne se produit sur l'objet en essai.

6.3.2 Essais de tension de décharge disruptive

La tension doit être appliquée et augmentée de façon continue, comme pour un essai de tension de tenue, jusqu'à ce qu'une décharge disruptive se produise sur l'objet en essai. On doit enregistrer la dernière valeur de la tension d'essai atteinte au moment de la décharge disruptive. Cela doit être répété le nombre de fois n spécifié dans la procédure d'essai pour donner un ensemble de n tensions mesurées.

Le Comité d'études concerné doit spécifier la vitesse d'accroissement de la tension, le nombre d'applications de tension et la procédure d'évaluation des résultats d'essai (voir Annexe A).

6.3.3 Essais de tension de décharge disruptive assurée

La tension doit être appliquée et augmentée de façon continue, comme pour un essai de tension de tenue, jusqu'à ce qu'une décharge disruptive se produise sur l'objet en essai. On doit enregistrer la dernière valeur de la tension d'essai atteinte avant la décharge disruptive. Cela doit être répété le nombre de fois n spécifié dans la procédure d'essai pour donner un ensemble de n tensions mesurées.

Les exigences de l'essai sont satisfaites si aucune tension de cette série ne dépasse la tension de décharge disruptive assurée.

Le Comité d'études concerné doit spécifier le nombre d'applications de tension et la vitesse d'accroissement de la tension.

7 Essais en tension de choc de foudre

7.1 Définitions concernant les essais aux chocs de foudre

7.1.1

tension de choc

tension transitoire apériodique appliquée intentionnellement qui monte en général rapidement à une valeur de crête, puis plus lentement tombe à zéro

NOTE Pour des besoins particuliers, des chocs ayant des fronts approximativement linéaires, ou des transitoires de forme oscillante ou approximativement rectangulaire, sont utilisés.

7.1.2

tension de choc de foudre

tension de choc dont la durée du front est inférieure à 20 μ s.

7.1.3

tension de choc de foudre plein

tension de choc de foudre qui n'est pas interrompue par une décharge disruptive (voir Figure 5)

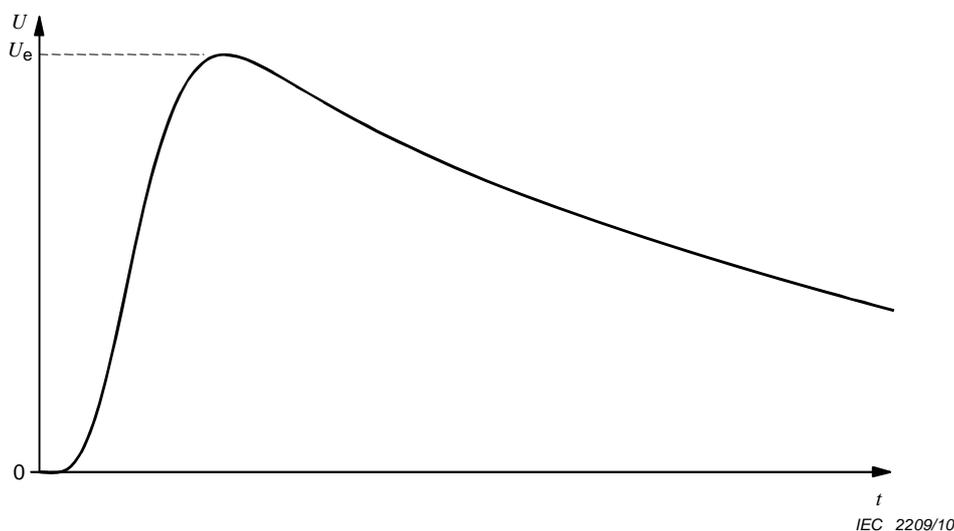


Figure 5 – Tension de choc de foudre plein

7.1.4

dépassement

augmentation de l'amplitude d'une tension de choc due à une oscillation amortie à la valeur de crête provoquée par le circuit

NOTE De telles oscillations (plage de fréquences habituellement de 0,1 MHz à 2 MHz) sont provoquées par l'inductance du circuit et, parfois, ne peuvent pas être évitées dans les grands circuits ou pour les objets inductifs en essai. Les méthodes d'évaluation de dépassement sont données dans l'Annexe B.

7.1.5

courbe enregistrée

graphique ou représentation numérique des données d'essai d'une tension de choc

7.1.6

niveau de base

niveau d'un enregistrement d'un système de mesure de chocs lorsque l'entrée de l'enregistreur est portée à zéro

7.1.7**courbe de référence**

estimation d'une tension de choc de foudre plein sans oscillation superposée (voir Annexe B)

7.1.8**courbe résiduelle** **$R(t)$**

différence entre la courbe enregistrée et la courbe de référence (voir Annexe B)

7.1.9**valeur extrême** **U_e**

valeur maximale de la courbe enregistrée mesurée par rapport au niveau de base dans le même sens que le choc appliqué

7.1.10**maximum de la courbe de référence** **U_b**

valeur maximale de la courbe de référence

7.1.11**fonction de tension d'essai**

fonction amplitude-fréquence définie pour représenter la réponse de l'isolation aux chocs avec dépassement. Elle est obtenue par la formule:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2}$$

où f est la fréquence en MHz (voir Figure 6).

NOTE 1 Différentes courbes de tension d'essai pour différents types d'isolation peuvent être spécifiées par le Comité d'études concerné lorsque plusieurs données d'essai sont disponibles.

NOTE 2 L'application de cette fonction comme un filtre à la courbe de tension résiduelle permet de calculer la valeur de la tension d'essai de la tension de choc de foudre plein équivalente (voir Annexe B, Annexe C et Annexe D).

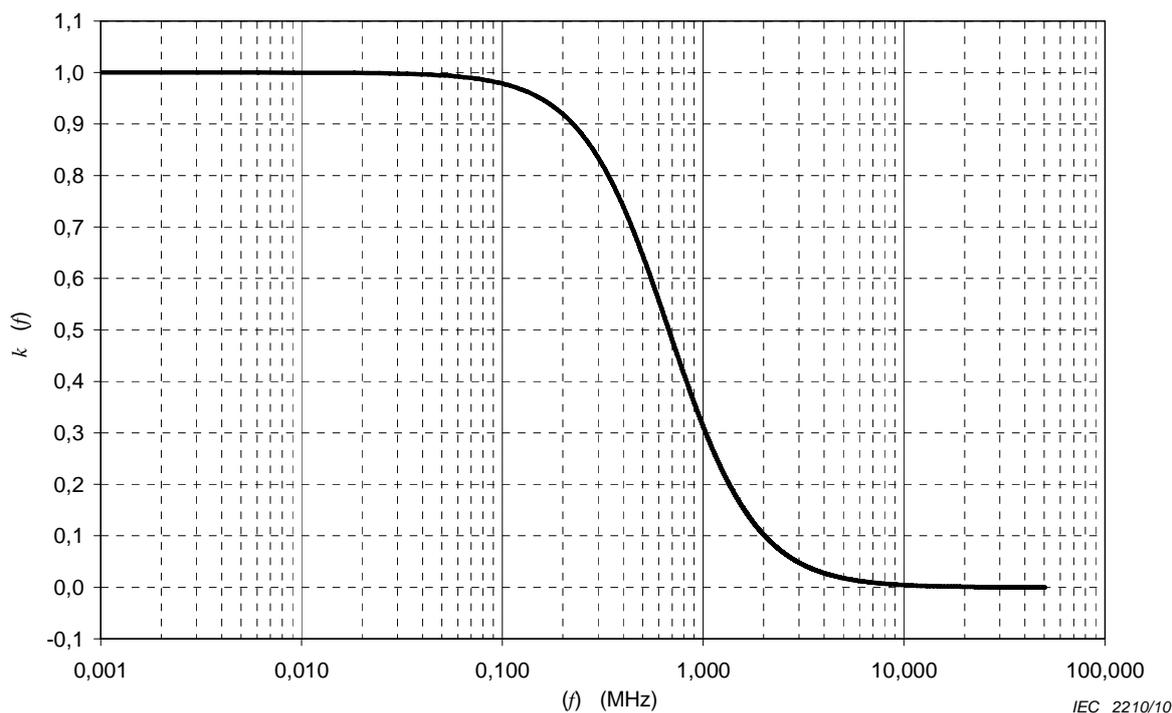


Figure 6 – Fonction de tension d’essai

7.1.12

courbe résiduelle filtrée

$R_f(t)$

courbe résiduelle filtrée par la fonction de tension d’essai

7.1.13

courbe de tension d’essai

sommation de la courbe de référence et de la courbe résiduelle filtrée

NOTE Ceci est une représentation mathématique du processus et ne constitue pas une entité physique ou un choc équivalent.

7.1.14

choc lisse équivalent

tension de choc d’allumage estimée sans dépassement ayant une valeur de crête égale à la valeur maximale de la courbe de tension d’essai et le même temps de montée et la même durée pour la demi-valeur que la courbe de tension d’essai correspondante

NOTE Un choc lisse équivalent a le même comportement au claquage du diélectrique que la courbe enregistrée.

7.1.15

valeur de la tension d’essai

U_t

valeur maximale de la courbe de tension d’essai mesurée par rapport au niveau de base dans le même sens que le choc appliqué

7.1.16

amplitude du dépassement

β

différence entre la valeur extrême de la courbe enregistrée, et la valeur maximale de la courbe de référence

7.1.17 amplitude relative du dépassement

β'

rapport entre l'amplitude du dépassement et la valeur extrême, généralement exprimé en pourcentage.

7.1.18 temps de montée

T_1

paramètre virtuel défini comme 1/0,6 fois l'intervalle de temps T compris entre les instants où la tension atteint 30 % et 90 % de la valeur de crête sur la courbe de tension d'essai (points A et B, Figure 7)

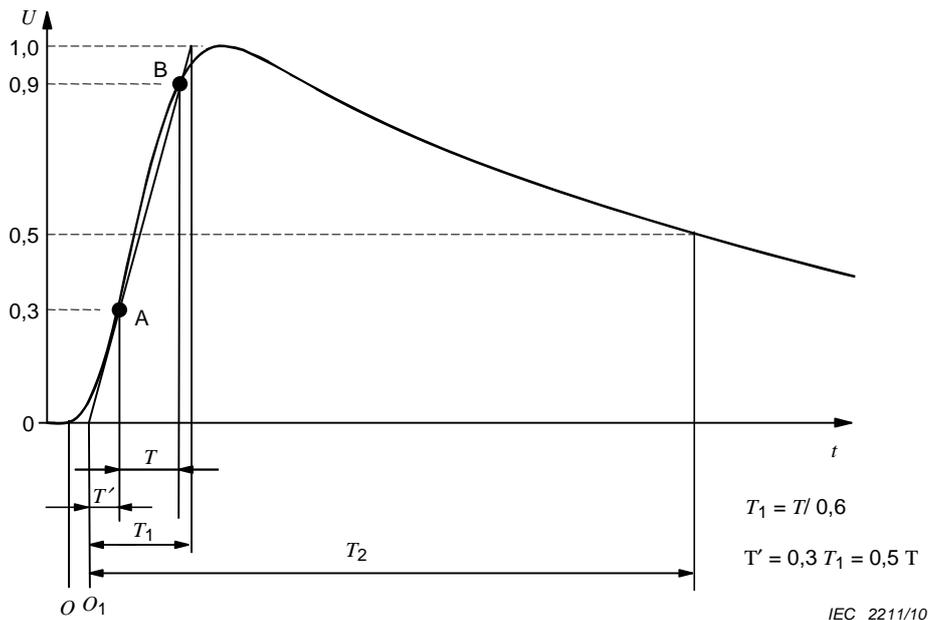


Figure 7 – Paramètres de temps de la tension de choc pleine

7.1.19 origine virtuelle

O_1

instant qui précède d'une durée de $0,3 T_1$, celui qui correspond au point A de la courbe de tension d'essai (voir Figure 7).

NOTE Pour les enregistrements à échelle de temps linéaire, il s'agit de l'intersection avec l'axe des temps d'une droite passant par les points de référence A et B du front.

7.1.20 vitesse moyenne d'augmentation

pente de la droite la mieux ajustée, calculée à partir de la courbe enregistrée, en utilisant tous les points de données situés entre 30 % et 90 % des niveaux de valeurs extrêmes. Elle est généralement exprimée en kilovolts par microseconde.

NOTE Dans le cas du bruit ou d'oscillations à des niveaux de 30 % et 90 %, l'ensemble de données est délimité par le premier point après le dernier passage du niveau à 30 % et par le dernier point avant le premier passage du niveau à 90 %.

7.1.21 temps de crête

T_e

valeur extrême, U_e , divisée par la vitesse moyenne d'augmentation

7.1.22
durée jusqu'à la mi-valeur

T_2
paramètre virtuel défini comme l'intervalle de temps compris entre l'origine virtuelle, O_1 , et l'instant où la courbe de tension d'essai a diminué jusqu'à la moitié de la valeur de la tension d'essai. Voir Figure 7.

7.1.23
intervalle temps-tension

T_λ
intervalle de temps pour lequel la courbe enregistrée dépasse λU_e où $0 < \lambda < 1$ (voir Figure 8)

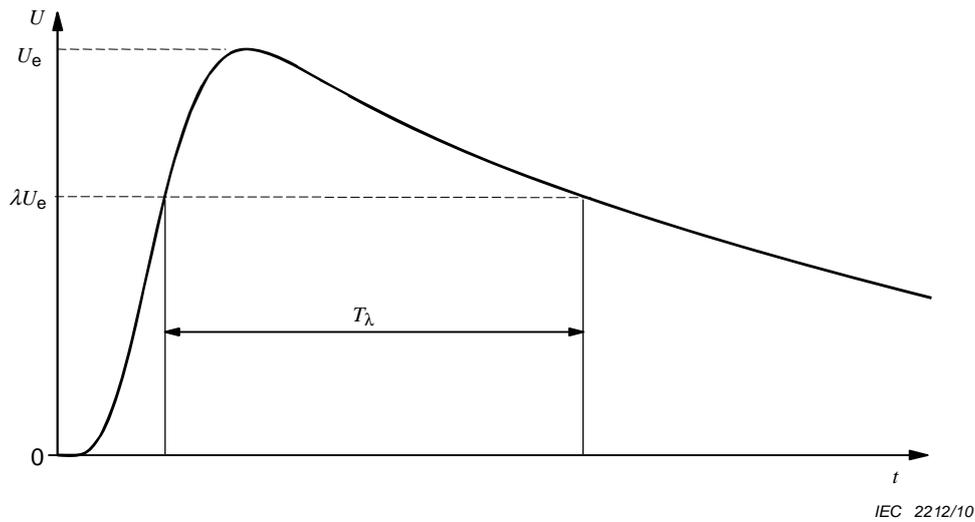


Figure 8 – Intervalle temps-tension

7.1.24
intégrale de tension

intégrale par rapport au temps de la courbe enregistrée sur un intervalle de temps donné (voir Figure 9).

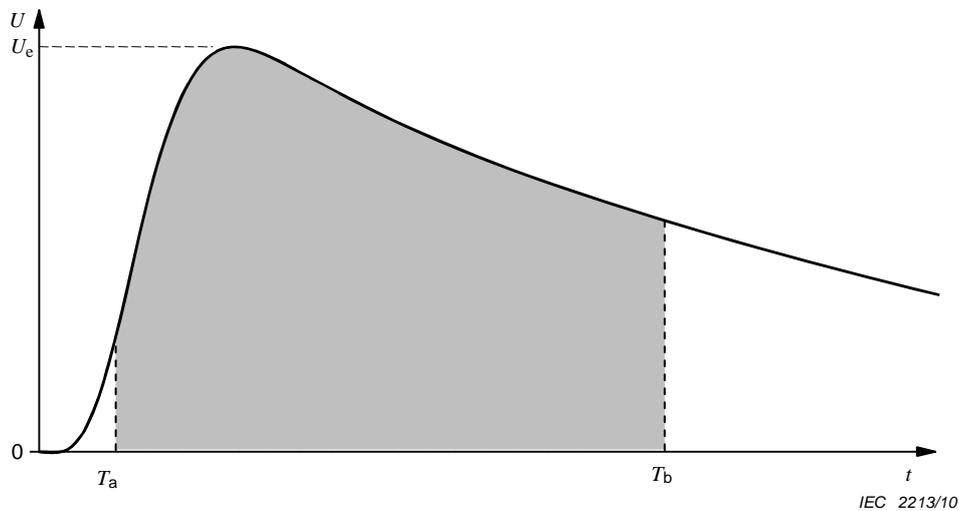


Figure 9 – Intégrale de tension

7.1.25**tension de choc de foudre coupée**

tension de choc de foudre durant laquelle une décharge disruptive provoque une chute rapide de la tension, pratiquement jusqu'à zéro (voir Figure 10 à Figure 12).

7.1.26**instant de la coupure**

instant où l'extrapolation de la ligne entre les points 70 % et 10 % (C et D) sur la chute de tension passe par le niveau qui précède immédiatement la chute (voir Figure 10 et Figure 11).

7.1.27**durée jusqu'à la coupure T_C**

paramètre virtuel défini comme l'intervalle de temps entre l'origine virtuelle O_1 et l'instant de coupure (voir Figure 10 et Figure 11).

7.1.28**caractéristiques liées à la chute de tension pendant la coupure**

caractéristiques virtuelles de la chute de tension pendant la coupure définies par deux points C et D situés à 70 % et 10 % de la tension qui précède immédiatement la chute de tension (voir Figure 11).

NOTE 1 La durée de la chute de tension est de 1/0,6 fois l'intervalle de temps entre les points C et D. La raideur de la chute de tension est le rapport entre la tension au moment de la coupure et la durée de la chute de tension.

NOTE 2 Les points C et D sont utilisés uniquement pour les besoins des définitions; leur emploi n'implique pas que la durée et la raideur de la coupure puissent être mesurées avec une quelconque précision par des circuits de mesure classiques.

