

Edition 1.0 2010-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

High-current test techniques – Definitions and requirements for test currents and measuring systems

Techniques des essais à haute intensité – Définitions et exigences relatives aux courants d'essai et systèmes de mesure





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 Varembé 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: <u>www.iec.ch/searchpub</u>

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.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: <u>www.electropedia.org</u>

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: <u>www.iec.ch/webstore/custserv</u>

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: <u>csc@iec.ch</u> 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: <u>www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm</u>

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: <u>www.electropedia.org</u>

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: <u>www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm</u>

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: <u>csc@iec.ch</u> Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

Edition 1.0 2010-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



High-current test techniques – Definitions and requirements for test currents and measuring systems

Techniques des essais à haute intensité – Définitions et exigences relatives aux courants d'essai et systèmes de mesure

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE



ICS 19.080

ISBN 978-2-88912-184-7

CONTENTS

FO	REWC	RD		8	
1	Scop	e		10	
2	Norm	ative re	ferences	10	
3	Term	Terms and definitions			
	3.1	Measuring systems			
	3.2	Compo	ments of a measuring system		
	3.3	Scale f	actors	12	
	3.4	Rated	values	13	
	3.5	Definiti	ons related to the dynamic behaviour	13	
	3.6	Definiti	ons related to uncertainty	14	
	3.7	Definiti	ons related to tests on measuring systems	16	
4	Procedures for qualification and use of a measuring system			17	
	4.1	Genera	al principles	17	
	4.2	Schedu	ule of performance tests	17	
	4.3	Schedu	le of performance checks	17	
	4.4	Requir	ements for the record of performance	18	
		4.4.1	Contents of the record of performance	18	
		4.4.2	Exceptions	18	
	4.5	Operat	ing conditions	18	
	4.6	Uncert	ainty	19	
5	Tests	and te	st requirements for an approved measuring system	20	
	5.1	General requirements		20	
	5.2	Calibration – Determination of the scale factor			
		5.2.1	Calibration of a measuring system by comparison with a reference measuring system (preferred method)	20	
		5.2.2	Determination of the scale factor of a measuring system from those of its components	24	
	5.3	Linearity test		25	
		5.3.1	Application	25	
		5.3.2	Alternative methods in order of suitability	26	
	5.4	.4 Dynamic behaviour		26	
	5.5	Short-t	erm stability	27	
		5.5.1	Method	27	
		5.5.2	Steady-state current	27	
		5.5.3	Impulse current and short-time current	28	
		5.5.4	Periodic impulse current and periodic short-time current	28	
	5.6	Long-term stability		29	
	5.7	Ambier	nt temperature effect	29	
	5.8	Effect	of nearby current paths	30	
	5.9	Software effect			
	5.10	Uncert	ainty calculation	32	
		5.10.1	General	32	
		5.10.2	Uncertainty of calibration	32	
	5 11	5.10.3 Uncertainty of measurement using an approved measuring system			
	U	only)			
		5.11.1	General	34	

		5.11.2	Uncertainty of the time-parameter calibration	34
		5.11.3	Uncertainty of a time-parameter measurement using an approved	
	F 40	1	measuring system	35
	5.12	Interfe	Analisation	
		5.12.1	Application	
		5.12.2	Current-converting shunts and current transformers with Iron	
	E 10	5.12.3	Inductive measuring systems without Iron (Rogowski colls)	38 20
	5.15	5 1 2 1	Voltage withstand tests	ەد ەد
		5 1 2 2	Current withstand tests	
6	Stoo	D.IJ.Z	direct current	
6	6.1 Application			
	6.1	Арриса		
	6.2	Terms	and definitions	
	6.3		Jrrent	
		6.3.1		
	C 4	6.3.Z		
	6.4	Measu	Perminent of the test current.	
		6.4.1	Requirements for an approved measuring system	
		6.4.2		
		6.4.3	Dynamic behaviour	
		6.4.4	Calibrations and tests on an approved measuring system	
		6.4.5	Performance check	
	6.5	Measu	rement of ripple amplitude	
		6.5.1	Requirements for an approved measuring system	
		6.5.2	Uncertainty contributions	
		6.5.3	Dynamic behaviour for ripple	41
		6.5.4	Calibrations and tests on an approved ripple-current measuring system	42
		6.5.5	Measurement of the scale factor at the ripple frequency	42
		6.5.6	Performance check for ripple current measuring system	42
	6.6	Test pi	rocedures	43
7	Stead	dy-state	alternating current	43
	7.1	Applica	ation	43
	7.2	Terms	and definitions	43
	7.3	Test cu	urrent	
		7.3.1	Requirements	
		7.3.2	Tolerances	
	7.4	Measu	rement of the test current	44
		7.4.1	Requirements for an approved measuring system	
		7.4.2	Uncertainty contributions	44
		7.4.3	Dvnamic behaviour	44
		7.4.4	Calibrations and tests on an approved measuring system	
		7.4.5	Performance check	
	7.5	Test pr	rocedures	47
8	Shor	t-time di	irect current	
-	8 1	Applic	ation	<u>م</u>
	8.2	Terme	and definitions	۲+۲ ۸۹
	0.2 8 3	Test ci	una dominiono	0+ ۵۵
	0.0	831	Requirements for the test current	9- 10
		0.0.1		

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

		8.3.2	Tolerances	49
	8.4	Measu	rement of the test current	
		8.4.1	Requirements for an approved measuring system	
		8.4.2	Uncertainty contributions	49
		8.4.3	Dynamic behaviour	49
		8.4.4	Calibrations and tests on an approved measuring system	50
		8.4.5	Performance check	51
		8.4.6	Linearity test	51
	8.5	Test p	rocedures	51
9	Short	time a	Iternating current	51
	9.1	Applica	ation	51
	9.2	Terms	and definitions	52
	9.3	Test cu	urrent	53
		9.3.1	Requirements for the test current	53
		9.3.2	Tolerances	53
	9.4	Measu	rement of the test current	54
		9.4.1	Requirements for an approved measuring system	54
		9.4.2	Uncertainty contributions	54
		9.4.3	Dynamic behaviour	54
		9.4.4	Calibrations and tests on an approved measuring system	
		9.4.5	Performance check	56
		9.4.6	Linearity test	56
		9.4.7	Interference test	57
	9.5	Test p	rocedures	57
10	Impu	' Ise curr	ents	57
	10.1	0.1 Application		
	10.2	Terms	and definitions	57
	10.3	Test cu	urrent	61
		10.3.1	General	61
		10.3.2	Tolerances	61
	10.4	Measu	rement of the test current	62
		10.4.1	Requirements for an approved measuring system	62
		10.4.2	Uncertainty contributions	62
		10.4.3	Dvnamic behaviour	
		10.4.4	Calibrations and tests on an approved measuring system.	
		10.4.5	Performance check	
	10.5	Test p	rocedures	
11	Curre	ent mea	surement in high-voltage dielectric testing	65
•••	11 1	Applic	ation	65
	11.1	Torme	and definitions	05
	11.2	Magau	rement of the test surrent	
	11.5	11 2 1	Poquirements for an approved measuring system	
		11.3.1	Requirements for an approved measuring system	00
		11.3.2		00
		11.3.3	Calibrations and tosts on an approved macrowing system	
		11.3.4	Camprations and tests on an approved measuring system	
		11.3.5		
		11.3.6	Linearity test	
		Trat		
	11.4	i est pi	locedules	

12 Reference measuring systems	67
12.1 General	67
12.2 Interval between subsequent calibrations of reference measuring systems	67
Annex A (informative) Uncertainty of measurement	68
Annex B (informative) Examples of the uncertainty calculation in high-current measurements	76
Annex C (informative) Step-response measurements	82
Annex D (informative) Convolution method for estimation of dynamic behaviour from step-response measurements	85
Annex E (informative) Constraints for certain wave shapes	88
Annex F (informative) Temperature rise of measuring resistors	90
Annex G (informative) Determination of r.m.s. values of short-time a.c. current	91
Annex H (informative) Examples of IEC standards with high current tests	98
Bibliography	100
Figure 1 – Examples of amplitude frequency responses for limit frequencies (f_1 ; f_2)	14
Figure 2 – Calibration by comparison over full assigned measurement range	22
Figure 3 – Uncertainty contributions of the calibration (example with the minimum of 5 current levels)	23
Figure 4 – Calibration by comparison over a limited current range with a linearity test (see 5.3) providing extension up to the largest value in the assigned measurement	
range	24
Figure 5 – Linearity test of the measuring system with a linear device in the extended voltage range	26
Figure 6 – Short-term stability test for steady-state current	28
Figure 7 – Short-term stability test for impulse current and short-time current	28
Figure 8 – Short-term stability test for periodic impulse-current and periodic short-time current	29
Figure 9 – Test circuit for effect of nearby current path for current-converting shunts and current transformers with iron.	31
Figure 10 – Test circuit for effect of nearby current path for inductive measuring systems without iron (Rogowski coils)	31
Figure 11 – Principle of interference test circuit.	37
Figure 12 – Interference test on the measuring system $i_1(t)$ based on current-converting shunt or current transformer with iron in a typical 3-phase	
short-circuit set-up (example)	37
Figure 13 – Test circuit for interference test for inductive systems without iron	38
Figure 14 – Acceptable normalized amplitude-frequency response of an a.c. measuring system intended for a single fundamental frequency f_{nom}	45
Figure 15 – Acceptable normalized amplitude-frequency response of an a.c. measuring system intended for a range of fundamental frequencies f_{nom1} to f_{nom2}	46
Figure 16 – Example of short-time direct current	48
Figure 17 – Example of short-time alternating current.	52
Figure 18 – Exponential impulse current	58
Figure 19 – Exponential impulse current – oscillating tail	58
Figure 20 – Impulse current – Rectangular, smooth	59

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

Figure 21 – Impulse current – Rectangular with oscillations	59
Figure A.1 – Normal probability distribution $p(x)$ of a continuous random variable x	75
Figure A.2 – Rectangular symmetric probability distribution $p(x)$ of the estimate x of an input quantity X	75
Figure B.1 – Comparison between the system under calibration X and the reference system N	81
Figure C.1 – Circuit to generate current step using a coaxial cable	82
Figure C.2 – Circuit to generate current step using a capacitor	82
Figure C.3 – Definition of response parameters with respect to step response	84
Figure E.1 – Attainable combinations of time parameters (shaded area) for the 8/20 impulse at maximum 20 % undershoot and for 20 % tolerance on the time parameters	88
Figure E.2 – Locus for limit of attainable time parameters as a function of permissible undershoot for the 8/20 impulse	89
Figure E.3 – Locus for limit of attainable time parameters as a function of permissible undershoot for the 30/80 impulse	89
Figure G.1 – Equivalent circuit of short-circuit test	91
Figure G.2 – Symmetrical a.c. component of an alternating short-circuit current	92
Figure G.3 – Numerical evaluation of r.m.s value showing both instantaneous current and instantaneous squared value of the current.	93
Figure G.4 – Three-crest method	94
Figure G.5 – Evaluation of conventional r.m.s. value of an arc current using the three- crest method	95
Figure G.6 – Evaluation of equivalent r.m.s value of a short-time current during a short-circuit test	96
Figure G.7 – Relation between peak factor κ and power factor $cos(\phi).$	97
Table 1 – Required tests for steady-state direct current	40
Table 2 – Required tests for ripple current	42
Table 3 – Required tests for steady-state alternating current	46
Table 4 – Tolerance requirement on test-current parameters for short-time direct	40
Table 5 Pequired tests for short time direct current	49 50
Table 5 - Required tests for short-time direct current	50 52
Table 5 – Tolerance requirements on the short-time alternating current test parameters	55
frequency range of the measuring system	54
Table 8 – Tolerance requirements on scale factor	55
Table 9 – Required tests for short-time alternating current	55
Table 10 – Examples of exponential impulse-current types	61
Table 11 – Required tests for impulse current	64
Table 12 – Required tests for impulse current in high-voltage dielectric testing	66
Table A.1 – Coverage factor k for effective degrees of freedom v_{eff} (p = 95,45 %)	73
Table A.2 – Schematic of an uncertainty budget	74
Table B.1 – Result of the comparison measurement	78
Table B.2 – Result of the comparison measurement	78
Table B.3 – Uncertainty budget for calibration of scale factor F_x	79
Table B.4 – Result of linearity test	80

Table B.5 – Uncertainty budget of scale factor F _{X,mes}	81
Table H.1 – List of typical tests with short-time alternating current	98
Table H.2 – List of typical tests with exponential impulse current	99
Table H.3 – List of typical tests with rectangular impulse current	99

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

- 8 -

HIGH-CURRENT TEST TECHNIQUES – DEFINITIONS AND REQUIREMENTS FOR TEST CURRENTS AND MEASURING SYSTEMS

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.
- 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 62475 has been prepared by IEC technical committee 42: High-voltage test techniques.

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

FDIS	Report on voting
42/278/FDIS	42/283/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.

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.

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

HIGH-CURRENT TEST TECHNIQUES – DEFINITIONS AND REQUIREMENTS FOR TEST CURRENTS AND MEASURING SYSTEMS

1 Scope

This International Standard is applicable to high-current testing and measurements on both high-voltage and low-voltage equipment. It deals with steady-state and short-time direct current (as e.g. encountered in high-power d.c. testing), steady-state and short-time alternating current (as e.g. encountered in high-power a.c. testing), and impulse-current. In general, currents above 100 A are considered in this International Standard, although currents less than this can occur in tests.

NOTE This standard also covers fault detection during, for example, lightning impulse testing.

This standard:

- defines the terms used;
- defines parameters and their tolerances;
- describes methods to estimate uncertainties of high-current measurements;
- states the requirements which a complete measuring system shall meet;
- describes the methods for approving a measuring system and checking its components;
- describes the procedure by which the user shall show that a measuring system meets the requirements of this standard, including limits set for uncertainty of measurement.

2 Normative references

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

IEC 60051-2:1984, Direct acting analogue electrical measuring instruments and their accessories – Part 2: Special requirements for ammeters and voltmeters

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

IEC 61180-1, *High-voltage test techniques for low-voltage equipment – Part 1: Definitions, test and procedure requirements*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)

NOTE Further related standards, guides, etc. on subjects included in this standard are given in the bibliography.

3 Terms and definitions

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

3.1 Measuring systems

3.1.1

measuring system

complete set of devices suitable for performing measurements of a quantity to be measured (measurand). Software used to obtain or calculate measurement results also forms a part of the measuring system

NOTE 1 A high-current measuring system usually comprises the following components:

- converting device with either terminals to connect this device in circuit or appropriate coupling to the circuit, and connections to earth;
- transmission system(s) connecting the output terminals of the converting device to the measuring instrument(s) with its attenuating, terminating, and adapting impedances or networks; and
- measuring instrument(s) together with any connections to the power supply.

Measuring systems which comprise only some of the above components or which are based on non-conventional principles are acceptable if they meet the uncertainty requirements specified in this standard.

NOTE 2 The environment in which a measuring system functions, its clearances to live, current carrying, and earthed structures, and the presence of electromagnetic fields may significantly affect the measurement result and its uncertainty.

3.1.2

record of performance

detailed record, established and maintained by the user, describing the measuring system and containing evidence that the requirements given in this standard have been met. This evidence includes the results of the initial performance test and the schedule and results of each subsequent performance test and performance check

3.1.3

approved measuring system

measuring system that is shown to comply with one or more of the sets of requirements set out in this standard

3.1.4

reference measuring system

measuring system with its calibration traceable to relevant national and/or international standards, and having sufficient accuracy and stability for use in the approval of other systems by making simultaneous comparative measurements with specific types of waveform and ranges of current

NOTE A reference measuring system (maintained according to the requirements of this standard) can be used as an approved measuring system but the converse is not true.

3.2 Components of a measuring system

3.2.1

converting device

device for converting the quantity to be measured (measurand) into a quantity, compatible with the measuring instrument

3.2.2

current-converting shunt

resistor across which the voltage is proportional to the current to be measured

3.2.3

current transformer

instrument transformer in which the secondary current, in normal conditions of use, is substantially proportional to the primary current and differs in phase from it by an angle which is approximately zero for an appropriate direction of the connections

[IEC 60050-321:1986, 321-02-01]

NOTE Current transformers are usually defined for a single frequency, but special designs with a wide frequency range are possible.

3.2.4

Rogowski coil

inductive current-converting device without iron; measuring systems based on a Rogowski coil include an integrating circuit (passive, active, or numerical)

NOTE Measuring systems based on a Rogowski coil can be designed for current measurements in a wide range of frequencies.

3.2.5

transmission system

set of devices that transfers the output signal of a converting device to a measuring instrument(s)

NOTE 1 A transmission system usually consists of a coaxial cable with its terminating impedance, but it may include attenuators, amplifiers, or other devices connected between the converting device and the measuring instrument(s). For example, an optical link includes a transmitter, an optical cable, and a receiver as well as related amplifiers.

NOTE 2 A transmission system may be partially or completely included in the converting device or in the measuring instrument.

3.2.6

measuring instrument

device intended to make measurements, alone or in conjunction with supplementary devices

[IEC 60050-300:2001, 311-03-01]

3.3 Scale factors

3.3.1

scale factor of a measuring system

factor by which the value of the measuring-instrument reading is to be multiplied to obtain the value of the input quantity of the complete measuring system

NOTE 1 A measuring system may have multiple scale factors for different current ranges, frequency ranges or waveforms.

NOTE 2 Some measuring systems display the value of the input quantity directly (i.e., the scale factor of the measuring system is unity).

3.3.2

scale factor of a converting device

factor by which the output of the converting device is to be multiplied to obtain its input quantity

NOTE The scale factor of a converting device may be dimensionless (for example, the ratio of a current transformer) or may have dimensions (for example, related to the impedance of a current-converting shunt).

3.3.3

scale factor of a transmission system

factor by which the output of a transmission system is to be multiplied to obtain its input quantity

3.3.4

scale factor of a measuring instrument

factor by which the instrument reading is to be multiplied to obtain its input quantity

3.3.5

assigned scale factor

F

scale factor of a measuring system determined at the most recent performance test

NOTE A measuring system may have more than one assigned scale factor; for example, it may have several ranges, each with a different scale factor.

3.4 Rated values

3.4.1

operating conditions

conditions under which a measuring system will operate within the specified uncertainty limits

3.4.2

rated current

maximum level of current of specified frequency or waveform at which a measuring system is designed to be used

NOTE The rated current may be higher than the upper limit of the assigned measurement range.

3.4.3

assigned measurement range

range of current of specified frequency or waveform in which a measuring system can be used within the uncertainty limits given in this standard, characterized by a single scale factor

NOTE 1 The limits of the assigned measurement range are chosen by the user and verified by the performance tests specified in this standard.

NOTE 2 A measuring system may have more than one assigned measurement range, with different scale factors established for the different ranges.

3.4.4

assigned operating time

longest time during which a d.c. or a.c. current measuring system can operate at the upper limit of the assigned measurement range within the uncertainty limits given in this standard

3.4.5

assigned rate of application

highest rate of specified short-time currents or impulse currents that can be applied in a given time interval, at which the measuring system can operate at the upper limit of the assigned measurement range and stay within the uncertainty limits given in this standard

NOTE The assigned rate of application could for example be expressed as the number of applications per minute and the time interval in minutes or hours.

3.5 Definitions related to the dynamic behaviour

3.5.1

response of a measuring system,

g or G

output, as a function of time or frequency, when a specified current is applied to the input of the system

3.5.2

amplitude-frequency response

G(f)

ratio of the output to the input of a measuring system as a function of frequency, f, when the input is sinusoidal

3.5.3

limit frequencies

lower and upper limits of the range within which the amplitude-frequency response is nearly constant

NOTE These limits are where the response first deviates by a certain amount (e.g. ± 15 %) from the constant value. The permissible deviation should be related to acceptable uncertainties of a measuring system (see Figure 1).



NOTE Upper and lower limit frequencies are shown on curve A. Curve B shows a constant response down to direct current.

Figure 1 – Examples of amplitude frequency responses for limit frequencies (f_1 ; f_2)

3.5.4 step response

g(t)

output of a measuring system as a function of time, t, when the input is a step function

NOTE For more information on step-response measurements see Annex C.

3.6 Definitions related to uncertainty

3.6.1

tolerance

permitted difference between the measured value and the test specified value

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

NOTE 2 The measured test current is required to lie within the stated tolerance of the specified test level. The relevant technical committee should specify test levels.

3.6.2

uncertainty (of measurement)

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

[IEC 60050-300:2001, 311-01-02]

NOTE 1 Uncertainty is positive and given without sign.

NOTE 2 Uncertainty of a measurement should not be confused with the tolerance of a test-specified value or parameter.

NOTE 3 For more information see Annex A and Annex B.

3.6.3 standard uncertainty

uncertainty of the result of a measurement expressed as a standard deviation

[ISO/IEC Guide 98-3:2008, GUM 2.3.1]

NOTE 1 The standard uncertainty associated with an estimate of a measurand has the same dimension as the measurand.

NOTE 2 In some cases, the relative standard uncertainty of a measurement may be appropriate. The relative standard uncertainty of a measurement is the standard uncertainty divided by the measurand, and is therefore dimensionless.

3.6.4

combined standard uncertainty

 $u_{\rm c}$

standard uncertainty of the result of a measurement when that result is obtained from the values of a number of other quantities, equal to the positive square root of a sum of terms, the terms being the variances or covariances of these other quantities weighted according to how the measurement result varies with changes in these quantities

[ISO/IEC Guide 98-3:2008, GUM 2.3.4]

3.6.5 expanded uncertainty

U

quantity defining an interval about the result of a measurement that may be expected to encompass a large fraction of the distribution of values that could reasonably be attributed to the measurand

[ISO/IEC Guide 98-3:2008, GUM 2.3.5, modified, i.e. without the notes]

NOTE Expanded uncertainty is the closest match to the term "overall uncertainty" used in earlier editions of the related documents.

3.6.6

coverage factor

k

numerical factor used as a multiplier of the combined standard uncertainty in order to obtain an expanded uncertainty

(ISO/IEC Guide 98-3:2008, GUM 2.3.6, modified, i.e. without the note)

NOTE For 95 % coverage probability and normal (Gaussian) probability distribution, the coverage factor is approximately 2.

3.6.7

error

measured quantity value minus a reference quantity value

[ISO/IEC Guide 99:2007, VIM 2.1.6]

3.6.8

traceability

property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to stated references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparisons, all having stated uncertainties

[IEC 60050-300:2001, 311-01-15, modified, i.e. without the notes]

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

3.6.9

type A evaluation

method of evaluation of uncertainty by statistical analysis of observations

3.6.10

type B evaluation

method of evaluation of uncertainty by means other than statistical analysis of series of observations

3.6.11

National Metrology Institute

institute designated by national decision to develop and maintain national measurement standards for one or more quantities

3.7 Definitions related to tests on measuring systems

3.7.1

calibration

set of operations that establishes, by reference to standards, the relationship which exists, under specified conditions, between an indication and a result of a measurement

NOTE 1 This term is based on the "uncertainty" approach.

NOTE 2 The relationship between the indications and the results of measurement can be expressed, in principle, by a calibration diagram.

NOTE 3 The determination of the scale factor is included in the calibration.

[IEC 60050-300:2001, 311-01-09, modified, i.e. by the addition of NOTE 3]

3.7.2

type test

conformity test made on one or more items representative of the production

[IEC 60050-151:2001, 151-16-16]

NOTE For a measuring system, this is understood as a test performed on a component or on a complete measuring system of the same design to characterize it under operating conditions.

3.7.3

routine test

conformity test made on each individual item during or after manufacture

[IEC 60050-151:2001, 151-16-17]

NOTE For a measuring system this is understood as a test performed on each component or on each complete measuring system during or after manufacture to characterize it under operating conditions.

3.7.4

performance test

test performed on a complete measuring system to characterize it under operating conditions

3.7.5 performance check

simple procedure to ensure that the result of the most recent performance test is still valid

4 **Procedures for qualification and use of a measuring system**

4.1 General principles

Every approved measuring system is required to undergo initial testing, followed by subsequent performance tests (periodic, see 4.2) and performance checks (periodic, see 4.3) throughout its service life. The initial tests consist of type tests (performed on a component, or system, of the same design) and routine tests (performed on every component or system).

The performance tests and checks shall prove that the measuring system can measure the intended test currents within the uncertainties given in this standard, and that the measurements are traceable to national and/or international standards of measurement. The system is approved only for the arrangements and operating conditions included in its record of performance.

A major requirement for a converting device, transmission system(s) and measuring instrument(s) used in a measuring system is stability within their specified range of operating conditions so that the scale factor of the measuring system remains constant over long periods.

The assigned scale factor is determined in the performance test.

Test facilities shall use the tests given in this standard to qualify their measuring systems. Alternatively, any user may choose to have the performance tests made by a National Metrology Institute or by a calibration laboratory accredited for the quantity to be calibrated.

Any calibration shall be traceable to national and/or international standards. It is the responsibility of the user to ensure that all calibrations are performed by competent personnel using reference measuring systems and suitable procedures.

NOTE Calibrations performed by a laboratory accredited according to ISO/IEC 17025 for the quantities calibrated and reported under the accreditation, are considered traceable to national and/or international standards of measurement.

4.2 Schedule of performance tests

To maintain the quality of a measuring system, its assigned scale factor(s) shall be determined by the periodic performance tests according to 5.2. The interval between performance tests shall be based on evaluation of past stability of the measuring system. It is recommended that the performance test should be repeated annually and in any case it shall be repeated at least once every five years.

NOTE Long intervals between performance tests can increase the risk of an undetected change in the measuring system.

A performance test shall be made after major repairs to the measuring system and whenever a circuit arrangement that is beyond the limits given in the record of performance is to be used.

When a performance test is required because a performance check shows that the assigned scale factor is no longer valid, the cause of this change shall be investigated before the performance test is made.

4.3 Schedule of performance checks

Performance checks shall be made at intervals based on the recorded stability of the measuring system as shown in its record of performance. The interval from the last performance test or the last performance check should not be longer than one year.

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

For a new or repaired measuring system, performance checks shall be made at short intervals to demonstrate its stability.

No reference method is identified for the performance checks because the required accuracy is less than that required for performance tests.

4.4 Requirements for the record of performance

4.4.1 Contents of the record of performance

The results of all tests and checks, including the conditions under which the results were obtained, shall be kept in the record of performance (stored in paper format or electronically if permitted by quality systems and local laws) established and maintained by the user. The record of performance shall uniquely identify the components of the measuring system and shall be structured so that performance of the measuring system can be traced over time.

The record of performance shall comprise at least the following information:

- general description of the measuring system;
- results of type and routine tests on the converting device, transmission system(s) and measuring instrument(s), and, if performed, on the complete measuring system;
- results of subsequent performance tests on the measuring system;
- results of subsequent performance checks on the measuring system.

NOTE The general description of the measuring system usually comprises main data and capabilities of the measuring system, such as rated current, waveform(s), range(s) of clearances, operating time, or maximum rate of current applications. For many measuring systems, information on the transmission system as well as on the ground return and earthing arrangements is fundamentally important. If needed, a description of the components of the measuring system should be given, including, for example, the type and identification of the measuring instrument.

4.4.2 Exceptions

In the case of measuring systems or components manufactured before the date of issue of this standard, the required evidence may not be available for some of the type and routine tests (for example, 5.7 and 5.13). Then, the performance tests (in accordance with 6.4.4, 7.4.4, 8.4.4, 9.4.4 or 10.4.4 as relevant) and checks made in accordance with earlier standards are deemed adequate, provided they show the scale factor is stable. The results of these previous checks shall also be entered in the record of performance.

Measuring systems comprising several pieces of equipment used interchangeably, may be covered by a single record of performance including all the combinations possible with the least amount of duplication possible. Specifically, each converting device shall be covered individually, but transmission systems and measuring instruments may be covered generically.

4.5 Operating conditions

The current-converting shunt and/or current transformer of a current measuring system shall be connected in series with the test object. The connections should be of the lowest practicable impedance.

The Rogowski coil of a current measuring system shall be situated concentric around a straight part of the current-carrying conductor. The axes of the current conductor and the plane of the coil should be perpendicular in order to minimize sensitivity of the system to external magnetic fields.

NOTE 1 The direction of a current-carrying conductor often shows a 90° angle at a certain distance from the Rogowski coil. It has been shown that for the Rogowski coil situated at a distance of more than 2 times the coil radius from the 90° angle, the influence is negligible.

NOTE 2 Parasitic coupling may need to be investigated.

A measuring system shall have uncertainty low enough for its intended operating conditions.

The assigned operating time of measuring systems for direct and alternating current shall be specified.

NOTE 3 The recommended minimum value for the assigned operating time is 1 h.

The assigned rate of application of short-time current or impulse currents shall be specified.

NOTE 4 The recommended minimum value for the maximum rate of application is two per minute.

The range of environmental conditions under which the measuring system fulfils the requirements of this standard shall be stated.

4.6 Uncertainty

The uncertainty of all measurements made under this standard shall be evaluated according to ISO/IEC Guide 98-3.

Procedures for evaluating uncertainties have been selected from ISO/IEC Guide 98-3 and presented in this standard. These are considered sufficient for the instrumentation and measurement arrangements commonly used in high-current testing: however, users may select other appropriate procedures from ISO/IEC Guide 98-3, as they are given in Annex A and Annex B.

In general, the measurand is the scale factor of the measuring system, but in some cases, other quantities, such as the time parameters of high-current impulses and their associated errors, should be considered.

NOTE 1 Other measurands for specific converting devices are in common use. For example, a current-converting shunt is characterized by the resistance and its uncertainties in the ranges used. A current transformer is characterized by the ratio error, the phase displacement, and the corresponding uncertainties.

According to ISO/IEC Guide 98-3, the uncertainty of a measurand is determined by combining the uncertainty contributions of type A and type B (see Annex A). The contributions are obtained from measurement results, from manufacturer's handbooks, calibration certificates, and from estimating reasonable values of the influence quantities during the measurement. Such influence quantities can include for example temperature effects, interference (effect of nearby current paths), etc.

NOTE 2 The resolution of a measuring instrument, e.g. one with few significant digits, may in some cases be a significant source of uncertainty.

During an actual current test in the test laboratory, it is usually necessary to consider additional influence quantities, apart from the calibration uncertainty of the scale factor as stated in the calibration certificate, in order to obtain the uncertainty of a measurement of the test current.

Guidance on determining uncertainty contributions that need to be considered and on their combination is given in Clause 5, Annex A, and Annex B. The uncertainty shall be given as the expanded uncertainty for a coverage probability of approximately 95 % corresponding in most cases to a coverage factor k = 2 under the assumption of a normal distribution.

NOTE 3 In this standard, the uncertainties of the scale factor and of current measurements (5.2 to 5.10) are expressed by the relative uncertainties instead of the absolute uncertainty normally considered in ISO/IEC Guide 98-3. The direct application of the GUM and consideration of the absolute uncertainties are shown in 5.11 for time parameters and in Annex A and Annex B.

5 Tests and test requirements for an approved measuring system

5.1 General requirements

The assigned scale factor of the measuring system is determined by calibration according to the specified performance test. The assigned scale factor is a single value for a certain range of currents, the assigned measurement range. If necessary, several assigned measurement ranges with different scale factors can be defined.

In the case of impulse measuring systems and short-time a.c. and short-time d.c. measuring systems, the performance test also shows that the dynamic performance of the system is adequate for the specified measurements and that the level of any interference is less than the specified limits.

In high-current tests, the size of the apparatus, the levels of current used, and the interaction between the test and measuring circuits often make it preferable to perform calibrations at the test facility of the user.

However, measuring systems or their components may be transported to another laboratory for calibration in an arrangement that simulates the operating conditions, provided that the interference test, if specified, is performed in the test facility of the user. The simulated arrangement shall represent the operating conditions and shall be described in the record of performance.

If a converting device (and/or other component of the measuring system) is sensitive to the presence of nearby current paths, the range of clearances where the assigned scale factor is valid determined and given in the record of performance. One or more ranges of clearances and respective scale factors can be assigned. In the case where the clearance is fixed, the proximity effect is covered by the calibration.

The scale factor(s) of a measuring system shall be determined in each assigned measurement range, preferably by comparison with a reference measuring system. However, as reference measuring systems are not always available at higher currents, calibration by comparison may be made at currents as low as 5 % of the assigned measurement range, provided that the linearity has been proved from this point up to the limit of the assigned measurement range. One of the linearity test methods given in 5.3 shall be used for this extension.

All equipment used in establishing the scale factors of measuring systems shall have calibrations traceable to national and/or international measurement standards.

NOTE Calibrations performed by a National Metrology Institute, or by a laboratory accredited for the quantities calibrated and reported under the accreditation, are considered traceable to national and/or international standards.

Conditions significant for the result of the calibration of the approved measuring system shall be included in the record of performance.

5.2 Calibration – Determination of the scale factor

5.2.1 Calibration of a measuring system by comparison with a reference measuring system (preferred method)

5.2.1.1 Comparison measurement

Scale factor(s) is (are) determined for a complete measuring system by comparison with a reference measuring system.

62475 © IEC:2010

For the comparison, a reference measuring system, traceable to a National Metrology Institute, shall be connected in series with the measuring system to be calibrated. Care shall be taken to avoid those ground loops between the converting device and measuring instrument(s) that produce unacceptable interference. Simultaneous readings shall be taken on both systems. The value of the input quantity obtained for each measurement by the reference measuring system is divided by the corresponding reading of the instrument in the system under test to obtain a value $F_{i,g}$ of its scale factor at one current level I_g . The procedure is repeated to obtain *n* independent readings. The arithmetic mean (average) value $\overline{F_a}$ of the scale factor of the system under calibration at one current level I_g is given by:

$$\overline{F_{g}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} F_{i,g}$$

The relative experimental (sample) standard deviation s_g of the individual scale factor values $F_{i,g}$ is given by:

$$s_{g} = \frac{1}{\overline{F_{g}}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (F_{i,g} - \overline{F_{g}})^{2}}$$

and the type A relative standard uncertainty u_g of the mean value $\overline{F_a}$ is given by:

$$u_{g} = \frac{s_{g}}{\sqrt{n}}$$

NOTE 1 Usually no more than n = 10 readings are necessary. If less than 10 readings are taken, evaluation should be in accordance with Annex A.

NOTE 2 For measurement of direct and alternating currents, independent readings may be obtained either by applying the test current and taking n readings or by applying the test current n times and taking a reading each time. For impulses and short-time currents, n high-current events are applied.

A measuring system with several assigned measurement ranges shall be calibrated for each range to determine its scale factor. Measuring systems with secondary attenuators may be calibrated on one setting only, provided that the load at the output of the converting device can be shown to be constant for all settings by other tests. In such cases, the full range of settings of the secondary attenuators shall be calibrated separately.

The scale factor shall be determined over each assigned measurement range by one of the following two methods.

5.2.1.2 Comparison over the full assigned measurement range

This test includes both the determination of assigned scale factor and determination of linearity. The scale factor determination shall be done by comparison with a reference measuring system according to 5.2.1.1 at the minimum and maximum levels of the assigned measurement range and at least at three approximately equally spaced intermediate levels (see Figure 2). The assigned scale factor *F* is taken as the mean value of all scale factors $\overline{F_g}$

recorded at h current levels.

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^{h} \overline{F_g}$$

where the number of current levels $h \ge 5$.

The standard uncertainty u_F of the determination of the assigned scale factor F is given by the combination of a type B contribution u_{B1} of non-linearity of the mean values $\overline{F_g}$ and a type B contribution u_{B2} based on the maximum of the type A standard uncertainties of the recorded scale factors $\overline{F_g}$:

$$u_{F} = \sqrt{u_{B1}^{2} + u_{B2}^{2}} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{h}{\max}_{g=1}^{h} \left| \frac{\overline{F_{g}}}{F} - 1 \right| \right)^{2} + \left(\frac{h}{\max}_{g=1}^{h} \left(u_{g} \right) \right)^{2}}$$

NOTE 1 The *h* determinations of scale factor $\overline{F_g}$ do not constitute a statistical ensemble since they have not been obtained under the same conditions, especially concerning the current level. It is therefore not possible to obtain the uncertainty of the assigned scale factor with statistical methods (i.e. type A). Instead, an estimation type B has to be carried out, and is here based on two contributions. The spread of $\overline{F_g}$ observed over the current levels, is characterized by the maximum deviation from the mean, and evaluated as a rectangular probability distribution. The statistical spreads of type A in the determinations of the individual $\overline{F_g}$ results, at each current level are taken into account by using the maximum value of the individual u_g values, and evaluated as a normal distribution (See Figure 3).