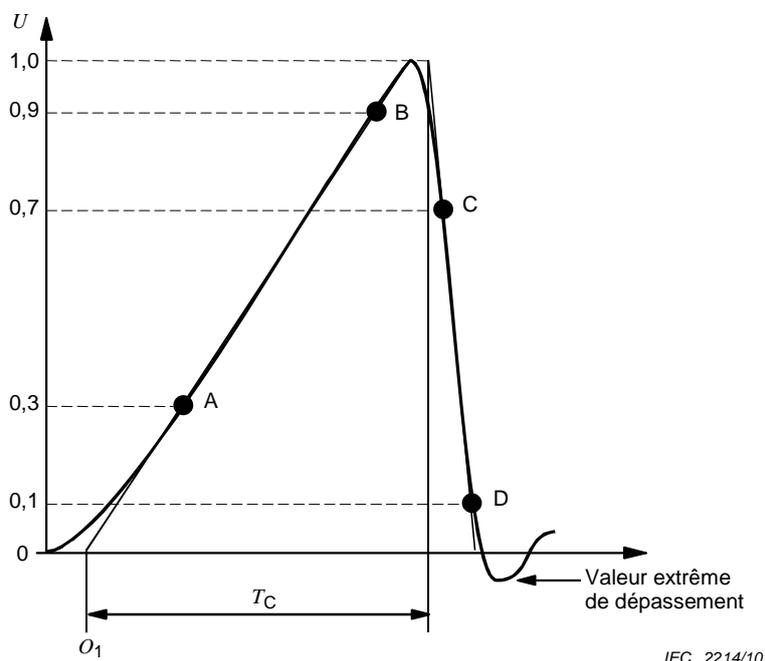


Figure 10 – Tension de choc de foudre coupée sur le front

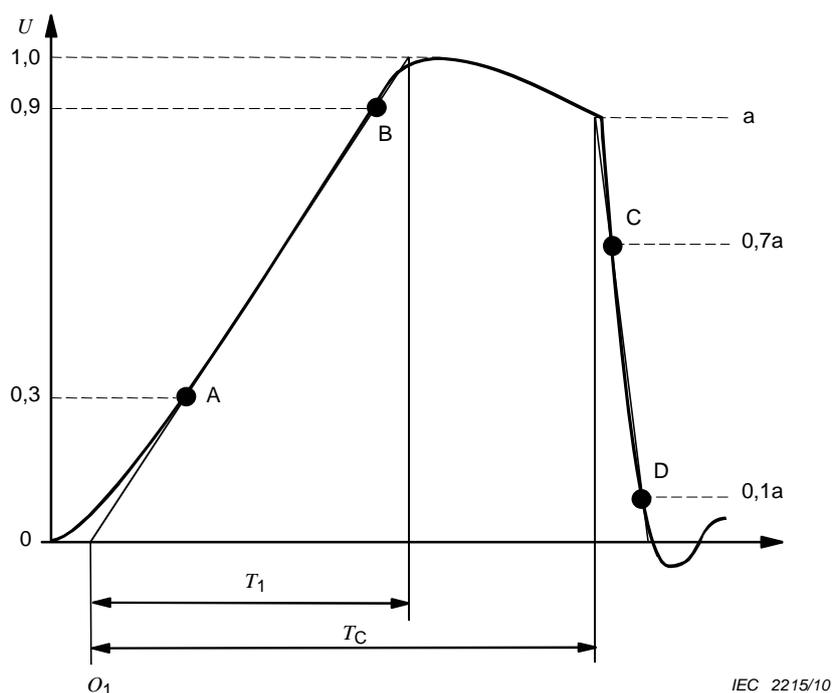


Figure 11 – Tension de choc de foudre coupée sur la queue

7.1.29

valeur extrême du dépassement d'un choc

amplitude maximale mesurée par rapport au niveau de base dans le sens opposé au choc appliqué (voir Figure 10).

7.1.30

choc coupé ayant un front augmentant linéairement

tension s'accroissant avec une raideur approximativement constante, jusqu'à ce qu'elle soit coupée par une décharge disruptive

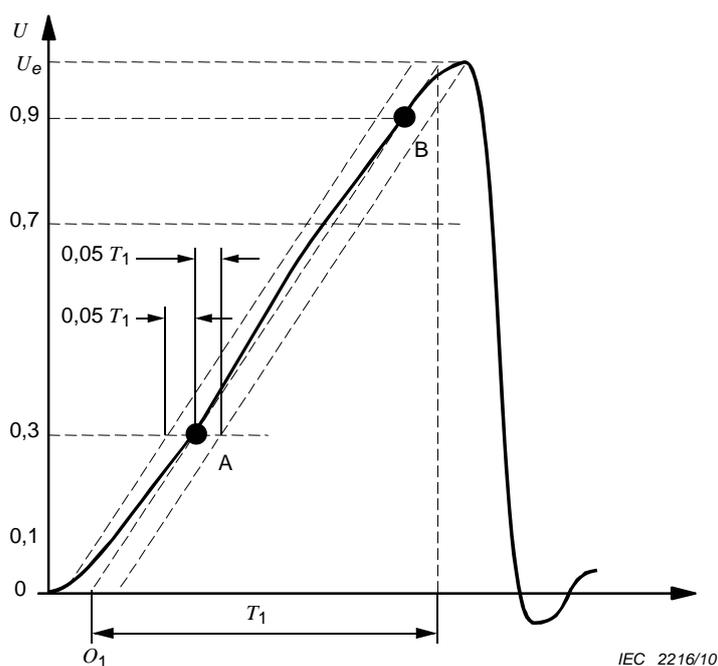


Figure 12 – Choc coupé ayant un front augmentant linéairement

NOTE 1 Pour définir un tel choc, on trace la ligne droite la mieux ajustée dans la partie du front du choc située entre 30 % et 90 % de la crête; les intersections de cette ligne avec les 30 % et 90 % sont alors désignées respectivement par A et B (voir Figure 12).

Le choc est défini par:

la tension de crête U_e

le temps de montée T_1

La raideur virtuelle S : $S = U_e/T_1$

Il s'agit de la pente de la droite passant par les points A et B, généralement exprimée en kilovolts par microseconde.

On considère que ce choc coupé est augmenté de façon approximativement linéaire si le front, à partir de l'amplitude à 30 % jusqu'à l'instant de la coupure, est entièrement situé entre deux lignes parallèles à la ligne AB, mais décalées dans le temps d'une durée de $\pm 0,05 T_1$ (voir Figure 12).

NOTE 2 Il convient que la valeur et la tolérance relatives à la raideur virtuelle S soient spécifiées par le Comité d'études concerné.

7.1.31 Définitions pour courbes tension/temps

7.1.31.1

courbe tension/temps pour tension de choc augmentant linéairement

courbe liant la tension de décharge au temps de montée T_1

NOTE La courbe est obtenue en appliquant des tensions de chocs de raideurs différentes. (voir Figure 13).

7.1.31.2

courbe tension/durée pour tension de choc ayant une forme présumée constante

courbe liant la tension de décharge d'un objet en essai à la durée jusqu'à la coupure qui peut se produire sur le front, sur la crête ou sur la queue

NOTE La courbe est obtenue en appliquant des tensions de chocs de valeurs de crête présumées différentes. (voir Figure 13).

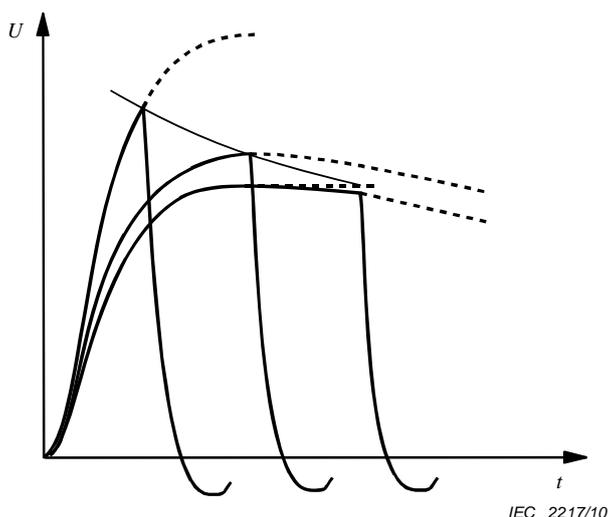


Figure 13 – Courbe tension/temps pour des chocs ayant une forme présumée constante

7.2 Tension d'essai

7.2.1 Tension de choc de foudre normalisée

La tension de choc de foudre normalisée est une tension de choc de foudre plein ayant un temps de montée de 1,2 μ s et une durée jusqu'à la mi-valeur de 50 μ s et décrit comme un choc 1,2/50.

7.2.2 Tolérances

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, les différences suivantes sont acceptées entre les valeurs spécifiées pour le choc normalisé et les suivantes:

- Valeur de tension d'essai: ± 3 %.
- Temps de montée: ± 30 %.
- Durée jusqu'à la mi-valeur: ± 20 %.

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, l'amplitude relative du dépassement ne doit pas dépasser 10 %.

Pour certains circuits d'essai et objets en essai, les formes d'onde normalisées dans les tolérances spécifiées peuvent être impossibles à réaliser. Dans de tels cas, une prolongation du dépassement du temps de montée T_1 peut être nécessaire. Il convient que le Comité d'études concerné fournisse des lignes directrices pour de tels cas.

NOTE Le temps de crête, T_e , l'intervalle de temps en tension, T_λ et l'intégrale de tension sont des paramètres à l'étude pour une autre caractérisation de tensions de chocs de foudre. Des valeurs peuvent être assignées par le Comité d'études concerné.

7.2.3 Tension de choc de foudre coupée normalisée

Ceci est un choc normalisé coupé par un éclateur extérieur avec une durée jusqu'à la coupure comprise entre 2 μ s et 5 μ s.

D'autres durées jusqu'à la coupure peuvent être spécifiées par le Comité d'études concerné. Il convient que la durée de la chute de tension soit beaucoup plus rapide que la durée du front et les limites peuvent être déterminées par le Comité d'études concerné. Les exigences relatives à la mesure et aux incertitudes associées sont données dans la CEI 60060-2.

7.2.4 Tensions de choc de foudre spéciales

Dans certains cas, des tensions de chocs de foudre oscillants peuvent être appliquées. Ceci offre la possibilité de produire des chocs avec des temps de montée plus courts ou des valeurs extrêmes correspondant à un rendement du générateur supérieur à 1.

NOTE Pour des détails voir CEI 60060-3.

7.2.5 Génération de la tension d'essai

La tension d'essai est généralement produite par un générateur de chocs qui est constitué essentiellement d'un certain nombre de condensateurs chargés en parallèle par une source de tension continue, puis mis en série et déchargés dans un circuit produisant les chocs qui inclut l'objet en essai.

7.2.6 Mesure de la tension d'essai et détermination de la forme du choc

Les mesures de la valeur de la tension d'essai, des paramètres de temps et du dépassement ou des oscillations de la tension d'essai doivent être réalisées au moyen de dispositifs de mesure approuvés (voir CEI 60060-2). Les mesures doivent être effectuées avec l'objet en essai dans le circuit et, en général, la forme du choc doit être contrôlée pour chaque objet en

essai. Quand plusieurs objets de mêmes caractéristiques et de mêmes dimensions sont soumis aux essais dans des conditions identiques, on n'a besoin de contrôler la forme du choc qu'une seule fois.

Pour une impulsion hachée d'éclair la chute peut se produire sur le front, sur la crête ou sur la queue. Pour un front de tension de choc de foudre coupée, la courbe de tension d'essai est la courbe enregistrée. Les chocs coupés sur la queue sont considérés comme des ondes pleines pour l'évaluation de la tension d'essai et du temps de montée, ce qui peut être déterminé à partir de la réduction des chocs de tension (par exemple < 50 %) qui ne produisent pas de coupure. La coupure peut être réalisée avec un éclateur de coupure extérieur ou peut survenir en raison d'une décharge dans l'isolation interne ou externe de l'objet en essai.

Avec certains objets en essai ou dispositions d'essais, il peut exister un aplatissement de la crête ou un arrondissement de la tension avant la chute finale à zéro. Des effets similaires dus aux imperfections du circuit de mesure peuvent également être observés. Une détermination précise des paramètres liés à la coupure exige la présence, d'une part d'une discontinuité brutale, d'autre part d'un dispositif de mesure rapide. Les autres cas sont laissés à l'appréciation des Comités d'Études concernés.

Une détermination de la forme du choc par le calcul à partir des paramètres du circuit d'essai n'est pas considérée comme satisfaisante.

7.2.7 Mesure du courant lors des essais avec des tensions de choc

Le Comité d'études concerné doit spécifier les caractéristiques d'un courant traversant l'objet en essai qu'il convient de mesurer pendant les essais avec des tensions de choc élevées. Quand ce type de mesure est utilisé à des fins de comparaison, la forme de l'onde de courant est essentielle alors que la mesure de la valeur absolue de ce courant peut présenter un intérêt moindre. Pour les directives, voir CEI 62475.

7.3 Procédures d'essai

7.3.1 Essais de tension de tenue

Les procédures d'essai recommandées dépendent de la nature de l'objet en essai, comme défini en 3.5. Le Comité d'études concerné doit spécifier les procédures qui doivent être appliquées. Dans les procédures A, B et C, seule la tension de tenue spécifiée est appliquée à l'objet en essai, tandis que, dans la procédure D, on doit appliquer plusieurs niveaux de tension.

NOTE La précision statistique des procédures est différente, mais pour la coordination de l'isolation (CEI 60071) on suppose que le résultat des essais est identique.

7.3.1.1 Essai de tension de tenue: Procédure A

On applique à l'objet en essai trois chocs de forme et de polarité spécifiées, au niveau assigné de tension de tenue. Les exigences de l'essai sont satisfaites si, en utilisant les méthodes de détection spécifiées par le Comité d'études concerné, on ne constate aucune défaillance.

NOTE Cette procédure est recommandée pour des essais sur une isolation dégradable ou non autorégénératrice.

7.3.1.2 Essai de tension de tenue: Procédure B

On applique à l'objet en essai quinze chocs de forme et de polarité spécifiées, au niveau spécifié de tension de tenue. Les exigences de l'essai sont satisfaites s'il ne se produit pas plus de deux décharges disruptives dans la partie autorégénératrice de l'isolation et si aucune indication de défaillance de l'isolation non autorégénératrice n'apparaît en utilisant les méthodes de détection spécifiées par le Comité d'études concerné.

NOTE Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, on peut considérer comme une indication d'absence de défaillance dans l'isolation non autorégénératrice, le fait que les trois derniers chocs n'aboutissent pas à une décharge disruptive. Dans le cas d'une décharge disruptive se produisant entre le treizième et le quinzième choc, il peut être nécessaire d'appliquer jusqu'à trois chocs supplémentaires (maximum 18). En l'absence de nouvelle décharge disruptive, on considère que l'objet en essai a satisfait à l'essai.

7.3.1.3 Essai de tension de tenue: Procédure C

On applique à l'objet en essai trois chocs de forme et de polarité spécifiées, au niveau spécifié de tension de tenue. En l'absence de nouvelle décharge disruptive, on considère que l'objet en essai a satisfait à l'essai. Si plusieurs décharges disruptives se produisent, on considère que l'objet en essai n'a pas satisfait à l'essai. Si une décharge disruptive se produit dans la partie autorégénératrice de l'isolation, on applique neuf chocs supplémentaires et, si aucune décharge disruptive ne se produit, on considère que l'objet en essai est considéré a satisfait à l'essai.

Si les méthodes de détection spécifiées par le Comité d'études concerné, font apparaître, à un moment quelconque de l'essai, une défaillance dans la partie non autorégénératrice de l'isolation, on considère que l'objet en essai est considéré n'a pas satisfait à l'essai.

7.3.1.4 Essai de tension de tenue: Procédure D

Pour une isolation autorégénératrice, la tension de décharge disruptive à 10 % U_{10} , peut être estimée à l'aide des procédures d'essais statistiques décrites dans l'Annexe A.

Ces méthodes d'essais permettent soit une évaluation directe de U_{10} , et U_{50} soit une évaluation indirecte de U_{10} .

Dans ce dernier cas, U_{10} est déduit de U_{50} à l'aide de la formule:

$$U_{10} = U_{50}(1 - 1,3s)$$

Le Comité d'études concerné doit préciser la valeur à adopter pour l'écart type s de la tension de décharge disruptive. Pour les essais à sec d'isolation dans l'air, sans qu'aucune autre isolation soit concernée, on peut utiliser la valeur par unité $s = 0,03$.

L'objet en essai est considéré comme satisfaisant si U_{10} n'est pas inférieure à la tension de tenue au choc spécifiée.

Les méthodes d'essai suivantes peuvent être utilisées pour évaluer U_{50} :

- a) la méthode des paliers multiples (voir A.1.1) avec un nombre de paliers de tension $m \geq 4$ et un nombre de chocs par palier $n_i \geq 10$.
- b) la méthode de montée et descente (voir A.1.2) avec $n = 1$ choc par groupe et $m \geq 20$ applications significatives.

Pour évaluer U_{10} on peut utiliser la méthode de tenue de montée et descente avec $n = 7$ chocs par groupe et au moins huit groupes significatifs.

Dans tous les cas, il convient que le pas de tension ΔU entre paliers soit approximativement compris entre 1,5 % et 3 % de la valeur estimée de U_{50} .

7.3.2 Procédures d'essai de tension de décharge disruptive assurée

Les procédures pour un essai de tension de décharge disruptive assurée sont similaires à celles qui sont décrites en 7.3.1, avec les changements adéquats entre conditions de décharge et de tenue.

Le Comité d'études concerné peut également spécifier d'autres procédures, pour des objets en essai spécifiques.

8 Essais avec tension de choc de manœuvre

8.1 Définitions concernant les essais de tension de choc de manœuvre

8.1.1

tension de choc de manœuvre

tension de choc avec un temps de montée de 20 μ s ou plus

8.1.2

valeur de la tension d'essai

valeur maximum, sauf spécification contraire du Comité Études concerné

8.1.3

durée jusqu'à la crête

T_p

intervalle de temps entre le point origine réel et la valeur maximale d'une tension de choc de manœuvre

NOTE En raison de la durée importante de la tension maximale, il peut exister des problèmes pratiques pour la détermination de ce laps de temps et des méthodes sont indiquées en 8.2.3.