NOTE 2 A rounded value F_0 may be taken as the assigned scale factor F if the difference between F_0 and F is introduced as an uncertainty contribution of type B in the estimate of the expanded uncertainty of the scale factor F_0 .



Figure 2 – Calibration by comparison over full assigned measurement range



- 23 -

Figure 3 – Uncertainty contributions of the calibration (example with the minimum of 5 current levels)

5.2.1.3 Comparison over limited current range

In cases where the assigned measurement range exceeds the capability of the available reference measuring system, the assigned scale factor shall be determined by comparison according to 5.2.1.1 up to the maximum current of the reference measuring system. The comparison shall, in any case, be carried out at a current that is not lower than 5 % of the upper limit of the assigned measurement range (see Figure 4).

The comparison shall be supplemented by a linearity test in accordance with 5.3. The uncertainty contribution related to linearity shall be considered in the calculation of measurement uncertainty when using the measuring system, see 5.10.3.

The comparison with the reference measuring system is carried out at $a \ge 2$ current levels, where the highest current level is equal to the maximum current of the reference measuring system. The necessary linearity test is carried out at *b* current levels with one level equal to the maximum level of the comparison calibration (see 5.3). The current levels shall further be chosen such that they comprise at least the minimum and the maximum levels of the assigned measurement range, and that:

$$a \ge 2$$
$$a + b \ge 6$$

where the linearity measurements b are considered in 5.3.

The assigned scale factor, F, is taken as the mean value of the scale factors F_g recorded via comparison with the reference measuring system according to 5.2.1:

$$F = \frac{1}{a} \sum_{g=1}^{a} \overline{F_g}$$

The standard uncertainty u_F for the determination of the assigned scale factor F (calibration values) is given by the combination of the type B contributions of non-linearity of F and the type B contribution based on the maximum of the type A standard uncertainty of the recorded scale factors \overline{F}_{q} :

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{a}{\max}_{g=1}^{a} \left| \frac{\overline{F_g}}{F} - 1 \right| \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{\max}_{g=1}^{a} \left(u_g \right) \right)^2}$$

NOTE A rounded value F_{o} may be taken as the assigned scale factor if the difference between F_{o} and F_{g} is introduced as an uncertainty contribution of type B in the estimate of the expanded uncertainty of the scale factor F_{o} .



Figure 4 – Calibration by comparison over a limited current range with a linearity test (see 5.3) providing extension up to the largest value in the assigned measurement range

5.2.2 Determination of the scale factor of a measuring system from those of its components

The assigned scale factor of the measuring system shall be determined as the product of the scale factors of its converting device, its transmission system, any secondary attenuator, and its measuring instrument. Separate tests are not required for transmission systems that consist only of cables.

The scale factor of a measuring instrument is determined according to the relevant IEC standard (see Clause 2) or by performing calibrations to prove traceability for the quantity to be measured by the instrument.

NOTE 1 The accuracy class stated for analogue instruments in accordance with IEC 60051-2, is related to the fiducial value, i.e. it is an uncertainty stated as a percentage of the upper limit of the measuring range of the instrument. At lower deflections the relative error will be correspondingly larger.

The determination of the scale factor of a component may be made by one of the following methods:

- simultaneous measurements of its input and output quantities;
- by comparison with a reference component (e.g. a current-converting shunt with a reference current-converting shunt);
- a bridge method;
- calculation based on measured impedances;
- from steady-state portion of its step-response (see Annex C), where the dynamic performance for the scale factor thus obtained can be investigated using convolution techniques (Annex D).

NOTE 2 Care should be taken to ensure that the appropriate "stray" coupling and the mutual influence of the components are considered when performing the measurement.

The scale factor of a current-converting shunt may be determined by d.c. measurements, provided that the dynamic behaviour has been determined separately.

An estimation of relevant type A and type B contributions to uncertainty (see also 5.3 to 5.9) shall be made, for each component of the measuring system, and the combined uncertainty valid for each component is determined according to 5.10, taking into account the uncertainty contributions of the of the measuring devices used for the calibrations.

NOTE 3 Estimation of contributions to uncertainty in the component calibration method requires analysis of each component over the full range of conditions – current, temperature, effect of nearby current paths, etc. – that may influence the result. This analysis is complex and requires deep understanding of the measurement process.

The expanded uncertainty of the current measurement, using the measuring system, shall be obtained by combining these combined uncertainties of the components according to the provisions of ISO/IEC Guide 98-3. See also Annex A and Annex B

Further tests related to estimation of uncertainty shall be made on converting device, transmission system(s) (other than cables) and measuring instrument(s) in accordance with all the tests described in 5.3 to 5.9.

Estimation of uncertainty of time parameter measurement shall be made applying the provisions of 5.11 and the same principles as for measurement of the value of the test current.

5.3 Linearity test

5.3.1 Application

The linearity test is only intended to provide an extension of the validity of the assigned scale factor from the maximum current at which a calibration according to 5.2.1.3 has been carried out, up to the upper limit of the assigned measurement range, usually equal to the rated current of the measuring system (see Figure 4).

Some types of converting devices show in principle no change in linearity behaviour over the lifetime of the device, e.g. a shunt. For such devices the first linearity test shall be made, but subsequent linearity tests may be replaced by advancing scientific arguments proving that the linearity is not affected by foreseeable processes in the device.

The output of the measuring system shall be compared with the output of a comparison device or system that has proven its linearity or can be shown – at least through its principle and theory (such as e.g. Rogowski coil) – to be linear over the full assigned measurement range of the system under the linearity test. Failure to prove the linearity using such method does not necessarily mean the measuring system is non-linear. In this case another method suitable for the linearity test shall be chosen.

The ratio *R* between the corresponding readings of the measuring system and the comparison device or system, shall be established as described in 5.2.1.1 for *b* current levels I_g ranging from the upper limit of the assigned measurement range down to a current at which the scale factor has been determined.

Evaluation of linearity is based on the maximum deviation of the ratios $R_{i,g}$ from their mean $\overline{R_g}$, where $R_{i,g}$ are the individual ratios of the measured current to the corresponding input current of the comparison device. The maximum deviation is taken as a type B estimate of the relative standard uncertainty u_{lin} related to non-linearity of the scale factor in the extended current range higher than the maximum current at which calibration has been carried out:

$$u_{\text{lin}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{g=1}^{b} \left| \frac{R_{i,g}}{\overline{R}_g} - 1 \right|$$



Figure 5 – Linearity test of the measuring system with a linear device in the extended voltage range

5.3.2 Alternative methods in order of suitability

5.3.2.1 Comparison with an approved measuring system

The output of the measuring system shall be checked against the output of an approved measuring system according to the procedure described in 5.3.1.

The linearity of the approved measuring system shall preferably have been established by calibration in accordance with 5.2.1.

5.3.2.2 Estimation of temperature rise of current-converting shunt

The impulse current, or the short-time current, carried by a current-converting shunt, raises the temperature of its resistance element and this can alter its scale factor significantly. The extent of this effect on the linearity and its dependence on current can be established by calculation based on the temperature coefficient of the resistance element (see Annex F).

5.3.2.3 Comparison with Rogowski coil

The output from a rigid Rogowski coil in a fixed position is in principle linear and can be used for the linearity test according to the procedure described in 5.3.1.

5.4 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of the scale factor of the measuring system or a component may be affected by various influence quantities depending on the type of current to be measured and the measurement conditions. Further requirements are given in the specific clauses for the relevant current. A type B estimate of the scale-factor relative standard uncertainty u_{dyn} related to the dynamic behaviour is given by:

$$u_{\rm dyn} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{i=1}^{k} \left| \frac{F_i}{F} - 1 \right|$$

where

- *k* is the number of scale-factor determinations within a range of impulse parameters or a frequency range;
- F_{i} is the individual scale factors;

 \overline{F} is the mean (average) scale factor within a range of impulse-time parameters or a frequency range.

Some types of converting devices show, in principle, no change in dynamic behaviour over their lifetime. For such devices the first dynamic performance test must be made, but subsequent dynamic performance tests may be replaced by advancing scientific arguments proving that dynamic performance is not affected by foreseeable processes in the device.

5.5 Short-term stability

5.5.1 Method

The short term stability test is intended to cover the effects of self-heating of the converting device.

A current equal to the maximum current of the assigned measurement range shall be applied to the converting device continuously (or in the case of impulses, at the assigned rate of application) for a period appropriate to the anticipated use.

NOTE The period of current application need not be longer than the assigned operating time, but can be limited to a time sufficient to reach thermal equilibrium.

The scale factor shall be measured at the beginning and at the end of the applied current or, in the case of a series of impulses, at the end of a series of impulses. The measurement of the scale factor can be made either by comparison with another approved measuring system or by other suitable methods. If other methods are chosen, the scale factor may be determined with the converting device dismounted from the test circuit. In this case, the measurement shall be carried out as soon as possible after the application of the current or the series of impulses so that the scale factor does not change appreciably. The recommended maximum time is 20 min.

The result of the test is an estimate of a change of the scale factor, from which the relative standard uncertainty contribution u_{st} is obtained as a type B estimate:

$$u_{\rm st} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{F_{\rm after}}{F_{\rm before}} - 1 \right|$$

where F_{before} and F_{after} are the scale factors before and after the short-term stability test respectively.

5.5.2 Steady-state current

The scale factor shall be measured before or at the start of the application of the current. The rated current shall be applied to the converting device continuously until thermal stability is reached. The scale factor shall then be measured immediately after (or at the end of) the application of the current (see Figure 6).

In certain cases some time has to be permitted for reconnection of the converting device. This time should not be more than 20 % of the thermal time constant of the converting device, and shall in any case not be longer than 20 min.

As an alternative method, the temperature of the resistive element of the shunt can be measured during the test. The scale factor relevant to conditions after the test can then either be determined directly by measurement under artificial heating of the shunt, or by recording the scale factor during the cooling process and extrapolation of the curve back to the last instant of current application.



Figure 6 – Short-term stability test for steady-state current

- 28 -

5.5.3 Impulse current and short-time current

The scale factor shall be measured before or at the start of the application of the current and immediately after or at the end of the application of the current. The rated current shall be applied to the converting device (see Figure 7).

In addition, the scale factor shall be just measured before or at the intended next application of an impulse, to prove that the current-free time has been long enough for the scale factor to return to the original value.

NOTE In the case of a short-time d.c./a.c. current, the scale factor evaluated before and after a single current application may be a proper measure of the short-term stability.



Figure 7 – Short-term stability test for impulse current and short-time current

5.5.4 Periodic impulse current and periodic short-time current

The scale factor shall be measured before or at the start of the application of a series of impulses/short-time currents and immediately after or at the end of the application of a series of impulses/short-time currents (see Figure 8). The rated current shall be applied to the converting device.

In addition, the scale factor shall be measured just before or at the intended start of a new series of impulses, to prove that the current-free time has been long enough for the scale factor to return to the original value.





Figure 8 – Short-term stability test for periodic impulse-current and periodic short-time current

5.6 Long-term stability

The stability of the scale factor shall be considered and evaluated for a long span of time, and is generally estimated as an uncertainty contribution valid for a projected time of use T_{use} until the next calibration. The evaluation can be based on manufacturer's data or on results of a series of performance tests. The result of the evaluation is an estimate of a change of the scale factor from which the relative standard uncertainty contribution u_{lt} is obtained as a type B estimate:

$$u_{\text{lt}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \times \frac{T_{\text{use}}}{T_2 - T_1}$$

where F_1 and F_2 are the scale factors at two subsequent performance tests made at times T_1 and T_2 .

In cases where a number of performance test results are available, the long-term stability can be characterized by the type A contribution:

$$u_{\text{lt}} = \frac{T_{\text{use}}}{T_{\text{interval}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{F_{i}}{\overline{F}_{i}} - 1\right)^{2}}{n-1}}$$

where F_i are the scale factors determined at performance tests repeated at a mean time interval of $T_{interval}$. The mean value of the scale factors F_i is $\overline{F_i}$.

5.7 Ambient temperature effect

The variations of the scale factor or a parameter (for example, the resistance or the transformer ratio error) of a device due to changes of the ambient temperature can be determined by computation using the temperature coefficients of single elements (see for example Annex F) or by making measurements on the single elements at different temperatures.

The influence of ambient temperature can also be quantified by determination of the scale factor at different ambient temperatures.

The data and calculations shall be reported in the record of performance; they may be taken from manufacturer's data.

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

The result of the test (or calculation) is an estimate of a change of the scale factor due to ambient temperature. From this, the relative standard uncertainty contribution u_{temp} is obtained as a type B estimate:

$$u_{\text{temp}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max \left| \frac{F_{Ti}}{F_{\text{cal}}} - 1 \right|$$

where

 F_{Ti} is the scale factor at a particular temperature T_i ;

 F_{cal} is the scale factor at the temperature during the calibration.

NOTE Self-heating effect is covered by the short-term stability test.

Temperature correction factors may be used in cases where the ambient temperature varies over a wide range. Any temperature corrections to be used shall be listed in the record of performance.

In cases where temperature correction has been applied, the uncertainty contribution u_{temp} shall be taken as the uncertainty of the temperature correction factor.

5.8 Effect of nearby current paths

Influence on current measurements, i.e. interference due to mutual-inductance effects of nearby high-current path(s), such as found for instance in three-phase test circuits, can be determined by measurements performed for representative distances of the current-converting device from possibly interfering circuit(s). Grounding/earthing should be the same as in the normal test situation.

The test is performed with no current in the converting device under test and a suitable current in the nearby circuit, whereas readings are taken from both measuring system under test and the nearby current circuit (see Figure 9 and Figure 10).

The result of the test is an estimate of the influence on the measurement, from which the relative standard uncertainty contribution u_{prox} is obtained as a type B estimate:

$$u_{\text{prox}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{i_{\text{prox}}}{i_{\text{nearby}}} - 1 \right|$$

where

 i_{prox} is the reading of the (interference) current of the measuring system under test;

 i_{nearby} is the current applied to the nearby conductor.

In case of multiple-phase test circuits, it is assumed that the current carried by the nearby conductor(s) for the purpose of 5.8 is approximately equal to the current applied to the converting device of the investigated measuring system in a real high-current test. Different values for the standard uncertainty contribution u_{prox} may be obtained for different ranges of distances.

NOTE 1 Some test facilities may choose to approve their measuring systems for only a single set of distances, or for a few sets or ranges of distances.

NOTE 2 The test of the effect of nearby current paths on the converting device should be performed once for each set-up, or range of set-ups.





Figure 9 – Test circuit for effect of nearby current path for current-converting shunts and current transformers with iron



Figure 10 – Test circuit for effect of nearby current path for inductive measuring systems without iron (Rogowski coils)

5.9 Software effect

The way the software handles evaluation of measured data may introduce an uncertainty that has to be estimated. This can be done for instance by evaluation of a synthetically established set of data from a test-data generator, followed by a comparison with the established reference values of the data.

The result of the evaluation is an estimate of the influence of the data processing, from which the relative standard uncertainty contribution u_{sft} is obtained as a type B estimate.

5.10 Uncertainty calculation

5.10.1 General

A simplified procedure to determine the expanded uncertainty of the assigned scale factor F of a measuring system is given here. It is based on several assumptions, which in many cases may be true, but should be verified in each individual case. The main assumptions are as follows:

- there is no correlation between the measurement quantities;
- standard uncertainties evaluated by the method of type B are assumed to have a rectangular distribution; and,
- there are at least three dominant uncertainty contributions that are similar in magnitude.

These assumptions lead to a procedure of evaluation of the expanded uncertainty of the assigned scale factor, F, both for the calibration situation and for the use of an approved measuring system under extended conditions in measurements.

The expanded uncertainty of calibration U_{cal} is estimated from the uncertainty of the calibration of the reference measuring system, and in addition, from influences of other quantities discussed in this clause, such as stability of the reference measuring system and ambient parameters during the calibration.

The expanded uncertainty of a measurement U_{mes} of the test quantity is evaluated from the uncertainty of calibration of the scale factor of the approved measuring system and in addition from influence of other quantities discussed in 5.10.3, such as stability of the approved measuring system and ambient parameters during the measurement.

Further methods for estimating uncertainty are given in ISO/IEC Guide 98-3 and are discussed in Annex A and Annex B.

5.10.2 Uncertainty of calibration

The expanded uncertainty of a calibration U_{cal} is calculated from the uncertainty of the reference measuring system and from the type A and type B uncertainty contributions explained in this clause:

$$U_{cal} = k \times u_{c cal} = 2 \times \sqrt{u_{c ref}^2 + u_{F}^2 + \sum_{i=1}^N u_{Bi}^2}$$

where

- k = 2 is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;
- $u_{c cal}$ is the combined standard uncertainty of the scale factor of the approved measuring system determined at its calibration;

- $u_{c ref}$ is the combined standard uncertainty of the scale factor of the reference measuring system determined at its calibration;
- u_F is the standard uncertainty of the determination of the scale factor performed according to 5.2.1 or in 5.2.2;
- u_{Bi} is the contribution to combined uncertainty of the scale factor caused by the *i*th influence quantity and evaluated as a type B contribution. These contributions are related to the reference measuring system and arise from non-linearity, short- and long-term instabilities, etc.; they are determined according to 5.3 to 5.9 and based either on additional measurements or estimated from other data sources. Influences related to the approved measuring system, such as its short-term stability and resolution of the measurement, have also to be taken into account if they are significant during the calibration.

In cases where the assumptions mentioned above are not valid, the procedures given in Annex A and Annex B or, if necessary, in ISO/IEC Guide 98-3, shall be applied.

The number N of type B uncertainty contributions may differ for different types of test currents (Clauses 6 to 11). More information on the type B contributions is given in the relevant clauses.

If the assigned scale factor of the measuring system is calculated from those of its components (5.2.2), the standard uncertainties of the calibration of the components shall be combined with those describing additional conditions of the measuring system and its environment (see Annex A and Annex B).

5.10.3 Uncertainty of measurement using an approved measuring system

Estimation of the expanded uncertainty of a measurement is the responsibility of the user. However, this estimation may be given for a defined range of measurement conditions in conjunction with the calibration certificate.

The relative expanded uncertainty of a measurement U_{mes} is calculated from the combined standard uncertainty of the assigned scale factor of the approved measuring system as determined in the calibration and additional uncertainty contributions related to the use of the approved measuring system. It is estimated by:

$$U_{\rm mes} = k \times u_{\rm c\,mes} = 2 \times \sqrt{u_{\rm c\,cal}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\rm Bi}^2}$$

where

- k = 2 is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;
- *u*_{c mes} is the combined standard uncertainty of the measurement using the approved measuring system, valid for a projected period of use, e.g. a calibration interval;
- $u_{c cal}$ is the combined standard uncertainty of the scale factor of the approved measuring system determined at the calibration;
- u_{Bi} is the contribution to the combined uncertainty of the scale factor of the approved measuring system caused by the *i*th influence quantity evaluated as a type B contribution. These contributions are related to a normal use of the approved measuring system and arise from non-linearity, short- and long-term instabilities, etc.; they are determined according to 5.3 to 5.9 and are based either on additional measurements or estimated from other data sources. Other significant influences shall also be taken into account, e.g. the resolution of the instrument display in the approved measuring system.

NOTE A calibration certificate may include information on both the uncertainty of the calibration, U_{cal} , and the uncertainty of measurement of the test current, U_{mes} , when using the approved measuring system under stated, predefined conditions.

- 34 -

In cases where the assumptions mentioned above are not valid, the procedures given in Annex A or, if necessary in ISO/IEC Guide 98-3, shall be applied.

The number N of type B uncertainty contributions may differ for different types of test currents (Clauses 6 to 11). More information on the type B contributions is given in the relevant clauses.

5.11 Uncertainty calculation of time-parameter measurements (impulse currents only)

5.11.1 General

An approved measuring system for impulse current shall be able to measure each time parameter within the specified uncertainty limit provided the parameter lies within its specified range. For front time this is usually the nominal epoch, see 10.2.9. The experimental proof may be given either by the comparison or the component method. The proof may also be given by calculation, using the convolution method based on the experimental step response (Annex C and Annex D).

The general procedure for evaluating the time parameters and their uncertainties is described below for the front time T_1 , determined by the comparison method. It is applicable to other time parameters in the same way.

Definitions of time parameters for impulse currents are given in Clause 10.

NOTE The estimation of the measurement uncertainty of time parameters results in an absolute uncertainty value.

5.11.2 Uncertainty of the time-parameter calibration

The front time T_1 of *n* impulse currents shall be measured simultaneously by the measuring system under test, denoted as X, and the reference measuring system, denoted as N. The error of the reference measuring system is assumed to be negligible. The arithmetic mean error of the front times is:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(T_{1\mathsf{X},i} - T_{1\mathsf{N},i} \right)$$

and the experimental standard deviation of the individual front-time errors is:

$$s_{\Delta T_1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\Delta T_{1,i} - \Delta T_1)^2}$$

where $\Delta T_{1,i}$ is the *i*th difference between the front times measured by the systems X and N.

NOTE 1 Usually, no more than n = 10 independent readings are necessary.

NOTE 2 In general, the front times are evaluated from the same records of N and X, used to evaluate the peak values for determining the scale factor (see 5.2.1.1).

From $s_{\Delta T_1}$, the type A standard uncertainty of the mean front-time errors is calculated as:

$$u_{\mathsf{A}} = \frac{s_{\Delta T_1}}{\sqrt{n}}$$
The comparison is performed at a suitable current level with a front time being the minimum and maximum T_1 values that the measuring system will be used for. The different front times are distinguished by an ordinal number, *j*, as T_{1j} . For each T_1 value, the mean difference $\Delta T_{1,j}$ is calculated as described above.

The overall mean of the $n \ge 2$ mean errors is:

$$\overline{\Delta T_{1m}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \overline{\Delta T_{1,j}}$$

The maximum deviation of the individual values $\Delta T_{1,j}$ from their mean value ΔT_{1m} is used to determine the type B uncertainty u_B as:

$$u_{\rm B} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^{n} \left| \overline{\Delta T_{1,j}} - \overline{\Delta T_{1m}} \right|$$

NOTE 3 If the measuring system is used for one single front time, only one comparison measurement is needed.

The expanded uncertainty of the time-parameter calibration, equal to that of the resultant mean error, ΔT_{1cal} , is determined as:

$$U_{cal} = k \times u_{c cal} = 2 \times \sqrt{u_{c ref}^2 + u_{A}^2 + u_{B}^2}$$

where

- $u_{c cal}$ is the combined standard uncertainty of the mean front-time error, ΔT_{1cal} , of the calibrated measuring system;
- k = 2 is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;
- $u_{\rm c ref}$ is the combined standard uncertainty of the mean front-time error, $\Delta T_{\rm 1ref}$, of the reference measuring system;
- u_A is the type A standard uncertainty of the mean front-time error, ΔT_{1cal} , of the calibrated measuring system;
- $u_{\rm B}$ is the type B standard uncertainty of the mean front-time error, $\Delta T_{\rm 1cal}$, of the calibrated measuring system.

Additional contributions to the expanded uncertainty U_{cal} may be important in special cases and shall be considered.

5.11.3 Uncertainty of a time-parameter measurement using an approved measuring system

Estimation of the expanded uncertainty of a time-parameter measurement is the responsibility of the user. However, this estimation may be given for a defined range of measurement conditions in the calibration certificate.

NOTE If the expanded uncertainty U_{cal} of the time parameter calibration is less than 70 % of the expanded uncertainty specified for time parameter measurement in this standard, it can in general be assumed that the uncertainty of using the approved measuring system for time parameter measurement U_{M} is equal to U_{cal} .

Calculation of the expanded uncertainty of the time-parameter measurement U_{mes} shall be calculated according to the following formula:

$$U_{\text{mes}} = k \times u_{\text{cmes}} = 2 \times \sqrt{u_{\text{ccal}}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\text{B}i}^2}$$

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

where

- $u_{c cal}$ is the combined standard uncertainty of the mean front-time error, ΔT_{1cal} , of the calibrated measuring system;
- k = 2 is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;
- u_{Bi} is the contribution to combined uncertainty of the measurement of time parameter of an impulse, using the approved measuring system caused by the *i*th influence quantity to the time parameter and evaluated as a type B contribution. These contributions are related to a normal use of the approved measuring system and arise for example from short- and long-term instabilities, software effects, etc., but also due to non-perfect impulse shapes. Determination of these contributions according to 5.3 to 5.9 is based either on additional measurements or other data sources. In some situations, further influences must also be taken into account, e.g. the resolution of the instrument display in the approved measuring system;
- $u_{c mes}$ is the combined standard uncertainty of the time parameter measured with the approved measuring system, valid for a projected period of use.

Additional contributions to the expanded uncertainty may be important in special cases and shall be considered in calculation of U_{mes} , e.g. when the impulse current exhibits oscillations on the front.

NOTE 1 No correction for time parameter measurement is required, as long as the sum of the observed relative mean error $\frac{\Delta T_{1,j}}{T_1}$ and its relative expanded uncertainty U_{mes} is less than 70 % of the required relative uncertainty

for the relevant time-parameter measurement.

NOTE 2 The influence of the time-parameter variation on the test result is supposed to be small.

NOTE 3 The expanded uncertainty of a corrected time parameter, $T_{1 \text{corr}}$, should be established according to this clause.

5.12 Interference test

5.12.1 Application

Interference test is required for steady-state a.c., short-time a.c./d.c., and impulse-current measuring systems.

Interference test is made to ensure adequate immunity to interference of the current measuring system in a given circuit under given operating conditions. Interference may be induced by the transient electromagnetic field or conducted by either the signal or the supply lines.

The test shall be made on the measuring system whereas its transmission system (measuring cable) according to 5.12.2 or 5.12.3, whichever is relevant, is kept without any change of the earth connections. An interfering condition shall be produced at the input of the measuring system, for example by operation of an appropriate device producing a current representative of the waveform to be applied in the high-current test, and the output shall be recorded. The interference test shall be made at a suitable current with each type of current that is to be used or expected in or nearby the high-current test set-up, including multi-phase and chopped currents.

The interference ratio shall be determined as the maximum amplitude of the measured interference divided by the output of the measuring system when measuring the test current.

The interference ratio recorded should not exceed 1 %. Higher values can be accepted if it is shown that the uncertainty requirements are still met.

NOTE 1 A measuring system for short-time alternating current is considered an impulse measuring system with respect to the interference test.

NOTE 2 The influence of nearby current paths is considered in 5.8.

5.12.2 Current-converting shunts and current transformers with iron

During the interference test, the converting device of the measuring system shall be mounted in the current circuit, as under the normal high-current test conditions, and it shall carry the test current. The transmission system (measuring cable), disconnected from the converting device, shall be either short-circuited (coaxially in case of a coaxial cable) or terminated by its characteristic impedance at the input end (whichever best represents normal measurement conditions) and earthed in the same way as in normal measurements (see Figure 11).





Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print





5.12.3 Inductive measuring systems without iron (Rogowski coils)

For measuring systems comprising inductive converting devices without iron, such as Rogowski coils, it is essential to prove sufficient immunity of the winding and internal elements to interference (proper coaxial design, shielding to avoid capacitive pick-up, etc.). Therefore, during interference tests, the transmission system (measuring cable) shall be connected to the output of the converting device in the same way as for normal measurements including the earthing, while the converting device itself is shifted from its normal concentric position, so that it remains perpendicular and close to, but not around the high-current carrying conductor (see Figure 13). The distance of the Rogowski-coil axis from the interfering current path should be relevant to the conditions of the laboratory; in the case of a nearby-earthed current path, it should be approximately equal to half the diameter of the Rogowski coil; in cases with a high-potential current path, the distance is adequately larger as required by the necessary clearance.

NOTE The interference test is also a test for the effect of nearby current paths. However, the clearance to the current conductor is small, and possibly not representative of the clearance sought in the test in 5.8. In such cases, a second test can be made for a more representative clearance.



Figure 13 – Test circuit for interference test for inductive systems without iron

5.13 Withstand tests

5.13.1 Voltage withstand tests

Voltage withstand tests are applicable only to converting devices intended for operation at elevated potentials.

The converting device shall pass a dry withstand test performed with a voltage of the required frequency or shape at a level of 110 % of its rated voltage. For the procedures of withstand tests, see IEC 60060-1 or IEC 61180-1.

The withstand tests shall be performed at the polarity or polarities at which the system is to be used.

NOTE Design of any component of an approved measuring system should be such that it can withstand, without any change of its characteristics, a possible disruptive discharge at the test object.

5.13.2 Current withstand tests

5.13.2.1 Short-time withstand current

When short-time withstand current test is required, the converting device shall be part of the measuring system and shall be subjected to a short-time withstand current at its rated current. The measuring system shall fulfil requirements on scale factor at this current and there shall be no evidence of damage to the converting device.

5.13.2.2 Peak withstand current

When peak withstand current test is required, the converting device shall be part of the measuring system and shall be subjected to a peak withstand current at its rated current. The measuring system shall fulfil requirements on scale factor at this current and there shall be no evidence of damage to the converting device.

6 Steady-state direct current

6.1 Application

Test applications are considered for measurements of high steady-state d.c. currents.

Procedures given below for measurement of test current are applicable to both calibration and measurement.

6.2 Terms and definitions

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

6.2.1

value of the d.c. test current

arithmetic mean (average) value of the test current

6.2.2

ripple

periodic deviation from the arithmetic mean value of the current. The amplitude of the ripple is defined as half the difference between the maximum and minimum values

6.2.3

ripple factor

ratio of the ripple amplitude to the arithmetic mean value of the current

6.3 Test current

6.3.1 Requirements

The test current shall be a direct current with not more than 7 % ripple factor, unless otherwise specified by the relevant technical committee. Further test requirements may be defined in apparatus specific standards.

6.3.2 Tolerances

Unless otherwise specified by the relevant technical committee, the tolerance requirement on the test current shall be ± 3 % throughout the test.

NOTE 1 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.

NOTE 2 The relevant technical committee may specify other tolerance limits, e.g. 0 % to +5 %.

6.4 Measurement of the test current

6.4.1 Requirements for an approved measuring system

The general requirement is to measure the value of the test current with an expanded uncertainty U_{mes} (with a coverage probability of 95 %) of not more than 3 % if not otherwise defined in the relevant apparatus standard.

6.4.2 Uncertainty contributions

For a d.c. current measuring system, the expanded uncertainty U_{mes} shall be evaluated according to 5.10.3 and, if necessary, according to Annex A and Annex B. The individual contributions to be considered are given in Table 1. The information given here is for guidance only; other contributions can be important in some cases and shall be considered as well.

6.4.3 Dynamic behaviour

There are no requirements on dynamic behaviour of a measuring system used to measure only the value of the d.c test current (arithmetic mean value). For ripple measurements see 6.5.3.

6.4.4 Calibrations and tests on an approved measuring system

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor of measuring system at the calibration			5.2 and 5.10.2	
Scale factor check				6.4.5
Extension of linearity		5.3 (if applicable)	5.3 (if applicable)	
Dynamic behaviour of measuring system				
Short-term stability		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Effect of nearby current paths on converting device	5.8 (if applicable)			
Software effect	5.9 (if applicable)			
Dry voltage withstand test on converting device		5.13.1 (if applicable)		
Current withstand test	-			
Scale factor of converting device		5.2		
Scale factor of transmission system other than a cable		5.2		
Scale factor of measuring instrument		5.2		
Responsibility	On components: manufacturer		On measuring system: user	
Recommended repetition rate	Once only (type and routine test)		Proposed annually, but at least every 5 years	According to stability, but at least annually

Table 1 – Required tests for steady-state direct current

The compliance with type test requirements can be proved by tests on a device of the same design or sometimes be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each device. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

6.4.5 Performance check

6.4.5.1 General

The scale factor of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

6.4.5.2 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component shall be checked using an internal, or an external, calibrator having an expanded uncertainty not exceeding 1 %. If the scale factors of individual components differ from their previous values by not more than 1 %, the previous assigned scale factor of the measuring system is taken as still valid. If any difference exceeds 1 %, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test as described in 5.2.

NOTE DC measurements of the resistance of a current-converting shunt are in general sufficient for performance checks.

6.4.5.3 Check of the scale factor of the measuring system

A comparison shall be made with another approved measuring system with the procedure of 5.2.1. If the difference between the two measured values is not larger than 3 %, the previous assigned scale factor is taken as still valid. If it is larger, then the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.2).

6.5 Measurement of ripple amplitude

6.5.1 Requirements for an approved measuring system

The ripple amplitude shall be measured with an expanded uncertainty (with a coverage probability of 95 %) of not more than 10 % of the ripple amplitude or 1 % of the value of the d.c. test current, whichever is larger.

Separate measuring systems may be used to measure the value of the d.c. test current and of the ripple amplitude, or the same converting device may be used with two separate instruments.

6.5.2 Uncertainty contributions

For a measuring system for ripple current, the expanded uncertainty U_{mes} shall be evaluated according to 5.10.3 and, if necessary, Annex A and Annex B. The individual contributions to uncertainty to be considered are given in Table 2. The information given here is for guidance only; other contributions can be important in some cases and shall be considered as well.

6.5.3 Dynamic behaviour for ripple

6.5.3.1 Requirements

In general, it can be assumed that the requirement on uncertainty due to dynamic behaviour is fulfilled if the upper -3 dB limit frequency f_2 of the amplitude-frequency response of the measuring system is greater than 10 times the fundamental frequency f of the ripple and if the lower -3 dB limit frequency f_1 is smaller than 1/10 of the fundamental frequency f of the ripple.

6.5.3.2 Direct determination of the amplitude-frequency response

The system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for an appropriate range of frequencies.

6.5.4 Calibrations and tests on an approved ripple-current measuring system

The tests specified here shall be applied only to systems used to measure the ripple amplitude.

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor of measuring system at the calibration			6.5.5 and 5.2	
Scale factor check				6.5.6
Dynamic behaviour for ripple			6.5.3	
Long-term stability	5.6			
Ambient temperature effect	5.7			
Responsibility	On components: manufacturer		On measurin	g system: user
Recommended repetition rate	Onc (type and	e only routine test)	Proposed annually, but at least every 5 years	According to stability, but at least annually

Table 2 – Required tests for ripple current

The compliance with type test requirements can be proved by tests on a device of the same design or sometimes be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each device. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

Other uncertainty contributions can be important in individual cases and the information given here is for guidance only.

6.5.5 Measurement of the scale factor at the ripple frequency

The scale factor of the measuring system shall be determined at the fundamental frequency f of the ripple, with an expanded uncertainty of not more than 3 %. This scale factor may be determined as the product of the scale factors of the components.

6.5.6 Performance check for ripple current measuring system

6.5.6.1 General

The scale factor of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

6.5.6.2 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component shall be checked using an internal or an external calibrator having an expanded uncertainty not exceeding 3 %. If the scale factors of individual components differ from their previous values by not more than 3 %, the previous assigned scale factor of the measuring system is taken as still valid. If any difference exceeds 3 %, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.2).

NOTE DC measurements of the resistance of a current-converting shunt are in general sufficient for performance checks.

6.5.6.3 Check of the scale factor of the measuring system

A comparison shall be made with another approved measuring system according to the procedure of 5.2.1. If the difference between the two measured values is not larger than 10 %, the previous assigned scale factor is taken as still valid. If it is larger, then the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.2).

6.6 Test procedures

Test procedures are defined by the relevant technical committee or shall be based on agreement with the client.

7 Steady-state alternating current

7.1 Application

Test applications are considered for tests with steady-state alternating current.

Procedures given below for measurement of test current are applicable to both calibration and measurement.

7.2 Terms and definitions

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

7.2.1

value of the a.c. test current true r.m.s. value of the test current

7.2.2 true r.m.s. value value obtained from



where

0 is the time instant (t = 0) of an a.c. periodic wave, convenient for the beginning of integration;

T is the time taken over an integral number of cycles;

i(t) is the instantaneous value of the current.

NOTE 1 The true r.m.s. value can in general be calculated from a digitized record of any periodic waveform, provided a sufficient number of samples have been taken (see Clause G.4).

NOTE 2 In cases with varying frequency, no strict formula for true r.m.s. value can be given.

7.2.3

peak value

 $\hat{\iota}_{\rm SS}$

maximum instantaneous magnitude of the current

7.3 Test current

7.3.1 Requirements

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

The current wave shape shall approximate a sinusoid with the difference between the magnitudes of the positive and negative peak values being less than 2 %.

The results of a high-current test are thought to be unaffected by small deviations from a sinusoid if the total relative harmonic distortion (THD) does not exceed 5 % of the r.m.s. value of the fundamental component.

- 44 -



where

 I_1 is the r.m.s value of the fundamental component of the current;

 I_n is the r.m.s value of the n^{th} harmonic component starting from n = 2.

For some test circuits in common use, greater deviations have to be accepted. For instance, the test object, especially if it has non-linear impedance characteristics, may cause a considerable deviation from a sinusoid.

7.3.2 Tolerances

If not otherwise specified by the relevant technical committee, the tolerance requirement on the test current shall be ± 3 % throughout the test.

NOTE 1 It is emphasized that the tolerance constitutes the permitted difference between the test-specified value and the value actually measured. This difference should be distinguished from the uncertainty of a measurement.

NOTE 2 The relevant technical committee may specify other tolerance limits, e.g. 0 % to +5 %.

7.4 Measurement of the test current

7.4.1 Requirements for an approved measuring system

The general requirement is to measure the value of the test current with an expanded uncertainty U_{mes} (with a coverage probability of 95 %) not exceeding 3 % if not otherwise defined in the relevant apparatus standard.

7.4.2 Uncertainty contributions

For an a.c. current measuring system, the expanded uncertainty shall be evaluated according to 5.10.3 and, if necessary, Annex A and Annex B. The individual uncertainty contributions to be considered are given in Table 3. The information given here is for guidance only; other contributions can be important in some cases and shall be considered as well.

7.4.3 Dynamic behaviour

7.4.3.1 Requirements

The amplitude-frequency response of a measuring system intended for operation at one single fundamental frequency f_{nom} shall appear (in the frequency range depicted in Figure 14 by dash-and-dot lines) within the upper and lower limits indicated by solid and dashed lines. The limits have been derived from the uncertainty requirements. The number pairs in the diagram give the normalized frequencies (seen in the logarithmic scale) and the corresponding permitted deviations from the ideal response at the corner points of the limit lines. The performance from f_{nom} to 7 f_{nom} shall be proven either by test or by circuit analysis. The amplitude-frequency response limits outside this range are given for information only. The uncertainty contribution u_{dyn} is taken as zero.

Other requirements on dynamic behaviour may be specified by the relevant technical committee.

NOTE 1 The restrictions given on dynamic behaviour are intended to ensure that amplitude errors of the frequency components other than the fundamental will not contribute significantly to the measured value of the test

current. Measuring systems complying with these requirements are furthermore considered to have a frequency response suitable for measurements of the total harmonic distortion (THD) on the test current.





Figure 14 – Acceptable normalized amplitude-frequency response of an a.c. measuring system intended for a single fundamental frequency f_{nom}

A measuring system can also be approved for a range of fundamental frequencies. The scale factor (and consequently the amplitude-frequency response) of a measuring system shall in such case be constant within 1 % from the lowest fundamental frequency f_{nom1} up to the highest fundamental frequency f_{nom2} . The response outside the interval f_{nom1} to f_{nom2} , but inside the interval f_{nom1} to $7 f_{nom2}$ (i.e. in the frequency range up to the vertical dash-and-dot lines in Figure 15) shall appear within the upper and lower limits indicated by solid and dashed lines. The limits have been derived from the uncertainty requirements. The number pairs in the diagram give the normalized frequencies (seen in the logarithmic scale) and the corresponding permitted deviations from the ideal response at the corner points of the limit lines. The performance from f_{nom1} to $7 f_{nom2}$ shall be proven by tests or by circuit analysis. The amplitude-frequency response limits outside this range are given for information only.

The uncertainty contribution u_{dyn} due to the variation of scale factor over the frequency range f_{nom1} to f_{nom2} shall be evaluated according to 5.4.



Figure 15 – Acceptable normalized amplitude-frequency response of an a.c. measuring system intended for a range of fundamental frequencies f_{nom1} to f_{nom2}

7.4.3.2 Direct determination of the amplitude-frequency response

To determine the dynamic behaviour, the system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for an appropriate range of frequencies.

7.4.4 Calibrations and tests on an approved measuring system

Table 3 – Required	l tests for st	teady-state a	alternating	current
--------------------	----------------	---------------	-------------	---------

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor of measuring system at the calibration			5.2	
Scale factor check				7.4.5
Extension of linearity		5.3 (if applicable)	5.3 (f applicable)	
Dynamic behaviour of the measuring system		7.4.3 and 5.4		
Short-term stability of converting device		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Effect of nearby current paths on the converting device	5.8 (if applicable)			
Software effect	5.9 (if applicable)			
Interference test			5.12	

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Dry voltage withstand test on converting device		5.13.1 (if applicable)		
Current withstand test		-		
Scale factor of converting device		5.2		
Scale factor of transmission system other than a cable		5.2		
Scale factor of measuring instrument		5.2		
Responsibility	On components:	manufacturer	On measuring s	ystem: user
Recommended repetition rate	Once only (type test)	and routine	According to stability, but at least every 5 years	According to stability, but at least annually

The compliance with requirements of the type tests can be proved by tests on a device of the same design or be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each device. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

7.4.5 Performance check

7.4.5.1 General

The scale factor of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

7.4.5.2 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component can be checked using an internal or an external calibrator having an expanded uncertainty not exceeding 1 %. If the scale factors of individual components differ from their previous values by not more than 1 %, the previous assigned scale factor of the measuring system is taken as still valid. If any difference exceeds 1 %, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.2).

NOTE DC measurements of the resistance of a current-converting shunt are in general sufficient for performance checks.

7.4.5.3 Check of the scale factor of the measuring system

A comparison is made with another approved measuring system following the procedure of 5.2.1. If the difference between the two measured values is not larger than 3 %, the previous assigned scale factor is taken as still valid. If it is larger, then the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.2).

7.5 Test procedures

Test procedures are defined by the relevant technical committee or shall be based on agreement with the client.

8 Short-time direct current

8.1 Application

Test applications are considered for high-power testing with direct current. The short-time direct current is a d.c. current with limited duration (e.g. up to 1 s) as encountered for instance in high-power (short-circuit) d.c. tests. Due to current interruptions during the measurements of characteristic quantities, there may be transient phenomena, possibly

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

significant for the interference susceptibility of current and voltage measuring systems of a high-power laboratory.



Figure 16 – Example of short-time direct current

Procedures given below for measurement of test current are applicable to both calibration and measurement.

8.2 Terms and definitions

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

8.2.1

peak value

 $\hat{\imath}_{ss}$ maximum instantaneous magnitude of the current

8.2.2 steady-state d.c. current

arithmetic mean (average) value of current at steady state, i.e. when the current is above 90 % of the peak value

8.2.3 time constant of the circuit

τ

ratio of inductance over resistance of the circuit

NOTE 1 The time constant is the time in which an exponentially rising current reaches $(1 - e^{-1})$ of its steady-state value. The time constant measured is not necessarily equal to the time constant calculated from resistance and inductance values.

NOTE 2 Inductance of the circuit can change due to saturation effects in ferromagnetic materials and due to the fact that the circuit may be different at switching on and at switching off.

I_{ss}

8.2.4

duration

time during which the current is above 10 % of the peak value

8.3 Test currents

8.3.1 Requirements for the test current

The test current is in general characterized by:

- peak value; steady-state d.c. current;
- time constant of the circuit;
- duration.

8.3.2 Tolerances

Unless otherwise specified by the relevant technical committee, the tolerance requirement on the test current shall be according to Table 4.

NOTE 1 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.

NOTE 2 The relevant technical committee may specify other tolerance limits.

Table 4 – Tolerance requirement on test-current parameters for short-time direct current

Quantity	Tolerance %
Peak value	±5
Steady-state d.c. current	±5
Time constant	0 to +25
Duration	To be defined by the relevant technical committee

8.4 Measurement of the test current

8.4.1 Requirements for an approved measuring system

The general requirement is to measure the peak value and the steady-state current with an expanded uncertainty $U_{\rm mes}$ (with a coverage probability of 95 %) of not more than 5 %, if not otherwise defined in the relevant apparatus standard.

8.4.2 Uncertainty contributions

For a short-time d.c. current measuring system, the expanded uncertainty shall be evaluated according to 5.10.3 and, if necessary, Annex A and Annex B. The individual contributions to be considered are given in Table 5. The information given here is for guidance only; other contributions can be important in some cases and shall be considered as well.

8.4.3 Dynamic behaviour

8.4.3.1 Requirements

The measuring system shall be designed for d.c. up to the upper limit frequency f_2 . The upper -3 dB limit frequency f_2 of the amplitude-frequency response of the measuring system shall be greater than 1 kHz. The uncertainty contribution due to the frequency response is taken as zero.

8.4.3.2 Dynamic behaviour test

The amplitude-frequency response can either be determined directly or by evaluating the spectral density of the response to a pulse.

For the direct determination of the amplitude-frequency response, the system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for a range of frequencies sufficient to prove the response from d.c. up to the upper limit frequency f_2 .

For the determination of amplitude-frequency response using spectral-density function, the system is subjected to a current impulse and its input and output are measured. The input is measured using a reference measuring system having a flat response in the frequency range of interest. The impulse should have a rise time shorter than the shortest rise time for which the system under test is to be qualified. The duration of the impulse should be long enough to prove the response from d.c. up to the upper limit frequency f_2 . The amplitude-frequency response is estimated from the Fourier transform of the ratio of the test current measured by the reference measuring system and the output of the approved measuring system.

NOTE Certain converting devices have an innately stable dynamic behaviour. In such cases a dynamic test on the instrument may be sufficient.

8.4.4 Calibrations and tests on an approved measuring system

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor of measuring system at the calibration			5.2	
Scale factor check				8.4.5
Extension of linearity		5.3 and 8.4.6 (if applicable)	5.3 and 8.4.6 (if applicable)	
Dynamic behaviour of measuring system		8.4.3	8.4.3 (if applicable)	
Short-term stability of converting device		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Effect of nearby current paths on converting device	5.8 (if applicable)			
Software effect	5.9 (if applicable)			
Interference test on transmission system with active elements			5.12	
Interference test on measuring system			5.12	
Wet or polluted voltage withstand test on converting device	5.13.1 (if applicable)			
Dry voltage withstand test on converting device		5.13.1 (if applicable)		
Current withstand test		5.13.2		
Scale factor of a converting device		5.2		
Scale factor of transmission system other than a cable		5.2		
Scale factor of measuring instrument		5.2		
Responsibility	On components	s: manufacturer	On measuring	g system: user

Table 5 – Required tests for short-time direct current

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Recommended repetition rate	Once (type and r	e only outine test)	According to stability, but at least every 5 years	According to stability, but at least annually

The compliance with requirements of the type tests can be proved by tests on a device of the same design or be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each device. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

8.4.5 Performance check

8.4.5.1 General

The scale factor of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

8.4.5.2 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component can be checked using an internal or an external calibrator having an expanded uncertainty not exceeding 1 %. If the scale factors of individual components differ from their previous values by not more than 1 %, the previous assigned scale factor of the measuring system is taken as still valid. If any difference exceeds 1 %, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.3).

NOTE DC measurement of the resistance of a current-converting shunt is in general sufficient for performance checks.

8.4.5.3 Check of the scale factor of the measuring system

A comparison is made with another approved measuring system following the procedure of 5.3.2. If the difference between the two measured values is not larger than 3 %, the previous assigned scale factor is taken as still valid. If it is larger, then the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.3).

8.4.6 Linearity test

The linearity test can be performed either with short-time d.c. current or with asymmetrical power-frequency current with a peak factor of approximately 2. The procedures of 5.3 shall be followed.

The value to be determined is the peak value of the first peak. The linearity test is required for one polarity only.

8.5 Test procedures

Test procedures are defined by the relevant technical committee.

9 Short-time alternating current

9.1 Application

Test applications are considered for high-power testing. Short-time alternating current is an a.c. current with limited duration (e.g. up to 5 s), with or without transient d.c. component, i.e. asymmetrical or symmetrical current. Due to current interruptions during the measurement of characteristic quantities, there may also be transient phenomena, possibly significant for the interference susceptibility of current measuring systems.



- 52 -

Figure 17 – Example of short-time alternating current

Procedures given below for measurement of test current are applicable to both calibration and measurement.

9.2 Terms and definitions

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

9.2.1 peak value

maximum instantaneous magnitude of the current

9.2.2 true r.m.s. value of an event $I_{\rm rms}$

value obtained from:

$$I_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \, \mathrm{d}t}$$

where

0 is the time instant (t = 0) when the current first deviates from zero;

T is the time taken until the current last deviates from zero;

i(t) is the instantaneous value of the current.

NOTE 1 The true r.m.s. value of an event can in general be calculated from a digitised record of any event limited in time, provided a sufficient number of samples have been taken.

NOTE 2 The true r.m.s. value of an event takes into account the contribution from the d.c. component as well.

9.2.3

symmetrical a.c. component

true r.m.s. value of the current after any component has decayed

9.2.4

peak factor

ratio of the maximum absolute value of an alternating quantity to its root-mean-square value

```
9.2.5

impedance angle

\varphi

defined as \varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R}
```

where

 ω is the angular frequency of the supply;

- L is the inductance;
- *R* is the resistance of the equivalent circuit of the short-time alternating current.

The impedance angle is often characterized by the value of $\cos \varphi$ and named "power factor".

NOTE 1 Impedance angle is a characteristic of the test circuit itself.

NOTE 2 Methods to determine impedance angle may be given in product standards. A general procedure is given in Annex G.

9.3 Test current

9.3.1 Requirements for the test current

The test current is in general characterized by:

- peak value;
- symmetrical a.c. component;
- frequency;
- power factor (cos φ) of the circuit (see Annex G);
- duration.

For certain applications, other parameters can be considered, for example the Joule integral:

$$I_{\rm rms}^2 \times T = \int_0^T i^2(t) \, \mathrm{d}t$$

NOTE Practical procedures for determination of r.m.s. values are provided in Annex G.

9.3.2 Tolerances

Unless otherwise specified by the relevant technical committee, the tolerance requirement on the test current shall be according to Table 6.

Table 6 – Tolerance requirements on the short-time alternating current test parameters

Quantity	Tolerance %
Peak value	±5
Symmetrical a.c. component	±5
$\cos \varphi$	±0,05
Frequency	±5
Duration	To be defined by the relevant technical committee

NOTE 1 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.

NOTE 2 The relevant technical committee may specify other tolerance limits.

9.4 Measurement of the test current

9.4.1 Requirements for an approved measuring system

The general requirement is to measure the peak value and the symmetrical a.c. component, within the assigned measurement range given in the record of performance, with an expanded uncertainty $U_{\rm mes}$ (with a coverage probability of 95 %) not more than 5 %, if not otherwise defined in the relevant apparatus standard.

NOTE 1 The impedance angle, expressed as $\cos \varphi$, should be measured with an expanded uncertainty of not more than 0,05. However, the uncertainty of the measurement may be influenced by other measuring systems used for this determination.

NOTE 2 In systems using current transformers with iron as converting devices, special attention should be paid to the possible effects of the core saturation caused by successive asymmetrical test currents.

9.4.2 Uncertainty contributions

For a short-time a.c. current measuring system, the expanded uncertainty shall be evaluated according to 5.10.3 and, if necessary, Annex A and Annex B. The individual contributions to be considered are given in Table 9. The information given here is for guidance only; other contributions can be important in some cases and shall be considered as well.

9.4.3 Dynamic behaviour

9.4.3.1 Requirements

Requirements on dynamic behaviour depend on the type of test performed. In each case, the measuring system must be characterized by a minimum and a maximum frequency at which the requirements of 9.4.1 are fulfilled. Table 7 gives a listing of typical tests and the corresponding requirements. The procedures of 5.4 shall be followed.

Table 7 – List of typical tests in a high-power laboratory and required minimum
frequency range of the measuring system

Type of tests	Fundamental frequency of the current	Required frequency range	Comments
Peak withstand and short- time withstand current tests	Power frequency	0,2 Hz to 7 times the fundamental frequency of test current	DC component shall be measured as well
Making and breaking tests	Power frequency	0,2 Hz to 7 times the fundamental frequency of test current	Normally no chopping
Shunt-reactor switching tests	Power frequency	0,2 Hz to 7 times the fundamental frequency of test current	Multiple-restrike current test, current measurement not required for test evaluation
Capacitive-current switching tests	Power frequency but current chopping, and 4250 Hz at making during back-to-back testing	DC to 8 500 Hz	Current is naturally sinusoidal
Synthetic tests	Within 250 Hz to 1 000 Hz	0,2 to 7 times the fundamental frequency of test current	Injection current during synthetic tests: current is naturally sinusoidal
Current-limiting fuse tests	Power frequency with cut- off current	20 Hz to 5 000 Hz	Measurement of cut-off current

At fundamental frequency	At lower end of frequency range %	At upper end of frequency range %
See 5.2	±15	±15

Table 8 – Tolerance requirements on scale factor

In general, a measuring system that fulfils the above requirements on the scale factor is considered to fulfil 9.4.1 and the uncertainty contribution u_{dyn} due to its frequency response is considered negligible. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

9.4.3.2 Direct determination of amplitude-frequency response

In order to determine the dynamic behaviour, the system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for an appropriate range of frequencies.

9.4.3.3 Determination of amplitude-frequency response using spectral density function

The system is subjected to a current impulse and its input and output are measured. The input is measured using a reference measuring system having a flat response in the frequency range of interest. The impulse should have a rise time shorter than the shortest rise time for which the system under test is to be qualified. The total duration of the impulse should be relevant to the type of current for which the system under test is to be qualified. The amplitude-frequency response is estimated from the ratio of the input (measured by the good/reference system) and output signals.

9.4.3.4 Estimation of uncertainties using convolution techniques

The uncertainties of a measuring system caused by the time response of the measuring system may be estimated from a step response, using convolution techniques (see Annex D).

9.4.4 Calibrations and tests on an approved measuring system

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor of measuring system at the calibration			5.2	
Scale factor check				9.4.5
Extension of linearity		5.3 and 9.4.6 (if applicable)	5.3 and 9.4.6 (if applicable)	
Dynamic behaviour of measuring system		9.4.3 (if applicable)		
Short-term stability of converting device		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Effect of nearby current paths on converting device	5.8 (if applicable)			
Software effect	5.9 (if applicable)			
Interference test on transmission system with active elements; interference ratio			5.12	
Interference test on measuring system; interference ratio			5.12	

 Table 9 – Required tests for short-time alternating current

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Dry voltage withstand test on converting device		5.13.1 (if applicable)		
Current withstand test		5.13.2		
Scale factor of converting device		5.2		
Scale factor of transmission system other than a cable		5.2		
Scale factor of measuring instrument		5.2		
Responsibility	On component	ts: manufacturer	On measuring system: use	
Recommended repetition rate	Once only (type and routine test)		According to stability, but at least every 5 years	According to stability, but at least annually

Compliance with requirements of the type tests can be proved by tests on a device of the same design or be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each device. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

9.4.5 Performance check

9.4.5.1 General

The scale factor of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

9.4.5.2 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component can be checked using an internal or an external calibrator having an expanded uncertainty not exceeding 1 %. If the scale factors of individual components differ from their previous values by not more than 1 %, the assigned scale factor of the measuring system is taken as still valid. If any difference exceeds 1 %, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.2).

NOTE DC measurements of the resistance of a current-converting shunt are in general sufficient for performance checks.

9.4.5.3 Check of the scale factor of the measuring system

A comparison is made with another approved measuring system following the procedure of 5.2.1. If the difference between the two measured values is not larger than 3 %, the assigned scale factor is taken as still valid. If it is larger, then the assigned scale factor shall be determined in a performance test (see 5.2).

NOTE An intercomparison between two measuring systems measuring the same current can often be arranged using two phases of a three-phase circuit connected in series.

9.4.6 Linearity test

The linearity test shall be performed with an asymmetrical power-frequency current with a peak factor of 2,8 (or the maximum peak factor valid for the test circuit). The procedures of 5.3 shall be followed.

The value to be determined is the peak value of the first peak. The test is required for both polarities of the d.c. component.

NOTE 1 Due to saturation phenomena in certain converting devices, such as current transformers with iron, it may be necessary to change polarity of the d.c. component in subsequent applications of current.

NOTE 2 The offset in a measuring system can be identified by tests at two polarities.

9.4.7 Interference test

Interference test and requirements are described in 5.11.

Systems used only for measurements of power-frequency currents, shall have the interference test carried out at power frequency.

Systems used also at frequencies other than power frequency, additional interference tests in the frequency range of the test current are advised.

9.5 Test procedures

Test procedures are defined by the relevant technical committee or shall to be based on agreement with the client.

10 Impulse currents

10.1 Application

Test applications are considered for impulse-current withstand tests, e.g. for arrester testing, EMC testing, and lightning-impulse-current withstand tests. See Figure 18 through Figure 21.

Procedures given below for measurement of test current are applicable to both calibration and measurement.

NOTE In impulse-voltage tests, the resolution and reproducibility of the shape of the current through the test object may be of high importance. For these cases, see Clause 11.

10.2 Terms and definitions

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

10.2.1

exponential impulse current

current that increases from zero to the peak value in a short time, and thereafter decreases to zero either approximately exponentially or in the manner of a heavily-damped sine curve and is defined by the front time T_1 (see 10.2.4) and the time to half-value T_2 (see 10.2.6), generally denoted as T_1/T_2 impulse current (See Figure 18)

NOTE Other impulses are also used in testing, e.g. switched-in sine waves and ring-waves.

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print



Figure 18 – Exponential impulse current



Figure 19 – Exponential impulse current – Oscillating tail

10.2.2

rectangular impulse current

current with an approximately rectangular shape and is defined by the duration T_d of the peak (see 10.2.7) and the total duration T_t (see 10.2.8) and is generally denoted as T_d/T_t impulse currents (See Figure 20)



Figure 20 - Impulse current - Rectangular, smooth



Figure 21 – Impulse current – Rectangular with oscillations

10.2.3 value of the impulse current peak value of the test current NOTE With some test circuits, overshoot or oscillations may be present on the current waveform. In such cases, the peak is determined by the extreme value of the current, unless the relevant technical committee has specified another procedure, e.g. to draw a smooth curve through the oscillations.

10.2.4

front time

 T_1

virtual parameter of an exponential impulse current defined as 1,25 times the interval T, between the instants when the impulse is 10 % and 90 % of the peak value (see Figure 18)

10.2.5

virtual origin

 O_1

that instant of an exponential preceded by $0.1T_1$ at which the current attains 10 % of its peak value, where for records having linear time scales, this is the intersection with the time axis of a straight line drawn through the 10 % and 90 % reference points on the front

10.2.6

time to half-value

 T_2

virtual parameter of an exponential impulse current defined as the time interval between the virtual origin O_1 and the instant at which the current has decreased to half the peak value (see Figure 18), and where, if there are oscillations present on the tail, T_2 is taken as the time average of the first and the last instances when the current has decreased to half the peak value (see Figure 19)

10.2.7

duration

 T_{d}

time during which the rectangular impulse current is higher than 90 % of its peak value (see Figure 20 and Figure 21)and where, if there are oscillations present, T_d is taken as the longest time in which the current is consistently higher than 90 % of its peak value

10.2.8

total duration

Tt

virtual parameter defined as the time during which the rectangular impulse current is higher than 10 % of its peak value (see Figure 20 and Figure 21)

NOTE If small oscillations are present on the front, a mean curve should be drawn in order to determine the time at which the 10 % value is reached.

10.2.9

nominal epoch (front part of impulse only)

 τ_{N}

range of values between the minimum (t_{min}) and the maximum (t_{max}) of the relevant time parameter of impulses for which the measuring system is to be approved.

NOTE 1 The relevant time parameter is:

- the range of front time T_1 for exponential impulse current;

- the range of half the difference between T_{t} and T_{d} for rectangular impulse current.

NOTE 2 A measuring system may have one, two or more nominal epochs for different waveforms.

NOTE 3 For rectangular impulse current, the nominal epoch should be taken as

$$t_{\min} = \min\left(\frac{T_{t} - T_{d}}{2}\right) \text{ and } t_{\max} = \max\left(\frac{T_{t} - T_{d}}{2}\right)$$

10.2.10 charge of an impulse current Q

time integral of the absolute value of the instantaneous current:

$$Q = \int_{0}^{\infty} \left| i(t) \right| \mathrm{d}t$$

NOTE 1 For practical reasons, the upper limit of the integral should be chosen in a way that the residual contribution is lower than a specified value given by the relevant technical committee.

NOTE 2 The absolute value of the current is applicable for such cases, where arc-footing points with a substantially constant voltage drop are concerned.

10.2.11 Joule integral of an impulse current

 I^2t

time integral of the square of the instantaneous current:

$$I^2 t = \int_0^\infty i^2(t) \, \mathrm{d}t$$

NOTE For practical reasons, the upper limit of the integral should be chosen in a way that the residual contribution is lower than a specified value given by the relevant technical committee.

10.3 Test current

10.3.1 General

In testing, different standard impulse currents are used. Examples of exponential impulsecurrents are given in Table 10, and more examples are given in Annex H. Other wave shapes may be specified by the relevant IEC technical committees.

NOTE Future work is being considered in order to reduce the number of different wave shapes.

Table 10 – Examples of exponential impulse-current types

Impulse type	Front time T ₁ , μs	Time to half value Τ ₂ , μs	Tolerances for time parameters
1 / ≤20	1	≤20	T ₁ ±10 %
			$T_2 \le 20 \ \mu s$
8/20	8	20	$\begin{array}{c} T_1 \ \pm 20 \ \% \\ T_2 \ \pm 20 \ \% \end{array}$
10/350	10	350	$\begin{array}{c} T_1 \pm 30 \ \% \\ T_2 \pm 20 \ \% \end{array}$

10.3.2 Tolerances

10.3.2.1 Exponential impulse current

If not otherwise specified by the relevant technical committee, the following tolerances for the specified values for exponential impulse currents are as follows:

charge

0 %, upper limit specified by the relevant technical committee;

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

•	Joule integral	0 %, comm	upper nittee;	limit	specified	by	the	relevant	technical
•	value of the test current	±10 %	6;						
•	front time T_1	±20 %	6;						
•	time to half-value T_2	±20 %	6.						

NOTE 1 These tolerances are for certain impulse types difficult to achieve with only linear elements due to physical limitations (e.g. 4/10 and 8/20 impulses, see Annex E). The relevant technical committee may specify more details or may change the tolerances.

NOTE 2 In cases where the charge or specific energy is important for the test, the tolerance for T_2 may be ± 50 %.

Any polarity reversal peak after the test current has passed zero shall not be more than 30 % of the value of the impulse current, i.e. the peak value unless otherwise specified by the relevant technical committee.

10.3.2.2 Rectangular impulse current

- charge 0 %, upper limit specified by the relevant technical committee;
- Joule integral 0 %, upper limit specified by the relevant technical committee;
- peak value 0 %, +20 %;
- duration T_d of the peak 0 %, +20 %;
- total duration T_t <1,5 T_d .

The polarity reversal peak after the test current has passed zero should not be more than 10 % of the value of the impulse current, i.e. the peak value.

10.4 Measurement of the test current

10.4.1 Requirements for an approved measuring system

The general requirements are as follows:

- to measure the value of the impulse current, i.e. the peak value with an expanded uncertainty U_{mes} (with a coverage probability of 95 %) of not more than 3 %;
- to measure the time parameters (which define the waveform) with an expanded uncertainty (with a coverage probability of 95 %) of not more than 10 %;
- to exhibit low enough output offset to permit calculation of the charge of an impulse current and the Joule integral.

10.4.2 Uncertainty contributions

For an impulse-current measuring system, the expanded uncertainty shall be evaluated according to 5.10.3 and, if necessary, Annex A and Annex B. The individual contributions to be considered are given in Table 11. The information given here is for guidance only; other contributions can be important in some cases and shall be considered as well.

10.4.3 Dynamic behaviour

10.4.3.1 Requirements

The dynamic behaviour of a measuring system is adequate for its range of waveforms specified in the record of performance if:

- the scale factor is constant within 1 % over each range of waveforms;
- the expanded uncertainty of the measured time parameters plus their errors is not more than 10 %.

The dynamic behaviour of the measuring system shall be determined for the nominal epoch by using impulses with two different waveforms such that:

- t_{min} is equal to the shortest time parameter within the nominal epoch (see 10.2.9);
- t_{max} is equal to the longest time parameter within the nominal epoch (see 10.2.9).

The time to half-value (total duration if the waveform is rectangular) should approximate the longest time for which the measuring system is to be approved.

The uncertainty contribution u_{dyn} due to variation of scale factor over the nominal epoch shall be evaluated according to 5.4.

10.4.3.2 Comparison with a reference measuring system (preferred method)

The same records as taken in the test of 5.2.1 may be used and the relevant time parameters of the measured impulses are evaluated for each system. The errors of time parameters measured by the system under calibration shall be evaluated. The uncertainty of the error shall also be evaluated, considering both uncertainty of reference measuring system and uncertainties due to the calibration process.

NOTE If an approval is sought for a group of impulse types, t_{min} may be chosen from one impulse type and t_{max} from another. In such cases, the longest time to half-value of all the impulse types should be used.

10.4.3.3 Alternative method based on convolution

The scale factor of the measuring system is established by any suitable method. The wave shape used to determine the scale factor shall be within the range covered by the convolution method described below.

The dynamic behaviour is determined from a step-response measurement on the measuring system and from convolution of the recorded step response with the nominal waveforms for which approval is sought. From the convolution, the errors introduced by the measuring system for different wave shapes can be estimated and from these errors the uncertainty of measurement may be evaluated. The change in scale factor over the nominal epoch shall be within 1 %. The step response shall be recorded in accordance with 10.4.3.6. See also Annex C and Annex D.

10.4.3.4 Component-based calibration

The scale factors of the components of the measuring system are established by any suitable method. The wave shape used to determine the scale factor shall be within the range covered by the convolution method described below.

The dynamic behaviour is determined from step-response measurements on the components and from convolution of the recorded step responses with each other and with the nominal waveforms for which approval is sought. From the convolution, the errors introduced by the component investigated, for different wave shapes can be estimated and from these errors the uncertainty of measurement may be evaluated. The change in scale factor of the complete measuring system over the nominal epoch shall be within 1 %. The step response shall be recorded in accordance with 10.4.3.6. See Annex D for further information on convolution.

10.4.3.5 Reference record (optional)

When wanted for use in performance checks, the step response of the measuring system shall be recorded using the method of 10.4.3.6. The step response shall be included in the record of performance as a reference record ("fingerprint") to permit detection of changes in the dynamic behaviour at subsequent performance checks (see 10.4.5).

10.4.3.6 Step-response record

The system is subjected to a current impulse and its input and output are measured. The input is measured by a reference measuring system having a flat response for the frequency range of interest. The impulse should have a rise time shorter than the shortest rise time t_{min} (see 10.2.9) for which the system under test is to be qualified. The total time of the impulse should be relevant to the type of impulse for which the system under test is to be qualified.

10.4.4 Calibrations and tests on an approved measuring system

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor of measuring system at the calibration			5.2	
Scale factor check				10.4.5
Extension of linearity		5.3 (if applicable)	5.3 (if applicable)	
Dynamic behaviour of measuring system	10.4.3 (if applicable)		10.4.3 (if applicable)	10.4.5.4 (if applicable)
Short-term stability of converting device		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Effect of nearby current paths on converting device	5.8 (if applicable)			
Software effect	5.9 (if applicable)			
Interference test on transmission system with active elements; interference ratio			5.12	
Interference test on measuring system; interference ratio			5.12	
Dry voltage withstand test on the converting device		5.13.1 (if applicable)		
Current withstand test		5.13.2		
Scale factor of converting device		5.2		
Scale factor of transmission system other than a cable		5.2		
Scale factor of measuring instrument		5.2		
Responsibility	On components: manufacturer		On measuring system: user	
Recommended repetition rate	Once (type and r	e only outine test)	According to stability, but at least every 5 years Accordin stability, lu least ann	

Table 11 – Required tests for impulse current

The compliance with requirements of the type tests can be proved by tests on a device of the same design or be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each device. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

10.4.5 Performance check

10.4.5.1 General

The scale factor of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

10.4.5.2 Check of the scale factor of the measuring system

A comparison shall be made with another approved measuring system according to the procedure of 5.2.1. If the difference between the two measured values of current is not larger than 3 %, the assigned scale factor is taken as still valid. If it is larger, then the assigned scale factor shall be determined in a performance test.

10.4.5.3 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component can be checked using an internal or an external calibrator having an expanded uncertainty not exceeding 1 %. Impulse calibrators for calibration of impulse measuring instruments shall have an expanded uncertainty of not more than 1,5 %. If the scale factors of individual components differ from their previous values by not more than 1 %, the assigned scale factor of the measuring system is taken as still valid. If any difference exceeds 1 %, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test.

10.4.5.4 Dynamic behaviour check

The dynamic behaviour should be checked by comparison with another approved measuring system (or reference measuring system) using the procedure of 10.4.3.2.

Alternatively, a check should be made with step-response measurements where in each check, the step response shall be recorded in the same manner and in the same circuit as were used to obtain the reference record (see 10.4.3.5). The step-response record shall be compared with those from previous checks. Small variations can be expected from check to check and the extent of acceptable variations shall be established by the early checks. Any large difference shall be investigated and a performance test shall then be made.

10.5 Test procedures

Test procedures shall be defined by the relevant technical committee or shall be based on agreement with the client.

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

11 Current measurement in high-voltage dielectric testing

11.1 Application

In high-voltage dielectric testing, the impulse-current measuring systems are used for detection of insulation breakdown during lightning-impulse voltage tests, for example on transformers and reactors. The current measuring system is usually connected to the neutral terminal of the transformer (or reactor) and/or to a terminal not subjected to the impulse voltage. The main objective is to verify that the impulse current varies linearly with the applied test voltage, thus providing proof that no internal breakdown has occurred. No requirement is posed on determination of actual current values.

NOTE In impulse-voltage tests, the resolution and reproducibility of the shape of the current through the test object may be of high importance. In these cases, the requirements on the parameters to be measured should be stated by the relevant technical committee.

In the high-voltage test, the time parameters of the recorded current will depend on the complex impedance of the test object (e.g. transformer or reactor) and on reflections in the often, long windings. No à priori knowledge of the wave shape can be postulated. It can, however, in general be assumed that the fastest rise time will be of the same order of magnitude as the rise time of the applied test voltage. As a conventional estimate, the fastest impulse front to be recorded can be assumed to be $0.3 \ \mu s$.

11.2 Terms and definitions

Not applicable.

11.3 Measurement of the test current

11.3.1 Requirements for an approved measuring system

General requirements:

- the scale factor shall not change by more than 1 % between two test impulses with the same shape but with amplitudes different up to a factor of 2, as encountered during one test sequence;
- the dynamic behaviour shall be sufficient to reproduce a current impulse with a front time of $0,3\ \mu s$.

11.3.2 Uncertainty contributions

The evaluation of uncertainty shall take into account the short-term stability and linearity of the current measuring system.