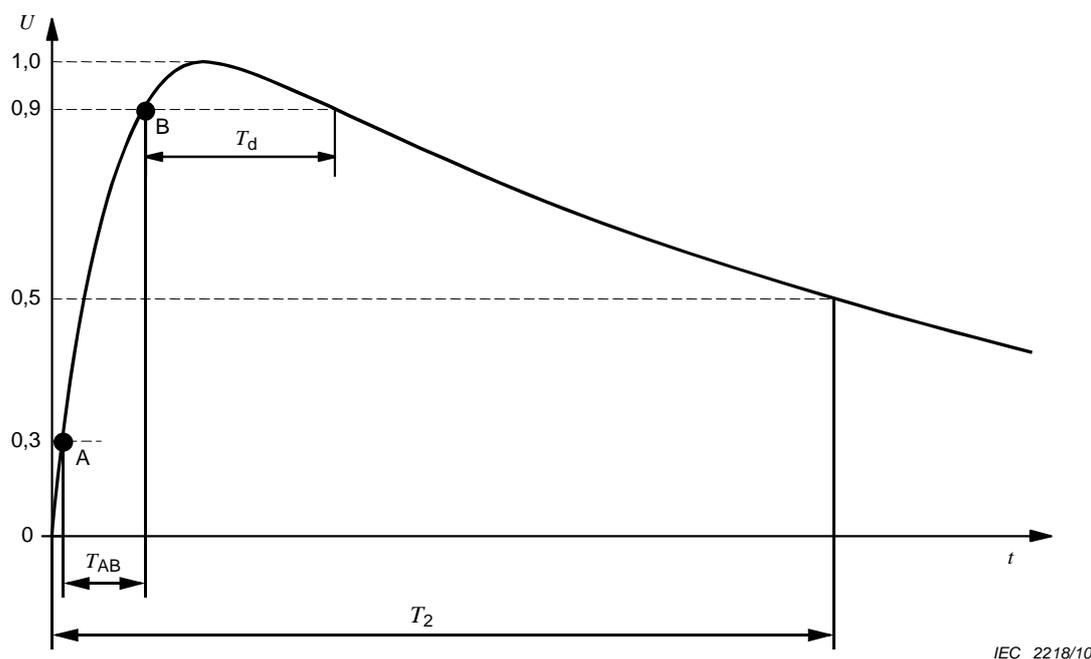


Figure 14 – Tension de choc de commutation

8.1.4

origine réelle

O

instant où la courbe enregistrée commence une augmentation (ou une diminution) monotone

8.1.5

durée jusqu'à la mi-valeur

T_2

intervalle de temps compris entre le point d'origine réel et l'instant où la tension a déchu pour la première fois jusqu'à la moitié de la valeur maximale (voir Figure 14)

8.1.6

durée au-dessus de 90 %

T_d

intervalle de temps pendant lequel la tension de choc est supérieure à 90 % de sa valeur maximale (voir Figure 14)

8.1.7

durée jusqu'à zéro

T_z

intervalle de temps compris entre le point d'origine réel et l'instant où la tension passe par zéro pour la première fois

NOTE On considère que la spécification de la durée au-dessus de 90 % et de la durée jusqu'à zéro au lieu de la durée jusqu'à mi-valeur est utile lorsque la forme du choc est imposée, par exemple par des phénomènes de saturation dans l'objet en essai ou dans le circuit d'essai, ou lorsqu'on considère que la sévérité d'un essai sur des parties importantes de l'isolation interne de l'objet dépend fortement de ces paramètres. Lors de la spécification d'une tension de choc de manœuvre, on donne généralement un seul jeu de paramètres relatifs à la forme d'onde. Il convient d'indiquer clairement les paramètres particuliers de durée choisis par référence, par exemple, à un choc T_p/T_2 ou $T_p/T_d/T_z$.

D'autres paramètres peuvent être spécifiés par le Comité d'études concerné lors de l'examen des essais spécifiques.

8.2 Tension d'essai

8.2.1 Tension de choc de manœuvre normalisée

La tension de choc de manœuvre normalisée est un choc de durée jusqu'à la crête T_p de 250 μ s et de durée jusqu'à mi-valeur T_2 de 2 500 μ s. Elle est appelée choc 250/2 500.

8.2.2 Tolérances

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, les écarts suivants entre les valeurs spécifiées et celles qui sont réellement enregistrées sont acceptés, aussi bien pour les chocs normalisés que pour les chocs spéciaux:

Valeur de la tension d'essai	$\pm 3 \%$
Durée jusqu'à la crête	$\pm 20 \%$
Durée jusqu'à la mi-valeur	$\pm 60 \%$

Dans certains cas, par exemple avec des objets en essai de faible impédance, il peut être difficile d'ajuster la forme du choc pour rester dans les limites des tolérances recommandées. Dans de tels cas, d'autres tolérances ou d'autres formes de choc peuvent être spécifiées par le Comité d'études concerné.

8.2.3 Évaluation de la durée jusqu'à la crête

8.2.3.1 Pour les tensions de choc de manœuvre normalisées

Pour les tensions de choc de manœuvre normalisées

$$T_p = K T_{AB},$$

ou K est une constante sans dimension donnée par

$$K = 2,42 - 3,08 \times 10^{-3} T_{AB} + 1,51 \times 10^{-4} T_2$$

où T_{AB} et T_2 sont en microsecondes et $T_{AB} = t_{90} - t_{30}$.

NOTE Dans la CEI 60060-3, $T_p = 2,4 T_{AB}$, est utilisé pour les tensions de choc de manœuvre normalisées.

8.2.3.2 Pour les chocs non normalisés

Pour les chocs non normalisés la durée jusqu'à la crête peut être déterminée par différentes méthodes d'ajustement numérique de la courbe en fonction de la forme réelle.

NOTE Si les considérations d'incertitude l'exigent, il convient d'indiquer la méthode de durée jusqu'à l'évaluation de crête.

8.2.4 Tensions de choc de foudre spéciales

Pour des utilisations spéciales, lorsqu'on considère que l'utilisation de la tension de choc de manœuvre normalisée n'est pas suffisante ou appropriée, des tensions de chocs de manœuvre spéciales de formes apériodiques ou oscillantes peuvent être prescrites par le Comité d'études concerné.

NOTE Pour plus de détails sur les tensions de choc de manœuvre oscillantes voir la CEI 60060-3.

8.2.5 Génération de la tension d'essai

Les tensions de chocs de manœuvre sont habituellement générées par un générateur de chocs classique.

NOTE Elles peuvent aussi être générées en appliquant un choc de tension à l'enroulement à basse tension d'un transformateur d'essai (ou d'un transformateur à soumettre à essai) mais il est difficile d'atteindre les paramètres normalisés comme spécifié en 8.2.1 et 8.2.2.

Il convient de choisir les éléments d'un circuit générateur de tensions de chocs de manœuvre de manière à éviter une distorsion excessive de la forme du choc par les courants de décharges non disruptives dans l'objet en essai. De tels courants peuvent atteindre des valeurs assez importantes, en particulier pendant des essais d'isolation externe sous pollution avec tensions élevées. Dans les circuits d'essai ayant une impédance interne élevée, ils peuvent provoquer une déformation importante de la tension, ou même empêcher une décharge disruptive de se produire.

8.2.6 Mesure de la tension d'essai et détermination de la forme du choc

La mesure de la valeur de la tension et la détermination des paramètres de temps doivent être réalisées avec des dispositifs de mesure approuvés (voir CEI 60060-2). Les mesures doivent être effectuées avec l'objet en essai dans le circuit et, en général, la forme du choc doit être contrôlée pour chaque objet en essai. Quand plusieurs objets de mêmes caractéristiques et de mêmes dimensions sont soumis aux essais dans des conditions identiques, on n'a besoin de contrôler la forme du choc qu'une seule fois.

8.2.7 Mesure du courant lors des essais avec des tensions de choc

Le Comité d'études concerné doit spécifier les caractéristiques du courant traversant l'objet en essai qu'il convient de mesurer pendant les essais avec des tensions de choc élevées. Quand ce type de mesure est utilisé à des fins de comparaison, la forme d'onde est essentielle alors que la mesure de la valeur absolue de ce courant peut présenter un intérêt moindre. Pour plus de détails, voir la CEI 62475.

8.3 Procédures d'essai

Les procédures d'essai sont généralement les mêmes que pour les essais de tension aux chocs de foudre et des considérations statistiques similaires s'appliquent (voir 7.3 et

Annexe A). Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, on peut supposer que l'écart type est le suivant, en valeur par unité, de la tension de décharge disruptive pour les essais à sec et sous pluie d'isolation dans l'air, sans aucune autre isolation concernée:

$$S = 0,06$$

En conséquence, des intervalles de tension ΔU plus importants peuvent être utilisés lorsqu'on applique les procédures des paliers multiples ou de montée et descente.

NOTE Avec les tensions de chocs de manœuvre, des décharges disruptives se produisent fréquemment à des moments aléatoires bien avant la crête. Quand on présente les résultats des essais de décharge réalisés selon 7.3.1.4, la relation entre la probabilité de décharge disruptive et la tension est en général exprimée en termes de valeur de crête présumée. Cependant, une autre méthode est également utilisée dans laquelle la tension réelle de décharge disruptive pour chaque choc est mesurée; la distribution de probabilité des valeurs de tension mesurées est alors déterminée par la méthode décrite pour les essais de Classe 3 dans l'Annexe A.

9 Essais avec des tensions combinées et composites

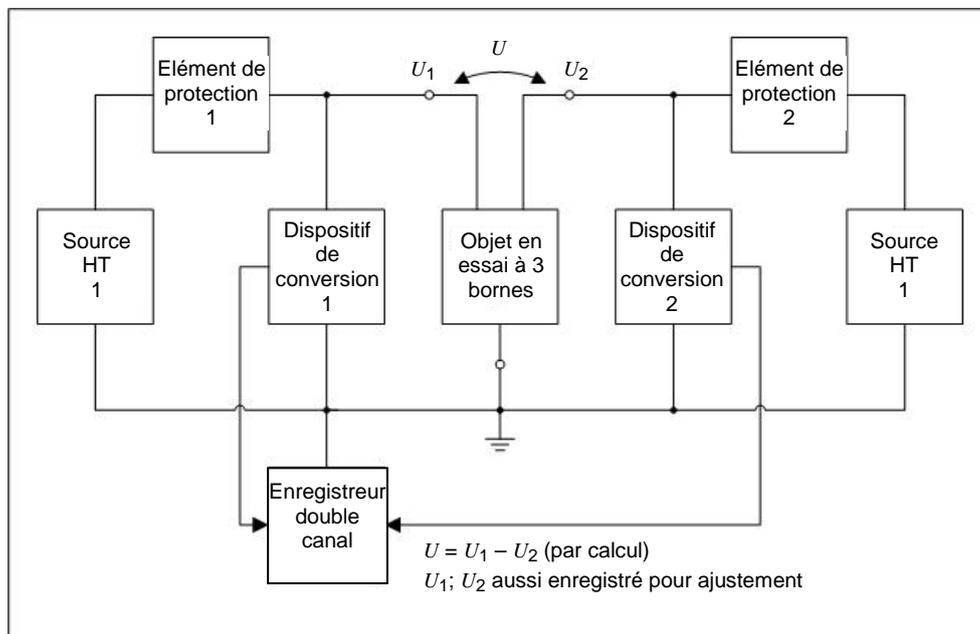
9.1 Définitions concernant les essais sous tensions combinées et composites

9.1.1

tension combinée

tension d'essai qui apparaît entre les deux bornes sous tension d'un objet en essai à trois bornes, la troisième borne étant reliée à la terre, lorsque l'alimentation est assurée par deux tensions d'essai différentes (voir Articles 5 à 8) générées par deux sources de tension d'essai distinctes. (voir Figure 15).

NOTE Les tensions combinées sont appliquées pour les essais, par exemple, d'isolation longitudinale du matériel de commutation et d'isolation entre phases des dispositifs et matériels triphasés. Les tensions sont appliquées sur différentes bornes de l'objet en essai.



IEC 2219/10

Figure 15 – Circuit pour un essai sous tension combinée

9.1.2

valeur d'une tension combinée

différence de potentiel maximale entre les deux bornes sous tension de l'objet en essai (voir Figure 16a)

9.2

tension composite

superposition de deux tensions d'essai différentes (voir Articles 5 à 8) générées par la connexion adaptée des deux sources de tensions d'essai distinctes (voir Figure 16b et Figure 17)

NOTE Les deux tensions sont appliquées sur une borne de l'objet en essai.

9.2.1

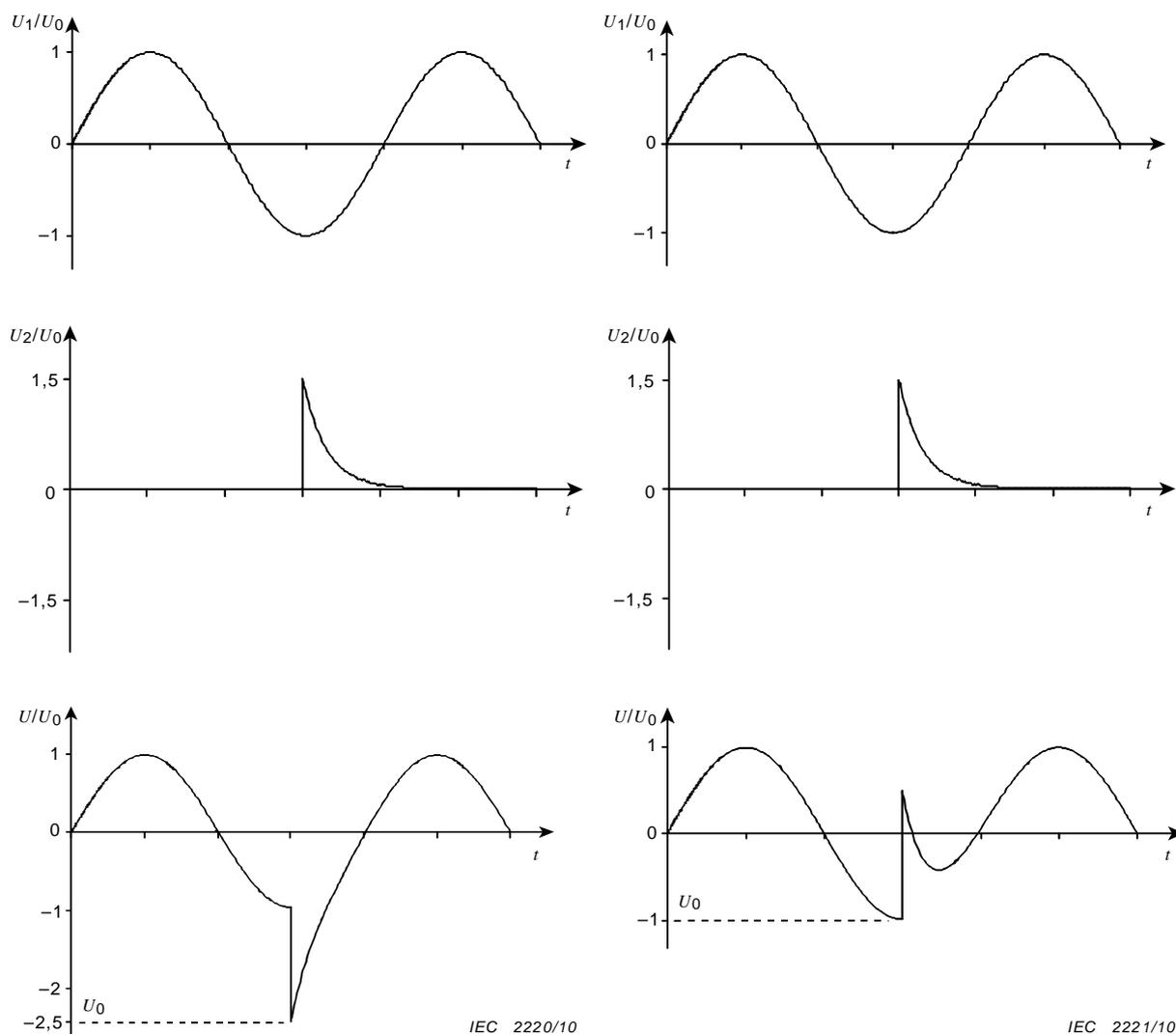
valeur d'une tension composite

valeur maximale mesurée sur l'objet en essai (voir Figure 16b)

9.2.2

composantes de tension

deux tensions d'essai, caractérisées selon les articles correspondants de la présente norme et provoquant les contraintes de tension d'essai combinées ou composites sur l'objet en essai



NOTE 1 In Figure 16a, la tension combinée est $U = U_1 - U_2$.

NOTE 2 In Figure 16b, la tension composite est $U = U_1 + U_2$.

Figure 16a – La tension combinée entre deux terminaux de HV

Figure 16b – La tension combinée entre un terminal de HV et la terre

Figure 16 – Exemple schématique de tension combinée et composite

9.2.3 retard de temps

Δt

intervalle de temps entre les instants où les deux composantes de tension atteignent leurs valeurs maximales (voir Figure 18)

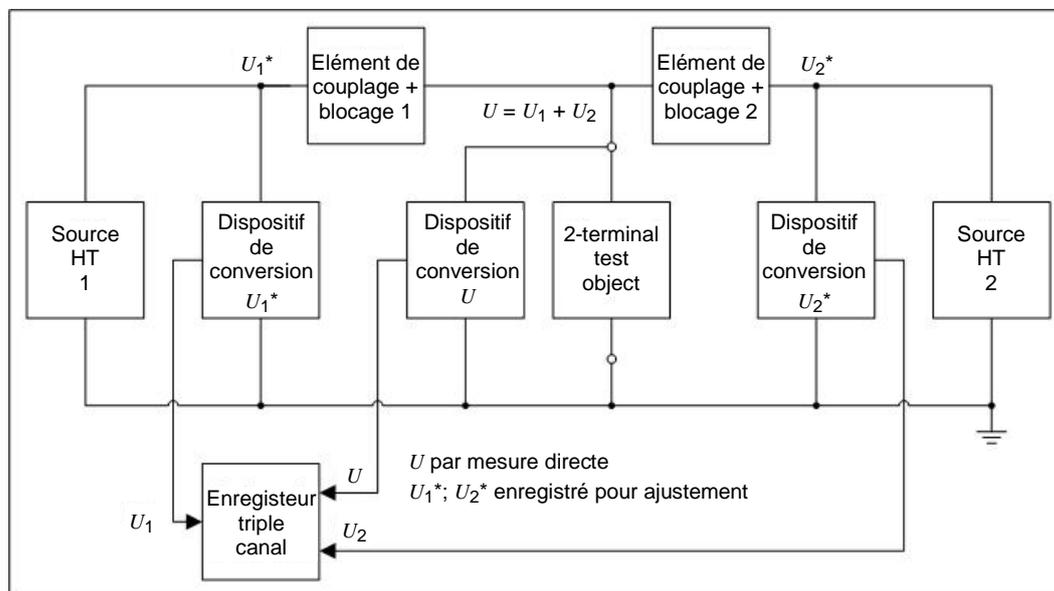


Figure 17 – Circuit pour un essai sous tension composite

9.2.4 Tolérances

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, une différence de $\pm 5\%$ entre une tension spécifiée et la tension réellement enregistrée est acceptable.

La tolérance du décalage temporel est de $\pm 0,05 T_p$, T_p étant la durée du front ou durée jusqu'à la crête d'un choc ou un quart d'un cycle d'une tension alternative. T_p est la plus longue durée des deux tensions impliquées.

9.2.5 Génération

Pour la génération, les deux sources uniques de tension sont connectées, chacune par l'intermédiaire d'un élément de protection, à l'une des bornes HT de l'objet en essai (Figure 15). L'élément de protection doit être choisi de sorte que la source associée, dans le cas d'une décharge disruptive de l'objet en essai, soit protégée contre les contraintes de tension de l'autre source.

En raison du couplage des deux sources, les formes et les amplitudes des deux composantes de tension différeront de celles générées par les mêmes sources utilisées séparément. Les limites autorisées pour la chute de tension sur la composante doivent être spécifiées par le Comité d'études concerné

NOTE Voir par exemple la CEI 62271-1[E5].

9.2.6 Mesure

Les deux systèmes de mesure de tension disposés entre chacune des bornes HT de l'objet en essai et la terre doivent satisfaire aux exigences de la CEI 60060-2 pour la mesure des deux composantes de tension, parce que les systèmes sont couplés. Voir Figure 15. Il est recommandé de les enregistrer au moyen d'un enregistreur double-canal conforme à la

CEI 61083-1 qui permet l'évaluation directe de la tension combinée à partir de ses deux composantes de tension. Le résultat peut être présenté comme sur la Figure 16a.

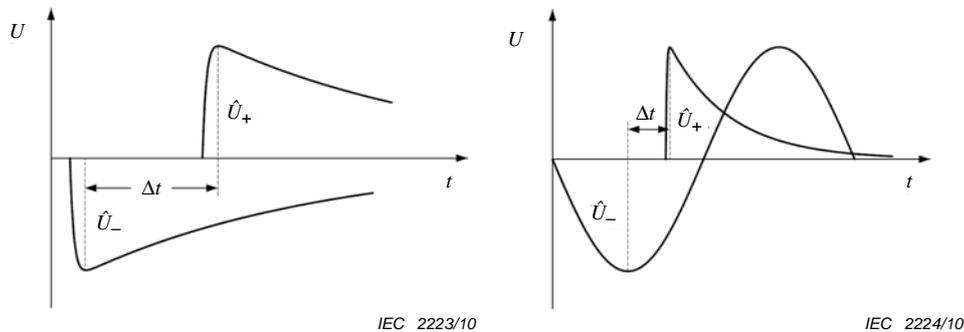


Figure 18a – Combinaison de deux tensions de choc

Figure 18b – Combinaison d'une tension de choc et d'une tension alternative à fréquence industrielle

Figure 18 – Définition du retard de temps Δt

9.3 Tensions d'essai composites

9.3.1 Paramètres

Une tension d'essai composite, générée par deux composantes de tension, les deux conformes à la présente norme, doit être caractérisée par les paramètres suivants:

- sa valeur de tension;
- le retard de temps;
- les paramètres de ses deux composantes selon les articles correspondants de la présente norme.

9.3.2 Tolérances

Sauf spécification contraire du Comité d'études concerné, une différence de $\pm 5\%$ entre une tension spécifiée et la tension réellement enregistrée est acceptable.

La tolérance du décalage temporel est de $\pm 0,05 T_p$, T_p étant la durée du front ou durée jusqu'à la crête d'un choc ou un quart d'un cycle d'une tension alternative. T_p est la plus longue durée des deux tensions impliquées.

9.3.3 Production

Pour la génération, les deux sources uniques de tension sont connectées ensemble et la borne HT de l'objet en essai est au niveau du point de connexion. Voir Figure 17. Chaque connexion est réalisée par un élément, qui couple une tension et bloque l'autre. On doit tenir compte de l'interaction des deux sources. Pour les sources elles-mêmes, voir les articles applicables de la présente norme.

9.3.4 Mesure

La tension et la caractéristique temporelle de la tension composite doivent être mesurées par rapport à la terre avec un système de mesure placé au point de connexion de l'objet en essai. Voir Figure 17. Le système de mesure doit satisfaire aux exigences de la CEI 60060-2 pour les deux composantes de tension. Il est recommandé de mesurer également directement la tension de sortie de chaque source de tension (voir Figure 17) et d'enregistrer les trois tensions de manière synchronisée.

9.4 Procédures d'essai

Les procédures d'essai et la disposition des objets en essai avec les tensions combinées et composites sont laissées à l'initiative du Comité d'études concerné.

Pour les corrections atmosphériques, le paramètre g (4.3.4.3) doit être calculé en tenant compte de la valeur de la tension d'essai combinée ou composite. Les paramètres k_1 et k_2 (4.2.4.1 et 4.2.4.2) doivent être les plus élevés de l'essai et appliqués aux deux.

Annexe A (informative)

Traitement statistique des résultats d'essais

A.1 Classification des essais

Les procédures d'essais de décharge disruptive peuvent être réparties en trois classes en vue de l'évaluation statistique.

A.1.1 Classe 1: Essais à paliers multiples (Figure A.1)

Dans un essai de Classe 1, n_i applications de tension (par exemple des tensions de chocs de foudre), causant $k_i < n_i$ décharges disruptives, sont appliquées à chacun des m paliers de tension, U_i ($i = 1, 2, \dots, m$), la différence entre les paliers de tension adjacents étant de $\Delta U = U_{i+1} - U_i$ ($i = 1, 2, \dots, m-1$). Si cette procédure s'applique généralement avec les tensions de choc, les essais sous tension alternative ou continue avec durée de contrainte spécifiée font aussi partie de cette classe.

NOTE Il convient de sélectionner les paramètres comme suit: $m \geq 5$, $n_i \geq 10$ pour tout $i = 1, 2, \dots, m$; $\Delta U = (0,01 \text{ à } 0,06) U_{50}$.

Les résultats d'essais sont les n_i applications de tension et le nombre correspondant, k_i , de décharges disruptives à chaque palier de tension U_i ($i = 1, 2, \dots, m$).

A.1.2 Classe 2: Essais de montée et descente (Figure A.2)

Un essai de Classe 2 consiste à appliquer m groupes acceptés de n tensions sensiblement égales à des niveaux de tension U_i ($i = 1, 2, \dots, m$). Le niveau de tension pour chaque groupe successif de contraintes est augmenté ou diminué d'une faible quantité ΔU , selon le résultat du précédent groupe de contraintes.

On utilise en général deux procédures d'essai: la procédure de tenue qui vise à déterminer des niveaux de tension correspondant à de faibles probabilités de décharges disruptives et la procédure de décharge qui détermine les niveaux de tension correspondant à des probabilités élevées de décharges disruptives. Dans l'essai de tenue, le niveau de tension est augmenté d'une quantité ΔU si on n'observe aucune décharge disruptive dans un groupe de n applications de tension; dans le cas contraire le niveau de tension est diminué de la même quantité. Dans la procédure de décharge, le niveau de tension est augmenté de ΔU s'il se produit une ou plusieurs tenues, dans le cas contraire le niveau est diminué de la même quantité.

Si $n = 1$, les deux procédures convergent vers la procédure de l'essai de tension de décharge disruptive à 50 % de montée-descente.

Des essais sont également effectués avec d'autres valeurs de n pour déterminer des tensions correspondant à d'autres probabilités de décharge disruptive. Les résultats sont les nombres k_i des groupes de tensions appliquées aux niveaux de tension U_i . Le premier niveau U_1 à considérer est celui auquel au moins deux groupes précédents de contraintes ont été appliqués. Le nombre total de groupes utiles est $m = \sum_{i=1}^l k_i$ aux niveaux de tension $i = 1 \dots l$.

NOTE Les essais avec $n = 7$ donnent les tensions de décharges disruptives à 10 % et 90 % qui sont respectivement définies en tant que tensions de tenue et tensions disruptives (voir 7.3.1.4). Il convient que les autres paramètres soient choisis comme suit $\Delta U = (0,01 \text{ à } 0,03) U_{50}$ et $m > 15$.

A.1.3 Classe 3: Essais de contraintes progressives (Figure A.3)

Un essai de Classe 3 consiste en n répétitions d'une procédure conduisant toujours à une décharge disruptive sur l'objet en essai. La tension d'essai peut être augmentée en continu ou par paliers jusqu'à apparition d'une décharge disruptive à une tension U_i ou elle peut être maintenue constante jusqu'à observation d'une décharge disruptive au temps t_i . Les résultats sont les n valeurs de tension U_i ou de temps t_i correspondant à l'apparition de la décharge disruptive ($n \geq 10$).

De tels essais sont réalisés avec des tensions de choc augmentées de manière continue ou par paliers et des tensions de choc alternatives ou augmentées par palier. On trouve en particulier dans cette classe les essais conduisant à des décharges disruptives sur le front du choc.

A.2 Comportement statistique d'une décharge disruptive

Pour une procédure d'essai donnée, quand la probabilité p de décharge disruptive ne dépend que de la valeur U de la tension d'essai, le comportement de l'objet en essai peut être caractérisé par une fonction $p(U)$ déterminée par les processus de développement de la décharge. En pratique, cette fonction, la fonction de probabilité de décharge disruptive, peut être représentée mathématiquement par une fonction de distribution de probabilité théorique caractérisée par au moins deux paramètres, par exemple U_{50} et s . U_{50} est l'estimation de la tension de décharge à 50 % pour laquelle $p(U) = 0,5$ et s est l'estimation de l'écart type (voir 3.4.4 et 3.4.6).

NOTE 1 Des exemples de $p(U)$ peuvent être déduits des fonctions de distribution de probabilité Gaussienne (ou normale), de Weibull ou de Gumbel. L'expérience pratique montre que l'on peut considérer que pour $0,16 < p < 0,84$, la plupart des fonctions de distribution théoriques sont équivalentes. Pour plus de détails, voir les documents de référence [A1 à A4].

NOTE 2 Dans certains cas, p est une fonction de deux paramètres ou plus, par exemple U et dU/dt . Dans de tels cas, aucune fonction simple ne peut être utilisée pour décrire p . Pour plus de détails, voir les documents de référence [A1 à A4].

La fonction $p(U)$ et les paramètres U_{50} et s peuvent être estimés à partir d'essais comportant un nombre suffisant d'applications de tension, à condition que les caractéristiques de l'objet en essai restent constantes tout au long des essais. En pratique le nombre d'applications de tension est en général limité et les estimations de U_{50} et s , conditionnés par des hypothèses sur la forme de $p(U)$, sont sujets à des incertitudes statistiques.

A.2.1 Limites de confiance

Si un paramètre y est estimé à partir de n résultats d'essais on peut définir des limites de confiance supérieure et inférieure (y_{upper} et y_{lower}) avec une probabilité C pour que la valeur vraie de y se trouve à l'intérieur de ces limites. C est également appelé niveau de confiance et la plage (y_{upper} à y_{lower}) définit la largeur de la bande de confiance.

En général C est égal à 0,95 ou 0,90 et les limites correspondantes sont respectivement appelées limites de confiance à 95 % ou à 90 %.

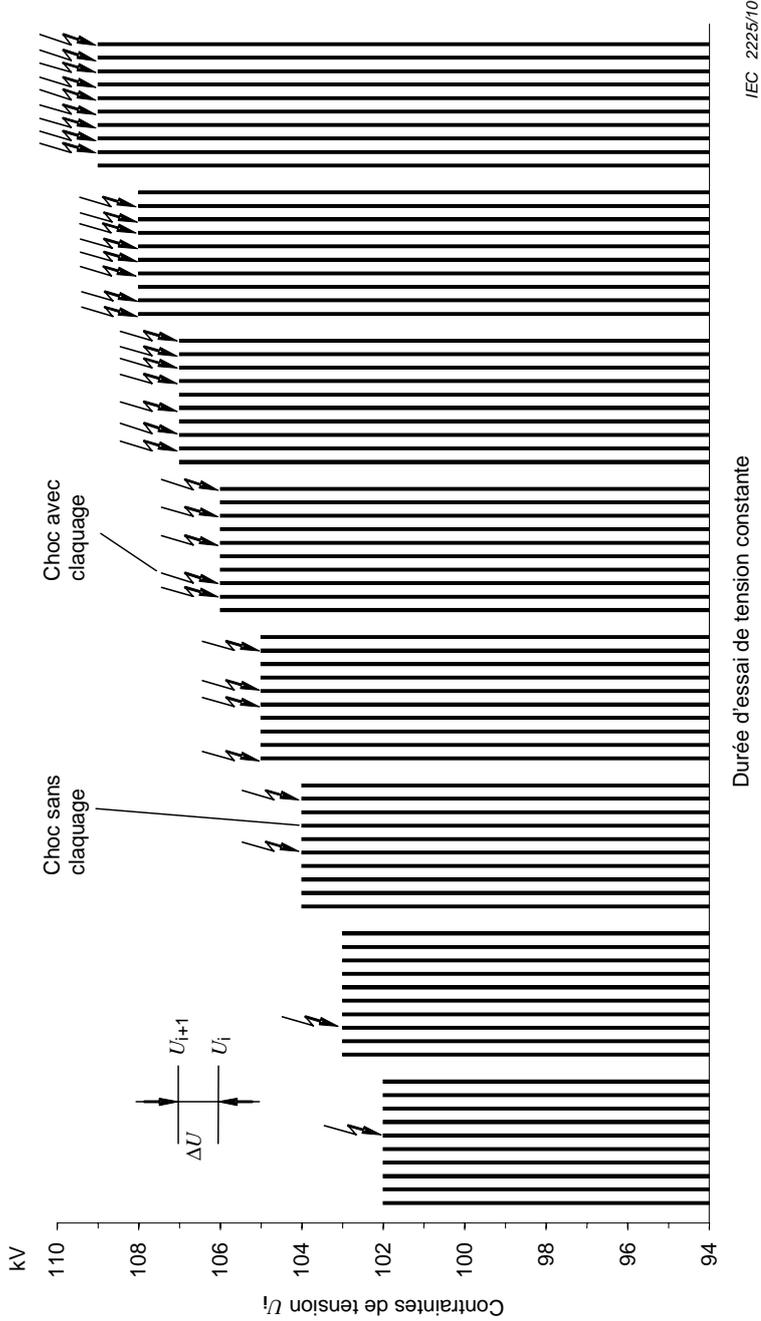
Pour une valeur de C donnée, la largeur de la bande de confiance dépend à la fois de n et de la valeur de l'écart type s . Il convient que l'écart type s soit estimé si possible à partir d'essais réalisés dans des conditions réalistes. En général, plus le nombre d'essais réalisés est élevé meilleure est l'estimation de s . Toutefois, lors d'une série d'essais prolongée il convient de se souvenir que les conditions ambiantes peuvent changer jusqu'à altérer le bénéfice en précision obtenu par l'augmentation du nombre d'essais.

Étant donné qu'il n'est pas possible d'obtenir une estimation précise de s à partir d'une série d'essais limitée, les Comités d'études concernés donnent le plus souvent des valeurs estimées déduites d'un grand ensemble de résultats d'essais.