11.3.3 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of the current measuring system shall be adequate for the range of waveforms that can be encountered in high-voltage dielectric testing. Presumption of conformance to this requirement can be based on the fulfilment of requirements of Clause 10 as regards measuring systems used for the impulse current 1/20.

11.3.4 Calibrations and tests on an approved measuring system

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check	
Scale factor of measuring system			Not applicable		
Scale factor check				10.4.5	
Extension of linearity		5.3 (if applicable)	5.3 (if applicable)		
Dynamic behaviour of measuring system	10.4.3 (if applicable)		10.4.3 (if applicable)	10.4.5.4 (if applicable)	
Short-term stability of converting device		5.5			
Long-term stability					
Ambient temperature effect					
Effect of nearby current paths on converting device					
Software effect	5.9 (if applicable)				
Interference test on transmission system with active elements; interference ratio			5.12		
Interference test on measuring system; interference ratio			5.12		
Dry voltage withstand test on the converting device		5.13.1 (if applicable)			
Current withstand test		5.13.2			
Scale factor of converting device		5.2			
Scale factor of transmission system other than a cable		5.2			
Scale factor of measuring instrument		5.2			
Responsibility	On component	s: manufacturer	On measuring system: user		

Table 12 – Required tests for impulse current in high-voltage dielectric testing

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check	
Recommended repetition rate	Once (type and r	e only outine test)	According to stability, but at least every 5 years	According to stability, but at least annually	

The compliance with requirements of the type tests can be proved by tests on a device of the same design or be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each device. See 4.6 for details and 4.4.2 for exceptions.

11.3.5 Performance check

The performance check on measuring systems intended for measurement of impulse current in high-voltage dielectric testing is related to the short-term stability and to dynamic behaviour.

Presumption of fulfilment of requirements can however be shown by a check on the scale factor of the measuring system in accordance with the requirements given in 10.4.5.

11.3.6 Linearity test

See 5.3.

11.3.7 Interference test

Interference test and requirements are described in 5.12.

11.4 Test procedures

Test procedures are defined by the relevant technical committee or shall be based on agreement with the client.

12 Reference measuring systems

12.1 General

A reference measuring system shall have an uncertainty sufficiently low to permit the required uncertainties in calibration of approved measuring systems to be reached. It shall also be traceable to national and/or international standards of measurements through an unbroken chain of comparative measurements all having stated uncertainties.

12.2 Interval between subsequent calibrations of reference measuring systems

In the absence of evidence to the contrary, the calibrations of a reference measuring system should be repeated once a year, but at least once every five years.

It is recommended that reference measuring systems be used only for comparative measurements in performance tests. However, reference measuring systems may be used for other measurements, including routine daily use, if it is shown that such use does not affect their performance. (The performance checks specified in this standard are sufficient to verify this.) In addition, the substitution of an equivalent measuring instrument, which satisfies the relevant IEC standard, shall be accepted.

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

Annex A (informative)

Uncertainty of measurement

A.1 General

Clause 5 describes a simplified procedure to evaluate uncertainty of measurement under conditions usually applicable and fully sufficient in high-current testing. In some cases it may, however, be necessary or desirable to evaluate uncertainties in a more complex manner. Annex A gives a survey on how to proceed in these cases.

Every measurement of a quantity is to some degree imperfect and the result of a measurement is only an approximation ("estimate") of the "true" (generally unknowable) value of the measurand. The uncertainty of measurement gives a clear statement on the quality of a measurement. It enables the user to compare and weight the measurement results, e.g. obtained from different laboratories, and it gives information whether or not a measurement result is within the limits specified by a standard. ISO/IEC Guide 98-3 is the internationally accepted standard for estimation of measurement uncertainty.

ISO/IEC Guide 98-3 provides general rules for evaluating and expressing uncertainty in a broad spectrum of measurements at various levels of uncertainty. It is therefore necessary to extract from the ISO/IEC Guide 98-3 a set of clear-cut rules that deals with the specific field of high-current measurement and its level of accuracy and complexity. Corresponding to the basic principles of the ISO/IEC 98-3, uncertainties are grouped into two categories according to their methods of evaluation (type A and type B). Both methods are based on probability distributions of the quantities influencing the measurement and on standard uncertainties quantified by variances or standard deviations. This allows a uniform treatment of both categories of uncertainties and evaluation of a combined standard uncertainty of the measurand. Within the scope of this standard an expanded uncertainty corresponding to a coverage probability of approximately 95 % is required.

The basic principles of the ISO/IEC Guide 93 and examples of determination of uncertainties in high-current measurements are presented below in a simplified version. The equations and examples given here are valid for uncorrelated input quantities, which is often the case in high-current measurements.

A.2 Terms and definitions in addition to 3.6

A.2.1

measurable quantity

attribute of a phenomenon, body or substance that may be distinguished qualitatively and determined quantitatively

A.2.2

value of a quantity

magnitude of a specific quantity generally expressed as unit of measurement multiplied by a number

A.2.3

measurand

specific quantity subject to measurement

A.2.4

variance

s²

expectation of the square of the deviation of a random variable about its expectation

A.2.5

correlation

relationship between two or several random variables within a distribution of two or more random variables

A.2.6

coverage probability

fraction, usually large, of the distribution of values that as a result of a measurement could reasonably be attributed to the measurand

A.2.7

type A evaluation (of standard uncertainty)

method of evaluation of a standard uncertainty by the statistical analysis of series of observations

A.2.8

type B evaluation (of standard uncertainty)

method of evaluation of a standard uncertainty by means other than the statistical analysis of series of observations

A.3 Model function

Every measurement can be described by a functional relationship *f*:

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_i, ..., X_N)$$
(A.1)

where Y is the output quantity (measurand), which depends on N measurable input quantities X_i . In the meaning of the ISO/IEC Guide 98-3, the model function, f, comprises all measurement values, influence quantities, corrections, correction factors, physical constants, and any other data that can contribute a significant amount to the value of Y and its uncertainty. It may exist as a single or manifold analytical or numerical expression or a combination of both. In general the values of X_i cannot be exactly known due to random variations in the influence quantities (random effects) and are thus denoted as input estimates x_i having specific probability distributions of the possible values and being associated with standard uncertainties $u(x_i)$ of type A or type B. The combination of both types of uncertainty according to the rules of the ISO/IEC Guide 98-3 yields the standard uncertainty u(y) of the output estimate y.

NOTE 1 The model function f in Equation (A.1) is also valid for the input and output estimates x_i and y, respectively.

NOTE 2 In a series of observations, the k^{th} observed value of the input quantity X or X_i is denoted by X_k or $X_{i,k}$ and the corresponding input estimate by x_k or $x_{i,k}$, respectively.

A.4 Type A evaluation of standard uncertainty

The evaluation method of type A is applied to quantities that vary randomly and for which n independent observations x_k have been obtained under the same conditions of measurement. In general, a normal (Gaussian) probability distribution p(x) of the n observations of a random variable x can be assumed (Figure A.1). The arithmetic mean (average) of the estimates x_k of a series of observations of the input quantity X_k is defined by:

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} x_k \tag{A.2}$$

and is considered the best estimate of X. Its standard uncertainty of type A is equal to the experimental standard deviation of the mean $s(\overline{x})$:

$$u(\overline{x}) = s(\overline{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}}$$
(A.3)

where $s(x_k)$ is the sample or experimental standard deviation (of the individual values):

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n} (x_k - \bar{x})^2}$$
(A.4)

The quadratic values $s^2(x_k)$ and $s^2(\overline{x})$ are called the sample variance and the variance of the mean, respectively. The number of observations should be $n \ge 10$ otherwise the reliability of a type A evaluation of standard uncertainty has to be checked by means of the effective degrees of freedom (see Clause A.8).

NOTE In some cases, a pooled (combined) estimate of variance s_p^2 may be available from a large number of previous observations under well-characterized conditions. Then the standard uncertainty of a comparable measurement with a small number n (n = 1, 2, 3, ...) is estimated better by $u(\bar{x}) = s_0 / \sqrt{n}$ than by Equation (A.3).

A.5 Type B evaluation of standard uncertainty

The evaluation method of type B applies to all cases other than the statistical analysis of a series of observations. The standard uncertainty of type B is evaluated by scientific judgment based on all available information on the possible variability of an input quantity X_i such as:

- method of evaluating the quantities;
- uncertainty of calibration of the measuring system and its components;
- non-linearity of current-converting devices and measuring instruments;
- short-term stability, e.g. due to self heating;
- long-term stability, e.g. due to drift;
- ambient conditions during measurements;
- limited resolution of digital instruments and/or reading of analogue instruments;
- effect of nearby current paths;
- electromagnetic interference;
- scale-factor variation with frequency or impulse shape;
- effects caused by software used in instruments or in evaluation of results.

Information on the input quantities and uncertainties can be obtained from actual and previous measurements, calibration certificates, data in handbooks and standards, manufacturer's specifications, or knowledge of the characteristics of relevant materials or instruments. The following cases for a type B evaluation of uncertainties can be distinguished:

a) Often, only a single input value x_i and its standard uncertainty $u(x_i)$ is known, e.g. a single measured value, a correction value or a reference value from literature. This value and its uncertainty will be taken over in the model function (Equation A.1). In case $u(x_i)$ is not

- 70 -
known, it shall to be calculated from other relevant uncertainty data or be estimated on the basis of experience.

b) The uncertainty of a device is quoted as the k multiple of a standard uncertainty, e.g. the expanded uncertainty U of a digital voltmeter in a calibration certificate (Clause A.7). If the voltmeter is used in a complex measuring system, it contributes to the uncertainty of measurements by:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \tag{A.5}$$

where k is the coverage factor. Instead of expressing the expanded uncertainty and coverage factor, one may find a statement on the level of confidence, e.g. 68,3 %, 95,45 % or 99,7 %. In general, normal distribution according to Figure A.1 can be assumed and the statement on the level of confidence is equivalent to the coverage factor k = 1, 2, or 3, respectively.

c) The value x_i of an input quantity X_i is estimated to lie in the interval a_- to a_+ with a certain probability distribution $p(x_i)$. Often, there is no specific knowledge on $p(x_i)$ and a rectangular distribution of the probable values is then assumed (Figure A.2). Then, the expected value of X_i is the midpoint of the interval:

$$x_i = \frac{(a_- + a_+)}{2} \tag{A.6}$$

and the associated standard uncertainty:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{A.7}$$

where $a = (a_{+} - a_{-})/2$.

In some cases, other probability distributions may be more appropriate. Since the discontinuity of the rectangular distribution at the borders is often unphysical, it seems reasonable to replace the rectangular distribution by a trapezoidal, triangular, or normal distribution.

NOTE 1 The standard uncertainty is $u(x_i) = a/\sqrt{6}$ for the triangular distribution and $u(x_i) = \sigma$, where σ is the standard deviation of the normal distribution. This means that the rectangular distribution gives a larger standard uncertainty than the other distributions.

In ISO/IEC Guide 98-3, it is explicitly stated that a type B uncertainty should not be doublecounted if the particular effect has already contributed to a type A uncertainty. Furthermore, the evaluation of uncertainty should be realistic and based on standard uncertainties, avoiding the use of personal or any other factors of safety to obtain larger uncertainties than those evaluated according to the ISO/IEC Guide 98-3. Often, an input quantity X_i has to be adjusted or corrected to eliminate systematic effects of significant magnitude, e.g. based on temperature or current dependence. However, the uncertainty $u(x_i)$ associated with this correction shall still be taken into account.

NOTE 2 Double-counting of uncertainty contributions may occur when a digital recorder is used for repetitive impulse measurements, e.g. when calibrating the scale factor. The dispersion of the *n* measurement values giving rise to a Type A standard uncertainty is partially caused by the limited resolution of the recorder and its internal noise. The resolution does not need to be considered again in full but only in a small portion as a residual type B uncertainty. However, if the digital recorder is then used during an impulse-current test to obtain a single measurement value, the limited resolution should be considered in a type B uncertainty.

NOTE 3 The evaluation of type B uncertainties requires extensive knowledge and experience on the relevant physical relationships, influence quantities, and measurement techniques. As the evaluation itself is not an exact science leading to only a single solution, it is not uncommon that experienced test engineers may judge the measurement process in a different manner and obtain different type B uncertainty values.

- 72 -

A.6 Combined standard uncertainty (u_c)

The standard uncertainty $u(x_i)$ of the estimate x_i of each input quantity X_i evaluated by method type A or B contributes to the standard uncertainty of the output quantity by:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \tag{A.8}$$

where c_i is the sensitivity coefficient. It describes how the output estimate y is influenced by variations of the input estimate x_i . It can be evaluated directly as the partial derivative of the model function f with respect to X_i :

$$c_{i} = \frac{\partial f}{\partial X_{i}} \bigg|_{X_{i} = x_{i}} = \frac{\partial f}{\partial x_{i}}$$
(A.9)

or by using equivalent numerical and experimental methods. The sign of c_i may be positive or negative. In cases where input quantities are uncorrelated, the sign need not be further considered since only the quadratic values of standard uncertainties are used in the next steps.

The *N* standard uncertainties $u_i(y)$ defined by Equation (A.8) contribute to a combined standard uncertainty $u_c(y)$ of the output quantity according to the "law of propagation of uncertainty":

$$u_{c}^{2}(y) = u_{1}^{2}(y) + u_{2}^{2}(y) + \dots + u_{N}^{2}(y) = \sum_{i=1}^{N} u_{i}^{2}(y)$$
 (A.10)

from which $u_{c}(y)$ is evaluated as the positive square root:

$$u_{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} u_{i}^{2}(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} [c_{i} u(x_{i})]^{2}}$$
(A.11)

If the output quantity *Y* is a product or quotient of the input quantities X_i , a similar relationship as given in Equations (A.10) and (A.11) can be obtained for the relative uncertainties $u_c(y)/|y|$ and $u(x_i)/|x_i|$. The law of propagation of uncertainty applies thus to both types of the model function for uncorrelated input quantities.

NOTE In a case where correlation exists, linear terms will be present in the law of propagation of uncertainty and the sign of the sensitivity coefficients becomes relevant. Correlation occurs when, for example, the same instrument is used for measuring two or more input quantities. To avoid complicated calculation, the correlation can be removed by adding additional input quantities in the model function, *f*, with appropriate corrections and uncertainties. In some cases, the presence of correlated input quantities may even reduce the combined standard uncertainty. Taking correlation into account is thus mainly essential for sophisticated uncertainty analysis to achieve very accurate estimation of uncertainty. Correlation is not further discussed in this standard.

A.7 Expanded uncertainty

In the field of high-voltage and high-current measurements, as in most other industrial applications, a statement of uncertainty corresponding to a coverage probability, p, of approximately 95 % is required. This is achieved by multiplying the combined standard uncertainty $u_c(y)$ of Equation (A.11) by a coverage factor k:

$$U = k \times u_{\rm c}(\gamma) \tag{A.12}$$

where *U* is the expanded uncertainty.

The coverage factor k = 2 is used in cases where:

- a normal distribution can be attributed to the output estimate y; and
- $u_c(y)$ has sufficient reliability, i.e. the effective degrees of freedom of $u_c(y)$ is sufficiently large (see Clause A.8). Otherwise a value k > 2 has to be determined to obtain p = 95 %.

NOTE 1 In some older standards, the term "overall uncertainty" is used. In the majority of cases, this term is interpreted as an expanded uncertainty U with the coverage factor k being equal to 2.

NOTE 2 Since uncertainties are defined as positive numbers, the sign of U is always positive. In cases where U means an uncertainty interval, it is quoted as $\pm U$.

A.8 Effective degrees of freedom

The assumption of a normal distribution of the output estimate y is, in general, fulfilled in cases where several (i.e. $N \ge 3$) uncertainty components of comparable values and well-defined probability distribution (Gaussian, rectangular, etc.) contribute to the combined standard uncertainty and where the type A uncertainty is based on $n \ge 10$ repeated observations. These conditions are satisfied in many calibrations of high-current measuring systems. If the assumption of a normal (Gaussian) distribution is not justified, a value of k > 2 shall be evaluated to obtain a coverage probability of approximately 95%. The appropriate coverage factor can be evaluated on the basis of the effective degrees of freedom v_{eff} of the combined standard uncertainty $u_c(y)$:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{c}}^{4}(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_{i}^{4}(y)}{v_{i}}}$$
(A.13)

where

 $u_i(y)$ is given by Equation (A.8) for i = 1, 2, ..., N; and

 v_i is the corresponding degrees of freedom.

Reliable values of v_i are:

- $v_i = n 1$ for a type A uncertainty based on *n* independent observations;
- $v_i \ge 50$ for a type B uncertainty taken from a calibration certificate and when the coverage probability is stated to be not less than 95 %;
- $v_i = \infty$ for a type B uncertainty assuming a rectangular distribution within a_- and a_+ .

The effective degrees of freedom can then be calculated by Equation (A.13) and the coverage factor be taken from Table A.1 that is based on a *t*-distribution evaluated for a coverage probability of p = 95,45 %. If v_{eff} is not an integer, interpolate or truncate v_{eff} to the next lower integer.

Table A.1 – Coverage factor k for effective degrees of freedom v_{eff} (p = 95,45 %)

v _{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

62475 © IEC:2010

The following formula can also be used to calculate k from v_{eff} :

$$k = 1,96 + \frac{2,374}{v_{\text{eff}}} + \frac{2,818}{v_{\text{eff}}^2} + \frac{2,547}{v_{\text{eff}}^3}$$
(A.14)

NOTE It is also possible to calculate this inverse *t*-distribution using spreadsheet software.

A.9 Uncertainty budget

The uncertainty budget of a measurement provides an overview of a detailed analysis of all sources and values of uncertainty based on the model function, *f*. The relevant data should be kept for inspection in the form of a table equal or comparable to Table A.2. The last row gives the values of the measurement result, *y*, the effective degrees of freedom v_{eff} and the combined standard uncertainty $u_c(y)$.

Quantity X_i Y	Estimate x _i y	Standard uncertainty of components $u(x_i)$ -	Degrees of freedom $v_i^v v_{eff}$	Sensitivity coefficient $\frac{c_i}{-}$	Uncertainty contribution $u_i(y)$ $u_c(y)$
<i>X</i> ₁	<i>X</i> ₁	$u(x_1)$	v ₁	C ₁	<i>u</i> ₁ (<i>y</i>)
X ₂	<i>x</i> ₂	$u(x_2)$	v ₂	c2	$u_2(y)$
:	:	:	:	:	:
X _N	x _N	$u(x_N)$	v _N	c _N	и _N (у)
Y	Y	_	$v_{\sf eff}$	_	$u_{c}(y)$

Table A.2 – Schematic of an uncertainty budget

NOTE Validated software is commercially available or may be developed by the user from general software that enables automated calculation of the quantities in Table A.2 from the model function, f. It is recommended to present the absolute (not relative) values $u(x_i)$ including their units in the uncertainty budget.

A.10 Statement of the measurement result

In calibration and test certificates, the measurand *Y* shall be expressed as $(y \pm U)$ for a coverage probability (or level of confidence) of approximately p = 95 %. The numerical value of the expanded uncertainty *U* shall be rounded to give not more than two significant figures. If rounding down reduces the value by more than 0,05 *U*, the rounded-up value shall be used. The numerical value of *y* shall be rounded to the least significant figure that could be affected by the expanded uncertainty.

NOTE 1 As an example, the result of a current measurement is stated in one of the following ways:

An explanatory note shall be added informing on the coverage probability p and the coverage factor k.

NOTE 2 As an example, the following complete wording is recommended (the terms in brackets apply to the cases $v_{eff} < 50$, i.e. k > 2,05 according to Table A.1):

- 74 -

[&]quot;The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the combined standard uncertainty multiplied by the coverage factor k = 2 (k = XX), which for a normal distribution (*t*-distribution with $v_{eff} = YY$ effective degrees of freedom) corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The combined standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with IEC 62475."



NOTE 3 The symbol σ is the standard deviation.

NOTE 4 The shaded area indicates the standard uncertainty.





NOTE 5 The shaded area indicates the rectangular uncertainty.



Annex B (informative)

Examples of the uncertainty calculation in high-current measurements

B.1 General

A clear distinction should be made between the calibration uncertainty and the uncertainty of measurements performed by the calibrated measuring system. The calibration uncertainty applies to the calibration situation only. It is primarily covered by an analysis of the reference measuring system, although some components of uncertainty related to the system under calibration may have to be considered.

The uncertainty of measurements performed by the calibrated measuring system is based on an analysis of the combination of the calibration uncertainty and parameters related to the calibrated measuring system and the conditions of use.

In this annex, examples are given on how to apply Clause 5 in the evaluation of measuring systems.

B.2 Example 1: Calibration of the scale factor of an a.c. current measuring system (comparison or reference method)

An a.c. measuring system with an assigned measurement range of 1 kA to 10 kA, denoted by X, is calibrated by an accredited calibration laboratory in the test laboratory of the user. The calibration is performed by comparison with a reference measuring system up to 5 kA, denoted by N (Figure B.1). Both systems consist of a shunt and a digital voltmeter indicating the r.m.s. voltages $V_{\rm N}$ and $V_{\rm X}$ at the outputs of the shunts. The scale factor and the relative expanded uncertainty of the reference system N at 20 °C is $F_{\rm N}$ = 10 025 A/V and $U_{\rm N}$ = 0,8 % (k = 2), respectively, including a small contribution due to the long-term instability.

During the calibration, the ambient temperature is (15 ± 2) °C. Thus, the scale factor of N is to be corrected by -0.01 % according to the temperature coefficient, yielding the actual value $F_{\rm N} = 10\ 024\ \text{A/V}$ at 15 °C. This correction, however, would not be very accurate due to further temperature variation within ± 2 °C during the calibration and the probable values of $F_{\rm N}$ are therefore assumed to lie within an interval of ± 0.1 % with rectangular distribution. Simultaneous readings of $V_{\rm N}$ and $V_{\rm X}$ are taken for n = 10 applications of the current for a short time, while a long current-free time is held between the applications; therefore, the effect from the temperature rise can be ignored. The linearity of the system under calibration, X, is checked from 5 kA up to 10 kA with a Rogowski coil (see 5.2.1.3) and considered in Clause B.3.

The model equation for calculating the value of F_X and its combined standard uncertainty can be developed as follows. In the ideal case, both measuring systems indicate the same value of the a.c. test current *I* (Figure B.1):

$$I = F_{\rm N}V_{\rm N} = F_{\rm X}V_{\rm X} \tag{B.1}$$

This leads to the basic equation for calculating the scale factor of the system under calibration:

$$F_{\rm X} = \frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}} F_{\rm N} \tag{B.2}$$

As described above, the scale factors of both systems are subject to several influence quantities like drift, temperature etc. They contribute to the scale-factor values and their uncertainties as well. These contributions are denoted here by $\Delta F_{N,1}$, $\Delta F_{N,2}$, for the reference system and $\Delta F_{X,1}$, $\Delta F_{X,2}$, ... for the system under calibration (the former determine the uncertainty of calibration, whereas the latter, in addition, constitute the uncertainty of measurements performed by the calibrated measuring system). In general, each contribution to the scale factor F_N or F_X consists of an error δ_i and a standard uncertainty u_i . The error is used to correct the scale factor, the correction being of opposite sign. The uncertainty contribution is related to the relevant scale factor F_N or F_X and evaluated in a similar way as described in Clause A.5, i.e. either by:

- assuming a symmetrical rectangular probability distribution within an interval of $\pm a_i$ and the half-width a_i , leading to a standard uncertainty $u_i = a_i/\sqrt{3}$; or,
- in the case of a calibrated component, by dividing its expanded uncertainty *U* by the coverage factor *k*.

The contribution $\Delta F_{N,m}$ or $\Delta F_{X,i}$ need not always have an error (or δ_i is assumed negligibly small) and then it consists only of an uncertainty contribution u_i .

The basic Equation (B.2) is thus supplemented by the contributions $\Delta F_{N,m}$ and $\Delta F_{X,i}$ to obtain the complete model function for determining the scale factor F_X and its combined standard uncertainty. Since correlation between the influence quantities is neglected, Equation (B.2) can be written in the general form:

$$F_{\mathsf{X}} - \sum_{i} \Delta F_{\mathsf{X},i} - \sum_{k} \Delta F_{\mathsf{X},k} = \frac{V_{\mathsf{N}}}{V_{\mathsf{X}}} F_{\mathsf{N}} \left(1 - \sum_{m} \Delta F_{\mathsf{N},m} - \sum_{n} \Delta F_{\mathsf{N},n} \right)$$
(B.3)

NOTE By definition, the errors inserted on both sides of the equation have a negative sign. They are defined as ΔF = (measured value) – (reference value), (term 3.6.7).

The scale factor $F_{X,cal}$ assigned by the comparison method of calibration to the a.c. measuring system can be expressed by:

$$F_{\rm X,cal} = \left(\overline{\frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}}} \right) \times \left(F_{\rm N} - \Delta F_{\rm N,temp} \right) = \left(\overline{\frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}}} \right) \times F_{\rm N} \times \left(1 - \frac{\Delta F_{\rm N,temp}}{F_{\rm N}} \right)$$
(B.4)

where

 $\Delta F_{N, \text{ temp}}$ is the contribution due to the reference system being used at a lower temperature than the temperature at which its scale factor has been established;

$$\left(\frac{V_{\mathsf{N}}}{V_{\mathsf{X}}}\right)$$

is the arithmetic mean of the quotients $q=V_N/V_X$ of the comparison measurements.

The comparison measurement yields ten pairs of measured values V_N and V_X from which the quotients V_N/V_X , their mean, and the experimental standard deviation *s* are calculated (see Table B.1). An example for the values measured at a current of about 25 % of I_{Xmax} is given in Table B.1. In the same manner, the quotients V_N/V_X and their related standard deviations *s* are obtained for in total g = 3 current levels up to 5 kA (see Table B.2). The result of the linearity test is shown in Table B.3.

- 78	_
------	---

Number of measurement	Reference system V _N ∨	System under test V _X	$\begin{array}{c} \mathbf{Quotient} \\ V_{\mathbf{N}} / V_{\mathbf{X}} \end{array}$
1	0,191 4	0,190 8	1,003 1
2	0,191 6	0,190 9	1,003 7
3	0,190 7	0,189 9	1,004 2
4	0,189 9	0,189 0	1,004 8
5	0,190 9	0,189 0	1,010 1
6	0,191 2	0,190 2	1,005 3
7	0,191 3	0,190 4	1,004 7
8	0,191 2	0,190 4	1,004 2
9	0,190 6	0,189 9	1,003 7
10	0,191 3	0,190 7	1,003 1
Mean of $V_{\rm N}/V_{\rm X}$.	1,004 7		
Experimental sample star	0,002 32		

Table B.1 – Result of the comparison measurement

The standard uncertainty of type A is evaluated from *s* and *n* according to Equation (A.3):

$$u_{\rm g} = u \left(\frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}} \right) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0,002\ 32}{\sqrt{10}} = 0,000\ 73$$
 (B.5)

g no.	Current level % of I _{X,max}	V _N /V _X	s(V _N /V _X)	u _{xg}
1	10	1,004 2	0,002 44	0,000 77
2	25	1,004 7	0,002 32	0,000 73
3	50	1,003 7	0,002 88	0,000 91 (= u_{max})
Mean		1,004 2		

Table B.2 – Result of the comparison measurement

With this, the scale factor from the comparison with the reference system is estimated to be:

$$F_{\rm x} = 100\ 25\ {\rm x}\ 1,004\ 2 = 100\ 67,1$$
 (B.6)

The uncertainty estimation of V_N/V_X is evaluated as:

$$u_{\rm F} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{g=1}^{3} \left| \frac{\overline{F}_g}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left(\max_{g=1}^{3} (u_g) \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} (0,0005)^2 + (0,00091^2)} = 0,0006$$
(B.7)

The values and standard uncertainties of the quantities on the right side of the model function Equation (B.4) are listed in the uncertainty budget (Table B.3). The degrees of freedom are determined in accordance with Equation (A.13). The result of the evaluation consisting of the scale factor, its combined standard uncertainty, and effective degrees of freedom is given in the last row of Table B.3. The large value $v_{eff} = 52$ indicates normal distribution of the probable values of F_X for which k = 2 is valid (Table A.1).

Quantity	Value	Standard uncertainty of components	Degrees of freedom	Sensitivity coefficient	Contribution to combined standard uncertainty
$V_{\rm N}/V_{\rm X}$	1,004 2	0,000 6 ^a	∞	10 026,002 5	5,8
F _N	1002 5	40,1 ^ª	50	1,004 2	40
$\Delta F_{N,temp}$	-1,002 5	5,79 ^b	∞	-1,004 2	-5,8
FX	10 068,1		55		41

The combined standard uncertainty u_{cal} in Table B.3 has been calculated as:

$$u_{cal} = \sqrt{u_{V_N/V_X}^2 + u_{F_N}^2 + u_{\Delta F_N, temp}^2} =$$

$$= \sqrt{6^2 + 40.1^2 + 5.8^2} = 41$$
(B.8)

Finally, the complete result of the calibration is expressed by:

 $F_{X} = F_{X,cal} = 100\ 68 \pm 82 = 100\ 68 \times (1 \pm 0,008)$ for a coverage probability of not less than 95 % (k = 2).

The expanded uncertainty of the calibration of the scale factor is $U_{cal} = 0.8$ %. For uncertainty of measurements performed by the measuring system, further uncertainty contributions have to be considered.

B.3 Example 2: Expanded uncertainty of measurement using an approved measuring system

The approved measuring system X for a.c. has been calibrated as described in Clause B.2. The scale factor and the expanded uncertainty of the calibration was $F_{\chi} = 100$ 68 and $U_{\rm X}$ = 0,8 % (k = 2). The linearity of the approved measuring system was checked from 5 kA up to 10 kA with a Rogowski coil (the results are given in Table B.4). Further investigations on the dynamic behaviour, short-term stability, temperature interval, and interference show an influence on F_X within ±0,2 % each. The long-term instability of F_X is estimated on the basis of the manufacturer's data to lie within ±0,3 % until the next calibration. The effect of nearby current paths need not be considered in addition since the approved measuring system X is used in a fixed position in the test hall of the user, i.e. this effect was included in the calibration.

The model equation for calculating the value of the scale factor F_{X,mes} of the approved measuring system and its combined standard uncertainty is shown as follows:

$$F_{\rm X,mes} = F_{\rm X,cal} - \Delta F_{\rm X,lin} - \Delta F_{\rm X,st} - \Delta F_{\rm X,lt} - \Delta F_{\rm X,dyn} - \Delta F_{\rm X,temp}$$
(B.9)

where

F _{X,cal}	is the scale factor resulting from the comparison calibration (see Equation (B.2));
$\Delta F_{X,lin}$	is the contribution from the linearity test;
$\Delta F_{X,st}$	is the contribution due to the short-term instability of the system;

- $\Delta F_{X,lt}$ is the contribution due to the long-term instability of the system;
- $\Delta F_{X,dyn}$ is the contribution due to the dynamic behaviour of the system;
- $\Delta F_{X,temp}$ is the contribution due to the temperature interval in which the system is expected to be used.

The scale factor of the system is subject to several influence quantities like drift, temperature, etc. They contribute to the scale factor value and its uncertainties as well. The contributions thought to be pertinent in this case are listed above. In general, each contribution to the scale factor F_X consists of an error δ_i and a standard uncertainty u_i . The error is used to correct the scale factor, the correction being of opposite sign. The uncertainty contribution is evaluated as described in Clause A.5, i.e. either by assuming a rectangular probability distribution within an interval of half-width a_i , leading to a standard uncertainty $u_i = a_i/\sqrt{3}$, or, in the case of a calibrated component, by dividing its expanded uncertainty U by the coverage factor k. The contribution $\Delta F_{X,i}$ need not always have an error (or δ_i is assumed being negligibly small) and then it consists only of an uncertainty contribution u_i . Correlation between the influence quantities is neglected.

The result of the linearity test is shown in Table B.4.

No.	Current level % of I _{X,max}	F _{Xg}	(F _{Xg} /F _X)-1
4	50	10 064,1	-0,001 9
5	75	10 077,2	-0,000 6
6	100	10 107,4	+0,002 4
Mean		10 082,9	

Table B.4 – Result of linearity test

The relative standard uncertainty u_{lin} is estimated in accordance with 5.3:

$$u_{\text{lin}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{g=4}^{6} \left| \frac{F_{\chi_g}}{\overline{F}_{\chi_g}} - 1 \right| = 0,0014$$
(B.10)

The values and standard uncertainties of the quantities on the right-hand side of the model function (Equation (B.5)) are listed in the uncertainty budget (Table B.5). The degrees of freedom are determined according to Equation (A.13). The result of the evaluation consisting of the scale factor, its combined standard uncertainty, and effective degrees of freedom is given in the last row of Table B.5. The large value $v_{eff} = 120$ indicates normal distribution of the probable values of $F_{X,mes}$ for which k = 2 is valid (Table B.5).

Quantity	Value	Standard uncertainty of components	Degrees of freedom	Sensitivity coefficient	Contribution to combined standard uncertainty
$F_{\rm X,cal}$	10 068,1	41,1 ^a	50	1,0	41,1
$\Delta F_{\rm X,lin}$	0	14,1 ^b	∞	-1,0	-14,1
$\Delta F_{X,st}$	0,0	11,6 ^b	∞	-1,0	-11,6
$\Delta F_{X,lt}$	0,0	17,4 ^b	∞	-1,0	-17,4
$\Delta F_{X,dyn}$	0,0	11,6 ^b	∞	-1,0	-11,6
$\Delta F_{X,temp}$	0,0	11,6 ^b	œ	-1,0	-11,6
$\Delta F_{X,prox}$		Co	vered by calibratic	on	
$F_{\rm X,mes}$	10 068,3		118		51
^a Normal distrib	oution.	-	•	•	
^b Rectangular o	distribution.				

Table B.5 – Uncertainty budget of scale factor $F_{X,mes}$

- 81 -

The combined standard uncertainty u_{mes} in Table B.5 has been calculated as:

$$u_{\text{mes}} = \sqrt{u_{\text{X,cal}}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\text{X,Bi}}^2} = \sqrt{u_{\text{X,cal}}^2 + u_{\text{X,lin}}^2 + u_{\text{X,st}}^2 + u_{\text{X,lit}}^2 + u_{\text{X,dyn}}^2 + u_{\text{X,temp}}^2 + u_{\text{X,prox}}^2} = \sqrt{41,1^2 + 14,1^2 + 11,6^2 + 17,4^2 + 11,6^2 + 11,6^2 + 0^2} = 50,94$$
(B.11)

Finally, the complete result as regards the scale factor to be used in measurements with the approved measuring system is expressed by:

 $F_{X,mes} = 10\ 068 \pm 102 = 10\ 070 \times (1 \pm 0,010)$ for a coverage probability of not less than 95 % (k = 2).

The expanded uncertainty of the scale factor when using the measuring system is $U_{\text{mes}} = 1,0$ % which can be applied as the maximum value of the expanded measuring uncertainty until the next calibration.



Figure B.1 – Comparison between the system under calibration X and the reference system N

Annex C (informative)

Step-response measurements

C.1 Generation of current step

The circuit arrangement used for determining the step response should be described in the record of performance and it should be as near as possible to the operating conditions.

An approximate step current is injected into the input terminals of the current-converting device. The rise time of the step should be much shorter than the shortest front time (rise time) of the current to be measured (a factor of 10 or more is recommended). The flat portion of the step should be as long as possible with the minimal decay, and in any case, it should be much longer than the longest tail time (duration) of the current waveform to be measured (a factor of 10 or more is recommended). The step should be as long as possible with the minimal decay, and in any case, it should be much longer than the longest tail time (duration) of the current waveform to be measured (a factor of 10 or more is recommended). The output quantity of the converting device (current or voltage) is measured using a digital recorder or oscilloscope.