A.3 Analyse des résultats d'essais

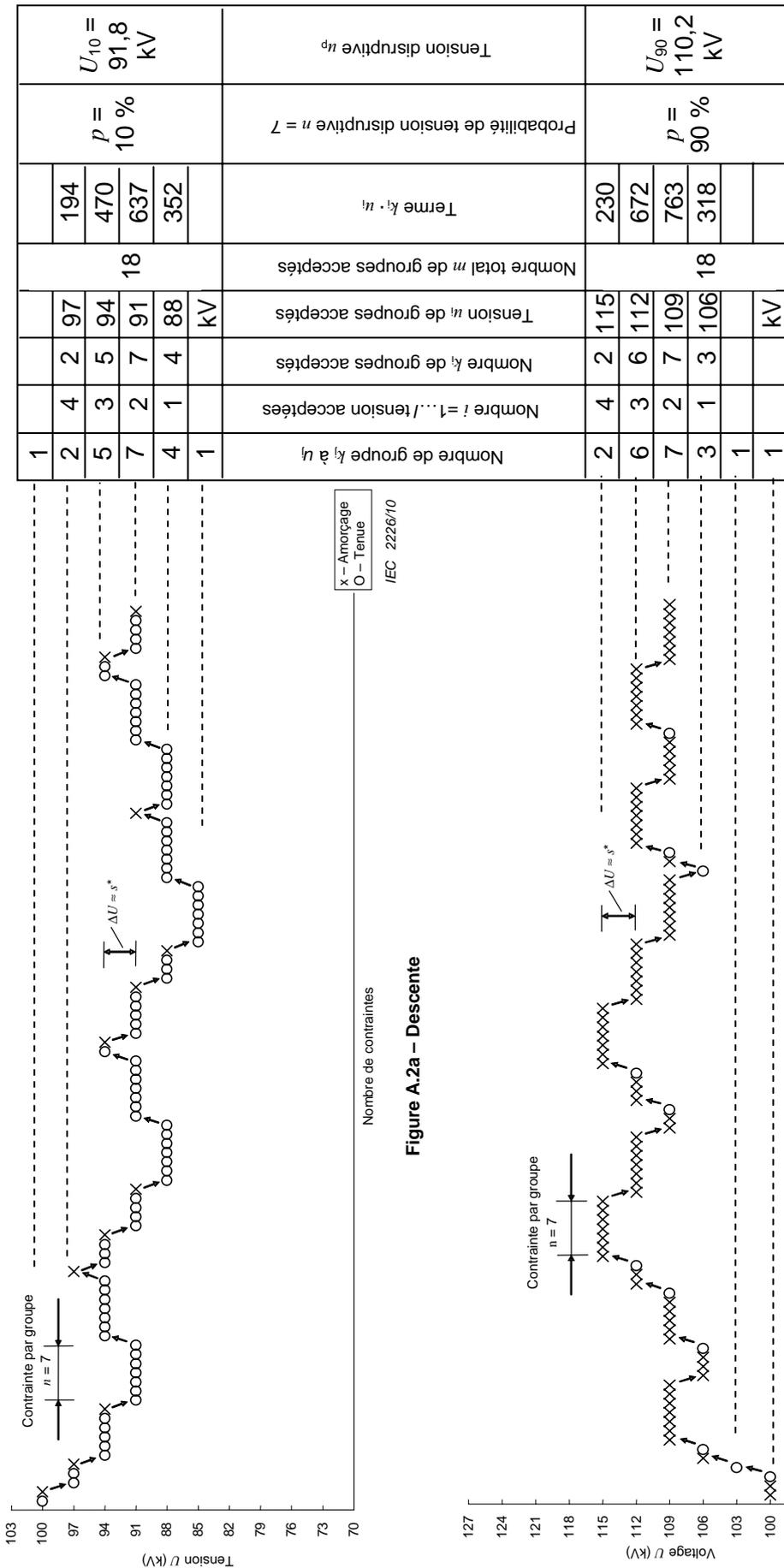
Cet article s'applique aux cas où l'on peut considérer que les résultats des essais sont des estimations indépendantes c'est-à-dire lorsque le résultat d'un essai n'est pas influencé par les événements liés à tout essai réalisé auparavant.

NOTE Pour vérifier l'indépendance d'une série de résultats d'essais, voir les documents de référence [A1 à A4].



nombre de contraintes de tension, i	1	2	3	4	5	6	7	8
nombre d'applications de tensions, n_i	10	10	10	10	10	10	10	10
nombre de décharges disruptives, k_i	1	1	2	4	5	7	8	9
fréquence de décharge disruptive, $f_i = k_i/n_i$	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
décharges disruptives totales, g	1	2	4	8	13	20	28	37

Figure A.1 – Exemple d'essai à paliers multiples (Classe 1)



X - Amorçage
O - Tenue
IEC 2226/10

Figure A.2a - Descente

IEC 2227/10

Nombre de contraintes

Figure A.2b - D'augmentation

Figure A.2 - Exemples d'essais de diminution (Classe 2) et augmentation de haut en bas, pour la détermination des probabilités de décharges disruptives à 10 % et 90 % respectivement

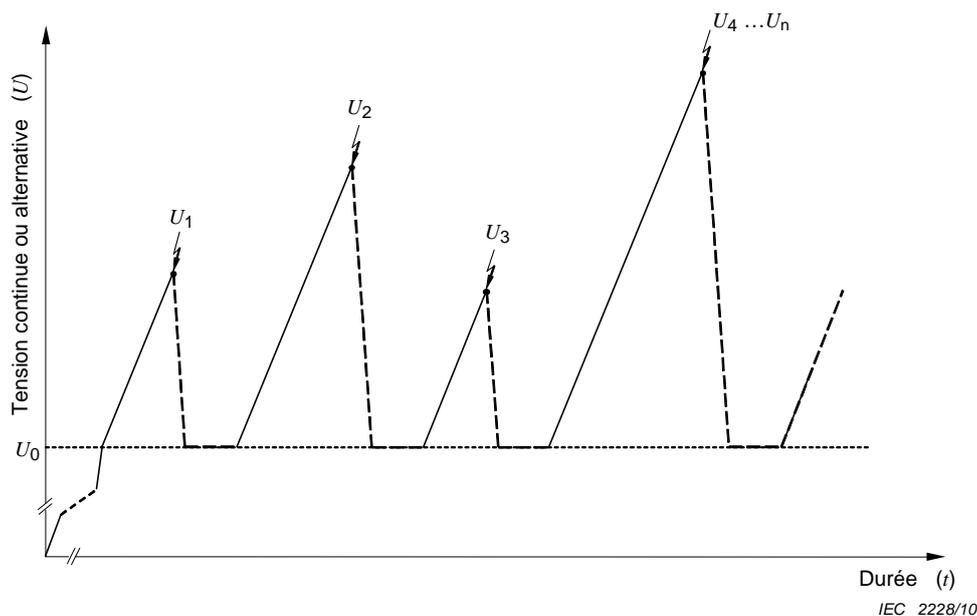


Figure A.3a – Augmentation de tension continue

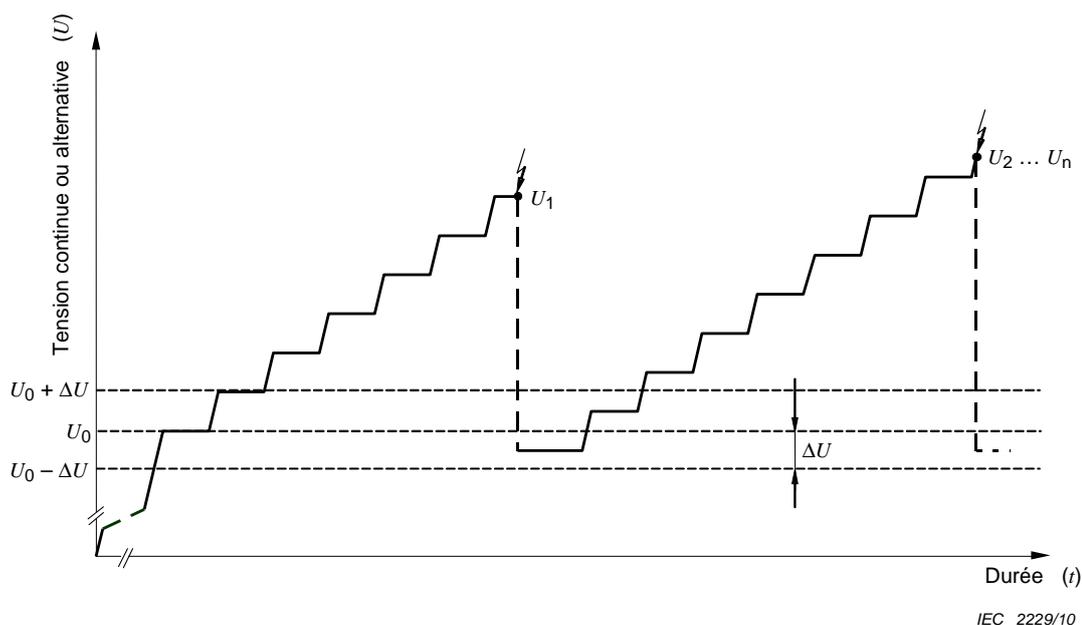


Figure A.3b – Augmentation disposée en gradins de tension

Figure A.3 – Exemples d’essais de contraintes progressives (Classe 3)

A.3.1 Traitement des résultats à partir des essais de Classe 1

Dans ce cas, on considère que la fréquence de décharge $f_i = d_i/n_i$ à un niveau de tension U_i ($i = 1, 2, \dots, m$) est une estimation de $p(U_i)$, probabilité de décharge au niveau de tension U_i . Les m estimations de $p(U_i)$ obtenues dans un essai de Classe 1 peuvent ensuite être ajustées à une fonction présumée $p(U)$ de distribution de probabilité et ses paramètres U_{50} et $s = U_{50} - U_{16} = U_{84} - U_{50}$ sont déterminés.

Ceci est habituellement réalisé en traçant f_i en fonction de U_i sur un papier graphique spécial qui donne une ligne droite quand les estimations de la probabilité obéissent à une fonction donnée $p(U)$ de distribution de probabilité. Un exemple bien connu est celui du papier à

probabilité gaussienne ou normale, qui donne un tracé rectiligne quand les estimations répondent à la fonction de Gauss:

$$p(U) = (1/s\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^U \exp[-(u-U_{50})^2/2s^2] du$$

NOTE 1 Les papiers à probabilité normale n'ont pas d'échelles d'ordonnées englobant les valeurs $p = 0$ ou $p = 1$. En conséquence les résultats d'essais pour des tensions provoquant systématiquement des décharges, c'est-à-dire $d_i = n_i$, ou des essais à des niveaux ne causant aucune décharge, c'est-à-dire $d_i = 0$, ne peuvent pas être reportés directement. On peut utiliser ces résultats en les combinant avec les valeurs obtenues pour un niveau de tension voisin et en leur affectant une tension moyenne pondérée.

À l'heure actuelle, des logiciels utilisant des techniques d'ajustement analytiques, impliquant la méthode des moindres carrés ou la méthode de vraisemblance maximale (voir [A4]), peuvent être utilisés pour trouver U_{50} , s (ainsi que les paramètres d'autres fonctions de distribution appliquées) et les limites de confiance associées de ces estimations. Ils contiennent des méthodes adaptées (par exemple des coefficients de régression classique ou des intervalles de confiance) pour vérifier que la fonction de probabilité estimée s'ajuste avec une précision suffisante sur les points de mesure. Pour plus de détails consulter la littérature pertinente [A1 à A4].

En règle générale, la largeur de l'intervalle de confiance a tendance à varier à l'inverse de la racine carrée du nombre n_i d'applications de tension à chaque niveau U_i , et inversement au nombre m de niveaux d'essai. On peut aussi noter par exemple que si toutes les valeurs de f_i diffèrent de 0 et de 1, avec 10 applications de tension ($n_i = 10$) à chacun des cinq niveaux ($m = 5$), l'intervalle de confiance à 95 % serait:

Pour U_{50} :

$$U_{50}^* - 0,72 s^* \leq U_{50} \leq U_{50}^* + 0,72 s^*$$

et pour s :

$$0,4 s^* < s < 2,0 s^*$$

Où U_{50}^* et s^* sont les estimations de U_{50} et s obtenues par ajustement des résultats d'essais à une fonction présumée de probabilité de décharge $p(U)$.

NOTE 2 La largeur de l'intervalle de confiance tend vers des valeurs basses pour des estimations de U_p au voisinage de $p = 0,5$ ou 50 %.

A.3.2 Traitement des résultats à partir des essais de Classe 2

Un essai de Classe 2 donne une estimation de U_p , tension à laquelle la probabilité de décharge disruptive est p . U_p^* , l'estimation de U_p , est donnée par la formule approximative suivante (pour une formule plus précise, voir la documentation technique):

$$U_p^* = \sum_{i=1}^l (k_i U_i) / m$$

où k_i est le nombre de groupes de contraintes, chacun étant constitué de n applications de tensions au palier de tension U_i et m le nombre total de groupes utiles. La valeur appropriée de n est donnée par les formules ci-dessous pour une probabilité voulue de p . Pour éviter des erreurs importantes, il convient que la valeur de tension la plus faible prise en compte ne diffère pas de U_p^* de plus de $2\Delta U$.

La procédure de tenue décrite en A.1.2 permet d'estimer U_p pour une probabilité de décharge disruptive p donnée par:

$$p = 1 - (0,5)^{1/n}$$

alors que la procédure de décharge donne U_p , pour:

$$p = (0,5)^{1/n}$$

Les valeurs de p pour lesquelles U_p peut être estimée lors d'essais de montée-descente sont limitées en raison de l'exigence qui implique que m soit un entier. Des exemples sont fournis dans le Tableau A.1.

Tableau A.1 – Probabilités de décharge dans les essais de montée et de descente

$n =$	70	34	14	7	4	3	2	1	
$P =$	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,50	(procédure de tenue)
$p =$	0,99	0,98	0,95	0,90	0,85	0,80	0,70	0,50	(procédure de décharge)

Des procédures existent permettant d'estimer s et son intervalle de confiance mais elles ne sont pas recommandées pour une utilisation générale.

A.3.3 Traitement des résultats à partir des essais de Classe 3

Le résultat d'un essai de Classe 3 est en général une série de n tensions U_i à partir de laquelle on doit déterminer les paramètres U_{50} et s d'une fonction de probabilité de décharge disruptive. Pour une distribution gaussienne (ou normale), les estimations des paramètres U_{50} et s sont données par

$$U_{50}^* = \sum U_i / n$$

$$s^* = \left[\sum (U_i - U_{50}^*)^2 / (n - 1) \right]^{1/2}$$

Pour d'autres distributions, on peut employer des méthodes de vraisemblance maximale pour estimer les paramètres concernés (voir Article A.4). Les mêmes expressions et méthodes s'appliquent aux cas où les instants d'apparition d'une décharge disruptive t_j doivent être analysés.

L'intervalle de confiance des distributions gaussiennes (de U_{50}^* et s^*) peut être obtenu à l'aide des distributions du t de Student ou du Chi-deux décrites dans les ouvrages techniques de référence.

A titre d'exemple, dans le cas d'une distribution gaussienne, l'intervalle de confiance à 95 % des estimations de U_{50} et s , obtenues lors d'un essai avec $n = 20$, est:

$$(U_{50}^* - 0,47s^*) \leq U_{50} \leq (U_{50}^* + 0,47s^*)$$

et

$$0,74 s^* \leq s \leq 1,48 s^*$$

A.4 Application des méthodes de vraisemblance maximale

Les méthodes de vraisemblance maximale peuvent être utilisées pour analyser les résultats de toutes les classes d'essais mentionnées ci-dessus par tout type de fonction de probabilité. Ces méthodes permettent l'estimation des paramètres et par conséquent des quantiles de la tension de claquage U_p . De plus, il est possible d'utiliser tous les résultats obtenus et on peut obtenir l'intervalle de confiance correspondant à tout niveau de confiance désiré C . Seul le principe est expliqué ci-dessous. Voir les ouvrages techniques applicables [A1 à A4]. De plus, un logiciel est disponible.

Pour les essais de Classe 1 et de Classe 2, on connaît le nombre de décharges d_i et le nombre de tenues w_i obtenues pour chaque niveau de tension U_i . Si l'on prend comme hypothèse la forme de la fonction de distribution de la probabilité de décharge disruptive par exemple $p(U; U_{50}, s)$, la probabilité de décharge au niveau U_i est $p(U_i; U_{50}, s)$ et la probabilité de tenue est $(1 - p(U_i; U_{50}, s))$. La fonction de vraisemblance L_i correspondant à d_i décharges et w_i tenues apparaissant au niveau de tension U_i est alors:

$$L_i = p(U_i; U_{50}, s)^{d_i} (1 - p(U_i; U_{50}, s))^{w_i}$$

Comme U_i , d_i et w_i sont connues, L_i est une fonction des paramètres (par exemple U_{50} et s) seulement.

La vraisemblance pour un ensemble complet de résultats couvrant n valeurs de U_i devient alors:

$$L = L_1 L_2 \dots L_i \dots L_n = L(U_{50}, s)$$

Pour des essais de Classe 3, avec paliers de tension augmentés par pas, chaque niveau de tension U_i qui apparaît dans les résultats correspond à une décharge disruptive. En général, un niveau de tension U_i apparaîtra m_i fois quand $m_i \geq 1$. La probabilité logarithmique $\log L$ devient:

$$\log L = m_1 \log[f(U_1; U_{50}, s)] + m_2 \log[f(U_2; U_{50}, s)] + \dots + m_n \log[f(U_n; U_{50}, s)]$$

où f caractérise la fonction de densité de probabilité à proximité de U_i ($i = 1, \dots, n$).

On peut trouver dans les ouvrages techniques des méthodes pour calculer L à partir d'un ensemble étendu de résultats, en considérant des groupes de résultats sur un certain nombre d'intervalles de tension.

Les meilleurs estimations des paramètres (par exemple U_{50} , s) sont les valeurs (U_{50}^* et s^*) qui donnent une valeur maximale de L . Ceci doit être réalisé au moyen de méthodes numériques. Des logiciels connexes sont disponibles.

Les maximums peuvent être obtenus avec un ordinateur par des calculs répétés de L pour des valeurs présumées de paramètres (U_{50}^* et s^*). Les estimations des paramètres étant fixées, U_p correspondant à toute valeur souhaitée p de la probabilité de décharge disruptive, peut être trouvée à partir de la fonction présumée de probabilité de décharge disruptive. On trouve dans les ouvrages techniques des méthodes pour déterminer l'intervalle de confiance de U_{50}^* et s^* . Dans le cas où $C = 0,9$, l'équation: $L(U_{50}; s) = 0,1 L_{\max}$ permet de déterminer ces intervalles de confiance.

NOTE En plus de l'analyse fondée sur la distribution gaussienne (voir A.3.1) la méthode de vraisemblance maximale donne aussi des résultats fiables pour d'autres fonctions de distribution de probabilité théorique, par exemple la distribution de Weibull ou de Gumbel. Pour plus de détails, voir les documents de référence et les logiciels disponibles.

A.5 Documents de référence

- [A1] CARRARA, G., and HAUSCHILD, W. *Statistical evaluation of dielectric test results*. Electra No. 133 (1990), pp. 109-131.
- [A2] YAKOV, S. *Statistical analysis of dielectric test results*. CIGRE Brochure No. 66 (1991)
- [A3] HAUSCHILD, W., and MOSCH, W. *Statistical Techniques for HV Engineering*. IEE Power Series No. 13, Peter Peregrinus Ltd., London, 1992
- [A4] VARDEMAN, S. B. *Statistics for Engineering Problem Solving*. IEEE Press/PWS Publishing Company, Boston, 1994

Annexe B (normative)

Procédures de calcul des paramètres des tensions de chocs de foudre normalisées avec superposition de dépassement ou d'oscillations

B.1 Remarques générales

La présente annexe décrit des procédures de calcul des paramètres de toutes les tensions de chocs de foudre plein, y compris celles avec superposition de dépassement. La base est donnée à l'Article B.2, la méthode normalisée sur laquelle sont fondées les définitions des paramètres est donnée à l'Article B.3, et une autre méthode manuelle est donnée à l'Article B.4. La procédure pour le traitement des chocs coupés sur la queue est donnée à l'Article B.5.

D'autres méthodes sont autorisées sous réserve que l'utilisateur estime l'incertitude que la méthode apporte à l'incertitude combinée et que l'incertitude combinée reste dans les limites fixées dans la CEI 60060-2. La mise en œuvre de la méthode utilisée doit satisfaire aux exigences de la CEI 61083-2.

B.2 Base des procédures

La procédure est fondée sur l'équation empirique:

$$U_t = U_b + k(f)(U_e - U_b) \quad (\text{B.1})$$

qui décrit la tension d'essai, U_t , à laquelle l'isolation est soumise, sous la tension de choc de foudre avec une amplitude de dépassement, β .

où:

U_b est la valeur maximale de la courbe de référence,

U_e , est la valeur maximale de la courbe d'origine enregistrée sans bruit, et la fonction de tension d'essai est une fonction qui dépend de la fréquence donnée par:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2} \quad (\text{B.2})$$

où f est la fréquence en MHz.

B.3 Procédure pour l'évaluation des paramètres des chocs de foudre pleins

Cette procédure est une mise en œuvre de l'Équation (1), et elle est utilisée pour les calculs assistés par ordinateur pour les chocs enregistrés numériquement. La procédure est utilisée pour obtenir la courbe de tension d'essai à partir de laquelle les paramètres de choc sont calculés.

Les étapes de la procédure sont:

- a) trouver le niveau de base de la courbe enregistrée en calculant la moyenne des valeurs de tension à partir de la partie plate au début de l'enregistrement lorsque la tension d'entrée est nulle;

- b) supprimer le décalage du niveau de base par rapport à la courbe enregistrée, $U(t)$, pour obtenir la courbe enregistrée compensée en décalage, $U_0(t)$, et utiliser cette courbe pour les étapes restantes;
- c) trouver la valeur extrême, U_e , de la courbe enregistrée compensée en décalage, $U_0(t)$ (Figure B.1);
- d) trouver le dernier échantillon sur le front ayant une valeur de tension inférieure à 0,2 fois la valeur extrême, U_e ;
- e) trouver le dernier échantillon sur la queue ayant une valeur de tension supérieure à 0,4 fois la valeur extrême, U_e ;
- f) choisir des données en partant de l'échantillon après l'échantillon déterminé à l'étape d), jusqu'à l'échantillon déterminé à l'étape e) inclus pour une analyse complémentaire;

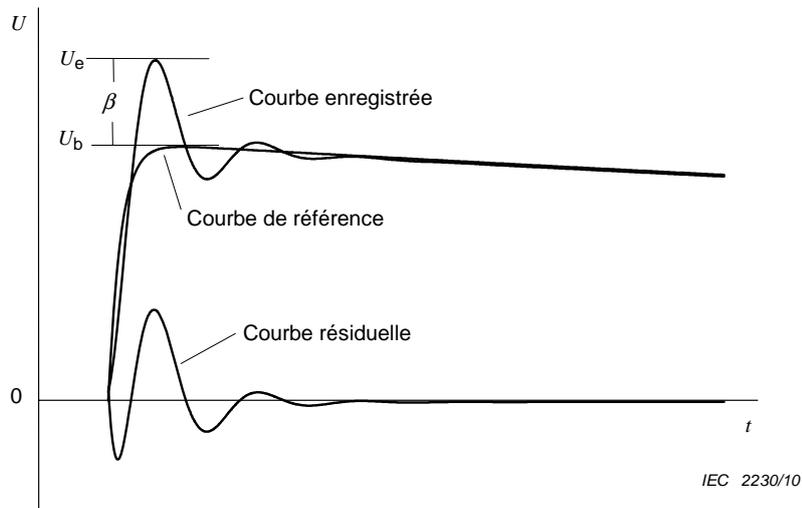


Figure B.1 – Courbe enregistrée et courbe de référence montrant le dépassement et la courbe résiduelle

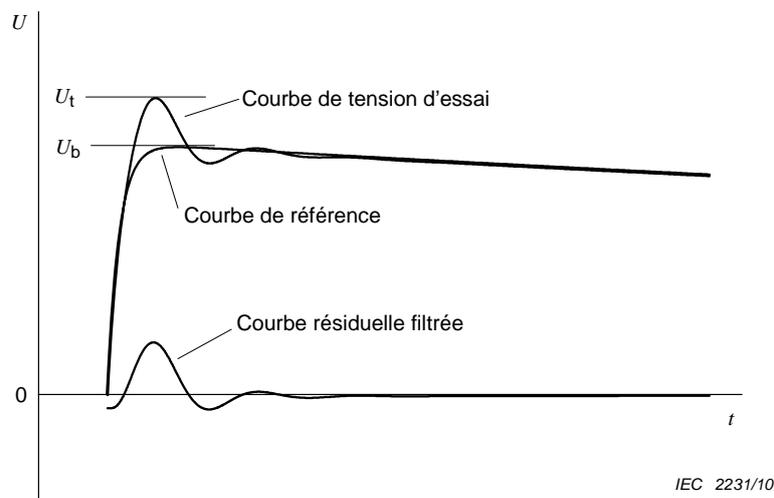


Figure B.2 – Courbe de tension d'essai (somme de la courbe de référence et de la courbe résiduelle filtrée)

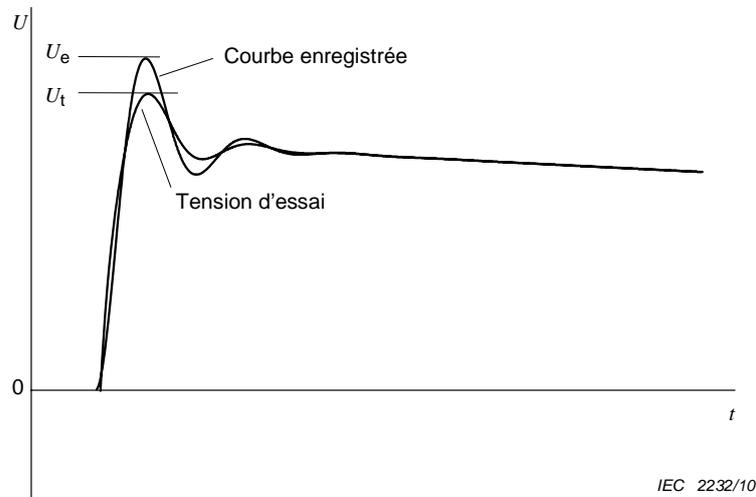


Figure B.3 – Courbes enregistrée et de tension d'essai

g) ajuster la fonction suivante aux données choisies à l'étape f) (voir Article C.1):

$$u_d(t) = U \left(e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right)$$

t est ici le temps, $u_d(t)$ est la fonction de tension. U , τ_1 , τ_2 et t_d sont les paramètres à trouver par ajustement²;

- h) construire la courbe de référence, $U_m(t)$, de la forme d'onde, en utilisant les valeurs nulles pour les points échantillons jusqu'au temps t_d (comme calculé à l'étape g) et les valeurs de $u_d(t)$ pour des points échantillons allant du temps t_d jusqu'à l'instant du dernier échantillon défini à l'étape e) (voir Figure B.1);
- i) soustraire la courbe de référence $U_m(t)$ de la courbe enregistrée compensée en décalage, $U_0(t)$ pour obtenir la courbe résiduelle $R(t) = U_0(t) - U_m(t)$ (voir Figure B.2);
- j) créer un filtre numérique (voir Article C.2) avec sa fonction transfert $H(f)$ égale à celle définie par la fonction de tension d'essai $k(f)$ (Équation B.2);
- k) appliquer le filtre numérique à la courbe résiduelle $R(t)$ pour obtenir la courbe résiduelle filtrée $R_f(t)$ (voir Figure B.2);
- l) ajouter la courbe résiduelle filtrée $R_f(t)$ à la courbe de référence $U_m(t)$ pour obtenir la courbe de tension d'essai, $U_t(t)$;
- m) calculer la valeur de la tension d'essai, U_t , et les paramètres temporels à partir de la courbe de tension d'essai (voir Figure B.2)
- n) trouver la valeur maximale U_b de la courbe de référence $U_m(t)$ (voir Figure B.2);
- o) calculer l'amplitude de dépassement relatif, $\beta' = 100 \frac{U_e - U_b}{U_e} \%$;
- p) afficher la courbe enregistrée compensée en décalage, $U_0(t)$, et la courbe de tension d'essai $U_t(t)$ (voir Figure B.3);
- q) déterminer et consigner les valeurs de la tension d'essai, U_t , du temps de front, T_1 , de la durée jusqu'à mi-valeur, T_2 , et de l'amplitude de dépassement relatif, β' .

² U est la constante d'amplitude, τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps de la forme d'onde et t_d est le retard de temps entre l'origine de la courbe ajustée et le point de déclenchement de la courbe enregistrée.

B.4 Procédure pour le calcul manuel à partir des formes d'onde graphiques

Cette procédure est une mise en œuvre de l'Équation (B.1), et elle est utilisée pour le calcul manuel des paramètres de chocs à partir des formes d'ondes en format graphique.

NOTE Une évaluation manuelle conduira à des résultats moins précis par rapport à la procédure de calcul à partir des formes d'ondes numériques.

Les étapes de la procédure sont:

- a) tracer manuellement une courbe de référence, $U_m(t)$, traversant la courbe enregistrée, $U(t)$, de manière à supprimer les oscillations sur le front et la crête;
- b) trouver la valeur maximale de $U_m(t)$, U_b ;
- c) trouver la valeur maximale U_e de la courbe enregistrée $U(t)$;
- d) calculer la durée, t , du dépassement en recherchant la différence des valeurs temporelles en deux points d'intersection des courbes $U(t)$ et $U_m(t)$ des deux côtés de la crête maximale de $U(t)$, et calculer la fréquence de dépassement $f_0 = 1/2t$;
- e) calculer la valeur de la fonction de tension d'essai $k(f)$ à partir de l'Équation (B.2);
- f) calculer la valeur de la tension d'essai, U_t en utilisant l'Équation (B.1);
- g) calculer l'amplitude de dépassement relatif, $\beta' = 100 \cdot \frac{U_e - U_b}{U_e} \%$;
- h) déterminer les paramètres temporels à partir de la courbe de référence utilisant U_t comme tension de crête pour déterminer les valeurs à 30 %, 90 % et 50 %;
- i) consigner la valeur de la tension d'essai, U_t , le temps de front, T_1 , la durée jusqu'à mi-valeur, T_2 , et l'amplitude de dépassement relatif, β' .

B.5 Procédure pour l'évaluation des paramètres des chocs de foudre coupés sur la queue

Cette procédure est une adaptation de l'algorithme donné à l'Article B.2 pour l'évaluation des chocs de foudre pleins. Cette procédure peut être utilisée lorsque la coupure intervient après 95 % du niveau de la valeur extrême.

Pour cette procédure adaptée, deux enregistrements sont nécessaires:

- 1) Le choc coupé sur la queue à évaluer.
- 2) Un choc de référence plein enregistré (généralement) sur une tension plus faible sans changement de montage.

La procédure est:

Appliquer les étapes de a) à c) à la fois au choc de référence plein et au choc coupé:

- a) trouver le niveau de base de la courbe enregistrée en calculant la moyenne des valeurs de tension à partir de la partie plate au début de l'enregistrement lorsque la tension d'entrée est nulle;
- b) supprimer le décalage du niveau de base de la courbe enregistrée, $U(t)$, pour obtenir la courbe enregistrée compensée en décalage, $U_0(t)$, et utiliser cette courbe pour les étapes restantes;
- c) rechercher la valeur extrême, U_e , de la courbe enregistrée compensée en décalage, $U_0(t)$;

Appliquer les étapes d) à h) au choc de référence plein:

- d) rechercher le dernier échantillon sur le front ayant une valeur de tension inférieure à 0,2 fois la valeur extrême, U_e ;

- e) rechercher le dernier échantillon sur la queue ayant une valeur de tension supérieure à 0,4 fois la valeur extrême, U_e ;
- f) choisir des données en partant de l'échantillon qui suit l'échantillon déterminé à l'étape d), jusqu'à l'échantillon déterminé à l'étape e) inclus pour une analyse complémentaire;
- g) ajuster la fonction suivante aux données choisies à l'étape f):

$$u_d(t) = U \left(e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right)$$

Ici t est le temps, $u_d(t)$ est la fonction de tension, et U , τ_1 , τ_2 et t_d sont les paramètres à trouver par ajustement;

- h) construire la courbe de référence, $U_m(t)$, de la forme d'onde, en utilisant des valeurs nulles pour les points échantillons jusqu'au temps t_d (comme défini à l'étape d) et les valeurs de $u_d(t)$ pour des points échantillons à partir du temps t_d jusqu'au temps du dernier échantillon défini à l'étape e);

Appliquer les étapes 1) à 7) au choc coupé sur la queue:

- 1) rechercher l'instant de la coupure;
 - 2) rechercher le point où la forme d'onde coupée commence à dévier de la forme d'onde de référence pleine;
 - 3) sélectionner les données jusqu'à ce point inclus pour analyse complémentaire;
 - 4) trouver le décalage de temps t_L entre les enregistrements de choc de référence plein et coupé (par exemple en utilisant des techniques de corrélation croisée, ou en adaptant les niveaux à 30 % 50 % et 80 % sur le front);
 - 5) régler le décalage de temps entre les chocs pleins et coupés à zéro;
 - 6) rechercher le rapport E entre les amplitudes des chocs coupés et pleins (par exemple en divisant les valeurs de crête, ou en divisant les valeurs moyennes calculées sur l'intervalle spécifié sur les deux enregistrements);
 - 7) réduire de ce facteur E l'amplitude de la courbe de référence.
- i) soustraire la courbe de référence réduite $U_m(t)$ de la courbe enregistrée compensée en décalage, $U_0(t)$ pour obtenir la courbe résiduelle $R(t) = U_0(t) - U_m(t)$;
 - j) créer un filtre numérique (voir Annexe C) avec sa fonction de transfert $H(f)$ égale à celle définie par la fonction du facteur de tension d'essai $k(f)$ (Équation (B.2));
 - k) appliquer le filtre numérique à la courbe résiduelle $R(t)$ pour obtenir la courbe résiduelle filtrée $R_f(t)$;
 - l) ajouter la courbe résiduelle filtrée $R_f(t)$ à la courbe de référence $U_m(t)$ pour obtenir la courbe de tension d'essai, $U_t(t)$;
 - m) calculer la valeur de la tension d'essai, U_t , et les paramètres de temps à partir de la courbe de tension d'essai
 - n) trouver la valeur maximale U_b de la courbe de référence $U_m(t)$;
 - o) calculer l'amplitude de dépassement relatif, $\beta' = 100 \cdot \frac{U_e - U_b}{U_e}$ %;
 - p) afficher la courbe enregistrée $U(t)$, et la courbe de tension d'essai $U_t(t)$.
 - q) consigner la valeur de la tension d'essai, U_t , le temps de front, T_1 , la durée jusqu'à coupure, T_C , et l'amplitude de dépassement relatif, β' .

Annexe C
(informative)

**Directives pour la mise en œuvre d'un logiciel d'évaluation
des paramètres de tension de choc de foudre**

C.1 Directives pour la mise en œuvre de l'ajustement à la courbe de référence

La fonction à ajuster à la courbe de référence possède quatre paramètres libres (U , τ_1 , τ_2 et t_d):

$$u_d(t) = U \left(e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_1}} - e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_2}} \right) \tag{C.1}$$

L'algorithme de Levenberg-Marquardt et ses dérivés ont été utilisés avec succès pour ajuster cette fonction sur la courbe enregistrée. Au moins les ensembles logiciels suivants ont été utilisés dans ce but:

Ensemble logiciel (version essayée)	Fonction utilisée pour l'ajustement
Matlab®. ³ , et sa boîte à outils Optimization (Version 7. 0. 4)	lqscurvefit
GNU Octave ⁴ (Version 3.2.0)	leasqr
LabVIEW™ ⁵ (LabVIEW 8 Professionnel)	Ajustement de courbe non linéaire
LabWindows™/CVI ⁶ (Version 6.0)	NonLinearFit

Le réglage de l'estimation initiale des paramètres libres raccourcit le temps de calcul. L'estimation initiale donnée pour la fonction d'ajustement peut être par exemple:

U : La valeur extrême de la courbe

τ_1 : 70 μ s

³ MATLAB® est le nom de marque d'un produit fourni par The MathWorks, Inc.

⁴ GNU Octave est redistribuable librement selon la Licence Publique générale GNU de John W. Eaton et. al. <http://www.gnu.org/software/octave/>.

⁵ NI LabVIEW™ est le nom de marque d'un produit fourni par National Instruments Corporation.

⁶ NI LabWindows™/CVI est le nom de marque d'un produit fourni par National Instruments Corporation.

Les informations ci-dessus sont données pour aider les utilisateurs de la présente norme et ne constituent pas un entérinement par la CEI du produit mentionné. Des produits équivalents peuvent être utilisés si l'on peut montrer qu'ils conduisent aux mêmes résultats.