Two methods to generate the step current are shown below. In Figure C.1, a coaxial cable is used to store the energy necessary for the step while in Figure C.2, a capacitor is used. The current waveform generated by coaxial cable is a sharp rectangle whose interval is twice the travelling time along the cable. A gap and a resistance between the energy storage device and the current-converting device are also shown. The chopping can be achieved in different ways. The following methods are often used:

- chopping by a relay with mercury-wetted contacts: this gives steps up to some 10 A;
- chopping by a uniform-field gap in air at atmospheric pressure with a spacing up to some millimetres: this gives steps up to some 100 A;
- chopping by a uniform gap with spacing up to some millimetres under increased gas pressure: this gives steps up to some kA.

When the step is generated using a repetitive generator, the duration of the step and of the interval between steps shall be chosen such that no additional errors are introduced with respect to a single pulse.

Current step generators using semiconductor devices have also been used to advantage in some laboratories.







Figure C.2 – Circuit to generate current step using a capacitor

where

- C is the energy storing capacitor;
- G is the gap to generate the step;
- D is the current-converting device.

C.2 Terms and definitions

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

C.2.1

reference level (impulse measurements only)

mean value, $l_{\rm R}$, of the step response taken over the range of $0.5 \times t_{\rm min}$ to $2 \times t_{\rm max}$ (see Figure C.3)

NOTE A measuring system may have more than one reference level, for example, it may have different scale factors for different waveforms due to the variation of the response level (see Figure C.3).

C.2.2

origin of a step response

 O_1

instant when the response curve first starts a monotonic rise above the amplitude of the noise at the zero level of the (unit) step response (see Figure C.3)

NOTE All time values are measured from the origin O_1 .

C.2.3

unit step response

g(t)

step response normalized such that a reference level becomes unity and the zero level becomes zero (Figure C.3)

NOTE A measuring system has a unit step response for each reference level. The origin O_1 of the step response is identical with that of the unit step response.



Figure C.3 – Definition of response parameters with respect to step response

Annex D

(informative)

Convolution method for estimation of dynamic behaviour from step-response measurements

D.1 General

The convolution method is used to evaluate the dynamic performance of an impulse currentconverting device, a digital recorder, or a complete impulse measuring system from their step responses as Annex C.

The convolution method uses the step response of the measuring system to calculate its output impulse waveform from the input impulse waveform. The errors of the impulse parameters of the output waveform relative to the input waveform may be used to evaluate the performance of the measuring system for a particular waveform to be measured.

The convolution method assumes that the step response of the measuring system is correctly measured and the input waveform used in the calculation is representative of the real impulse waveforms to be measured.

D.2 The convolution method

If the input impulse waveform and the unit (normalized) step response (Annex C) of an impulse measuring system are $V_{in}(t)$ and g(t) respectively, the output, $V_{out}(t)$, may be expressed by the following convolution integral (see John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis, as listed in the bibliography)

$$V_{\text{out}}(t) = \int_{0}^{t} V_{\text{in}}(\tau) \times g(t-\tau) \times \mathrm{d}\,\tau \tag{D.1}$$

where t is time and $Vi_n(t)$ is the first derivative of the input impulse waveform $V_{in}(t)$.

If g(t) and $V_{in}(t)$ are sampled with the same sampling interval and the number of samples of g(t) is less than that of $V_{in}(t)$, the continuous convolution integral (see Equation (D.1)) reduces to the causal form of the discrete convolution sum:

$$V_{\text{out}}(i) = \sum_{k=0}^{i} V_{\text{in}}(k) \times g(i-k) \times \Delta t \quad i = 0, 1, 2, ..., n-1$$
(D.2)

where

 $V_{out}(i)$ is the discrete output array;

- $V_{in}(i)$ is the first derivative of input array;
- g(i) is the unit step-response array;
- *n* is the number of samples of the input array; and
- Δt is the sampling interval of the input and output arrays, and the step-response array.

D.3 Procedure for performing the convolution calculation

This procedure is based on the discrete convolution sum described by Equation (D.2). It is used for computer-aided calculation using digital impulse waveforms. The procedure is used to estimate the errors of the impulse parameters of the output relative to the input waveforms of an impulse measuring system. The procedure given here describes the major steps of calculation. These steps are as follows:

- a) Obtain the input impulse-waveform array $V_{in}(i)$ for i = 0, 1, 2, ..., n-1, and calculate its impulse parameters.
- b) The sampling rate of the input impulse waveform should be identical to that of the unit step response, with the number of its samples equal to that of the unit step response (see step b). The input waveform should be a smooth waveform with the highest frequency of the noise having been reduced well below the Nyquist frequency (half of the sampling frequency of the impulse array). A smooth input waveform array and its impulse parameters may be derived either:
 - from an analytical expression of the impulse, e.g. a superposition of two ideal exponential functions. The impulse parameters of this waveform may either be obtained from the analytical expression or from the impulse calculation software of the impulse measuring system being examined;
 - 2) from a recorded real waveform, smoothed by a precision low-pass digital filter or a piecewise cubic spline fitting algorithm. The impulse parameters of this waveform may be obtained from the impulse calculation software of the impulse measuring system being examined.
- c) Obtain the first derivative $V'_{in}(i)$ for i = 0, 1, 2, ..., n-1, of the input impulse waveform $V_{in}(i)$ by numerical derivation
- d) Obtain the unit step response array g(i) for i = 1, 2, ..., m-1 and m = n + j, with j being the number of points before the origin of the recorded step response O_1 .
 - 1) Obtain the unit step response by normalizing the measured step response (Annex C). To obtain a low-noise unit step response for convolution purposes, averaging several step-response records may be used. The smoothness of the unit step response array g(i) is less critical if Equation (D.2) is used for the convolution calculation and the impulse array $V_{in}(i)$ is already smooth.

NOTE 1 For high-current measuring systems, a step response with a short enough rise time and a long enough tail time may be impossible to obtain. In such cases, an approximate step response could possibly be obtained by combining a short record, using the front, and a long record, using the tail. These records may have been obtained via different methods.

- 2) Obtain the zero level, l_0 , of the step response by averaging the samples of the recorded step-response array s(i) before the starting edge of of the step.
- 3) Obtain the reference level, l_R , of the step response by averaging the samples of the recorded step-response array s(i) within a time range including the shortest front time to for which the measuring system is to be used, and up to the time reflecting the frequency at which the scale factor of the converting device has been determined.
- 4) Normalize the step-response array s(i) into a temporary unit-step-response array, $g_0(i)$, by using the following formula:

$$g_0(i) = \frac{s(i) - l_0}{l_R - l_0}$$
(D.3)

5) Find the noise amplitude at the zero level by finding the standard deviation, d_0 , of the samples of the $g_0(i)$ array before the start of the step. Searching backwards from the end of $g_0(i)$, find the sample with its value being higher than three times of the

standard deviation d_0 . The time of this sample is assigned as the origin, O_1 , of $g_0(i)$. Assign the index of this sample to *j*.

6) Construct the unit step response g(t) from the origin by removing the samples of $g_0(i)$ before the origin, i.e.:

$$g(i-j) = g_0(i), \ i = j, \ \dots, \ m-1$$
 (D.4)

NOTE 2 Recorded $g_0(i)$ has m + j points. Unit step response g(i-j) has n = m points after removing j points before the origin O_1 .

- e) Obtain the output array and its impulse parameters array:
 - 1) Obtain the output impulse waveform array $V_{out}(i)$ by calculation using Equation (D.2) either in the time domain or in the frequency domain.
 - Calculate the impulse parameters of V_{out}(i) using the impulse calculation software of the impulse measuring system.
 - 3) Calculate the errors of $V_{out}(i)$ as the difference between the impulse parameters of $V_{out}(i)$ and $V_{in}(i)$.

D.4 Uncertainty contributions

In principle, the errors calculated by the convolution may be used for correcting the parameters calculated. Such correction does however require à priori knowledge of the waveshape, i.e. unless the impulse is of known regular shape, the correction is not reliable. The errors and their scatter for different wave-shapes, can be used as an uncertainty contribution to the combined uncertainty of measurement of the parameter concerned. Uncertainty calculation should be performed in accordance with ISO/IEC Guide 98-3. Guidance on uncertainty calculations is given in Annex A, with examples given in Annex B.

D.5 Discussion of the calculated errors of impulse parameters

D.5.1 Error in the peak amplitude

The unit level of the unit step response is usually not constant. Therefore, the calculated error of the peak amplitude is often significant in comparison with the numerical error of the convolution calculation, although it may be small in comparison with the required measurement uncertainty of the peak amplitude. The calculated relative error of the peak amplitude should be equal to the relative difference between unity and the value of g(i) at a time approximately equal to 2 times the front time T_1 of the input impulse $V_{in}(i)$. The calculated error in the peak amplitude can be compared to the unit step response to verify if the convolution calculation has been performed correctly.

D.5.2 Error in the front time

The convolution calculation can reveal a change in the wave shape of the impulse caused by the performance of the measuring system, and therefore the magnitude of the error of the front time, which cannot be revealed by the step response itself. As the consequence of a slower step response, the front time of the output impulse becomes larger. However, the front time is also influenced by the overshoot/undershoot of the step response. Depending on the time-positions of the overshoot and undershoot on the step response, the front part of the impulse waveform may be changed into different shapes, leading to either an increased or decreased front-time value.

D.5.3 Error in the time to half-value

The time to half-value is mainly affected by the difference between the g(i) value at a time approximately equal to 2 times the front time T_1 and the g(i) value at the time equal to T_2 of the impulse being evaluated. The convolution calculation can be used to estimate the magnitude of the error of T_2 , which cannot be directly estimated from the step response itself.

Annex E

(informative)

Constraints for certain wave shapes

It has been observed that certain current wave shapes, originally used for testing of non-linear elements, have also been applied to linear elements leading to some problems in achieving a standardized wave shape. For example, the wave shape 8/20 is defined in arrester testing, where the arrester is a strongly non-linear element. In the case of non-linear loads, this wave shape is readily obtainable. The parameters are as follows:

- peak value: ±10 %;
- $T_1 = 8 \ \mu s \pm 10 \ \%;$
- $T_2 = 20 \ \mu s \pm 10 \ \%;$
- reversal peak: <20 % of the peak value.

However, in case of linear loads, these parameters are generally not achievable because with a generating circuit using only R, L, and C elements, it is possible to obtain only a very small fraction of the total permissible parameter combinations T_1 and T_2 .

Calculation of the waveform with the condition of undershoot less than 20 %, it is possible to obtain a ratio of $2,7 < T_2/T_1 < 3,8$ (see S. Sato, T. Harada and M. Hanai, as listed in the bibliography). Figure E.1 shows the effective ranges (shaded) for T_1 and T_2 at 10 % and at 20 % permissible tolerance on T_1 and T_2 , both for 20 % and 30 % tolerated polarity reversal. For instance, if we determine $T_2 = 20 \ \mu$ s, we have for T_1 a range between 6,4 μ s and 7,4 μ s at $\pm 20 \$ % tolerance for the time parameters. In the case of a $\pm 10 \$ % tolerance, we have only a range of 7,2 μ s to 7,4 μ s for T_1 .

Consequently, it is advisable to permit larger undershoot if only linear test objects are to be tested, see Figures E.2 and E.3.



Usable range for T_1 and T_2

Figure E.1 – Attainable combinations of time parameters (shaded area) for the 8/20 impulse at maximum 20 % undershoot and for 20 % tolerance on the time parameters









Figure E.2 – Locus for limit of attainable time parameters as a function of permissible undershoot for the 8/20 impulse



Figure E.3 – Locus for limit of attainable time parameters as a function of permissible undershoot for the 30/80 impulse

Annex F

(informative)

Temperature rise of measuring resistors

Under normal operating conditions of impulse-current and/or short-time current, currentconverting shunts must dissipate a considerable amount of energy in a time so short that the heating of the resistor material is virtually adiabatic. Under these circumstances, the temperature rise $\Delta \vartheta$ and the resistance change ΔR may be calculated as follows:

$$\Delta \vartheta = \frac{W}{m \times c}$$

$$\Delta R = \Delta \vartheta \times R \times \alpha$$

where

 $\Delta \vartheta$ is the temperature rise in K;

- *W* is the energy dissipated in the current-converting shunt expressed in J;
- *m* is the mass of resistance material in kg;
- c is the specific heat capacity of the resistance material in J/(kg×K);
- *R* is the resistance of the current-converting shunt in Ω ;
- ΔR is the change of resistance R in Ω ;
- α is the temperature coefficient in K⁻¹.

In the event of failure of a test object undergoing e.g. an impulse-current test, the stored energy of the impulse generator will be dissipated mainly in the current-converting shunt. It is suggested that the characteristics of the shunt should be such that, under this condition, the temperature rise does not exceed 200 K.

For the progressive temperature rise associated with repeated current applications, the total permissible rise depends on the temperature coefficient of the resistor material and the temperature class of the insulating material employed.

Annex G

```
(informative)
```

Determination of r.m.s. values of short-time a.c. current

G.1 General characterization of a short-time alternating current

The equivalent circuit diagram of a short-circuit current test is shown in Figure G.1. This diagram describes the situation behind a transformer showing its leakage inductance, L, but neglecting the magnetizing inductance. It does, however, not fully describe the short-circuit conditions at or near the terminals of a generator since its transient and subtransient reactance can significantly increase the initial peak value of the short-circuit current.



Figure G.1 – Equivalent circuit of short-circuit test

For the circuit shown in Figure G.1, with the beginning of the short-circuit at t = 0 (i.e. the arbitrary instant of closing of the switch is taken as the zero-time reference on the voltage wave), the mathematical expression which describes the behaviour of the current is given by application of Kirchhoff's voltage law:

$$\hat{u} \times \sin(\omega t + \psi) = L \times \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} + R \times i_k$$
 (G.1)

where ψ is the angle on the voltage wave at which the switch is closed.

The solution of this differential equation leads to the following expression:

$$i_{k} = \hat{i}_{k} \times \left[\sin\left(\omega t + \psi - \varphi\right) - \sin\left(\psi - \varphi\right) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$
(G.2)

where

- \hat{i}_k is the peak value of the current;
- $\omega = 2\pi \times f$ is the angular frequency with *f* being the power frequency;
- φ is the phase angle (or impedance angle): $\varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R}$ (G.3)
- τ is the time constant: $\tau = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R}$ (G.4)

• ψ is the actuating angle, i.e. the angle on the voltage wave, at which the switch is closed.

- 92 -

Equation (G.2) can be split into two parts. The first part describes the steady-state a.c. component of the short-time current:

$$i_{kd} = \hat{\imath}_{k} \times \sin\left(\omega t + \psi - \varphi\right) \tag{G.5}$$

The second part describes the decay of the d.c. component of the current:

$$i_{\rm dc} = -\hat{i}_{\rm k} \times \sin\left(\psi - \varphi\right) \times e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$
(G.6)

This equation shows that the maximum value of the d.c. component also depends on the time constant $\frac{L}{R}$. For technical reasons, the phase (or impedance) angle is often expressed by cos φ (i.e. the power factor) from which the time constant $\frac{L}{R}$ can be derived.

G.2 True r.m.s. value

Refer to 7.2.2 for the true r.m.s. value of a periodic current and to 9.2.2 for the true r.m.s. value of an event.

G.3 Symmetrical a.c. component (r.m.s. value)

The symmetrical a.c. component of the alternating short-circuit current (such as the prospective short-circuit current of a particular test circuit free from any additional test object impedance or the actual test short-circuit current carried by the test object) is defined as the r.m.s. value described in Figure G.2:



Figure G.2 – Symmetrical a.c. component of an alternating short-circuit current

The symmetrical component of the current is $\frac{A_2}{2\sqrt{2}}$.

G.4 Numerical method of obtaining the true r.m.s. value using the trapezium rule

To obtain the true r.m.s. value of a given periodic a.c. current, it is at first necessary to calculate the integral of the following expression within an integer number of cycles:

$$I_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \, \mathrm{d}t}$$

The area of the function $i^2(t)$ using the trapezium rule is given by:

$$A_i = \frac{h}{2} \times [i^2(t_i) + i^2(t_i+1)]$$

where i = (0, ..., n-1).



Figure G.3 – Numerical evaluation of r.m.s value showing both instantaneous current and instantaneous squared value of the current

Summation of all partial areas leads to the true r.m.s. value of the current:

$$A(n) = \frac{h}{2} \sum_{i=0}^{n-1} [i^{2}(t_{i}) + i^{2}(t_{i+1})] = \frac{h}{2} \times \left(i^{2}(t_{0}) + 2\sum_{i=1}^{n-1} i^{2}(t_{i}) + i^{2}(T) \right) = I_{\text{rms}}^{2} \times T$$
$$\Rightarrow I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{h}{2T} \left(i^{2}(t_{0}) + 2\sum_{i=1}^{n-1} i^{2}(t_{i}) + i^{2}(T) \right)}$$

In order to get an acceptably small error in this numerical integration, a sufficient number of samples n is necessary (e.g. 800 samples for a 50 Hz current waveform).

G.5 Conventional r.m.s. value of the a.c. component

The conventional r.m.s. value I_{conv} of the a.c. component is determined using three consecutive peak values $A(t_{i-1}, Y_{i-1})$, $B(t_i, Y_i)$, and $C(t_{i+1}, Y_{i+1})$. This method is also known as the three-crest method,

- 94 -

where

- t_i is the time instant when the peak occurs;
- Y_i is the instantaneous value at time t_i .



Figure G.4 – Three-crest method

The r.m.s. value I_{conv} is measured as $\frac{[DD]}{2 \times \sqrt{2}}$. This value can be obtained graphically or by calculation using digital data and the formula:

$$I_{\rm conv} = \frac{\frac{A+C}{2} - B}{\frac{2}{2 \times \sqrt{2}}}$$

or calculating the two lines as:

• $f_i(t)$ being a straight line between the peak values A and C, related to the mean time instant t_i :

$$f_i(t) = a_i \times t_i + b_f$$

where

$$a_i = \frac{Y_{i+1} - Y_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

$$b_f = Y_{i+1} - a_i \times t_{i+1}$$
 or $b_f = Y_{i-1} - a_i \times t_{i-1}$

• gi(t) being a straight line parallel to $f_i(t)$ going through the peak value B:

$$g_i(t) = a_i \times t_i + b_g$$
 $b_a = Y_i - a_i \times t_i$

G.6 Conventional r.m.s. value of an arc current

To avoid a possible effect of current and/or frequency variation, the r.m.s. value of an arc current is obtained from a non-weighted average of the r.m.s. values (three-crest-method, as described in Clause G.5). Each r.m.s. value is obtained by a sliding from one crest to the previous one. To prevent border effects, the first and, if possible, the last cycle (loop) shall be omitted.



Figure G.5 – Evaluation of conventional r.m.s. value of an arc current using the three-crest method

The r.m.s. value for a signal with *N* crests [1, ..., *N*] is given by the following expression:

$$I = \frac{1}{N-4} \times \sum_{i=3}^{N-2} (X_i) \text{ or}$$
$$I = \frac{1}{N-4} \times \frac{1}{\sqrt{8}} \times \sum_{i=3}^{N-2} (Z_i)$$

where

 X_i is the r.m.s. value of the arc current at crest number *i* and;

 Z_i is the peak-to-peak value of the arc current at crest number *i*.

In the analytical form, the r.m.s. value is given for a signal with N crests by the following expression:

$$I = \frac{1}{N-4} \times \frac{1}{\sqrt{8}} \times \sum_{i=3}^{N-2} (a_i \times t_i + b_i - y_i)$$

where

- t_i is the instant (time abscissa) of crest number *i*;
- y_i is the peak value of crest number *i*;
- a_i is the slope of straight line $f_i(t)$;
- b_i is the origin of the straight line $f_i(t)$ at t = 0.

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

G.7 Equivalent r.m.s. value of a short-time current during a short-circuit of a given duration

If the short-time current does not show a constant symmetrical r.m.s. value, the equivalent r.m.s. value can be determined from the oscillogram, using the method described as follows:



Figure G.6 – Evaluation of equivalent r.m.s value of a short-time current during a short-circuit test

AA' and BB' is the envelope of the short-circuit current;

- CC' is the displacement of current-wave zero line from normal zero line at any instant;
- $Z_0, ..., Z_{10}$ is the r.m.s. value of the a.c. component of current at any instant measured from normal zero: d.c. component is neglected;
- X_0 is the peak value of the a.c. component of current at the instant of initiating short-circuit;
- BT is the duration (total time) of the short circuit (t_t) .

The total time t_t of the test is divided into 10 equal parts by verticals 0 - 0, 1 - , ..., 1 and the r.m.s value of the a.c. component of the current is measured at these verticals.

These values are designated: $Z_0, Z_1, ..., Z_{10}$

where

$$Z = \frac{X}{\sqrt{2}}$$
 and

X is the peak value of the a.c. component of current.

The equivalent r.m.s. current during the time t_t is given by:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{30} \times \left[Z_0^2 + 4 \times \left(Z_1^2 + Z_3^2 + Z_5^2 + Z_7^2 + Z_9^2 \right) + 2 \times \left(Z_2^2 + Z_4^2 + Z_6^2 + Z_8^2 \right) + Z_{10}^2 \right]}$$

The d.c. component of current represented by CC' is not taken into account.

– 97 –

G.8 Determination of the impedance angle

The impedance angle can be found by measurement of the current in a test circuit with a closing angle of 0° using the following equations:

Peak factor k can be derived from the measured current after the d.c. component has decayed.

$$\kappa = \frac{I_{\rm p}}{\sqrt{2} \times I_{\rm rms}^{"}}$$

where

*I*_p is the peak value (see 9.2.1);

 $I_{\rm rms}$ is the true r.m.s. value of the after any d.c. component has decayed (see 9.2.3).

The impedance angle is shown on the graph in Figure G.7, and can be calculated, using the following equations:

$$\frac{R}{X} = \sqrt{\frac{\cos \varphi^2}{1 - \cos \varphi^2}}$$
$$\kappa = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X}\right)^2}} * e^{\frac{R}{X}\left(\frac{\pi}{2} + \arctan\frac{X}{R}\right)}\right]$$



Figure G.7 – Relation between peak factor, k, and power factor $cos(\varphi)$

Annex H (informative)

Examples of IEC standards with high-current tests

Table H.1 – List of typical tests with short-time alternating current

Type of tests	Reference to IEC standards (examples)
Peak-withstand and short-time withstand current tests	IEC 60076-5 IEC 60439-2 IEC 60947-1, IEC 60947-2, IEC 6047-3 IEC 61230 IEC 61439-1 IEC 62271-1
Making and breaking tests	IEC 60265-1 IEC 60947-1, IEC 60947-2, IEC 6047-3 IEC 62271-100, IEC 62271-102, IE 62271-104, IEC 62271-105
Shunt-reactor switching tests	IEC 62271-110
Capacitive-current switching tests	IEC 62271-100
Synthetic tests	IEC 62271-101
Current-limiting fuse tests	IEC 60282-1

		1	r
Type of equipment under test	Reference to IEC standards	Impulse type	Tolerances for time parameters
Surge-arresters test without gaps	IEC 60099-4	1 / ≤ 20	T ₁ ±10 %
			T ₂ ≤20 μs
Surge-arresters test without gaps	IEC 60099-4	4/10	(3,5 < T ₁ <4,5) μs
			T ₂ ±10 %
Surge-arresters test without gaps	IEC 60099-4	8/20	(7 <t<sub>1 < 9) μs (18 <t<sub>2 <22) μs</t<sub></t<sub>
Surge-arresters test	Future IEC 61643-11		T ₁ ±10 % T ₂ ±10 %
Electronic devices	IEC 61000-4-5		$T_1 \pm 20 \%$ $T_2 \pm 20 \%$
Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks	IEC 61643-21		
Surge protective devices (SPD) connected to low voltage power distribution systems			
Surge-arresters test without gaps	IEC 60099-4	30/80	(25 <7 ₁ <35) μs (70 <7 ₂ <90) μs
Surge-arresters test without gaps	IEC 60099-4	30-100 / (60-200)	
Surge-arresters test without gaps	IEC 60099-4:2004, Tables 5 and 6	T _d of 500 μs, 1 000 μs or 2 000 μs or between 2 000 μs and 3 200 μs	T ₁ ±20 % T ₂ ±20 %
Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks	IEC 61643-21	5/300	$T_1 \pm 30 \%$ $T_2 \pm 20 \%$
Surge-arresters test without gaps	IEC 62305-1	10/350	Not given
Surge protective devices connected to telecommunications and signalling network	IEC 61643-21	10/350 10/250	$T_1 \pm 30 \%$ $T_2 \pm 20 \%$

Table H.2 – List of typical tests with exponential impulse current

Table H.3 – List of typical tests with rectangular impulse current

Type of equipment under test	Reference to IEC Standards	Impulse type
Surge-arresters test without gaps	IEC 60099-4:2004, Tables 5 and 6	T _d of 500 μs, 1 000 μs or 2 000 μs or between 2 000 μs and 3 200 μs

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

Bibliography

IEC 60050-151:2001, International Electrotechnical Vocabulary – Part 151: Electrical and magnetic devices

IEC 60050-300:2001, International Electrotechnical Vocabulary – Electrical and electronic measurements and measuring instruments – Part 311: General terms relating to measurements – Part 312: General terms relating to electrical measurements – Part 313: Types of electrical measuring instruments – Part 314: Specific terms according to the type of instrument

IEC 60050-321:1986, International Electrotechnical Vocabulary – Part 321: Instrument transformers

IEC 60076-5:2000, Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit

IEC 60099-4:2004, Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems

IEC 60265-1:1998, High-voltage switches – Part 1: Switches for rated voltages above 1 kV and less than 52 kV

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

IEC 60947-1:2007, Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General rules

IEC 60947-2:2006, Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-breakers

IEC 60947-3:2008, Low-voltage switchgear and controlgear – Part 3: Switches, disconnectors, switch-disconnectors and fuse-combination units

IEC 61000-4-5, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test

IEC 61083-1:2001, Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments

IEC 61083-2:1996, 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 61180-2:1994, High-voltage test techniques for low-voltage equipment, Test equipment

IEC 61230:2008, Live working – Portable equipment for earthing or earthing and shortcircuiting

IEC 61643-1:2005, Low-voltage surge protective devices – Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Requirements and tests

IEC 61643-11, Low-voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to Low-voltage power distribution systems – Performance requirements and testing methods¹

¹ Under consideration.

62475 © IEC:2010

IEC 61643-21, Low-voltage surge protective devices – Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Performance requirements and testing methods

IEC 62271-1, High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications

IEC 62271-100:2008, High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers

IEC 62271-101, High-voltage switchgear and controlgear – Part 101: Synthetic testing

IEC 62271-102:2001, High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches

IEC 62271-103, High-voltage switchgear and controlgear – Part 103: Switches for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV^2

IEC 62271-104, High-voltage switchgear and controlgear – Part 104: Alternating current switches for rated voltages of 52 kV and above

IEC 62271-105:2002, High-voltage switchgear and controlgear – Part 105: Alternating current switch-fuse combinations

IEC 62271-110:2009, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 110: Inductive load switching*

IEC 62305-1, Protection against lightning – Part 1: General principles

ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

ISO/IEC Guide 99:2007, International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)

European Association of National Metrology Institutes (EUROMET), "Metrology – In Short": Third edition, July 2008, ISBN: 87-988154-1-2

JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, http://www.bipm.org/en/publications/guides

JCGM 101:2008, Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method, http://www.bipm.org/en/publications/guides

JCGM 104:2009, Evaluation of measurement data – An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents, http://www.bipm.org/en/publications/guides

JCGM 200:2008, International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), http://www.bipm.org/en/publications/guides

SATO, S., HARADA, T. and HANAI, M. "IEC 60060-1 Requirements in Impulse Current Waveform Parameters", Proceedings of the 7th International Power Engineering Conference, CD-ROM, No.TM-3.4, pp.1-5, Singapore, (2005)

² Under consideration.

SATO, Shuji, HARADA, Tatsuya and HANAI, Masahiro, "IEC 60060-1 Requirements in Impulse Current Waveform Parameters", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 6, Art 7. pp.1-12, 2006, June

SATO, Shuji, HARADA, Tatsuya, YOKOYAMA, Taizou, SAKAGUCHI, Sumiko, EBANA, Takao and SAITO, Tatsunori, "Impulse Current Waveform Compliance with IEC 60060-1", IEEJ Trans. FM, Vol. 125, No.8, pp.609-613, (2005)

PROAKIS, John G. and MANOLAKIS, Dimitris G. "*Introduction to Digital Signal Processing*", Macmillan Publishing Company, New York, 1988.

RUNGIS, Y. Li, J. and PFEFFER, A. "The Voltage and Time Parameter Measurement Uncertainties of a Large Damped Capacitor Divider due to its Non-ideal Step Response", proceedings of 15th International Symposium on High Voltage Engineering, 27 – 31 August 2007, Ljubljana, Slovenia

MALEWSKI, R., NGUYEN, C.T., FESER, K., HYLTÉN-CAVALLIUS, N., "Elimination of the skin effect error in heavy current shunts", IEEE Transactions, PAS-100, 1981

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

AV	ANT-F	ROPOS	S	110			
1	Doma	Domaine d'application					
2	Références normatives						
3	Termes et définitions						
	3.1	Systèn	nes de mesure	113			
	3.2	Consti	tuants d'un système de mesure	113			
	3.3	.3 Coefficients de conversion					
	3.4	éristiques assignées	115				
	3.5	Définitions relatives au comportement dynamique					
	3.6	Définit	tions relatives à l'incertitude				
	3.7	3.7 Définitions relatives aux essais sur des systèmes de mesure					
4	Procédures de qualification et d'utilisation d'un système de mesure						
	4.1	Princip	bes généraux	119			
	4.2	Progra	amme des essais de détermination des caractéristiques	119			
	4.3	Progra	amme des contrôles des caractéristiques	120			
	4.4	Exiger	nces applicables au recueil de caractéristiques	120			
		4.4.1	Contenu du recueil de caractéristiques	120			
		4.4.2	Exceptions	121			
	4.5	Condit	ions d'utilisation	121			
	4.6	4.6 Incertitude					
5	Essais et exigences d'essai pour un système de mesure approuvé						
	5.1	Exiger	nces générales	122			
	5.2	Etalonnage – Détermination du coefficient de conversion					
		5.2.1	Etalonnage d'un système de mesure par comparaison avec un système de mesure de référence (méthode à privilégier)	123			
		5.2.2	Détermination du coefficient de conversion d'un système de mesure à partir de ceux de ses constituants	127			
	5.3	Essai	de linéarité	128			
		5.3.1	Application	128			
		5.3.2	Autres méthodes par ordre d'adéquation	129			
	5.4	Compo	ortement dynamique	129			
	5.5	Stabili	té à court terme	129			
		5.5.1	Méthode	129			
		5.5.2	Courant en régime établi	130			
		5.5.3	Courant de choc et courant de courte durée	131			
		5.5.4	Courants périodiques de choc et de courte durée	131			
	5.6	Stabilité à long terme					
	5.7	Effet de la température ambiante					
	5.8	Effet des trajets de courant voisins					
	5.9	Effet du logiciel					
	5.10	Calcul	de l'incertitude	135			
		5.10.1	Generalites	135			
		5.10.2	Incertitude d'etalonnage	135			
		5.10.3	Incertitude de mesure utilisant un systeme de mesure approuvé	136			
	5.11	choc uniquement)					
		5.11 1	Généralités	137			
		÷					

		5.11.2	Incertitude d'étalonnage des paramètres temporels	137			
		5.11.3	Incertitude de mesure des paramètres temporels au moyen d'un				
	- 10	système de mesure approuvé					
	5.12	Essai de perturbations					
		5.12.1	Application	139			
		5.12.2	Shunts de conversion de courant et transformateurs de courant avec fer	140			
		5.12.3	Systèmes de mesure inductifs sans fer (bobines de Rogowski)	141			
	5.13	Essais	de tenue	142			
		5.13.1	Essais de tension de tenue	142			
		5.13.2	Essais de courant de tenue	142			
6	Cour	Courant continu en régime établi					
	6.1	6.1 Application					
	6.2	Termes et définitions		143			
	6.3	Courar	nt d'essai	143			
		6.3.1	Exigences	143			
		6.3.2	Tolérances	143			
	6.4	Mesure	e du courant d'essai	143			
		6.4.1	Exigences applicables à un système de mesure approuvé	143			
		6.4.2	Contributions à l'incertitude	144			
		6.4.3	Comportement dynamique	144			
		6.4.4	Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé	144			
		6.4.5	Contrôle des caractéristiques	145			
	6.5	Mesure	e de l'amplitude de l'ondulation	145			
		6.5.1	Exigences applicables à un système de mesure approuvé	145			
		6.5.2	Contributions à l'incertitude	145			
		6.5.3	Comportement dynamique de l'ondulation	145			
		6.5.4	Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé du courant ondulatoire	146			
		6.5.5	Mesure du coefficient de conversion à la fréquence d'ondulation	146			
		6.5.6	Contrôle des caractéristiques du système de mesure de courant	146			
	66	Drocód		140			
7		6.6 Procedures d'essai		147			
'				147			
	7.1	Applica	ation	147			
	7.2	7.2 Termes et definitions		147			
	1.3			140			
		7.3.1		140			
	7 /	7.3.Z	Tolerances	140			
	7.4	Mésure du courant d'essai					
		7.4.1	Contributions à l'incertitude	1/10 1/10			
		7.4.2	Comportament dynamique	140			
		7.4.3	Etalophages et essais pour un système de mesure approuvé	151			
		7.4.4 7.4.5	Contrôle des caractéristiques	151			
	75	Procéd	lurae d'assai	150 150			
Q		ant cont	ini de courte durée	102 150			
8							
	8.1 0.0	Арриса		152			
	8.Z	rermes	S ET GEHINITIONS	153			

	8.3	Courar	nts d'essai	153	
		8.3.1	Exigences relatives au courant d'essai	153	
		8.3.2	Tolérances	153	
	8.4	Mesure	e du courant d'essai	154	
		8.4.1	Exigences applicables à un système de mesure approuvé	154	
		8.4.2	Contributions à l'incertitude	154	
		8.4.3	Comportement dynamique	154	
		8.4.4	Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé	155	
		8.4.5	Contrôle des caractéristiques	155	
		8.4.6	Essai de linéarité	156	
	8.5	Procéd	lures d'essai	156	
9	Courant alternatif de courte durée				
	9.1	Application			
	9.2	Termes et définitions			
	9.3	Courar	nt d'essai	158	
		9.3.1	Exigences relatives au courant d'essai	158	
		9.3.2	Tolérances	158	
	9.4	Mesure	e du courant d'essai	159	
		9.4.1	Exigences applicables à un système de mesure approuvé	159	
		9.4.2	Contributions à l'incertitude	159	
		9.4.3	Comportement dynamique	159	
		9.4.4	Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé		
		9.4.5	Contrôle des caractéristiques		
		9.4.6	Essai de linéarité		
		9.4.7	Essai de perturbations	162	
	9.5	ہ۔ ت Procédures d'essai		162	
10	Cour	ants de	choc		
	10.1	Applica	ation		
	10.2	Terme	s et définitions		
	10.3	Courar	nt d'essai		
		10.3.1	Généralités		
		10.3.2	Tolérances		
	10.4	Mesure	e du courant d'essai		
		10.4.1	Exigences applicables à un système de mesure approuvé		
		10.4.2	Contributions à l'incertitude		
		10.4.3	Comportement dynamique		
		10.4.4	Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé		
		10.4.5	Contrôle des caractéristiques		
	10.5	Procéd	lures d'essai		
11	Mesu	esure du courant lors d'essais diélectriques à haute tension			
	11 1	1 Application			
	11.2	 Application Termes et définitions 		172	
	11 3	Mesure	e du courant d'essai	172	
	11.0	11 3 1	Exigences applicables à un système de mesure approuvé	172	
		11 3 2	Contributions à l'incertitude	172	
		11 3 3	Comportement dynamique	172	
		11 2 /	Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé	170	
		11 3 5	Contrôle des caractéristiques	ے رہ 172	
		11 3 6	Essai de linéarité		
		11.0.0			
11.3.7 Essai de perturbations					