τ_2 : 0,4 μ s

t_d : L'origine réelle ou virtuelle de la courbe

La normalisation des données (c'est-à-dire, un changement d'échelle tel qu'à la fois les échelles de tensions et de temps s'étendent approximativement de 0 à 1) s'est révélée améliorer la convergence de l'algorithme. Il est nécessaire de ramener ensuite l'échelle des paramètres ajustés aux échelles de tension et de temps d'origine.

L'algorithme de Newton-Raphson s'est révélé produire des résultats égaux à ceux qui sont obtenus par l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

C.2 Exemple de filtre numérique pour mise en œuvre de la fonction de tension d'essai

Pour la mise en œuvre de la fonction de tension d'essai, un filtre numérique dont la réponse amplitude fréquence est égale à la fonction de tension d'essai (Équation B.2 de l'Annexe B) doit être construit. L'exemple donné ici est une mise en œuvre efficace et précise d'un filtre à réponse impulsionnelle infinie (IIR, en anglais: *Infinite Impulse Response*) à phase nulle. D'autres filtres, tels que les filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR, en anglais: *Finite Impulse Response*) construits par une méthode d'échantillonnage de fréquence ou des algorithmes de conception de filtres de réponses arbitraires à base de fenêtres et des logiciels commerciaux peuvent aussi être utilisés.

Un filtre IIR à phase nulle conçu par calcul direct est décrit en [C1]. Dans cette approche, l'atténuation du filtre n'est que de la moitié de la valeur nécessaire, mais les données traversent deux fois le filtre, une fois dans le sens direct et une fois dans le sens inverse. Ce filtrage donne une valeur de sortie qui est adaptée à la fonction de la tension d'essai avec une erreur d'amplitude et un déphasage négligeables.

Seuls deux coefficients de filtre sont nécessaires pour mettre en œuvre le filtre direct, les équations dérivées données en [C1] pour construire ce filtre sont:

$$\begin{aligned}
 y(i) &= b_0 x(i) + b_1 x(i-1) + a_1 y(i-1) \\
 b_0 &= b_1 = \frac{x}{1+x} \\
 a_1 &= \frac{1-x}{1+x} \\
 x &= \tan\left(\frac{\pi T_S}{\sqrt{a}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{C.2}$$

où a est égal à $2,2 \cdot 10^{-12}$ (point à -3 dB du filtre de facteur K), T_S est l'intervalle d'échantillonnage utilisé lorsqu'on enregistre le signal, $x(i)$ est le groupe d'échantillons d'entrée (tension) vers le filtre et $y(i)$ le groupe d'échantillons de sortie du filtre.

Par exemple, pour un intervalle d'échantillonnage de 10 ns cela donne les coefficients suivants:

$$a_1 = -0,9585113 \text{ et } b_0 = b_1 = 0,02074434$$

Le filtrage est ensuite réalisé deux fois (une fois dans le sens direct et une fois en sens inverse) en utilisant le filtre direct IIR avec l'équation de différence suivante:

$$y(i) = 0,02074434(x(i) + x(i-1)) + 0,9585113y(i-1) \tag{C.3}$$

Pour éviter les problèmes numériques qui se rencontrent souvent pour les filtres IIR, un nombre suffisamment important (dans ce cas de préférence ≥ 6) de chiffres significatifs doit être utilisé pour les coefficients du filtre.

C.3 Documents de référence

- [C1] LEWIN, Paul L., TRAN, Trung N., SWAFFIELD, David J., and HÄLLSTRÖM, Jari K. *Zero Phase Filtering for Lightning Impulse Evaluation: A K-factor Filter for the Revision of IEC60060-1 et -2*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, pages 3-12, January 2008.

Annexe D (informative)

Arrière plan de l'introduction du facteur de tension d'essai pour l'évaluation des chocs avec dépassement

D.1 Version antérieure (CEI 60060-1:1989)

A la fin des années 1980, la plupart des laboratoires utilisaient des oscilloscopes pour enregistrer les chocs et le temps nécessaire pour lire les oscillogrammes et les limites concernant la résolution des oscillogrammes imposaient des restrictions pratiques pour les exigences qui pouvaient être établies pour les laboratoires d'essai. La version antérieure de la norme (CEI 60060-1:1989) classait les tensions de choc de foudre plein en deux classes: tensions de choc de foudre plein lisses et tensions de choc de foudre plein avec oscillations amorties. En pratique, tous les chocs ont une part d'oscillations et l'utilisateur devait recourir à une estimation subjective pour savoir si les oscillations étaient telles qu'il convenait de les traiter comme tensions de choc de foudre plein avec oscillations amorties. Les tensions de choc de foudre plein à oscillations amorties ont été analysées en « traçant une courbe moyenne traversant les oscillations »: l'utilisateur devait recourir à une estimation subjective pour déterminer quelle était la courbe lisse correcte. Une limite de 5 % sur l'« amplitude de crête individuelle » de la valeur de crête (du choc) a été établie.

L'analyse dépendait de la durée ou de la fréquence du dépassement: 19.2 indique:

« Avec certains circuits d'essai, des oscillations ou un dépassement peuvent se produire à la crête du choc si la fréquence de ces oscillations n'est pas inférieure à 0,5 MHz ou si la durée du dépassement n'est pas supérieure à 1 μ s, il convient de tracer une courbe moyenne et, en ce qui concerne la mesure, on considère que l'amplitude maximale de cette courbe est la valeur de crête définissant la valeur de la tension d'essai.

Ceci donnait une transition abrupte mais était accepté comme une méthode raisonnable pour les oscillogrammes lorsque le dépassement était limité à 5 %. Une courbe représentant la transition est indiquée à la Figure D.1.

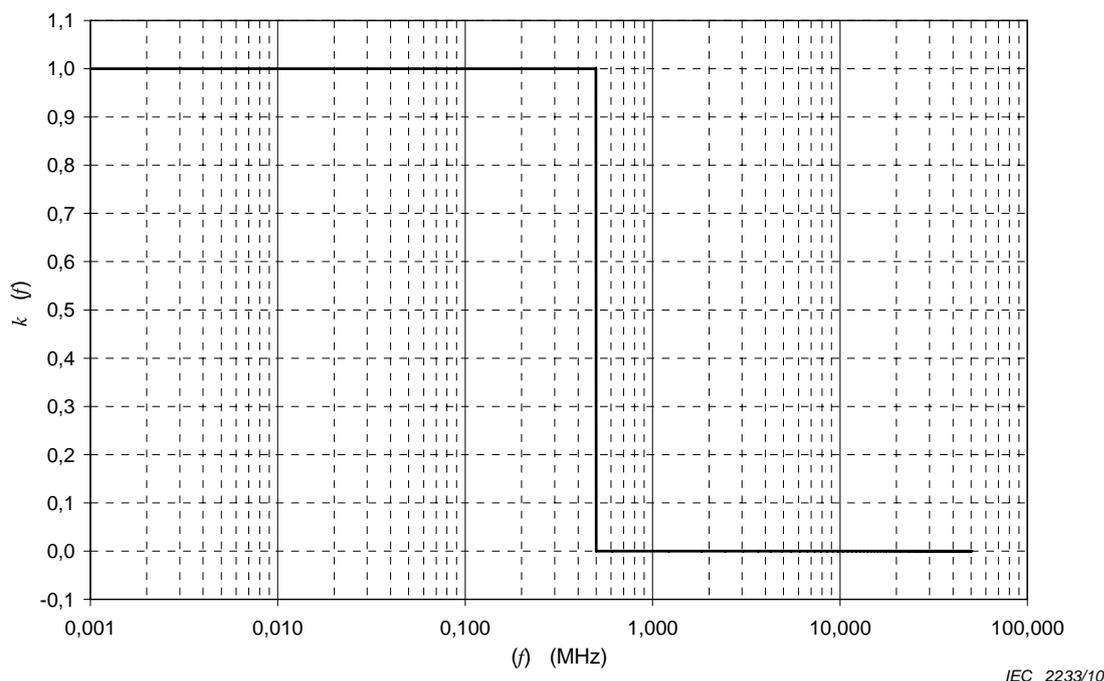


Figure D.1 – Fonction tension d’essai « efficace » dans la CEI 60060:1989

Ceci a généré trois problèmes pour la cohérence de mesure:

- a) La transition brusque entre « valeur maximale » et « maximum de courbe moyenne » conduit à des erreurs très importantes lorsque la fréquence du dépassement est proche de la fréquence de transition de 500 kHz. Cette transition brusque ne décrit pas bien le comportement des matériaux isolants. Il est également difficile de déterminer la fréquence avec précision.
- b) Le choix de la courbe moyenne était subjectif. Ceci a contribué à une incertitude supplémentaire significative dans l’évaluation des paramètres des tensions de choc de foudre plein avec oscillations amorties.
- c) Il n’est pas précisément spécifié comment déterminer si un choc est lisse ou s’il présente une très faible superposition d’oscillations.

L’utilisation des numériseurs s’est répandue au cours des deux dernières décennies. Les numériseurs utilisés avec une analyse logicielle sont capables de fournir une précision bien plus importante que les oscilloscopes mais leur application est entravée par les spécifications imprécises de la CEI 60060-1:1989. Les utilisateurs ont développé un éventail de programmes informatiques qui peuvent être essayés par les formes d’ondes de TDG de la CEI 61083-2 mais leur utilisation pour les essais est encore limitée par les définitions imprécises de la CEI 60060-1:1989. Les différences entre les valeurs des paramètres calculés par un programme informatique particulier et celles données dans la CEI 61083-2 fournissent un élément supplémentaire pour l’estimation de l’incertitude.

D.2 Recherche et développement pour fournir une solution

Au cours des deux dernières décennies, le GT D 1.33 du CIGRÉ (anciennement GT 33.03 du CIGRÉ) a encouragé les travaux pour résoudre ces problèmes et la MT4 du CE 42 de la CEI a travaillé sur ces questions dès l’origine.

Une étude, lancée par la Communauté Européenne, a été menée par 5 instituts de recherche au cours de la période 1997-1999, concernant l'effet des oscillations de fréquence variable et de la superposition d'amplitude sur une tension de choc de foudre plein sur la résistance au claquage de 5 types d'isolation [D1]. La probabilité de tension de claquage a été déterminée pour une tension de choc de foudre plein lisse dont la forme était proche de la somme de deux fonctions de forme exponentielle. La probabilité de tension de claquage a également été déterminée pour le même choc avec superposition d'oscillations de fréquence et d'amplitude variables et la valeur de la tension de choc de foudre plein équivalente a été trouvée. L'effet d'une fréquence avec superposition d'oscillation f est réduit d'un facteur $k(f)$ – à savoir, la valeur de crête du choc équivalent est égale à la valeur de crête du choc lisse appliqué plus $k(f)$ fois la valeur de crête de l'oscillation. Les valeurs de $k(f)$ déterminées de manière expérimentale tracées par rapport à la fréquence sont représentées à la Figure D.2.

Malgré la dispersion des données pour les différents types d'isolation, la conclusion principale était assez claire. L'effet de l'oscillation superposée dépend de la fréquence. En d'autres termes, il existe une transition graduelle, et non abrupte de la dépendance par rapport à la fréquence de l'amplitude de dépassement sur la résistance diélectrique.

Les chercheurs ont introduit le « facteur k », $k(f)$, pour représenter cette transition graduelle. Dans la présente norme, celle-ci est désormais désignée sous le terme fonction de tension d'essai,

$$U_t = U_b + k(f)(U_e - U_b) \quad (\text{D.1})$$

où

U_t , est la valeur de la tension d'essai à déterminer;

U_b est la valeur maximale de la courbe de référence ajustée;

U_e , est la valeur maximale de la courbe d'origine enregistrée.

La valeur de la tension d'essai (U_t) est la valeur maximale de la tension de choc de foudre plein lisse équivalente. La « courbe de tension d'essai » est utilisée pour calculer les paramètres temporels car cette méthode est précise, reproductible et robuste. La courbe de tension d'essai est un artefact mathématique et ce n'est pas la représentation physique du choc de foudre lisse équivalent. Les tolérances importantes sur les paramètres temporels sont fondées sur des décennies d'expérience et les résultats de l'expérimentation européenne confirment le fait que les valeurs des paramètres temporels ne sont pas très critiques pour déterminer le claquage. Ainsi, les nouvelles estimations des paramètres temporels sont suffisamment proches des valeurs qui seraient déterminées en appliquant les anciennes méthodes.

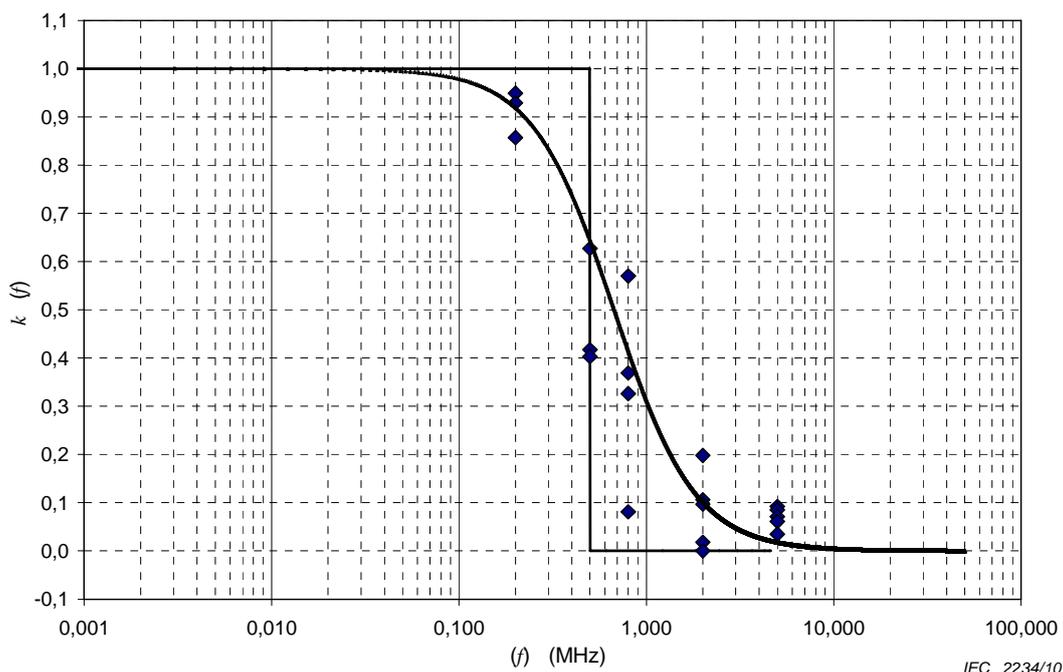


Figure D.2 – Points expérimentaux représentatifs provenant de l’expérimentation européenne et fonction de tension d’essai

Il y a eu beaucoup de débats concernant la formule la mieux adaptée pour $k(f)$ au sein du CIGRÉ. Lorsqu’il a été établi par calcul, que les fréquences de coupure n’avaient pas une grande influence sur les résultats et parce qu’elles se situaient dans les zone extrêmes des fréquences probables de dépassement, une formule simple a été proposée [D2] et a été acceptée pour la norme. Cette formule est la suivante:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2 f^2} \tag{D.2}$$

où f est la fréquence en MHz. Ceci est représenté à la Figure D.2.

C’est parce que les données originales ont été obtenues à partir de la superposition d’oscillations sur une tension de choc de foudre plein, que l’on utilise dans la norme la méthode de « filtrage résiduel », dans laquelle la fonction de facteur k est appliquée à la différence entre le choc mesuré et une courbe de référence ajustée, qui est la somme de deux fonctions exponentielles. Il a été établi que le choix de deux fonctions exponentielles donne une bonne cohérence pour l’évaluation de la valeur de la tension d’essai mais pour obtenir une cohérence dans les évaluations des paramètres temporels il a été nécessaire de spécifier la méthode d’ajustement de cette fonction. (voir Annexe B). De plus, il a été établi qu’il est pratique et mathématiquement recevable d’appliquer la fonction $k(f)$ en tant que filtre numérique. Ceci permet de calculer précisément et automatiquement l’Équation (D.1) sans qu’il soit nécessaire de déterminer la ou les fréquences du dépassement.

Désormais les trois problèmes, mentionnés au début, ont été résolus:

- a) Une fonction de transition graduelle a remplacé la fonction abrupte précédente. Il n’est plus non plus nécessaire de déterminer la fréquence du dépassement.
- b) La difficulté du choix de la courbe moyenne a été résolue par l’introduction d’une courbe de référence bien définie.

- c) Toutes les tensions de choc de foudre sont traitées de la même manière et il n'est donc plus nécessaire de déterminer si un choc est lisse.

En outre, puisque les définitions sont plus précises et fondées sur le traitement défini des enregistrements numériques, les numériseurs peuvent être utilisés avec des incertitudes de mesure bien plus faibles (ceci a été démontré par des calculs dans plusieurs laboratoires au cours de l'établissement de cette partie de CEI 60060).

La nouvelle procédure a accordé toute l'attention nécessaire à la cohérence des résultats en présence d'autres formes de distorsions. Ces distorsions englobent:

- d) l'oscillation du front de choc;
- e) la superposition d'oscillations sur le dépassement;
- f) l'oscillation sur la queue;
- g) le bruit à haute fréquence.

L'utilisation de la courbe de la tension d'essai donne les conséquences suivantes:

- h) Tout le bruit à haute fréquence sera supprimé. L'oscillation sur le front de choc sera supprimée. Ceci est cohérent avec les intentions de l'édition précédente de la norme. Toutefois, d'autres filtres numériques ou d'autres procédures d'adaptation de courbe ne sont plus exigés. La suppression de ces perturbations est désormais automatiquement obtenue lors du calcul de la courbe de la tension d'essai. En conséquence, les résultats des paramètres de choc sont plus cohérents en présence de ces perturbations
- i) Toute variation à basse fréquence de la forme d'onde sera préservée. En fait, la forme globale du choc, qui peut être très différente de celle de la courbe de référence, sera préservée. Dans cette méthode, la courbe de référence n'est qu'une courbe intermédiaire qui est utilisée pour extraire la courbe résiduelle (l'oscillation). Toute composante basse fréquence de la courbe résiduelle sera préservée ce qui conduit à la préservation de la composante basse fréquence de la courbe de tension d'essai. Ceci est en principe cohérent avec la deuxième édition précédente de la norme. Toutefois, la procédure dans cette troisième édition donne des résultats bien plus cohérents.
- j) Dans le cas de chocs lisses, seul le bruit sera éliminé, les paramètres du choc sont préservés de manière précise.
- k) En général, il convient que la même procédure soit appliquée à tous les chocs de foudre (sauf à front coupé).