11.4 Procédures d'essai					
12 Systemes de mesure de reference					
12.1 Generalites					
Annexe A (informative) Incertitude de mesure					
Annexe B (informative) Exemples de calcul de l'incertitude dans les mesures à haute					
intensité					
Annexe C (informative) Mesures de la réponse indicielle189					
Annexe D (informative) Méthode de convolution pour l'estimation du comportement dynamique à partir des mesures des réponses indicielles					
Annexe E (informative) Contraintes liées à certaines formes d'onde					
Annexe F (informative) Echauffement des résistances de mesure					
Annexe G (informative) Détermination des valeurs efficaces de courant alternatif de					
courte durée					
Annexe H (informative) Exemples de normes CEI relatives aux essais à haute					
Diblic graphic					
Bibliographie					
Figure 4 - European de séries en altrada (faé auropean acual de faé auropean listites (fa					
Figure 1 – Exemples de reponses amplitude/irequênce pour les irequênces limites (f_1 ; f_2)					
Figure 2 – Etalonnage par comparaison sur l'ensemble de l'étendue de mesure affectée					
Figure 3 – Contributions à l'incertitude de l'étalonnage (exemple avec un minimum de 5 niveaux de courant)					
Figure 4 – Etalonnage par comparaison sur un domaine de courant limité, avec un essai de linéarité (voir 5.3) permettant une extension jusqu'à la valeur la plus élevée de l'étendue de mesure affectée					
Figure 5 – Essai de linéarité du système de mesure avec un dispositif linéaire dans la plage de tension étendue					
Figure 6 – Essai de stabilité à court terme pour un courant en régime établi					
Figure 7 – Essai de stabilité à court terme pour un courant de choc et un courant de					
courte durée					
Figure 8 – Essai de stabilité à court terme pour des courants périodiques de choc et de courte durée					
Figure 9 – Circuit d'essai de l'effet du trajet de courant voisin pour des shunts de conversion de courant et des transformateurs de courant avec fer					
Figure 10 – Circuit d'essai de l'effet du trajet de courant voisin pour des systèmes de mesure inductifs sans fer (bobines de Rogowski)134					
Figure 11 – Principe du circuit d'essai de perturbations140					
Figure 12 – Essai de perturbations réalisé sur le système de mesure $i_1(t)$, fondé sur un shunt de conversion de courant ou un transformateur de courant avec fer dans un montage d'essai en court-circuit triphasé typique (exemple)					
Figure 13 – Circuit d'essai de perturbations pour des systèmes inductifs sans fer					
Figure 14 – Réponse amplitude-fréquence normalisée acceptable d'un système de					
mesure du courant alternatif pour une fréquence fondamentale unique f_{nom} 149					
Figure 15 – Réponse amplitude-fréquence normalisée acceptable d'un système de mesure du courant alternatif pour une gamme de fréquences fondamentales f _{nom1} à					
t _{nom2}					

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

Figure 16 – Exemple de courant continu de courte durée	152
Figure 17 – Exemple de courant alternatif de courte durée	157
Figure 18 – Courant de choc exponentiel	163
Figure 19 – Courant de choc exponentiel – oscillations sur la queue	164
Figure 20 – Courant de choc – Rectangulaire, lisse	164
Figure 21 – Courant de choc – Rectangulaire avec oscillations	165
Figure A.1 – Loi normale $p(x)$ d'une variable aléatoire continue x	182
Figure A.2 – Loi de probabilité rectangulaire symétrique $p(x)$ de l'estimation x d'une grandeur d'entrée X	182
Figure B.1 – Comparaison entre le système en cours d'étalonnage X et le système de référence N	188
Figure C.1 – Circuit de génération d'échelon de courant au moyen d'un câble coaxial	189
Figure C.2 – Circuit de génération d'échelon de courant au moyen d'un condensateur	190
Figure C.3 – Définition des paramètres de réponse par rapport à la réponse individuelle	191
Figure E.1 – Zone grisée montrant les combinaisons réalisables de paramètres temporels pour le courant de choc 8/20 avec un sous-dépassement maximal de 20 % et une tolérance de 20 % sur les paramètres temporels	197
Figure E.2 – Zone limite des paramètres temporels réalisables en fonction du sous- dépassement admissible pour des formes d'onde de courant de choc 8/20	197
Figure E.3 – Zone limite des paramètres temporels réalisables en fonction du sous- dépassement admissible pour un courant de choc 30/80	198
Figure G.1 – Circuit équivalent d'essai de court-circuit	200
Figure G.2 – Composante alternative symétrique d'un courant alternatif de court-circuit	201
Figure G.3 – Evaluation numérique de la valeur efficace démontrant à la fois le courant instantané et le carré instantané du courant	202
Figure G.4 – Méthode des trois crêtes	203
Figure G.5 – Evaluation de la valeur efficace conventionnelle d'un courant d'arc par la méthode des trois crêtes	204
Figure G.6 – Evaluation de la valeur efficace équivalente d'un courant de courte durée au cours d'un essai de court-circuit	205
Figure G.7 – Relation entre le facteur de crête κ et le facteur de puissance $\cos(\phi)$	206
Tableau 1 – Essais exigés pour le courant continu en régime établi	144
Tableau 2 – Essais exigés pour le courant ondulatoire	146
Tableau 3 – Essais exigés pour le courant alternatif en régime établi	151
Tableau 4 – Exigence de tolérance des paramètres d'essai de courant continu decourte durée	154
Tableau 5 – Essais exigés pour un courant continu de courte durée	155
Tableau 6 – Exigences de tolérance applicables aux paramètres d'essai de courant alternatif de courte durée	159
Tableau 7 – Liste des essais typiques réalisés dans un laboratoire d'essai à haute intensité et gamme de fréquences minimales exigée du système de mesure	160
Tableau 8 – Exigences de tolérance du coefficient de conversion	160
Tableau 9 – Essais exigés pour un courant alternatif de courte durée	161
Tableau 10 – Exemples de types de courants de choc exponentiels	167
Tableau 11 – Essais exigés pour le courant de choc	170

Tableau 12 – Essais exigés pour le courant de choc dans le cadre d'essais	
dielectriques a haute tension	172
Tableau A.1 – Facteur d'élargissement k pour un nombre effectif de degrés de liberté v_{eff} ($p = 95,45$ %)	181
Tableau A.2 – Présentation d'un bilan des incertitudes	181
Tableau B.1 – Résultat de la mesure comparative	185
Tableau B.2 – Résultat de la mesure comparative	185
Tableau B.3 – Bilan des incertitudes d'étalonnage du coefficient de conversion F_x	186
Tableau B.4 – Résultat de l'essai de linéarité	187
Tableau B.5 – Bilan des incertitudes du coefficient de conversion $F_{X,mes}$	188
Tableau H.1 – Liste d'essais types utilisant un courant alternatif de courte durée	207
Tableau H.2 – Liste d'essais types utilisant un courant de choc exponentiel	208
Tableau H.3 – Liste d'essais types utilisant un courant de choc rectangulaire	208

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TECHNIQUES DES ESSAIS À HAUTE INTENSITÉ – DÉFINITIONS ET EXIGENCES RELATIVES AUX COURANTS D'ESSAI ET SYSTÈMES DE MESURE

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.
- 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 62475 a été établie par le comité d'études 42 de la CEI: Technique des essais à haute tension.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
42/278/FDIS	42/283/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.

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

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

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

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

TECHNIQUES DES ESSAIS À HAUTE INTENSITÉ – DÉFINITIONS ET EXIGENCES RELATIVES AUX COURANTS D'ESSAI ET SYSTÈMES DE MESURE

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux essais et mesures à haute intensité sur des matériels haute et basse tensions. Elle couvre les essais à haute intensité en courant continu et courant alternatif en régime établi et de courte durée ainsi que des essais de courant de choc. De manière générale, la présente Norme internationale prend en compte des courants de plus de 100 A, même si des intensités moindres peuvent apparaître dans les essais.

NOTE La présente norme couvre également la détection de défauts, comme par exemple dans le cadre d'essais aux chocs de foudre.

La présente norme:

- définit les termes utilisés;
- définit les paramètres et leurs tolérances;
- décrit des méthodes d'estimation des incertitudes de mesures à haute intensité;
- détermine les exigences auxquelles un système de mesure complet doit satisfaire;
- décrit les méthodes à utiliser pour qualifier un système de mesure et pour en contrôler les différents constituants;
- décrit les procédures permettant à l'utilisateur de démontrer qu'un système de mesure respecte les exigences de la présente norme, y compris les limites établies pour l'incertitude de mesure.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application de la présente Norme internationale. 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 60051-2:1984, Appareils mesureurs électriques indicateurs analogiques à action directe et leurs accessoires – Deuxième partie: Prescriptions particulières pour les ampèremètres et les voltmètres

CEI 60060-1:2010, Techniques d'essais à haute tension – Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais

CEI 61180-1, Techniques des essais à haute tension pour matériels à basse tension – Partie 1: Définitions, prescriptions et modalités relatives aux essais

Guide ISO/CEI 98-3:2008, Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) (GUM 1995)

NOTE D'autres normes, guides apparentés, etc., relatifs aux sujets traités dans la présente norme sont fournis dans la bibliographie.

3 Termes et définitions

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

3.1 Systèmes de mesure

3.1.1

système de mesure

ensemble complet de dispositifs utilisable pour réaliser des mesures d'une grandeur à mesurer (mesurande). Le logiciel utilisé pour obtenir ou calculer les résultats de mesure fait également partie du système de mesure

NOTE 1 Un système de mesure à haute intensité comprend généralement les constituants suivants:

- un dispositif de conversion muni soit de bornes pour raccorder le dispositif au circuit, soit d'un couplage approprié au circuit, et les liaisons à la terre;
- un (des) système(s) de transmission reliant les bornes de sortie du dispositif de conversion à (l') aux instrument(s) de mesure et comprenant les impédances ou réseaux d'atténuation, de terminaison et d'adaptation; et
- un (des) instrument(s) de mesure, y compris leurs éventuelles connexions à l'alimentation en énergie.

Les systèmes de mesure qui ne comprennent que quelques-uns des constituants mentionnés ci-dessus, ou qui sont basés sur des principes de mesure non conventionnels, sont acceptables s'ils satisfont aux exigences d'incertitude spécifiées dans la présente norme.

NOTE 2 L'environnement dans lequel un système de mesure fonctionne, ses distances de garde par rapport à des structures sous tension, conductrices et mises à la terre, ainsi que la présence de champs électromagnétiques, peuvent affecter de manière significative le résultat de mesure et son incertitude.

3.1.2

recueil de caractéristiques

recueil détaillé, établi et conservé par l'utilisateur, décrivant le système de mesure et comprenant la preuve que les exigences décrites dans la présente norme sont satisfaites. De telles preuves comprennent les résultats de l'essai de détermination des caractéristiques initial ainsi que le programme et les résultats de chacun des essais de détermination et de contrôle des caractéristiques réalisés ultérieurement

3.1.3

système de mesure approuvé

système de mesure dont la conformité à un ou à plusieurs ensembles d'exigences imposées dans le présent norme a été prouvée

3.1.4

système de mesure de référence

système de mesure dont l'étalonnage fait référence à des étalons nationaux et/ou internationaux pertinents et dont la précision et la stabilité sont suffisantes pour être utilisés lors de l'approbation d'autres systèmes en réalisant des mesures comparatives simultanées avec des types spécifiques de formes d'onde et de gammes de courant

NOTE Un système de mesure de référence (tenu à jour suivant les exigences de la présente norme) peut être utilisé en tant que système de mesure approuvé, mais l'inverse n'est pas vrai.

3.2 Constituants d'un système de mesure

3.2.1

dispositif de conversion

dispositif qui convertit la grandeur à mesurer (mesurande) en une autre grandeur compatible avec l'instrument de mesure

3.2.2

shunt de conversion de courant

résistance pour laquelle la tension est proportionnelle au courant à mesurer

3.2.3

transformateur de courant

transformateur de mesure dans lequel le courant secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasé par rapport à celui-ci d'un angle approximativement nul pour un sens approprié des connexions

[CEI 60050-321:1986, 321-02-01]

NOTE Les transformateurs de courant sont en général définis pour une fréquence unique; cependant, certaines conceptions spéciales peuvent utiliser une gamme de fréquences étendue.

3.2.4

bobine de Rogowski

dispositif inductif de conversion du courant sans fer; les systèmes de mesure fondés sur une bobine de Rogowski comprennent un circuit intégrateur (passif, actif ou numérique)

NOTE Les systèmes de mesure fondés sur une bobine de Rogowski peuvent être conçus pour des mesures de courant dans une gamme de fréquences étendue.

3.2.5

système de transmission

ensemble de dispositifs transmettant le signal de sortie d'un dispositif de conversion à un (des) instrument(s) de mesure

NOTE 1 Un système de transmission est en général composé d'un câble coaxial avec ses impédances terminales, mais peut aussi comprendre des atténuateurs, des amplificateurs ou d'autres dispositifs raccordés entre le dispositif de conversion et l'(les) instrument(s) de mesure. Par exemple, une liaison optique comprend un transmetteur, un câble optique et un récepteur, ainsi que les amplificateurs associés.

NOTE 2 Un système de transmission peut être inclus, en partie ou en totalité, dans le dispositif de conversion ou dans l'instrument de mesure.

3.2.6

instrument de mesure

dispositif destiné à être utilisé pour faire des mesures, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes

[CEI 60050-300:2001, 311-03-01]

3.3 Coefficients de conversion

3.3.1

coefficient de conversion d'un système de mesure

coefficient par lequel la valeur lue sur l'instrument de mesure est à multiplier pour obtenir la valeur de la grandeur d'entrée du système de mesure complet

NOTE 1 Un système de mesure peut comporter plusieurs coefficients de conversion pour différents domaines de courants, gammes de fréquences ou formes d'onde.

NOTE 2 Certains systèmes de mesure affichent directement la valeur de la grandeur d'entrée (c'est-à-dire que le coefficient de conversion du système de mesure est égal à l'unité).

3.3.2

coefficient de conversion d'un dispositif de conversion

coefficient par lequel la sortie du dispositif de conversion est à multiplier pour obtenir sa grandeur d'entrée

NOTE Le coefficient de conversion d'un dispositif de conversion peut être sans dimension (par exemple, le rapport d'un transformateur de courant) ou peut être dimensionné (par exemple, en rapport avec l'impédance d'un shunt de conversion de courant).

3.3.3

coefficient de conversion d'un système de transmission

coefficient par lequel la sortie d'un système de transmission est à multiplier pour obtenir sa grandeur d'entrée

3.3.4

coefficient de conversion d'un instrument de mesure

coefficient par lequel la valeur lue sur l'instrument est à multiplier pour obtenir sa grandeur d'entrée

3.3.5

coefficient de conversion affecté

F

coefficient de conversion d'un système de mesure déterminé lors du dernier essai de détermination des caractéristiques

NOTE Un système de mesure peut avoir plusieurs coefficients de conversion affectés; il peut par exemple avoir plusieurs étendues de mesure ayant chacune un coefficient de conversion différent.

3.4 Caractéristiques assignées

3.4.1

conditions d'utilisation

conditions dans lesquelles un système de mesure fonctionne dans les limites d'incertitude spécifiées

3.4.2

courant assigné

niveau maximal de courant, de fréquence ou de forme d'onde spécifiée, auquel un système de mesure est conçu pour être utilisé

NOTE Le courant assigné peut être plus élevé que la limite supérieure de l'étendue de mesure affectée.

3.4.3

étendue de mesure affectée

domaine de courant, de fréquence ou de forme d'onde spécifiée, dans lequel un système de mesure peut être utilisé dans les limites d'incertitude données par la présente norme, caractérisé par un coefficient de conversion unique

NOTE 1 Les limites de l'étendue de mesure affectée sont choisies par l'utilisateur et vérifiées en réalisant les essais de détermination des caractéristiques spécifiés dans la présente norme.

NOTE 2 Un système de mesure peut avoir plusieurs étendues de mesure affectées, avec différents coefficients de conversion établis pour les différentes étendues.

3.4.4

durée de fonctionnement affectée

durée la plus longue au cours de laquelle un système de mesure en courant alternatif ou en courant continu peut fonctionner à la limite supérieure de l'étendue de mesure affectée compte tenu des limites d'incertitude données dans le présent norme

3.4.5

fréquence d'application affectée

fréquence la plus élevée de courants de courte durée ou de courants de chocs spécifiés, qui peut être appliquée dans un intervalle de temps donné, auquel le système de mesure peut fonctionner à la limite supérieure de l'étendue de mesure affectée et rester dans les limites d'incertitude données dans la présente norme

NOTE La fréquence d'application affectée peut, par exemple, être exprimée comme le nombre d'applications par minute et l'intervalle de temps en minutes ou en heures.

3.5 Définitions relatives au comportement dynamique

3.5.1

réponse d'un système de mesure

g ou G

grandeur de sortie, exprimée en fonction du temps ou de la fréquence, lorsqu'un courant donné est appliqué à l'entrée du système

3.5.2

réponse amplitude-fréquence

G(f)

rapport de la grandeur de sortie à la grandeur d'entrée d'un système de mesure en fonction de la fréquence *f*, lorsque la grandeur d'entrée est sinusoïdale

3.5.3

fréquences limites

limites inférieure et supérieure du domaine à l'intérieur duquel la réponse amplitude/ fréquence est pratiquement constante

NOTE Ces limites sont celles où la réponse s'écarte pour la première fois d'une certaine quantité (par exemple \pm 15 %) par rapport à la valeur constante. Il convient que l'écart admissible tienne compte des incertitudes acceptables d'un système de mesure (voir Figure 1).



NOTE Les fréquences limites supérieure et inférieure sont illustrées sur la courbe A. La courbe B montre une réponse constante descendante par rapport au courant direct.

Figure 1 – Exemples de réponses amplitude/fréquence pour les fréquences limites (f_1 ; f_2)

3.5.4

réponse indicielle g(t)

grandeur de sortie d'un système de mesure en fonction du temps, *t*, lorsque la grandeur d'entrée est un échelon

NOTE Pour plus d'informations concernant la mesure des réponses indicielles, voir l'Annexe C.

3.6 Définitions relatives à l'incertitude

3.6.1 tolérance

différence admise entre la valeur mesurée et la valeur spécifiée pour l'essai

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

NOTE 2 Il est exigé que le courant d'essai mesuré se situe dans la tolérance déclarée du niveau d'essai spécifié. Il convient que le comité d'études concerné spécifie les niveaux d'essai.

3.6.2

incertitude (de mesure)

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

[CEI 60050-300:2001, 311-01-02]

NOTE 1 L'incertitude est positive et indiquée sans signe.

NOTE 2 Il convient de ne pas confondre l'incertitude d'une mesure avec la tolérance d'une valeur ou d'un paramètre spécifié pour un essai donné.

NOTE 3 Pour plus d'informations, voir l'Annexe A et l'Annexe B.

3.6.3 incertitude-type

и

incertitude du résultat de mesure exprimée comme un écart-type

[Guide ISO/CEI 98-3:2008, GUM 2.3.1]

NOTE 1 L'incertitude-type associée à une estimation du mesurande a la même dimension que le mesurande.

NOTE 2 Dans certains cas, l'incertitude-type relative d'une mesure peut convenir. L'incertitude-type relative d'une mesure est l'incertitude-type divisée par le mesurande, et elle est par conséquent sans dimensions.

3.6.4

incertitude-type combinée

 u_{c}

incertitude-type du résultat de mesure lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'un certain nombre d'autres grandeurs égales à la racine carrée positive d'une somme de termes, ces termes étant les variances ou covariances de ces autres grandeurs, pondérées selon la manière dont le résultat de mesure varie en fonction de la modification de ces grandeurs

[Guide ISO/CEI 98-3:2008, GUM 2.3.4]

3.6.5

incertitude élargie

U

grandeur définissant un intervalle autour du résultat d'une mesure, dont on peut s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction importante de la distribution des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande

[Guide ISO/CEI 98-3:2008, GUM 2.3.5, modifiée, c'est-à-dire, sans les notes]

NOTE L'incertitude élargie est la notion la plus proche du terme « incertitude globale » utilisé dans des éditions antérieures des documents correspondants.

3.6.6 facteur d'élargissement

k

facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude-type combinée pour obtenir l'incertitude élargie

[Guide ISO/CEI 98-3:2008, GUM 2.3.6, modifiée, c'est-à-dire, sans la note]

NOTE Pour une probabilité de couverture de 95 % et une loi de probabilité normale (Gaussienne), le facteur d'élargissement est environ égal à 2.

3.6.7

erreur

différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence

[Guide ISO/CEI 99:2007, VIM 2.1.6]

3.6.8

traçabilité

propriété du résultat d'une mesure ou de la valeur d'un étalon telle qu'elle puisse être reliée à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées

[CEI 60050-300:2001, 311-01-15, modifiée, c'est-à-dire, sans les notes]

3.6.9

évaluation de type A

méthode d'évaluation de l'incertitude par analyse statistique des observations

3.6.10

évaluation de type B

méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres qu'une analyse statistique de séries d'observations

3.6.11

Institut National de Métrologie

institut désigné par décision sur le plan national pour développer et maintenir des étalons de mesure nationaux pour une ou plusieurs grandeurs

3.7 Définitions relatives aux essais sur des systèmes de mesure

3.7.1

étalonnage

ensemble des opérations établissant, en référence à des étalons, la relation qui existe, dans les conditions spécifiées, entre une indication et un résultat de mesure

NOTE 1 Cette définition est conçue dans l'approche « incertitude ».

NOTE 2 La relation entre les indications et les résultats de mesures peut être donnée, en principe, dans un diagramme d'étalonnage.

NOTE 3 La détermination du coefficient de conversion est incluse dans l'étalonnage.

[CEI 60050-300:2001, 311-01-09, modifiée, c'est-à-dire par l'addition de la NOTE 3]

3.7.2

essai de type

essai de conformité effectué sur une ou plusieurs entités représentatives de la production

[CEI 60050-151:2001, 151-16-16]

NOTE Pour un système de mesure, ce terme est généralement compris au sens d'un essai réalisé sur un constituant ou sur un système de mesure complet de même conception pour en déterminer les caractéristiques dans des conditions d'utilisation.

3.7.3

essai individuel de série

essai de conformité effectué sur chaque entité en cours ou en fin de fabrication

[CEI 60050-151:2001, 151-16-17]

NOTE Pour un système de mesure, ce terme est généralement compris au sens d'un essai réalisé sur chaque constituant ou sur chaque système de mesure complet, en cours ou en fin de fabrication, pour en déterminer les caractéristiques dans des conditions d'utilisation.

3.7.4

essai de détermination des caractéristiques

essai effectué sur un système de mesure complet pour en déterminer les caractéristiques dans des conditions d'utilisation

3.7.5

contrôle des caractéristiques

procédure simplifiée permettant de s'assurer que le résultat de l'essai de détermination des caractéristiques le plus récent est toujours valide

4 Procédures de qualification et d'utilisation d'un système de mesure

4.1 Principes généraux

Chaque système de mesure approuvé doit être soumis à des essais initiaux, suivis par des essais ultérieurs de détermination (périodiques, voir 4.2) et de contrôle des caractéristiques (périodiques, voir 4.3) tout au long de sa durée de vie. Les essais initiaux comprennent des essais de type (réalisés sur un constituant ou un système de même conception) et des essais individuels de série (réalisés sur chaque constituant ou système).

Les essais de détermination et les contrôles des caractéristiques doivent démontrer que le système de mesure peut mesurer les courants d'essai envisagés, dans les limites d'incertitude données par la présente norme et que les mesures font référence à des étalons de mesure nationaux et/ou internationaux. Le système est approuvé uniquement pour les configurations d'installation et les conditions d'utilisation décrites dans son recueil de caractéristiques.

La stabilité d'un dispositif de conversion, de système(s) de transmission et d'appareil(s) de mesure utilisés dans un système de mesure donné, dans leur domaine spécifié de conditions d'utilisation, est une exigence majeure pour que le coefficient de conversion du système de mesure demeure constant pendant de longues périodes.

Le coefficient de conversion affecté est établi lors de l'essai de détermination des caractéristiques.

Les installations d'essai doivent utiliser les essais donnés dans la présente norme jusque pour la qualification de leurs systèmes de mesure. Il est également admis qu'un utilisateur opte pour la réalisation des essais de détermination des caractéristiques par un Institut National de Métrologie ou par un laboratoire d'étalonnage accrédité pour la grandeur à étalonner.

Tout étalonnage doit faire référence à des étalons nationaux et/ou internationaux. Il incombe à l'utilisateur de s'assurer que tous les étalonnages sont effectués par un personnel compétent, au moyen de systèmes de mesure de référence et de procédures appropriées.

NOTE Les étalonnages réalisés par un laboratoire accrédité conformément à l'ISO/CEI 17025 pour les grandeurs étalonnées et indiquées dans l'accréditation, sont considérés faire référence à des étalons de mesure nationaux et/ou internationaux.

4.2 Programme des essais de détermination des caractéristiques

Pour conserver la qualité d'un système de mesure, son ou ses coefficients de conversion affectés doivent être déterminés en réalisant périodiquement les essais de détermination des caractéristiques selon 5.2. L'intervalle entre les essais de détermination des caractéristiques doit tenir compte de l'évaluation de la stabilité historique du système de mesure. Il est

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

recommandé de répéter les essais de détermination des caractéristiques tous les ans et dans tous les cas il doit être répété au moins une fois tous les cinq ans.

NOTE Des intervalles longs entre les essais de détermination des caractéristiques peuvent accroître le risque qu'une altération du système de mesure passe inaperçue.

L'essai de détermination des caractéristiques doit être répété après des réparations majeures du système de mesure et à chaque fois qu'une configuration de circuit hors des limites indiquées dans le recueil de caractéristiques doit être utilisée.

Lorsque le contrôle des caractéristiques montre que le coefficient de conversion affecté n'est plus valable et que par conséquent, un essai de détermination des caractéristiques est exigé, la raison de cette modification doit être recherchée avant la réalisation de l'essai de détermination des caractéristiques.

4.3 Programme des contrôles des caractéristiques

Les contrôles des caractéristiques doivent être réalisés à des intervalles tenant compte de la stabilité historique du système de mesure telle qu'elle apparaît dans le recueil de caractéristiques. Il convient que l'intervalle de temps depuis le dernier essai de détermination des caractéristiques ou le dernier contrôle des caractéristiques ne soit pas supérieur à une année.

Pour un système de mesure nouveau ou réparé, les contrôles des caractéristiques doivent être effectués à des intervalles courts afin d'en démontrer la stabilité.

Aucune méthode de référence n'est proposée pour les contrôles des caractéristiques car la précision requise est moindre que pour les essais de détermination des caractéristiques.

4.4 Exigences applicables au recueil de caractéristiques

4.4.1 Contenu du recueil de caractéristiques

Les résultats de tous les essais et contrôles, ainsi que leurs conditions d'obtention, doivent être conservés dans le recueil de caractéristiques (en format papier ou électronique si cela est autorisé par les systèmes qualité et la réglementation locale) établi et tenu à jour par l'utilisateur. Le recueil de caractéristiques doit identifier de manière unique les constituants du système de mesure et doit être structuré de sorte que la traçabilité des caractéristiques de fonctionnement du système de mesure soit assurée dans le temps.

Le recueil de caractéristiques doit au moins comprendre les informations suivantes:

- une description générale du système de mesure;
- les résultats des essais de type et des essais individuels de série du dispositif de conversion, du ou des systèmes de transmission, du ou des instruments de mesure et, le cas échéant, du système de mesure complet;
- les résultats des essais ultérieurs de détermination des caractéristiques réalisés sur le système de mesure;
- les résultats des contrôles ultérieurs des caractéristiques réalisés sur le système de mesure.

NOTE La description générale du système de mesure comprend habituellement les principales caractéristiques et capacités du système de mesure, telles que le courant assigné, la (les) forme(s) d'onde, le(s) domaine(s) de distances de garde, la durée de fonctionnement ou la fréquence maximale d'application du courant. Pour de nombreux systèmes de mesure, les informations concernant le système de transmission ainsi que les configurations de retour par la terre et de mise à la terre sont d'une importance fondamentale. Si nécessaire, il convient de fournir une description des constituants du système de mesure en incluant, par exemple, le type et l'identification de l'instrument de mesure.

4.4.2 Exceptions

Dans le cas de systèmes de mesure ou de constituants fabriqués avant la date de publication de la présente norme, il est possible que les éléments de preuve exigés pour certains des essais de type et des essais individuels de série (par exemple, 5.7 et 5.13) ne soient pas disponibles. Dans ce cas, les essais de détermination des caractéristiques (conformément au 6.4.4, 7.4.4, 8.4.4, 9.4.4 ou 10.4.4, selon le cas) et les contrôles réalisés sur la base de normes antérieures, sont considérés convenir, à condition qu'ils démontrent la stabilité du coefficient de conversion. Les résultats de ces contrôles précédents doivent également être intégrés au recueil de caractéristiques.

Les systèmes de mesure constitués de plusieurs équipements interchangeables, peuvent faire l'objet d'un seul recueil de caractéristiques, organisé de façon à couvrir toutes les combinaisons possibles avec un minimum de redites. Plus précisément, chaque dispositif de conversion doit faire l'objet d'un traitement individuel, mais les systèmes de transmission et les instruments de mesure peuvent être traités globalement.

4.5 Conditions d'utilisation

Le shunt de conversion de courant et/ou le transformateur de courant d'un système de mesure du courant doivent être connectés en série avec l'objet en essai. Il convient que l'impédance des connexions soit la plus faible possible.

La bobine de Rogowski d'un système de mesure du courant doit être concentrique à une partie rectiligne du circuit conducteur. Il convient que les axes du conducteur de courant et le plan de la bobine soient perpendiculaires afin de réduire la sensibilité du système par rapport à des champs magnétiques externes.

NOTE 1 La direction d'un circuit conducteur présente souvent un angle de 90° à une certaine distance de la bobine de Rogowski. Il a été démontré que l'influence est négligeable lorsque la bobine de Rogowski est située à une distance supérieure à 2 fois son rayon par rapport à l'angle de 90°.

NOTE 2 Il est possible que le couplage parasite doive être examiné.

L'incertitude d'un système de mesure doit être suffisamment basse pour ses conditions d'utilisation prévues.

La durée de fonctionnement affectée de systèmes de mesure du courant continu et alternatif doit être précisée.

NOTE 3 La durée de fonctionnement affectée minimale recommandée est 1 h.

La fréquence d'application affectée des courants de courte durée ou des courants de choc doit être spécifiée.

NOTE 4 La valeur minimale recommandée pour la fréquence maximale d'application est de deux par minute.

La gamme de conditions environnementales dans laquelle le système de mesure satisfait aux exigences de la présente norme doit être indiquée.

4.6 Incertitude

L'incertitude de toutes les mesures effectuées dans le cadre de la présente norme doit être évaluée selon le Guide ISO/CEI 98-3.

Les procédures d'évaluation des incertitudes sont extraites du Guide ISO/CEI 98-3 et décrites dans la présente norme. Elles sont considérées comme suffisantes pour les configurations d'instruments et de mesures généralement utilisées dans le cadre d'essais à haute intensité: les utilisateurs peuvent toutefois choisir d'autres procédures appropriées dans le Guide ISO/CEI 98-3, telles qu'elles sont mentionnées dans les Annexes A et B.

En général, le mesurande est le coefficient de conversion du système de mesure, mais dans certains cas, il convient de tenir compte d'autres grandeurs, telles que les paramètres temporels des chocs de courant de grande amplitude et leurs erreurs associées.

NOTE 1 Il est commun d'utiliser d'autres mesurandes pour des dispositifs de conversion spécifiques. Par exemple, un shunt de conversion de courant est caractérisé par la valeur de sa résistance et les incertitudes correspondantes dans les domaines utilisés. Un transformateur de courant est caractérisé par l'erreur du rapport, le déphasage et les incertitudes correspondantes.

Selon le Guide ISO/CEI 98-3, l'incertitude d'un mesurande est déterminée en combinant les contributions à l'incertitude de type A et de type B (voir l'Annexe A). Ces contributions sont obtenues à partir des résultats de mesure extraits des manuels des constructeurs, des certificats d'étalonnage, ainsi qu'à partir d'une estimation des valeurs raisonnables des grandeurs d'influence pendant les mesures. Les grandeurs d'influence incluent, par exemple, les effets de température, les perturbations (effet des trajets de courant voisins), etc.

NOTE 2 La résolution d'un instrument de mesure, par exemple un appareil comportant peu de chiffres significatifs, peut dans certains cas constituer une source d'incertitude importante.

Au cours d'un essai de courant réel en laboratoire, il est généralement nécessaire de tenir compte des grandeurs d'influence supplémentaires, outre l'incertitude d'étalonnage du coefficient de conversion tel qu'établi dans le certificat d'étalonnage, de manière à obtenir l'incertitude d'une mesure du courant d'essai.

L'Article 5, l'Annexe A et l'Annexe B fournissent des recommandations permettant de déterminer les contributions à l'incertitude dont il faut tenir compte ainsi que leurs combinaisons. L'incertitude doit être donnée comme l'incertitude élargie pour une probabilité de couverture d'environ 95 %, correspondant dans la plupart des cas à un facteur d'élargissement k = 2, si l'on suppose une loi normale.

NOTE 3 Dans la présente norme, les incertitudes du coefficient de conversion et des mesures du courant (5.2 à 5.10) sont exprimées par les incertitudes relatives en lieu et place de l'incertitude absolue normalement prise en compte dans le Guide ISO/CEI 98-3. L'application directe du GUM et la prise en compte des incertitudes absolues sont indiquées en 5.11 pour les paramètres temporels, ainsi que dans les Annexes A et B.

5 Essais et exigences d'essai pour un système de mesure approuvé

5.1 Exigences générales

Le coefficient de conversion affecté du système de mesure est déterminé par étalonnage en fonction de l'essai de détermination des caractéristiques spécifié. Le coefficient de conversion affecté est une valeur unique pour une certaine gamme de courants, qui est l'étendue de mesure affectée. Il est possible, si nécessaire, de définir plusieurs étendues de mesure affectées ayant différents coefficients de conversion.

Dans le cas des systèmes de mesure du courant de choc ainsi que des systèmes de mesure de courant alternatif/continu de courte durée, l'essai de détermination des caractéristiques démontre également que la réponse dynamique du système convient aux mesures spécifiées et que le niveau des éventuelles perturbations est inférieur aux limites spécifiées.

Pour les essais à haute intensité, la dimension des appareils, les niveaux de courant utilisés et l'interaction entre les circuits d'essai et de mesure sont tels qu'il est souvent préférable d'effectuer les étalonnages à l'installation d'essai de l'utilisateur.

Toutefois, les systèmes de mesure ou leurs constituants peuvent être transportés dans un autre laboratoire pour étalonnage dans une configuration simulant les conditions d'utilisation, à condition que l'essai de perturbations éventuellement prescrit soit réalisé dans l'installation d'essai de l'utilisateur. La configuration d'essai doit être représentative des conditions d'utilisation et doit également être décrite dans le recueil de caractéristiques.

Si un dispositif de conversion (et/ou un autre constituant du système de mesure) est sensible à la présence de trajets de courant voisins, le domaine de distances de garde, lorsque le coefficient de conversion affecté est valable, est déterminé et mentionné dans le recueil de caractéristiques. Un ou plusieurs domaines de distances de garde et les coefficients de conversion respectifs peuvent être affectés. Dans le cas où la distance de garde est fixe, l'effet de proximité est couvert par l'étalonnage.

Le ou les coefficients de conversion d'un système de mesure doivent être déterminés dans chaque étendue de mesure affectée, de préférence par comparaison avec un système de mesure de référence. Cependant, les systèmes de mesure de référence ne sont pas toujours disponibles à des courants d'intensité supérieure et l'étalonnage par comparaison peut donc être effectué à des courants d'une valeur aussi faible que 5 % de l'étendue de mesure affectée, à condition que la linéarité ait été démontrée depuis ce point jusqu'à la limite de l'étendue de mesure affectée. Pour cette extension, l'une des méthodes d'essai de linéarité données en 5.3 doit être utilisée.

Tous les équipements utilisés pour déterminer les coefficients de conversion de systèmes de mesure doivent avoir été étalonnés en référence à des étalons de mesure nationaux et/ou internationaux.

NOTE Les étalonnages réalisés par un Institut National de Métrologie ou par un laboratoire accrédité pour les grandeurs étalonnées et indiquées dans l'accréditation sont considérés faire référence à des étalons de mesure nationaux et/ou internationaux.

Les conditions considérées comme significatives pour les résultats de l'étalonnage du système de mesure approuvé doivent être incluses dans le recueil de caractéristiques.

5.2 Etalonnage – Détermination du coefficient de conversion

5.2.1 Etalonnage d'un système de mesure par comparaison avec un système de mesure de référence (méthode à privilégier)

5.2.1.1 Mesure par comparaison

Le ou les coefficients de conversion sont déterminés pour un système de mesure complet par comparaison avec un système de mesure de référence.

Il convient que le courant d'entrée utilisé pour l'étalonnage soit de la même nature, fréquence et forme d'onde que les courants à mesurer. Si cette condition n'est pas remplie, les contributions à l'incertitude correspondantes doivent être prises en compte.

Pour la comparaison, un système de mesure de référence approuvé par un Institut National de Métrologie, doit être connecté en série avec le système de mesure à étalonner. On doit veiller à éviter les boucles de sol entre le dispositif de conversion et l'(les) instrument(s) de mesure qui génèrent des perturbations inacceptables. Des lectures simultanées doivent être effectuées sur les deux systèmes. La valeur de la grandeur d'entrée obtenue pour chaque mesure réalisée à partir du système de mesure de référence est divisée par la lecture correspondante de l'instrument de mesure du système en essai afin d'obtenir une valeur $F_{i,g}$ de son coefficient de conversion à un niveau de courant I_g . La procédure est recommencée de manière à obtenir *n* lectures indépendantes. La moyenne arithmétique (valeur moyenne) $\overline{F_g}$ du coefficient de conversion du système en cours d'étalonnage, à un niveau de courant I_g est donnée par la formule suivante:

$$\overline{F_{g}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} F_{i,g}$$

L'écart-type s_g expérimental relatif (échantillon) des valeurs individuelles du coefficient de conversion $F_{i,g}$ est donné par l'expression suivante:

– 124 –

$$s_{g} = \frac{1}{\overline{F_{g}}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (F_{i,g} - \overline{F_{g}})^{2}}$$

et l'incertitude-type relative u_g de type A de la valeur moyenne $\overline{F_g}$ est donnée par l'expression suivante:

$$u_{g} = \frac{s_{g}}{\sqrt{n}}$$

NOTE 1 En général, au maximum n = 10 lectures indépendantes sont nécessaires. Si moins de 10 valeurs sont relevées, il convient que l'évaluation soit conforme à l'Annexe A.

NOTE 2 Pour les mesures de courants continus ou alternatifs, des lectures indépendantes peuvent être obtenues soit en appliquant le courant d'essai et en relevant n valeurs, soit en appliquant n fois le courant d'essai et en relevant à chaque fois une valeur. Pour les courants de chocs et de courte durée, n chocs à haute intensité sont appliqués.

Pour déterminer le coefficient de conversion d'un système de mesure ayant plusieurs étendues de mesure affectées, l'étalonnage doit être effectué pour chaque étendue. Les systèmes de mesure ayant des atténuateurs secondaires peuvent être étalonnés pour un seul réglage, à condition qu'il puisse être démontré par d'autres essais que la charge en sortie du dispositif de conversion demeure constante pour tous les réglages. Dans ce type de cas, l'intégralité de la gamme de réglage des atténuateurs secondaires doit être étalonnée séparément.

Le coefficient de conversion doit être déterminé sur chaque étendue de mesure affectée, selon l'une des deux méthodes suivantes.

5.2.1.2 Comparaison sur l'ensemble de l'étendue de mesure affectée

Cet essai comprend la détermination du coefficient de conversion affecté et celle de la linéarité. Le coefficient de conversion doit être déterminé par comparaison avec un système de mesure de référence selon 5.2.1.1, aux niveaux minimal et maximal de l'étendue de mesure affectée, et à au moins trois niveaux intermédiaires répartis à peu près équitablement entre ces extrêmes (voir la Figure 2). Le coefficient de conversion affecté F est considéré

comme étant la valeur moyenne de tous les coefficients de conversion F_g enregistrés à h niveaux de courant.

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^{h} \overline{F_g}$$

où le nombre de niveaux de courant $h \ge 5$.

L'incertitude-type u_F utilisée pour la détermination du coefficient de conversion affecté F est donnée par la combinaison d'une contribution de type B, u_{B1} , de non-linéarité des valeurs moyennes $\overline{F_g}$ et d'une contribution de type B, u_{B2} , fondée sur la valeur maximale des incertitudes-types de type A des coefficients de conversion enregistrés $\overline{F_g}$:

$$u_{F} = \sqrt{u_{B1}^{2} + u_{B2}^{2}} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{h}{\max}_{g=1} \left| \frac{\overline{F_{g}}}{F} - 1 \right| \right)^{2} + \left(\frac{h}{\max}_{g=1} \left(u_{g} \right) \right)^{2}}$$

3).

NOTE 1 Les *h* déterminations du coefficient de conversion $\overline{F_g}$ ne constituent pas un ensemble statistique car elles n'ont pas été obtenues dans les mêmes conditions, notamment pour ce qui concerne le niveau de courant. Par conséquent, il n'est pas possible d'obtenir l'incertitude du coefficient de conversion affecté au moyen de méthodes statistiques (c'est-à-dire de type A). En revanche, il convient d'effectuer une estimation de type B, qui est fondée sur deux contributions. La dispersion de $\overline{F_g}$ observée sur les niveaux de courant est caractérisée par l'écart maximal par rapport à la moyenne, et évaluée comme une loi rectangulaire. Les dispersions statistiques de type A dans les déterminations des résultats $\overline{F_g}$ individuels, à chaque niveau de courant, sont prises en compte par l'application de la valeur maximale des valeurs u_g individuelles, et évaluées comme loi normale (voir la Figure

NOTE 2 Il est admis d'utiliser une valeur arrondie F_0 comme coefficient de conversion affecté F si la différence entre F_0 et F est introduite comme contribution à l'incertitude de type B dans l'estimation de l'incertitude élargie du coefficient de conversion F_0 .



Figure 2 – Etalonnage par comparaison sur l'ensemble de l'étendue de mesure affectée



Figure 3 – Contributions à l'incertitude de l'étalonnage (exemple avec un minimum de 5 niveaux de courant)

5.2.1.3 Comparaison sur un domaine de courant limité

Dans les cas où l'étendue de mesure affectée dépasse la capacité du système de mesure de référence disponible, le coefficient de conversion affecté doit être déterminé par comparaison selon 5.2.1.1 jusqu'à la valeur maximale du courant du système de mesure de référence. Dans tous les cas, la comparaison doit être effectuée à un courant qui n'est pas inférieur à 5 % de la limite supérieure de l'étendue de mesure affectée (voir la Figure 4).

La comparaison doit être complétée par un essai de linéarité conformément à 5.3. La contribution à l'incertitude liée à la linéarité doit être prise en compte pour le calcul de l'incertitude de mesure lorsque le système de mesure est utilisé, voir 5.10.3.

La comparaison avec le système de mesure de référence est réalisée à $a \ge 2$ niveaux de courant, le niveau de courant le plus élevé étant égal au courant maximal du système de mesure de référence. L'essai de linéarité requis est réalisé à *b* niveaux de courant, un de ces niveaux étant égal au niveau maximal de l'étalonnage par comparaison (voir 5.3). Les niveaux de courant doivent ensuite être choisis de façon à ce qu'ils comprennent au moins les niveaux minimal et maximal de l'étendue de mesure affectée, et que:

 $a \ge 2$ $a+b \ge 6$

les mesures de linéarité de *b* étant prises en compte en 5.3.

Le coefficient de conversion affecté, F, est pris comme étant la valeur moyenne des coefficients de conversion \overline{F}_g enregistrés par comparaison avec le système de mesure de référence selon 5.2.1:

$$F = \frac{1}{a} \sum_{g=1}^{a} \overline{F_g}$$

L'incertitude-type u_F utilisée pour la détermination du coefficient de conversion affecté F (valeurs d'étalonnage) est donnée par la combinaison des contributions de type B de nonlinéarité de F et la contribution de type B fondées sur la valeur maximale de l'incertitude-type de type A des coefficients de conversion enregistrés \overline{F}_{q} :

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{a}{\max}_{g=1} \left| \frac{\overline{F_g}}{F} - 1 \right| \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{\max}_{g=1} \left(u_g \right) \right)^2}$$

NOTE Il est admis d'utiliser une valeur arrondie F_o comme coefficient de conversion affecté si la différence entre F_o et $\overline{F_g}$ est introduite comme contribution à l'incertitude de type B dans l'estimation de l'incertitude élargie du coefficient de conversion F_o .



Figure 4 – Etalonnage par comparaison sur un domaine de courant limité, avec un essai de linéarité (voir 5.3) permettant une extension jusqu'à la valeur la plus élevée de l'étendue de mesure affectée

– 127 –

5.2.2 Détermination du coefficient de conversion d'un système de mesure à partir de ceux de ses constituants

Le coefficient de conversion affecté du système de mesure doit être déterminé comme le produit des coefficients de conversion de son dispositif de conversion, de son système de transmission, d'un éventuel atténuateur secondaire et de son instrument de mesure. Il n'est pas nécessaire d'effectuer des essais séparés pour les systèmes de transmission qui sont constitués uniquement de câbles.

Le coefficient de conversion d'un instrument de mesure est déterminé selon la norme CEI pertinente (voir l'Article 2) ou en effectuant des étalonnages afin de démontrer la traçabilité de l'instrument par rapport à la grandeur à mesurer.

NOTE 1 La classe d'exactitude indiquée pour des instruments analogiques conformément à la CEI 60051-2 est associée à la valeur fiduciaire, c'est-à-dire qu'elle constitue une incertitude indiquée comme pourcentage de la limite supérieure de l'étendue de mesure de l'instrument. L'erreur relative est ainsi plus importante dans le cas de déviations plus faibles.

Le coefficient de conversion d'un constituant peut être déterminé par l'une des méthodes suivantes:

- des mesures simultanées de ses grandeurs d'entrée et de sortie;
- par comparaison à un constituant de référence (par exemple, un shunt de conversion de courant comparé à un shunt de conversion de courant de référence);
- une méthode en pont;
- un calcul fondé sur la mesure des impédances;
- mesure de la partie constante de sa réponse indicielle (voir Annexe C), où la réponse dynamique du coefficient de conversion ainsi obtenu peut être examinée à l'aide des techniques de convolution (Annexe D).

NOTE 2 Il convient de veiller à s'assurer que le couplage « parasite » approprié et l'influence mutuelle des constituants sont pris en compte lorsque la mesure est effectuée.

Le coefficient de conversion d'un shunt de conversion de courant peut être déterminé par des mesures en courant continu, à condition que le comportement dynamique ait été déterminé de manière séparée.

Les contributions pertinentes de type A et de type B à l'incertitude (voir également 5.3 à 5.9) doivent faire l'objet d'une estimation pour chaque constituant du système de mesure, et l'incertitude combinée valide pour chaque constituant est déterminée selon 5.10, compte tenu des contributions à l'incertitude des dispositifs de mesure utilisés pour les étalonnages.

NOTE 3 L'estimation des contributions à l'incertitude dans la méthode d'étalonnage des constituants nécessite une analyse de chaque constituant sur l'ensemble de la gamme de conditions – courant, température, effet des trajets de courant voisins, etc. – qui peuvent influencer le résultat. Cette analyse est complexe et nécessite une connaissance approfondie du processus de mesure.

L'incertitude élargie de la mesure du courant, déterminée au moyen du système de mesure, doit être obtenue par l'association de ces incertitudes combinées des constituants selon les dispositions du Guide ISO/CEI 98-3. Voir également les Annexes A et B.

D'autres essais relatifs à l'estimation de l'incertitude doivent être réalisés sur le dispositif de conversion, le(s) système(s) de transmission (autres que les câbles) et l'(es) instrument(s) de mesure conformément à l'ensemble des essais décrits de 5.3 à 5.9.

L'estimation de l'incertitude de mesure des paramètres temporels doit être effectuée en appliquant les dispositions de 5.11 et les mêmes principes que ceux utilisés pour la mesure de la valeur du courant d'essai.

5.3 Essai de linéarité

5.3.1 Application

L'essai de linéarité est uniquement destiné à étendre la validité du coefficient de conversion affecté à partir du courant maximal auquel un étalonnage a été effectué selon 5.2.1.3 jusqu'à la limite supérieure de l'étendue de mesure affectée, qui est en général égale au courant assigné du système de mesure (voir la Figure 4).

Certains types de dispositifs de conversion, par exemple un shunt, ne présentent en principe aucune variation du comportement en linéarité au cours de leur durée de vie. Pour ces dispositifs, le premier essai de linéarité doit être effectué, mais les essais suivants peuvent être remplacés par une argumentation scientifique démontrant que la linéarité n'est pas affectée par des processus prévisibles dans le dispositif.

Les indications de sortie du système de mesure doivent être comparées à celles d'un dispositif ou d'un système de comparaison dont la linéarité a été démontrée ou pour lequel il est possible de démontrer – au moins sur la base de son principe de conception et de sa théorie de réalisation (comme par exemple la bobine de Rogowski) – qu'il est linéaire sur l'ensemble de l'étendue de mesure affectée du système soumis à l'essai de linéarité. Le fait de ne pas démontrer la linéarité au moyen de cette méthode ne signifie pas nécessairement que le système de mesure n'est pas linéaire. Dans ce cas, une autre méthode appropriée pour l'essai de linéarité doit être choisie.

Le rapport *R* entre les lectures correspondantes du système de mesure et le dispositif ou système de comparaison doit être établi comme décrit en 5.2.1.1 pour *b* niveaux de courant I_g allant de la limite supérieure de l'étendue de mesure affectée jusqu'à un niveau de courant auquel le coefficient de conversion a été déterminé.

L'évaluation de la linéarité est fondée sur l'écart maximal des rapports $R_{i,g}$ par rapport à leur moyenne, $\overline{R_g}$, $R_{i,g}$ correspondant à chacun des rapports du courant mesuré au courant d'entrée correspondant du dispositif de comparaison. L'écart maximal est pris comme étant une estimation de type B de l'incertitude-type relative u_{lin} par rapport à la non-linéarité du coefficient de conversion dans le domaine de courant étendu supérieur au courant maximal auquel l'étalonnage a été effectué.

$$u_{\text{lin}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{g=1}^{b} \left| \frac{R_{i,g}}{\overline{R}_{g}} - 1 \right|$$



Figure 5 – Essai de linéarité du système de mesure avec un dispositif linéaire dans la plage de tensions étendue

5.3.2 Autres méthodes par ordre d'adéquation

5.3.2.1 Comparaison avec un système de mesure approuvé

La sortie du système de mesure doit être vérifiée par rapport à la sortie d'un système de mesure approuvé selon la procédure décrite à 5.3.1.

La linéarité du système de mesure approuvé doit, de préférence, avoir été établie par étalonnage conformément au 5.2.1.

5.3.2.2 Estimation de l'échauffement du shunt de conversion de courant

Le courant de choc ou le courant de courte durée qui traverse un shunt de conversion de courant élève la température de son élément résistif, ce qui peut modifier de manière significative son coefficient de conversion. L'ampleur de cet effet sur la linéarité et sa dépendance vis à vis du courant peuvent être établies par calcul sur la base du coefficient de température de l'élément résistif (voir l'Annexe F).

5.3.2.3 Comparaison avec la bobine de Rogowski

La sortie d'une bobine de Rogowski rigide, en position fixe, est en principe linéaire et peut être utilisée pour l'essai de linéarité selon la procédure décrite en 5.3.1.

5.4 Comportement dynamique

Le comportement dynamique du coefficient de conversion du système de mesure ou d'un constituant peut être affecté par diverses grandeurs d'influence en fonction du type de courant à mesurer et des conditions de mesure. Des exigences supplémentaires sont données dans les articles spécifiques au courant concerné. Une estimation de type B de l'incertitude-type relative u_{dyn} du coefficient de conversion, en fonction du comportement dynamique, est donnée par l'expression suivante:

$$u_{\text{dyn}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{i=1}^{k} \left| \frac{F_i}{F} - 1 \right|$$

où

- *k* est le nombre de déterminations du coefficient de conversion dans l'étendue de paramètres de chocs ou la gamme de fréquences;
- *F*_i représente les coefficients de conversion individuels;
- *F* est le coefficient de conversion moyen dans une gamme de paramètres temporels de courants de choc ou dans une gamme de fréquences donnée.

Certains types de dispositifs de conversion ne présentent en principe aucune variation du comportement dynamique au cours de leur durée de vie. Pour ces dispositifs, le premier essai de détermination de la réponse dynamique doit être effectué, mais les essais suivants peuvent être remplacés par une argumentation scientifique démontrant que la réponse dynamique n'est pas affectée par des processus prévisibles dans le dispositif.

5.5 Stabilité à court terme

5.5.1 Méthode

L'essai de stabilité à court terme est destiné à couvrir les effets d'auto-échauffement du dispositif de conversion.

Un courant égal à l'intensité maximale de l'étendue de mesure affectée doit être appliqué en continu (ou dans le cas de courants de choc à la fréquence d'application affectée) au dispositif de conversion pendant une période correspondant à l'utilisation prévue.

NOTE Il n'est pas nécessaire que la durée d'application du courant soit supérieure à la durée de fonctionnement affectée; elle peut toutefois être limitée à la durée suffisante pour obtenir l'équilibre thermique.

Le coefficient de conversion doit être mesuré au début et à la fin du courant appliqué, ou, dans le cas d'une série de courants de choc, à la fin de cette série. Le coefficient de conversion peut être mesuré soit par comparaison avec un autre système de mesure approuvé, soit par d'autres méthodes convenables. Si d'autres méthodes sont choisies, le coefficient de conversion peut être déterminé après avoir retiré le dispositif de conversion du circuit d'essai. Dans ce cas, la mesure doit être effectuée après application du courant ou de la série de courants de choc dès que possible, de façon à ce que le coefficient de conversion ne varie pas de manière significative. La durée maximale recommandée est de 20 min.

Le résultat de l'essai est une estimation de la variation du coefficient de conversion, à partir de laquelle on obtient la contribution à l'incertitude-type relative u_{st} en tant qu'estimation de type B:

$$u_{\rm st} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{F_{\rm après}}{F_{\rm avant}} - 1 \right|$$

où F_{avant} et $F_{\text{après}}$ sont les coefficients de conversion obtenus respectivement avant et après l'essai de stabilité à court terme.

5.5.2 Courant en régime établi

Le coefficient de conversion doit être mesuré avant ou au début de l'application du courant. Le courant assigné doit être appliqué au dispositif de conversion en continu jusqu'à ce qu'une stabilité thermique soit atteinte. Le coefficient de conversion doit ensuite être mesuré immédiatement après (ou à la fin de) l'application du courant (voir la Figure 6).

Dans certains cas, une certaine période doit être autorisée afin de permettre le rebranchement du dispositif de conversion. Il convient que cette durée ne dépasse pas 20 % de la constante de temps thermique du dispositif de conversion et, dans tous les cas, elle ne doit pas dépasser 20 min.

Une autre méthode consiste à mesurer la température de l'élément résistif du shunt au cours de l'essai. Le coefficient de conversion correspondant aux conditions après essai peut alors être déterminé, soit directement en effectuant les mesures sous échauffement artificiel du shunt, soit en enregistrant le coefficient de conversion au cours du processus de refroidissement et en extrapolant la courbe par rapport au dernier instant d'application du courant.



Figure 6 – Essai de stabilité à court terme pour un courant en régime établi

5.5.3 Courant de choc et courant de courte durée

Le coefficient de conversion doit être mesuré avant ou au début de l'application du courant ainsi qu'immédiatement après ou à la fin de l'application du courant. Le courant assigné doit être appliqué au dispositif de conversion (voir la Figure 7).

En outre, le coefficient de conversion doit être mesuré juste avant ou au moment de l'application suivante prévue d'un courant de choc, afin de démontrer que le temps hors courant est suffisamment long pour que le coefficient de conversion revienne à sa valeur initiale.

NOTE Dans le cas d'un courant continu/alternatif de courte durée, le coefficient de conversion évalué avant et après une application de courant unique peut constituer une mesure appropriée de la stabilité à court terme.



Figure 7 – Essai de stabilité à court terme pour un courant de choc et un courant de courte durée

5.5.4 Courants périodiques de choc et de courte durée

Le coefficient de conversion doit être mesuré avant ou au début de l'application d'une série de courants de choc/courants de courte durée, ainsi qu'immédiatement après ou à la fin de l'application d'une série de courants de choc/courants de courte durée (voir la Figure 8). Le courant assigné doit être appliqué au dispositif de conversion.

En outre, le coefficient de conversion doit être mesuré juste avant ou au moment de l'application prévue d'une nouvelle série de courants de choc, afin de démontrer que le temps hors courant est suffisamment long pour que le coefficient de conversion revienne à sa valeur initiale.



- 132 -

Figure 8 – Essai de stabilité à court terme pour des courants périodiques de choc et de courte durée

5.6 Stabilité à long terme

La stabilité du coefficient de conversion doit être prise en compte et évaluée sur une longue durée; elle est en général estimée comme une contribution à l'incertitude valable pour une durée d'utilisation envisagée $T_{\text{utilisation}}$ jusqu'au prochain étalonnage. L'évaluation peut être fondée sur les données du constructeur ou sur les résultats d'une série d'essais de détermination des caractéristiques. Le résultat de l'évaluation est une estimation de la variation du coefficient de conversion, à partir de laquelle on obtient la contribution à l'incertitude-type relative u_{lt} en tant qu'estimation de type B:

$$u_{\text{lt}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \times \frac{T_{\text{utilisation}}}{T_2 - T_1}$$

où F_1 et F_2 sont les coefficients de conversion obtenus lors de deux essais successifs de détermination des caractéristiques réalisés à des instants T_1 et T_2 .

Dans les cas où un certain nombre de résultats d'essais de détermination des caractéristiques est disponible, la stabilité à long terme peut être caractérisée par la contribution de type A:

$$u_{\rm lt} = \frac{T_{\rm utilisation}}{T_{\rm intervalle}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{F_{\rm i}}{F_{\rm i}} - 1\right)^2}{n-1}}$$

où F_i sont les coefficients de conversion déterminés lors des essais de détermination des caractéristiques effectués de manière récurrente à un intervalle de temps moyen de $T_{\text{intervalle}}$. La valeur moyenne des coefficients de conversion F_i est $\overline{F_i}$.

5.7 Effet de la température ambiante

Les variations du coefficient de conversion ou d'un des paramètres (par exemple, la résistance ou l'erreur de rapport de transformation) d'un dispositif, dues à des changements de la température ambiante, peuvent être déterminées par des calculs utilisant les coefficients de température de chaque élément (voir par exemple l'Annexe F) ou en mesurant chaque élément à différentes températures.

L'effet de la température ambiante peut également être quantifié par détermination du coefficient de conversion à différentes températures ambiantes.

Les données et les calculs doivent être indiqués dans le recueil de caractéristiques; ils peuvent être déduits des données du constructeur.

Le résultat de l'essai (ou du calcul) est une estimation de la variation du coefficient de conversion due à la température ambiante. A partir de là, la contribution à l'incertitude-type relative u_{temp} est obtenue comme estimation de type B:

$$u_{\text{temp}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max \left| \frac{F_{Ti}}{F_{\text{cal}}} - 1 \right|$$

où

 F_{T_i} est le coefficient de conversion à une température particulière T_i ;

*F*_{cal} est le coefficient de conversion à la température mesurée au cours de l'étalonnage.

NOTE L'effet d'auto-échauffement est pris en compte par l'essai de stabilité à court terme.

Les facteurs de correction de température peuvent être utilisés lorsque la température ambiante varie sur une large gamme. Toute correction de température à appliquer doit être indiquée dans le recueil de caractéristiques.

Dans les cas où il a été appliqué une correction de la température, la contribution à l'incertitude u_{temp} doit être considérée comme l'incertitude du facteur de correction de la température.

5.8 Effet des trajets de courant voisins

L'effet sur les mesures du courant, c'est-à-dire les perturbations dues aux effets d'inductance mutuelle du (des) trajet(s) de courant voisin(s), tel qu'il existe, par exemple, dans les circuits d'essai triphasés, peut être déterminé par des mesures effectuées sur des distances représentatives entre le dispositif de conversion du courant et le ou les éventuels circuits perturbateurs. Il convient que la mise à la masse/terre soit identique à celle existante dans une situation d'essai normale.

L'essai est effectué sans application de courant au dispositif de conversion en essai, mais en appliquant un courant approprié au circuit voisin, tandis que les lectures sont effectuées à la fois à partir du système de mesure en essai et du circuit de courant voisin (voir les Figures 9 et 10).

Le résultat de l'essai est une estimation des effets sur la mesure à partir de laquelle est obtenue la contribution à l'incertitude-type relative u_{prox} en tant qu'estimation de type B:

$$u_{\text{prox}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{i_{\text{prox}}}{i_{\text{voisin}}} - 1 \right|$$

où

*i*_{prox} est la lecture en termes de courant (de perturbation) du système de mesure en essai;

*i*voisin est le courant appliqué au conducteur voisin.

Dans le cas de circuits d'essai à phases multiples, on suppose que le courant acheminé par le ou les conducteurs voisins pour les besoins de 5.8 est approximativement égal au courant appliqué au dispositif de conversion du système de mesure examiné dans un essai à haute intensité réel. Différentes valeurs de la contribution à l'incertitude-type u_{prox} peuvent être obtenues pour différentes plages de distances.

NOTE 1 Certaines installations d'essai peuvent choisir d'approuver leurs systèmes de mesure pour un seul ensemble de distances ou pour quelques ensembles ou plages de distances.

NOTE 2 Il convient que l'essai relatif à l'effet des trajets de courant voisins sur le dispositif de conversion soit effectué une seule fois pour chaque montage d'essai ou chaque ensemble de montages d'essai.



Figure 9 – Circuit d'essai de l'effet du trajet de courant voisin pour des shunts de conversion de courant et des transformateurs de courant avec fer



Figure 10 – Circuit d'essai de l'effet du trajet de courant voisin pour des systèmes de mesure inductifs sans fer (bobines de Rogowski)

5.9 Effet du logiciel

La manière dont le logiciel traite l'évaluation des données mesurées peut introduire une incertitude qui doit être évaluée. Cela peut être effectué, par exemple, par l'évaluation d'un ensemble de données synthétique fourni par un générateur de données d'essai, suivie d'une comparaison avec les valeurs de référence établies des données.

Le résultat de l'évaluation est une estimation de l'influence du traitement des données à partir de laquelle est obtenue la contribution à l'incertitude-type relative u_{sft} en tant qu'estimation de type B.

5.10 Calcul de l'incertitude

5.10.1 Généralités

Le présent paragraphe donne une procédure simplifiée de détermination de l'incertitude élargie du coefficient de conversion affecté F d'un système de mesure. Cette procédure est fondée sur plusieurs hypothèses qui, dans de nombreux cas, peuvent être vraies, mais qu'il convient également de vérifier dans chaque cas particulier. Les principales hypothèses sont les suivantes:

- il n'y a aucune corrélation entre les grandeurs de mesure;
- les incertitudes-types évaluées par la méthode de type B sont supposées suivre une loi rectangulaire; et
- il y a au moins trois contributions à l'incertitude dominantes qui sont d'amplitude similaire.

Ces hypothèses donnent une procédure qui permet d'évaluer l'incertitude élargie du coefficient de conversion affecté, *F*, à la fois en situation d'étalonnage et en situation d'utilisation d'un système de mesure approuvé dans des conditions de mesure étendues.

L'incertitude élargie d'étalonnage U_{cal} est estimée à partir de l'incertitude d'étalonnage du système de mesure de référence et en outre, à partir de l'effet d'autres grandeurs traitées dans le présent article, comme par exemple la stabilité du système de mesure de référence et les paramètres environnementaux au cours de l'étalonnage.

L'incertitude élargie d'une mesure U_{mes} de la grandeur d'essai est évaluée à partir de l'incertitude d'étalonnage du coefficient de conversion du système de mesure approuvé et, en outre, à partir de l'effet d'autres grandeurs traitées en 5.10.3, comme par exemple la stabilité du système de mesure approuvé et les paramètres environnementaux au cours de la mesure.

D'autres méthodes d'estimation de l'incertitude sont données dans le Guide ISO/CEI 98-3 et sont également traitées dans l'Annexe A et dans l'Annexe B.

5.10.2 Incertitude d'étalonnage

L'incertitude élargie d'un étalonnage U_{cal} est calculée à partir de l'incertitude du système de mesure de référence et à partir des contributions à l'incertitude de type A et de type B expliquées dans le présent article:

$$U_{cal} = k \times u_{c cal} = 2 \times \sqrt{u_{c ref}^2 + u_{F}^2 + \sum_{i=1}^{N} u_{Bi}^2}$$

où

k = 2 est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture d'environ 95 % et une loi normale;

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

- 136 –
- *u*_{c cal} est l'incertitude-type combinée du coefficient de conversion du système de mesure approuvé déterminée au moment de l'étalonnage;
- *u*_{c ref} est l'incertitude-type combinée du coefficient de conversion du système de mesure de référence déterminée au moment de l'étalonnage;
- u_F est l'incertitude-type de la détermination du coefficient de conversion réalisée conformément à 5.2.1 ou à 5.2.2;
- ^uB sont les contributions à l'incertitude combinée du coefficient de conversion due à la i^{ème} grandeur d'influence et évaluée comme contribution de type B. Ces contributions sont liées au système de mesure de référence et résultent de la nonlinéarité, des instabilités à court et à long terme, etc.; elles sont déterminées selon 5.3 à 5.9 et fondées soit sur des mesures supplémentaires, soit sur des estimations à partir d'autres sources de données. Les influences liées au système de mesure approuvé, telles que la stabilité à court terme et la résolution de la mesure, doivent également être prises en compte si elles sont importantes pendant l'étalonnage.

Dans les cas où les hypothèses ci-dessus ne sont pas valables, les procédures données dans l'Annexe A et l'Annexe B ou, si nécessaire, dans le Guide ISO/CEI 98-3, doivent être appliquées.

Le nombre N de contributions à l'incertitude de type B peut être différent en fonction des différents types de courants d'essai (Articles 6 à 11). Les articles correspondants donnent des informations supplémentaires relatives aux contributions de type B.

Si le coefficient de conversion affecté du système de mesure est calculé à partir de ceux de ses constituants (5.2.2), les incertitudes-types d'étalonnage des constituants doivent être combinées à celles décrivant les autres conditions du système de mesure et de son environnement (voir l'Annexe A et l'Annexe B).

5.10.3 Incertitude de mesure utilisant un système de mesure approuvé

L'estimation de l'incertitude élargie d'une mesure incombe à l'utilisateur. Cependant, cette estimation peut être donnée pour une gamme définie de conditions de mesure avec le certificat d'étalonnage.

L'incertitude élargie relative d'une mesure U_{mes} est calculée à partir de l'incertitude-type combinée du coefficient de conversion affecté du système de mesure approuvé tel que déterminée lors de l'étalonnage et des contributions à l'incertitude supplémentaires liées à l'utilisation du système de mesure approuvé. Elle est exprimée au moyen de l'expression suivante :

$$U_{\rm mes} = k \times u_{\rm c\,mes} = 2 \times \sqrt{u_{\rm c\,cal}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\rm Bi}^2}$$

où

- *k* = 2 est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture d'environ 95 % et une loi normale;
- *u*_{c mes} est l'incertitude-type combinée de la mesure utilisant le système de mesure approuvé, valable pour une période d'utilisation envisagée, par exemple, un intervalle d'étalonnage;
- *u*_{c cal} est l'incertitude-type combinée du coefficient de conversion du système de mesure approuvé déterminée au moment de l'étalonnage;
- u_{Bi} est la contribution à l'incertitude combinée du coefficient de conversion du système de mesure approuvé, due à la $i^{\text{ème}}$ grandeur d'influence évaluée comme contribution de type B. Ces contributions sont liées à une utilisation normale du système de mesure approuvé et résultent de la non-linéarité, des instabilités à

court et à long terme, etc.; elles sont déterminées selon 5.3 à 5.9 et fondées soit sur des mesures supplémentaires, soit sur des estimations à partir d'autres sources de données. D'autres influences importantes doivent également être prises en compte, comme par exemple la résolution d'affichage de l'instrument dans le système de mesure approuvé.

NOTE Un certificat d'étalonnage peut comprendre des informations concernant à la fois l'incertitude de l'étalonnage, U_{cal} , et l'incertitude de mesure du courant d'essai, U_{mes} , lorsque le système de mesure approuvé est utilisé dans des conditions établies et prédéfinies.

Dans les cas où les hypothèses ci-dessus ne sont pas valables, les procédures données dans l'Annexe A ou, si nécessaire, dans le Guide ISO/CEI 98-3, doivent être appliquées.

Le nombre N de contributions à l'incertitude de type B peut être différent en fonction des différents types de courants d'essai (Articles 6 à 11). Les articles correspondants donnent des informations supplémentaires relatives aux contributions de type B.

5.11 Calcul de l'incertitude de mesure des paramètres temporels (courants de choc uniquement)

5.11.1 Généralités

Un système de mesure approuvé de courant de choc doit pouvoir mesurer chaque paramètre temporel dans les limites d'incertitude spécifiées, à condition que le paramètre s'inscrive dans son domaine spécifié. Pour la durée de front, il s'agit en général de l'époque nominale, voir 10.2.9. La démonstration expérimentale correspondante peut être obtenue soit par la méthode de la comparaison, soit par la méthode des constituants. Elle peut également être obtenue par calcul en utilisant la méthode de convolution, fondée sur la réponse indicielle expérimentale (Annexe C et Annexe D).

La procédure générale d'évaluation des paramètres temporels et de leurs incertitudes est décrite ci-après pour la durée de front T_1 , déterminée par la méthode comparative. Elle est applicable de la même manière aux autres paramètres temporels.

Les définitions des paramètres temporels applicables aux courants de choc sont données à l'Article 10.

NOTE L'estimation de l'incertitude de mesure des paramètres temporels génère une valeur d'incertitude absolue.

5.11.2 Incertitude d'étalonnage des paramètres temporels

La durée de front T_1 de *n* courants de choc doit être simultanément mesurée par le système de mesure en essai, dans ce cas désigné par X, et par le système de mesure de référence, dans ce cas désigné par N. L'erreur du système de mesure de référence est supposée être négligeable. L'erreur moyenne arithmétique des durées de front est la suivante:

$$\overline{\Delta T_1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(T_{1\mathsf{X},i} - T_{1\mathsf{N},i} \right)$$

et l'écart-type expérimental des erreurs de durées de front individuelles est le suivant:

$$s_{\Delta T_1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\Delta T_{1,i} - \Delta T_1)^2}$$

où $\Delta T_{1,i}$ est la *i*^{ème} différence entre les durées de front mesurées par les systèmes X et N.

NOTE 1 En général, au maximum n = 10 lectures indépendantes sont nécessaires.

NOTE 2 Les durées de front sont habituellement évaluées à partir des mêmes enregistrements de N et de X, utilisés pour évaluer les valeurs de crête pour déterminer le coefficient de conversion (voir 5.2.1.1).