D.3 Limite du dépassement

Il est souhaitable d'identifier la limite qui sera équivalente à celle utilisée dans la version antérieure de la norme (CEI 60060-1:1989). La nature subjective de la « courbe moyenne » conduit à des incertitudes élevées et elles sont estimées à 2 %. La somme de deux courbes de fonctions exponentielles sera sous la « courbe lisse » d'environ 3 % en moyenne. Pour inclure pratiquement tous les chocs (97,5 %) avec oscillations amorties qui étaient autorisées par la version antérieure de la norme (CEI 60060-1:1989) le dépassement relatif est fixé à 10 %. Ceci autorisera les mêmes chocs qu'auparavant mais permettra une analyse plus précise.

NOTE Dans certains cas (par exemple pour les transformateurs de puissance), le dépassement ne peut pas déterminer les contraintes maximales sur l'isolation, et l'augmentation de tolérance sur l'amplitude de dépassement relative à 10 % peut conduire à un essai insuffisant du matériel. Il convient que le Comité d'études en tienne compte.

D.4 Chocs hors limites

L'étude européenne [D1] utilisait des oscillations amorties avec des amplitudes allant jusqu'à 20 % environ, les effets sur l'isolation sont donc prouvés. Toutefois, pour des essais généraux, il convient de ne pas dépasser la limite de 10 %. Pour des cas particuliers, la détermination de la meilleure approche est laissée à l'initiative du Comité Études concerné. La courbe résiduelle peut être utilisée comme indicateur de distorsion. Il convient de noter que cette méthode est fondée sur des études de l'isolation (comme l'était la CEI 60060-1:1989) et elle ne tient pas compte des effets des vitesses élevées d'augmentation de tension sur la répartition du champ dans l'appareil.

La présente norme inclut la définition de certains nouveaux paramètres (tels que la valeur extrême et le taux moyen d'augmentation) recommandés par le Groupe de travail GT 33.03 du CIGRÉ (activités communes avec le SC 12 du CIGRÉ).

D.5 Documents de référence

- [D1] GARNACHO, F., SIMON, P., GOCKENBACH, E., HACKEMACK, K., BERLIJN, S., and WERLE, P. *Evaluation of lightning-impulse voltages based on experimental results*. Electra No. 204, October 2002.

- [D2] HÄLLSTRÖM, JK. et al, *Applicability of different implementations of k-factor filtering schemes for the revision of IEC60060-1 and -2*. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005, paper B-32, p 92.

Annexe E (informative)

Méthode par calcul itératif dans la procédure réciproque pour la détermination du facteur de correction atmosphérique

E.1 Remarque d'introduction

Il a été établi que l'erreur sur le facteur de correction atmosphérique calculé K_t est significative si K_t est très inférieur à un (par exemple, $K_t = 0,95$ ou moins) si la procédure par calcul itératif (4.3.2.2) n'est pas utilisée. Une valeur faible de K_t est due la plupart du temps à une faible pression atmosphérique qui est caractéristique des sites d'essai situés à haute altitude. Les erreurs dues aux variations de température et d'humidité sont négligeables.

Les exemples donnés ici montrent que l'utilisation de la procédure (4.3.2.2) est nécessaire lorsque la pression atmosphérique est inférieure de manière significative au niveau normal. Les exemples montrent également que la procédure par calcul itératif n'est pas normalement nécessaire pour les essais réalisés à une altitude proche du niveau de la mer.

E.2 Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

La pression atmosphérique diminue de manière presque linéaire entre le niveau de la mer et une altitude de 10 000 m. La pression atmosphérique à une altitude donnée peut être calculée selon la formule suivante:

$$p = 1013 \cdot e^{-\frac{H}{8150}}$$

où p est la pression atmosphérique en hPa, H la hauteur par rapport au niveau de la mer est en mètres. Un tracé de la pression atmosphérique p en fonction de l'altitude H est représenté à la Figure E.1. Le Tableau E.1 énumère les altitudes et la pression atmosphérique normale à trois emplacements

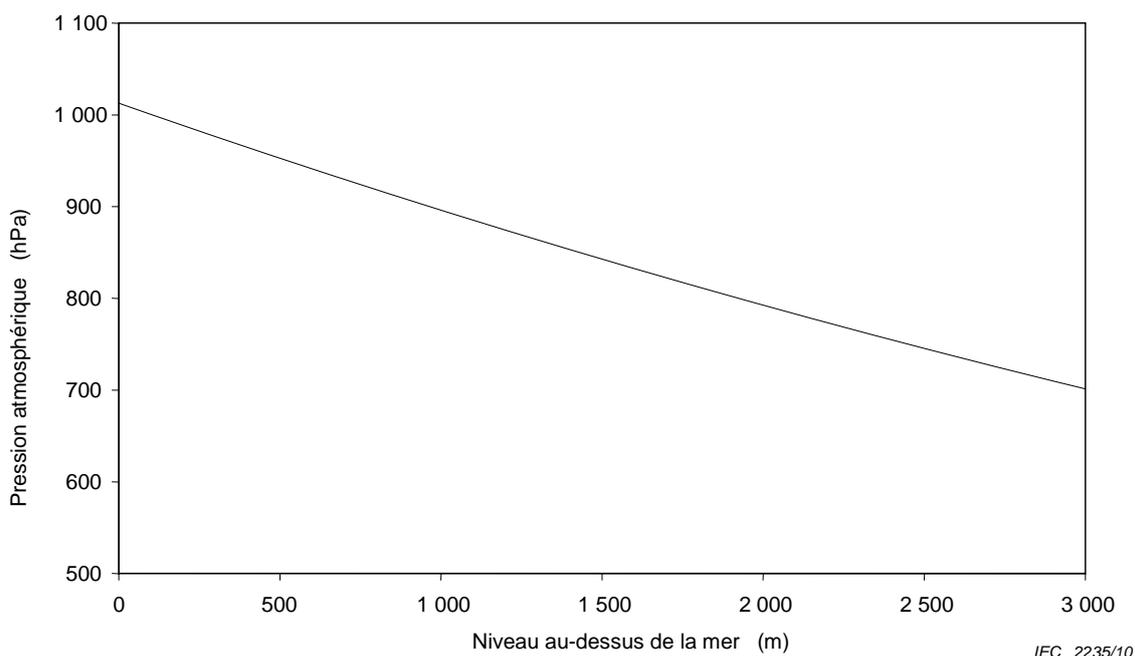


Figure E.1 – Pression atmosphérique en fonction de l'altitude

Tableau E.1 – Altitudes et pression atmosphérique à certains emplacements

Emplacement	A	B	C
Altitude (m)	0	1 540	2 240
Pression atmosphérique (hPa)	1 013,0	838,6	769,6

E.3 Sensibilité de K_t à U_{50}

La tension de décharge disruptive à 50 % U_{50} est une valeur d'entrée pour le calcul du facteur de correction atmosphérique K_t . Pour un essai de décharge disruptive à 50 %, U_{50} est le résultat de l'essai et peut être directement utilisé pour le calcul de K_t . Une erreur de K_t négligeable apparaît en raison de l'erreur de U_{50} .

Toutefois, si K_t doit être déterminé pour corriger la tension d'essai pour un essai de tenue de tension, la valeur de U_{50} est inconnue. Par conséquent, il est recommandé en 4.2.4.3 d'estimer U_{50} en multipliant la tension d'essai spécifiée U_0 par 1,1, c'est-à-dire,

$$U_{50} = 1,1 U_0$$

et d'utiliser la valeur estimée de U_{50} pour le calcul de K_t .

L'utilisation de la valeur estimée de U_{50} peut conduire à une erreur pour la valeur calculée de K_t et ainsi la tension d'essai corrigée $U = K_t U_0$.

L'erreur sur K_t dépend de la sensibilité de K_t à la variation de U_{50} , c'est-à-dire, la valeur du coefficient de sensibilité [E1, E2] $\partial K_t / \partial U_{50}$. Le calcul numérique montre que le coefficient de sensibilité de K_t par rapport à U_{50} est très faible dans la plage des pressions atmosphériques proches du niveau de la mer, une erreur de 5 % en U_{50} provoquera généralement une erreur inférieure à 0,1 % pour K_t . Le coefficient de sensibilité augmente significativement lorsque la pression atmosphérique diminue. À une altitude d'environ 2 000 m au-dessus du niveau de la mer, une erreur de 5 % de U_{50} provoquera une erreur approximativement de 1 % de K_t .

Le Tableau E.2 énumère les valeurs initiales de K_t calculées (pas de procédure par calcul itératif appliquée) et son coefficient de sensibilité par rapport à U_{50} pour un essai de tenue à la tension d'essai alternative spécifiée de 395 kV

NOTE Celle-ci est la tension d'essai alternative efficace pour isolation entre phase et terre de sectionneurs 300 kV, spécifiée dans la CEI 62271-1 [E5].

Tableau E.2 – Valeur initiale K_t et ses coefficients de sensibilité par rapport à U_{50} pour l'exemple de la tension d'essai alternative normale de 395 kV entre phase et terre

Altitude (m)	Pression atmosphérique p (hPa)	température de l'air T (°C)	Humidité relative (% HR)	Longueur de décharge L (m)	K_t initial	$\partial K_t / \partial U_{50}$ (1/kV)
0	1 013,0	25,4	35	2,57	0,9904	$-4,1 \times 10^{-5}$
1 540	838,6	20	35	2,57	0,9308	$-2,7 \times 10^{-4}$
2 240	769,6	15	35	2,57	0,8849	$-4,3 \times 10^{-4}$

E.4 Calcul avec la procédure de calcul itératif

Dans la procédure de calcul itératif, la valeur de K_t est calculée par itération jusqu'à ce qu'elle converge vers une valeur constante, la limite d'erreur résiduelle étant fixée en tenant compte du bilan d'incertitude total de la tension d'essai.

Le paramètre U_{50} est utilisé pour calculer K_t (4.3.2). Prendre comme exemple l'essai de tenue en courant alternatif du sectionneur 300 kV à l'altitude de 2 240 m (d'autres paramètres sont données dans le Tableau E.2), la première valeur de K_t , $K_{t,0}$ et la première valeur de tension d'essai de crête $U_{t,0}$ sont calculées à partir de l'estimation initiale de tension disruptive à 50 %, $U_{50,0}$, comme suit:

La valeur de crête de la tension d'essai spécifiée est:

$$U_{0p} = \sqrt{2}U_0 = \sqrt{2} \times 395 \text{ kV} = 558,61 \text{ kV}$$

Alors,

$$U_{50,0} = 1,1 U_{0p} = 1,1 \times 558,61 \text{ kV} = 614,48 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,0}}{500 L \delta k} = 0,6600$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9069$$

$$k_2 = k^w = 0,9757$$

$$K_{t,0} = k_1 k_2 = 0,8849$$

$$U_{t,0} = K_{t,0} \cdot U_{0p} = 0,8849 \times 558,61 \text{ kV} = 494,30 \text{ kV}$$

Le calcul de $K_{t,i}$ et $U_{t,i}$ à l'étape d'itération i utilise la valeur U_{50} obtenue à partir de la valeur K_t de l'étape $i-1$ précédente, $K_{t,i-1}$, à savoir,

$$U_{50,i} = 1,1 U_{t,i-1} = 1,1 K_{t,i-1} \cdot U_{0p}$$

L'itération suivante de la valeur de la tension d'essai $U_{t,i}$ est calculée par

$$U_{t,i} = K_{t,i} \cdot U_{0p}$$

Par conséquent pour continuer avec l'exemple ci-dessus

$$U_{50,1} = 1,1 U_{t,0} = 1,1 K_{t,0} \cdot U_{0p} = 1,1 \times 0,8849 \times 558,61 \text{ kV} = 543,72 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,1}}{500 L \delta k} = 0,5840$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9303$$

$$k_2 = k^w = 0,9820$$

$$K_{t,1} = 0,9136$$

$$U_{t,1} = K_{t,1} \cdot U_{0p} = 0,9136 \times 558,61 \text{ kV} = 510,36 \text{ kV}$$

$$U_{50,2} = 1,1 \cdot U_{t,1} = 1,1 \times 510,36 \text{ kV} = 561,40 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,2}}{500 L \delta k} = 0,6030$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9247$$

$$k_2 = k^w = 0,9805$$

$$K_{t,2} = 0,9067$$

$$U_{t,2} = K_{t,2} U_{0p} = 0,9067 \times 537,40 \text{ kV} = 506,52 \text{ kV}$$

$$U_{50,3} = 1,1 \cdot U_{t,2} = 1,1 \times 506,52 \text{ kV} = 557,17 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,3}}{500 L \delta k} = 0,5985$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9261$$

$$k_2 = k^w = 0,9809$$

$$K_{t,3} = 0,9084$$

$$U_{t,3} = K_{t,3} U_{0p} = 0,9084 \times 558,61 \text{ kV} = 507,45 \text{ kV}$$

$$U_{50,4} = 1,1 \cdot U_{t,3} = 1,1 \times 507,45 \text{ kV} = 558,19 \text{ kV}$$

$$g = \frac{U_{50,4}}{500 L \delta k} = 0,5996$$

$$k_1 = \delta^m = 0,9258$$

$$k_2 = k^w = 0,9808$$

$$K_{t,4} = 0,9080$$

$$U_{t,4} = K_{t,4} U_{0p} = 0,9080 \times 558,61 \text{ kV} = 507,22 \text{ kV}$$

La différence entre les valeurs de crête de la tension d'essai des deux dernières itérations est alors

$$507,45 \text{ kV} - 507,22 \text{ kV} = 0,23 \text{ kV}$$

qui est inférieure à 0,1 % de la valeur de crête de la tension d'essai de la dernière itération. On peut considérer qu'une limite de convergence de 0,1 % est raisonnable et peut être facilement obtenue en utilisant une automatisation du calcul.

L'erreur sur la première valeur estimée K_t , ΔK_t (%), et l'erreur sur la première tension d'essai de crête ΔU_t (%) peuvent être calculées par

$$\Delta K_t(\%) = 100 \times (0,8849 - 0,9080)/0,8849 = - 2,61 \%$$

$$\Delta U_t(\%) = 100 \times (494,30 - 507,22)/494,30 = - 2,61 \%$$

La tension alternative finale (valeur efficace) à appliquer peut alors être calculée d'après la valeur de la tension d'essai de crête alternative convergente, qui dans cet exemple est égale à

$$507,22 \text{ kV} / \sqrt{2} = 358,66 \text{ kV}$$

NOTE Celle-ci est la tension d'essai à appliquer à une altitude de 2 240 m pour l'essai de l'isolation à utiliser dans l'atmosphère normalisée de référence (près du niveau de la mer). Celle-ci n'est pas la tension d'essai à appliquer dans l'atmosphère normalisée de référence pour l'essai de l'isolation à utiliser à l'altitude de 2 240 m.

Le Tableau E.3 énumère les valeurs initiales et après convergence K_t calculées avec la procédure de calcul itératif pour les autres altitudes avec les mêmes humidité relative et longueur de décharge que celles qui sont représentées au Tableau E.2. Les erreurs, qui résulteraient de la non-utilisation de la procédure itérative, sont données dans la dernière colonne. Les résultats montrent aussi que l'effet de la température sur l'erreur est normalement négligeable.

Tableau E.3 – Valeurs initiales et après convergence K_t pour l'exemple de la tension normale d'essai en courant alternatif entre phase et terre de 395 kV

Altitude (m)	Pression (hPa)	Température (°C)	K_t initial	Convergence K_t	ΔK_t (%) ou ΔU_t (%)
0	1 013,0	25,4	0,9904	0,9907	- 0,03
0	1 013,0	15	0,9871	0,9876	- 0,05
1 540	838,6	20	0,9308	0,9404	- 1,03
1 540	838,6	15	0,9272	0,9377	- 1,14
2 240	769,6	20	0,8907	0,9120	- 2,39
2 240	769,6	15	0,8849	0,9081	- 2,62

E.5 Commentaires

L'erreur ΔK_t due à la valeur d'entrée initiale incorrecte U_{50} devient significative lorsque la valeur de K_t est inférieure à 0,95, qui ne peut pas être normalement attribuée à des conditions atmosphériques anormales au niveau de la mer. Une valeur faible de K_t est essentiellement provoquée par les essais à un emplacement à haute altitude. Les exemples montrent que l'erreur du niveau de tension d'essai corrigé peut aller jusqu'à 1,1 % même à une altitude de 1 500 m au-dessus du niveau de la mer si la procédure de calcul itératif n'est pas utilisée. Cette erreur atteint 2,6 % à un niveau de 2 240 m. Au niveau de la mer, l'erreur serait normalement insignifiante.

E.6 Documents de référence

- [E1] ISO *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)*, 1995
- [E2] CEI 60060-2, *Technique des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure, Annexe A.*
- [E3] CEI 60060-3: *High voltage test techniques – Part 3: Definitions and requirements for on-site testing* (disponible en anglais seulement)
- [E4] CEI 60071-1: 2006, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

[E5] CEI 62271-1: *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes*

Bibliographie

- [1] FESER, K. *Dimensioning of electrodes in the UHV range - Illustrated with the example of toroid electrodes for voltage dividers*. ETZ-A 96 (1975), 4 pp, 206-210.
 - [2] HAUSCHILD, W. *Engineering the electrodes of HV test systems on the basis of the physics of discharges in air*. 9th ISH Graz (1995), Invited Lecture 9002.
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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