A partir de $s_{\Delta T_1}$, l'incertitude-type de type A des erreurs de durées de front moyennes est calculée comme suit

$$u_{\mathsf{A}} = \frac{s_{\Delta T_1}}{\sqrt{n}}$$

La comparaison est effectuée à un niveau de courant approprié, avec une durée de front correspondant aux valeurs minimale et maximale de T_1 auxquelles le système de mesure est utilisé. Les différentes durées de front sont identifiées par un nombre ordinal, *j*, comme par exemple $T_{1,j}$. Pour chaque valeur T_1 , l'erreur moyenne $\overline{\Delta T_1}_{,j}$ est calculée comme décrit cidessus.

La moyenne globale des $n \ge 2$ erreurs moyennes est la suivante:

$$\overline{\Delta T_{1m}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \overline{\Delta T_{1,j}}$$

L'écart maximal des valeurs individuelles $\Delta T_{1,j}$ par rapport à leur valeur moyenne ΔT_{1m} permet de déterminer l'incertitude de type B u_B par l'expression :

$$u_{\rm B} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^{n} \left| \overline{\Delta T_{1,j}} - \overline{\Delta T_{1m}} \right|$$

NOTE 3 Si le système de mesure est utilisé pour une seule durée de front, une seule mesure comparative est nécessaire.

L'incertitude élargie de l'étalonnage des paramètres temporels, égale à celle de l'erreur moyenne résultante ΔT_{1cal} , est déterminée par l'expression

$$U_{cal} = k \times u_{c cal} = 2 \times \sqrt{u_{c ref}^2 + u_{A}^2 + u_{B}^2}$$

où

- $u_{c cal}$ est l'incertitude-type combinée de l'erreur moyenne de la durée de front, ΔT_{1cal} , du système de mesure étalonné;
- k = 2 est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture d'environ 95 % et une loi normale;
- $u_{c ref}$ est l'incertitude-type combinée de l'erreur moyenne de la durée de front, ΔT_{1ref} , du système de mesure de référence;
- u_A est l'incertitude-type de type A de l'erreur moyenne de la durée de front, $\Delta T_{1,cal}$, du système de mesure étalonné;
- $u_{\rm B}$ est l'incertitude-type de type B de l'erreur moyenne de la durée de front, $\Delta T_{\rm 1cal}$, du système de mesure étalonné.

Les contributions supplémentaires à l'incertitude élargie U_{cal} peuvent se révéler significatives dans certains cas particuliers et doivent être prises en compte.

5.11.3 Incertitude de mesure des paramètres temporels au moyen d'un système de mesure approuvé

L'estimation de l'incertitude élargie d'une mesure de paramètre temporel incombe à l'utilisateur. Cependant, cette estimation peut être donnée pour une gamme définie de conditions de mesure dans le certificat d'étalonnage.

NOTE Si l'incertitude élargie U_{cal} de l'étalonnage d'un paramètre temporel est inférieure à 70 % de l'incertitude élargie spécifiée dans la présente norme pour la mesure de paramètre temporel, il peut généralement être supposé que l'incertitude relative à l'utilisation du système de mesure approuvé pour la mesure de paramètre temporel U_{M} est égale à U_{cal} .

L'incertitude élargie de la mesure de paramètre temporel $U_{\rm mes}$ doit être calculée selon la formule:

$$U_{\text{mes}} = k \times u_{\text{cmes}} = 2 \times \sqrt{u_{\text{ccal}}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\text{B}i}^2}$$

où

- $u_{c cal}$ est l'incertitude-type combinée de l'erreur moyenne de la durée de front, $\Delta T_{1,cal}$, du système de mesure étalonné;
- *k* = 2 est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture d'environ 95 % et une loi normale;
- u_{Bi} est la contribution à l'incertitude combinée de la mesure du paramètre temporel d'un choc en utilisant le système de mesure approuvé, due à la *i*^{ème} grandeur d'influence du paramètre temporel et évaluée comme une contribution de type B. Ces contributions correspondent à une utilisation normale du système de mesure approuvé et résultent par exemple d'instabilités à court et à long termes, des effets des logiciels, etc., mais également des formes d'onde de choc imparfaites. La détermination de ces contributions selon à 5.3 à 5.9 est fondée soit sur des mesures supplémentaires, soit sur d'autres sources de données. Dans certaines situations, d'autres influences doivent également être prises en compte, comme par exemple la résolution d'affichage de l'instrument dans le système de mesure approuvé;
- *u*_{c mes} est l'incertitude-type combinée du paramètre temporel mesuré avec le système de mesure approuvé, valable pour une période d'utilisation envisagée.

D'autres contributions à l'incertitude élargie peuvent, dans des cas particuliers, être importantes et doivent être prises en compte pour le calcul de U_{mes} , comme par exemple lorsque le courant de choc présente des oscillations sur le front.

NOTE 1 Aucune correction de la mesure des paramètres temporels n'est nécessaire tant que la somme de l'erreur moyenne relative observée $\frac{\Delta T_{1,j}}{T_1}$ et de son incertitude élargie relative U_{mes} est inférieure à 70 % de

l'incertitude relative exigée pour la mesure correspondante du paramètre temporel.

NOTE 2 L'influence de la variation du paramètre temporel sur le résultat de l'essai est considérée comme faible.

NOTE 3 Il convient d'établir l'incertitude élargie d'un paramètre temporel corrigé, T_{1corr}, selon le présent article.

5.12 Essai de perturbations

5.12.1 Application

L'essai de perturbations est exigé pour les systèmes de mesure de courants alternatifs en régime établi, pour des courants alternatifs/continus de courte durée, ainsi que pour des courants de choc.

L'essai de perturbations est effectué pour s'assurer que le système de mesure de courant dispose d'une immunité appropriée aux perturbations, dans un circuit et dans des conditions d'utilisation spécifiques. Les perturbations peuvent être induites par le champ électromagnétique transitoire ou conduites par les fils de mesure ou d'alimentation.

- 140 -

L'essai doit être réalisé sur le système de mesure en configurant son système de transmission (câble de mesure) selon 5.12.2 ou à 5.12.3, selon le cas, et sans aucune modification des connexions de terre. Une condition de perturbation, résultant par exemple du fonctionnement d'un dispositif approprié générant un courant représentatif de la forme d'onde à appliquer dans le cadre de l'essai à haute intensité, doit être produite à l'entrée du système de mesure et la grandeur de sortie doit être enregistrée. L'essai de perturbations doit être effectué à une valeur appropriée de chaque type de courant à utiliser ou prévue dans ou à proximité du montage d'essai à haute intensité, y compris les courants polyphasés et coupés.

Le rapport de perturbations doit être déterminé comme étant l'amplitude maximale des perturbations mesurées divisée par la sortie du système de mesure au moment où le courant d'essai est mesuré.

Il convient que le rapport de perturbations enregistré ne dépasse pas 1 %. Des valeurs supérieures peuvent être acceptables s'il est démontré que les exigences d'incertitude demeurent conformes.

NOTE 1 Un système de mesure de courant alternatif de courte durée est considéré comme un système de mesure de courant de choc pour ce qui concerne l'essai de perturbations.

NOTE 2 L'effet des trajets de courant voisins est traité en 5.8.

5.12.2 Shunts de conversion de courant et transformateurs de courant avec fer

Au cours de l'essai de perturbations, le dispositif de conversion du système de mesure doit être monté dans le circuit de courant comme dans les conditions normales d'essai à haute intensité; il doit être traversé par le courant d'essai. Le système de transmission (câble de mesure), débranché du dispositif de conversion, doit être soit mis en court-circuit (coaxialement dans le cas d'un câble coaxial), soit terminé par son impédance caractéristique à l'extrémité d'entrée (selon que l'une ou l'autre méthode représente au mieux les conditions normales de mesure) et mis à la terre de la même manière que pour des mesures normales (voir la Figure 11).



Figure 11 – Principe du circuit d'essai de perturbations



Shunts de conversion de courant



Figure 12 – Essai de perturbations réalisé sur le système de mesure $i_1(t)$ fondé sur un shunt de conversion de courant ou un transformateur de courant avec fer dans un montage d'essai en court-circuit triphasé typique (exemple)

5.12.3 Systèmes de mesure inductifs sans fer (bobines de Rogowski)

Pour les systèmes de mesure comportant des dispositifs de conversion inductifs sans fer, tels que les bobines de Rogowski, il est essentiel de démontrer que les enroulements et les éléments internes présentent une immunité suffisante aux perturbations (conception coaxiale correcte, blindage pour éviter le captage capacitif, etc.). Par conséquent, au cours des essais de perturbations, le système de transmission (câble de mesure) doit être branché à la sortie du dispositif de conversion de la même manière que pour les mesures normales, y compris la mise à la terre, tandis que le dispositif de conversion proprement dit est décalé par rapport à sa position concentrique normale, de sorte à demeurer perpendiculaire et proche du conducteur de courant à haute intensité sans toutefois l'entourer (voir la Figure 13). Il convient que la distance entre l'axe de la bobine de Rogowski et le trajet du courant voisin mis à la terre, il convient que cette distance soit environ égale à la moitié du diamètre de la bobine de Rogowski; en cas de trajet de courant à potentiel élevé, la distance est proportionnellement plus grande, en fonction de l'isolement requis.

NOTE L'essai de perturbations est également utilisé pour mesurer l'effet des trajets de courant voisins. Cependant, la distance jusqu'au conducteur de courant est faible et il est possible qu'elle ne soit pas représentative de la distance requise pour l'essai décrit en 5.8. Dans ce type de cas, il est possible d'effectuer un deuxième essai utilisant une distance d'isolement plus représentative.





Figure 13 – Circuit d'essai de perturbations pour des systèmes inductifs sans fer

5.13 Essais de tenue

5.13.1 Essais de tension de tenue

Les essais de tension de tenue sont applicables uniquement aux dispositifs de conversion destinés à fonctionner à des potentiels élevés.

Le dispositif de conversion doit subir un essai de tenue à sec exécuté à une tension de fréquence ou de forme d'onde spécifiée, à un niveau de 110 % de la tension assignée. Pour les procédures des essais de tenue, voir la CEI 60060-1 ou la CEI 61180-1.

Les essais de tenue doivent être réalisés dans la ou les polarités pour lesquelles le système doit être utilisé.

NOTE Il convient que la conception de tout constituant d'un système de mesure approuvé soit telle qu'il puisse résister à une décharge disruptive que pourrait subir l'objet en essai, sans aucune modification de ses caractéristiques.

5.13.2 Essais de courant de tenue

5.13.2.1 Courant de tenue de courte durée

Lorsqu'un essai de courant de tenue de courte durée est requis, le dispositif de conversion doit faire partie du système de mesure et doit être soumis à un courant de tenue de courte durée à la valeur assignée. Le système de mesure doit satisfaire aux exigences applicables au coefficient de conversion pour ce niveau de courant et le dispositif de conversion ne doit présenter aucun signe de détérioration.

5.13.2.2 Courant de tenue de crête

Lorsqu'un essai de courant de tenue de crête est requis, le dispositif de conversion doit faire partie du système de mesure et doit être soumis à un courant de tenue de crête à la valeur assignée. Le système de mesure doit satisfaire aux exigences applicables au coefficient de
62475 © CEI:2010

conversion pour ce niveau de courant et le dispositif de conversion ne doit présenter aucun signe de détérioration.

6 Courant continu en régime établi

6.1 Application

Les applications couvrent des essais de courants continus de haute intensité en régime établi.

Les procédures données ci-après pour la mesure du courant d'essai s'appliquent tant à l'étalonnage qu'à la mesure.

6.2 Termes et définitions

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

6.2.1

valeur du courant continu d'essai

moyenne arithmétique du courant d'essai

6.2.2

ondulation

écart périodique par rapport à la valeur moyenne arithmétique du courant. L'amplitude de l'ondulation est définie comme la moitié de la différence entre les valeurs maximale et minimale

6.2.3

facteur d'ondulation

rapport de l'amplitude de l'ondulation à la valeur moyenne arithmétique du courant

6.3 Courant d'essai

6.3.1 Exigences

Il convient que le courant d'essai soit un courant continu de facteur d'ondulation de 7 % maximum, sauf spécification contraire du comité d'études concerné. Des exigences d'essai supplémentaires peuvent être définies dans les normes spécifiques au matériel utilisé.

6.3.2 Tolérances

Sauf spécification contraire du comité d'études concerné, les exigences de tolérance applicables au courant d'essai doivent être de ±3 % pendant toute la durée de l'essai.

NOTE 1 Il est souligné que la tolérance constitue la différence admise entre la valeur spécifiée et la valeur effectivement mesurée. Il convient de distinguer cette différence de l'incertitude d'une mesure.

NOTE 2 Le comité d'études concerné peut spécifier d'autres limites de tolérance, par exemple 0 % à +5 %.

6.4 Mesure du courant d'essai

6.4.1 Exigences applicables à un système de mesure approuvé

L'exigence générale consiste à mesurer la valeur du courant d'essai, avec une incertitude élargie $U_{\rm mes}$ d'au plus 3 % (avec une probabilité de couverture de 95 %), sauf indication contraire de la norme de matériel concernée.

6.4.2 Contributions à l'incertitude

Pour un système de mesure du courant continu, l'incertitude élargie U_{mes} doit être évaluée selon 5.10.3 et, si nécessaire, selon les Annexes A et B. Les contributions individuelles qui doivent être prises en compte sont indiquées dans le Tableau 1. Les informations sont uniquement données à titre indicatif; d'autres contributions peuvent dans certains cas se révéler significatives et doivent également être prises en compte.

6.4.3 Comportement dynamique

Il n'existe aucune exigence relative au comportement dynamique d'un système de mesure utilisé pour déterminer uniquement la valeur du courant continu d'essai (valeur moyenne arithmétique). Pour les mesures de l'ondulation, voir 6.5.3.

6.4.4 Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des	Contrôle des caractéristiques
			caractéristiques	-
Coefficient de conversion du système de mesure au moment de l'étalonnage			5.2 et 5.10.2	
Contrôle du coefficient de conversion				6.4.5
Extension de la linéarité		5.3 (le cas échéant)	5.3 (le cas échéant)	
Comportement dynamique du système de mesure				
Stabilité à court terme		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (le cas échéant)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet des trajets de courant voisins sur le dispositif de conversion	5.8 (le cas échéant)			
Effet du logiciel	5.9 (le cas échéant)			
Essai de tension de tenue à sec sur le dispositif de conversion		5.13.1 (le cas échéant)		
Essai de courant de tenue	_			
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion		5.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble		5.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure		5.2		
Responsabilité	Pour les consti	Pour les constituants: constructeur		tème de mesure: lisateur
Fréquence recommandée	Une seule fois (essai de type et individuel de série)		Suggéré une fois par an, mais au moins tous les 5 ans	En fonction de la stabilité, mais au moins tous les ans

Tableau 1 – Essais exigés pour le courant continu en régime établi

La conformité aux exigences de l'essai de type peut être démontrée par des essais sur un dispositif de même conception ou parfois à partir des données du constructeur. Les essais

individuels de série doivent être effectués sur chaque dispositif. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

6.4.5 Contrôle des caractéristiques

6.4.5.1 Généralités

Le coefficient de conversion d'un système de mesure approuvé peut être contrôlé par l'une des méthodes suivantes.

6.4.5.2 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant doivent être contrôlés en utilisant des calibrateurs internes ou externes dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 1 %. Si les coefficients de conversion des constituants individuels ne diffèrent pas de leurs valeurs précédentes de plus de 1 %, le coefficient de conversion affecté précédent du système de mesure est considéré comme encore valide. Si une quelconque différence dépasse 1 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée par un essai de détermination des caractéristiques comme décrit en 5.2.

NOTE Des mesures en courant continu de la résistance d'un shunt de conversion de courant suffisent en général pour le contrôle des caractéristiques.

6.4.5.3 Contrôle du coefficient de conversion du système de mesure

Le système de mesure doit être comparé à un autre système de mesure approuvé selon la procédure de 5.2.1. Si la différence entre les deux valeurs mesurées n'est pas supérieure à 3 %, le coefficient de conversion affecté précédent est considéré comme encore valide. Si la différence est plus importante, le coefficient de conversion affecté doit alors être obtenu par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.2).

6.5 Mesure de l'amplitude de l'ondulation

6.5.1 Exigences applicables à un système de mesure approuvé

L'amplitude de l'ondulation doit être mesurée avec une incertitude élargie d'au maximum 10 % (avec une probabilité de couverture de 95 %) de l'amplitude de l'ondulation ou 1 % de la valeur du courant continu d'essai, selon que l'une ou l'autre valeur est la plus grande.

Il est admis d'utiliser des systèmes de mesure séparés pour mesurer d'une part la valeur du courant continu d'essai et celle de l'amplitude de l'ondulation, ou d'utiliser le même dispositif de conversion avec deux instruments de mesure différents.

6.5.2 Contributions à l'incertitude

Pour un système de mesure du courant ondulatoire, l'incertitude élargie U_{mes} doit être évaluée selon 5.10.3 et, si nécessaire, selon les Annexes A et B. Les contributions individuelles à l'incertitude qui doivent être prises en compte sont données dans le Tableau 2. Les informations sont uniquement données à titre indicatif; d'autres contributions peuvent dans certains cas se révéler significatives et doivent également être prises en compte.

6.5.3 Comportement dynamique de l'ondulation

6.5.3.1 Exigences

On peut généralement supposer que l'exigence d'incertitude due au comportement dynamique est remplie si la fréquence f_2 à une limite supérieure de -3 dB de la réponse amplitude-fréquence du système de mesure est 10 fois supérieure à la fréquence fondamentale f de l'ondulation et si la fréquence f_1 à une limite inférieure de -3 dB est inférieure à 1/10 de la fréquence fondamentale f de l'ondulation.

6.5.3.2 Détermination directe de la réponse amplitude-fréquence

Le système est soumis à une grandeur d'entrée sinusoïdale d'amplitude connue, habituellement à bas niveau, et la grandeur de sortie est mesurée. Cette mesure est répétée pour une gamme appropriée de fréquences.

6.5.4 Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé du courant ondulatoire

Les essais spécifiés ici doivent uniquement être appliqués aux systèmes utilisés pour mesurer l'amplitude de l'ondulation.

		-		
Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion du système de mesure au moment de l'étalonnage			6.5.5 et 5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				6.5.6
Comportement dynamique de l'ondulation			6.5.3	
Stabilité à long terme	5.6			
Effet de la température ambiante	5.7			
Responsabilité	Pour les cons construct	tituants: eur	Pour le système de mesure: utilisateur	
Fréquence recommandée	Une seule fois (essai de type et individuel de série)		Suggéré une fois par an, mais au moins tous les 5 ans	En fonction de la stabilité, mais au moins tous les ans

Tableau 2 – Essais exigés pour le courant ondulatoire

La conformité aux exigences de l'essai de type peut être démontrée par des essais sur un dispositif de même conception ou parfois à partir des données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque dispositif. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

D'autres contributions à l'incertitude peuvent se révéler significatives dans des cas particuliers et les informations sont données ici à titre indicatif uniquement.

6.5.5 Mesure du coefficient de conversion à la fréquence d'ondulation

Le coefficient de conversion du système de mesure doit être déterminé à la fréquence fondamentale f de l'ondulation, avec une incertitude élargie ne dépassant pas 3 %. Ce coefficient de conversion peut être calculé comme le produit des coefficients de conversion des constituants.

6.5.6 Contrôle des caractéristiques du système de mesure de courant ondulatoire

6.5.6.1 Généralités

Le coefficient de conversion d'un système de mesure approuvé peut être contrôlé par l'une des méthodes suivantes.

6.5.6.2 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant doivent être contrôlés en utilisant un calibrateur interne ou externe dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 3 %. Si les coefficients de conversion des constituants individuels ne diffèrent pas de leurs valeurs précédentes de plus de 3 %, le coefficient de conversion affecté précédent du système de mesure est considéré comme encore valide. Si une quelconque différence dépasse 3 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.2).

NOTE Des mesures en courant continu de la résistance d'un shunt de conversion de courant suffisent en général pour le contrôle des caractéristiques.

6.5.6.3 Contrôle du coefficient de conversion du système de mesure

Le système de mesure doit être comparé à un autre système de mesure approuvé selon la procédure de 5.2.1. Si la différence entre les deux valeurs mesurées n'est pas supérieure à 10 %, le coefficient de conversion affecté précédent est considéré comme encore valide. Si la différence est plus importante, le coefficient de conversion affecté doit alors être obtenu par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.2).

6.6 Procédures d'essai

Les procédures d'essai sont définies par le comité d'études concerné ou doivent être convenues avec le client.

7 Courant alternatif en régime établi

7.1 Application

Les applications couvrent des essais de courant alternatif en régime établi.

Les procédures données ci-après pour la mesure du courant d'essai s'appliquent tant à l'étalonnage qu'à la mesure.

7.2 Termes et définitions

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

7.2.1

valeur du courant alternatif d'essai

valeur efficace vraie du courant d'essai

7.2.2

valeur efficace vraie valeur obtenue à partir de l'expression

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i^2(t) \, \mathrm{d}t}$$

оù

- 0 est l'instant temporel (*t* = 0) d'une onde périodique de courant alternatif qui convient pour commencer l'intégration;
- T est le temps mesuré sur un nombre entier de cycles;
- i(t) est la valeur instantanée du courant.

NOTE 1 La valeur efficace vraie peut en général être calculée à partir d'un enregistrement numérique de toute forme d'onde périodique, à condition de prélever un nombre d'échantillons suffisant (voir l'Article G.4).

NOTE 2 Dans les cas d'une fréquence variable, il n'est pas possible de donner une formule exacte pour la valeur efficace vraie.

62475 © CEI:2010

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

7.2.3

valeur de crête

 $\hat{\iota}_{ss}$

amplitude instantanée maximale du courant

7.3 Courant d'essai

7.3.1 Exigences

Le courant d'essai doit être un courant alternatif ayant généralement une fréquence assignée dans une gamme de 45 Hz à 65 Hz, désignée par l'expression courant d'essai à fréquence industrielle. Des essais particuliers peuvent être exigés à des fréquences très inférieures ou très supérieures à cette gamme, selon les spécifications du comité d'études concerné.

La forme d'onde de courant doit être approximativement sinusoïdale, avec des différences d'amplitude des valeurs de crête positive et négative inférieures à 2 %.

On considère que les résultats d'un essai à haute intensité ne sont pas affectés par de faibles écarts par rapport à une sinusoïde si le taux de distorsion harmonique totale (THD)¹ ne dépasse pas 5 % de la valeur efficace de la composante fondamentale.

$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1}$

où

 I_1 est la valeur efficace de la composante fondamentale du courant;

 I_n est la valeur efficace de la $n^{\text{ième}}$ composante harmonique à partir de n = 2.

Des écarts plus importants doivent être acceptés pour certains circuits d'essai communément utilisés. Par exemple, l'objet en essai, notamment s'il présente des caractéristiques d'impédance non linéaire, peut donner lieu à un écart important par rapport à une sinusoïde.

7.3.2 Tolérances

Sauf spécification contraire du comité d'études concerné, l'exigence de tolérance applicable au courant d'essai doit être de ± 3 % pendant toute la durée de l'essai.

NOTE 1 Il est souligné que la tolérance constitue la différence admise entre la valeur d'essai spécifiée et la valeur effectivement mesurée. Il convient de distinguer cette différence de l'incertitude d'une mesure.

NOTE 2 Le comité d'études concerné peut spécifier d'autres limites de tolérance, par exemple 0 % à +5 %.

7.4 Mesure du courant d'essai

7.4.1 Exigences applicables à un système de mesure approuvé

L'exigence générale consiste à mesurer la valeur du courant d'essai, avec une incertitude élargie U_{mes} d'au plus 3 % (avec une probabilité de couverture de 95 %), sauf indication contraire de la norme de matériel concernée.

7.4.2 Contributions à l'incertitude

Pour un système de mesure du courant alternatif, l'incertitude élargie doit être évaluée selon 5.10.3 et, si nécessaire, selon les Annexes A et B. Les contributions individuelles à l'incertitude qui doivent être prises en compte sont données dans le Tableau 3. Les

¹ THD: Total Harmonic Distortion

informations sont uniquement données à titre indicatif; d'autres contributions peuvent dans certains cas se révéler significatives et doivent également être prises en compte.

7.4.3 Comportement dynamique

7.4.3.1 Exigences

La réponse amplitude/fréquence d'un système de mesure prévu pour fonctionner à une seule fréquence fondamentale f_{nom} doit être donnée (dans la gamme de fréquences illustrée à la Figure 14 par des lignes mixtes trait-point) dans les limites supérieure et inférieure indiquées par des traits continus et discontinus. Les limites sont issues des exigences relatives à l'incertitude. Les paires de nombres dans le schéma indiquent les fréquences normalisées (observées sur l'échelle logarithmique) et les écarts autorisés correspondants par rapport aux réponses idéales aux angles des lignes de limite. Les caractéristiques de fonctionnement de f_{nom} à 7 f_{nom} doivent être démontrées par essai ou par une analyse de circuit. Les limites de la réponse amplitude-fréquence, hors de ce domaine, sont données pour information uniquement. La contribution à l'incertitude u_{dyn} est considérée égale à zéro.

D'autres exigences relatives au comportement dynamique peuvent être spécifiées par le comité d'études concerné.

NOTE 1 Les restrictions relatives au comportement dynamique permettent de s'assurer que les erreurs d'amplitude des composantes de fréquence autres que la fréquence fondamentale ne contribuent pas de manière significative à la valeur mesurée du courant d'essai. Les systèmes de mesure conformes à ces exigences sont en outre considérés comme ayant une réponse en fréquence adaptée aux mesures du taux de distorsion harmonique totale (THD) du courant d'essai.

NOTE 2 La réponse en fréquence illustrée hors du domaine indiqué par des lignes mixtes trait-point, même si elle n'est pas exigée, est effectivement représentative des bonnes pratiques en la matière.



Figure 14 – Réponse amplitude-fréquence normalisée acceptable d'un système de mesure du courant alternatif pour une fréquence fondamentale unique f_{nom}

Un système de mesure peut également être approuvé pour une gamme de fréquences fondamentales. Le coefficient de conversion (et par conséquent la réponse amplitude-

fréquence) d'un système de mesure doit être, dans ce type de cas, constant dans une limite de 1 % par rapport à la fréquence fondamentale inférieure f_{nom1} jusqu'à la fréquence fondamentale supérieure f_{nom2} . La réponse hors de l'intervalle f_{nom1} à f_{nom2} , mais dans l'intervalle f_{nom1} à 7 f_{nom2} (c'est-à-dire dans la gamme de fréquences jusqu'aux lignes mixtes trait-point verticales illustrée à la Figure 15) doit être donnée dans les limites supérieure et inférieure indiquées par des traits continus et discontinus. Les limites sont issues des exigences relatives à l'incertitude. Les paires de nombres dans le schéma indiquent les fréquences normalisées (observées sur l'échelle logarithmique) et les écarts autorisés correspondants par rapport à la réponse idéale aux angles des lignes de limite. Les caractéristiques de fonctionnement de f_{nom1} à 7 f_{nom2} doivent être démontrées par des essais ou par une analyse de circuit. Les limites de la réponse amplitude-fréquence, hors de ce domaine, sont données pour information uniquement.

La contribution à l'incertitude u_{dyn} due à la variation du coefficient de conversion sur la gamme de fréquences f_{nom1} à f_{nom2} doit être évaluée selon 5.4.



Figure 15 – Réponse amplitude-fréquence normalisée acceptable d'un système de mesure du courant alternatif pour une gamme de fréquences fondamentales f_{nom1} à f_{nom2}

7.4.3.2 Détermination directe de la réponse amplitude-fréquence

Afin de déterminer le comportement dynamique, le système est soumis à une grandeur d'entrée sinusoïdale d'amplitude connue, habituellement à bas niveau, et la grandeur de sortie est mesurée. Cette mesure est répétée pour une gamme appropriée de fréquences.

7.4.4 Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion du système de mesure au moment de l'étalonnage			5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				7.4.5
Extension de la linéarité		5.3 (le cas échéant)	5.3 (le cas échéant)	
Comportement dynamique du système de mesure		7.4.3 et 5.4		
Stabilité à court terme du dispositif de conversion		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (le cas échéant)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet des trajets de courant voisins sur le dispositif de conversion	5.8 (le cas échéant)			
Effet du logiciel	5.9 (le cas échéant)			
Essai de perturbations			5.12	
Essai de tension de tenue à sec sur le dispositif de conversion		5.13.1 (le cas échéant)		
Essai de courant de tenue		-		
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion		5.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble		5.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure		5.2		
Responsabilité	Pour les constituants: constructeur		Pour le système de mesu utilisateur	
Fréquence recommandée	Une seule fois (essai de type et individuel de série)		En fonction de la stabilité, mais au moins tous les 5 ans	En fonction de la stabilité, mais au moins tous les ans

Tableau 3 – Essais exigés pour le courant alternatif en régime établi

La conformité aux exigences des essais de type peut être démontrée par des essais sur un dispositif de même conception ou déduite à partir des données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque dispositif. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

7.4.5 Contrôle des caractéristiques

7.4.5.1 Généralités

Le coefficient de conversion d'un système de mesure approuvé peut être contrôlé par l'une des méthodes suivantes.

7.4.5.2 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant peuvent être contrôlés en utilisant un calibrateur interne ou externe dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 1 %. Si les coefficients de conversion des constituants individuels ne diffèrent pas de leurs valeurs

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

précédentes de plus de 1 %, le coefficient de conversion affecté précédent du système de mesure est considéré comme encore valide. Si une quelconque différence dépasse 1 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.2).

NOTE Des mesures en courant continu de la résistance d'un shunt de conversion de courant suffisent en général pour le contrôle des caractéristiques.

7.4.5.3 Contrôle du coefficient de conversion du système de mesure

Le système de mesure est comparé à un autre système de mesure approuvé selon la procédure de 5.2.1. Si la différence entre les deux valeurs mesurées n'est pas supérieure à 3 %, le coefficient de conversion affecté précédent est considéré comme encore valide. Si la différence est plus importante, le coefficient de conversion affecté doit alors être obtenu par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.2).

7.5 Procédures d'essai

Les procédures d'essai sont définies par le comité d'études concerné ou doivent être convenues avec le client.

8 Courant continu de courte durée

8.1 Application

Les applications couvrent des essais à haute intensité pour la mesure du courant continu. Le courant continu de courte durée est de durée limitée (par exemple, jusqu'à 1 s) tel qu'on le rencontre par exemple dans les essais de courant continu (court-circuit) à haute intensité. Lorsque l'on mesure des grandeurs caractéristiques, des coupures de courant peuvent générer des phénomènes transitoires qui risquent d'être déterminants pour la susceptibilité aux perturbations des systèmes de mesure du courant et de la tension d'un laboratoire d'essais à haute intensité.





Les procédures données ci-après pour la mesure du courant d'essai s'appliquent tant à l'étalonnage qu'à la mesure.

8.2 Termes et définitions

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

8.2.1

valeur de crête

îss

amplitude instantanée maximale du courant

8.2.2

courant continu en régime établi

Iss

moyenne arithmétique du courant en régime établi, c'est-à-dire lorsque le courant atteint une valeur de crête supérieure à 90 %

8.2.3 constante de temps du circuit

rapport d'inductance sur la résistance du circuit

NOTE 1 La constante de temps est la durée au cours de laquelle un courant augmentant de manière exponentielle atteint $(1 - e^{-1})$ de sa valeur en régime établi. La constante de temps mesurée n'est pas nécessairement égale à la constante de temps calculée à partir des valeurs de la résistance et de l'inductance.

NOTE 2 L'inductance du circuit peut changer du fait des effets de la saturation des matériaux ferromagnétiques et du fait que le circuit peut être différent au moment de la fermeture et de l'ouverture.

8.2.4

durée

temps au cours duquel le courant est supérieur à 10 % de la valeur de crête

8.3 Courants d'essai

8.3.1 Exigences relatives au courant d'essai

Le courant d'essai est en général caractérisé par:

- la valeur de crête; le courant continu en régime établi;
- la constante de temps du circuit;
- la durée.

8.3.2 Tolérances

Sauf spécification contraire du comité d'études concerné, les exigences de tolérance applicables au courant d'essai doivent être conformes au Tableau 4.

NOTE 1 Il est souligné que la tolérance constitue la différence admise entre la valeur spécifiée et la valeur effectivement mesurée. Il convient de distinguer cette différence de l'incertitude d'une mesure.

NOTE 2 Le comité d'études concerné peut spécifier d'autres limites de tolérance.

Tableau 4 – Exigence de tolérance des paramètres d'essai de courant continu de courte durée

Grandeur	Tolérance %
Valeur de crête	±5
Courant continu en régime établi	±5
Constante de temps	0 à +25
Durée	A définir par le comité d'études concerné

8.4 Mesure du courant d'essai

8.4.1 Exigences applicables à un système de mesure approuvé

L'exigence générale consiste à mesurer la valeur de crête et le courant en régime établi, avec une incertitude élargie U_{mes} d'au plus 5 % (avec une probabilité de couverture de 95 %), sauf indication contraire de la norme de matériel concernée.

8.4.2 Contributions à l'incertitude

Pour un système de mesure du courant continu de courte durée, l'incertitude élargie doit être évaluée selon 5.10.3 et, si nécessaire, selon les Annexes A et B. Les contributions individuelles qui doivent être prises en compte sont indiquées dans le Tableau 5. Les informations sont uniquement données à titre indicatif; d'autres contributions peuvent dans certains cas se révéler significatives et doivent également être prises en compte.

8.4.3 Comportement dynamique

8.4.3.1 Exigences

Le système de mesure doit être conçu pour un courant continu jusqu'à la limite supérieure de fréquence f_2 . La limite supérieure à -3 dB de la fréquence f_2 de la réponse amplitude-fréquence du système de mesure doit être supérieure à 1 kHz. La contribution à l'incertitude due à la réponse en fréquence est égale à zéro.

8.4.3.2 Essai de comportement dynamique

La réponse amplitude-fréquence peut être soit déterminée directement, soit par évaluation de la densité spectrale de la réponse impulsionnelle.

Pour la détermination directe de la réponse amplitude-fréquence, le système est soumis à une grandeur d'entrée sinusoïdale d'amplitude connue, habituellement à bas niveau et la grandeur de sortie est mesurée. Cette mesure est recommencée pour une gamme de fréquences suffisante pour démontrer la réponse à partir d'un courant continu jusqu'à la limite supérieure de fréquence f_2 .

Pour la détermination de la réponse amplitude-fréquence au moyen de la fonction de densité spectrale, le système est soumis à un courant de choc puis ses grandeurs d'entrée et de sortie sont mesurées. La grandeur d'entrée est mesurée au moyen d'un système de mesure de référence ayant une réponse uniforme dans la gamme de fréquences représentative. Il convient que le courant de choc ait un temps de montée plus court que le temps de montée le plus court pour lequel le système en essai doit être qualifié. Il convient que la durée du choc soit suffisamment longue pour démontrer la réponse à partir du courant continu jusqu'à la limite supérieure de fréquence f_2 . La réponse amplitude-fréquence est estimée à partir de la transformation de Fourier du rapport du courant d'essai mesuré par le système de mesure de référence et la grandeur de sortie du système de mesure approuvé.

NOTE Certains dispositifs de conversion ont un comportement dynamique stable intrinsèque. Dans ce type de cas, un essai dynamique réalisé sur l'instrument peut se révéler suffisant.

8.4.4 Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion du système de mesure au moment de l'étalonnage			5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				8.4.5
Extension de la linéarité		5.3 et 8.4.6 (le cas échéant)	5.3 et 8.4.6 (le cas échéant)	
Comportement dynamique du système de mesure		8.4.3	8.4.3 (le cas échéant)	
Stabilité à court terme du dispositif de conversion		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (le cas échéant)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet des trajets de courant voisins sur le dispositif de conversion	5.8 (le cas échéant)			
Effet du logiciel	5.9 (le cas échéant)			
Essai de perturbations sur un système de transmission incluant des éléments actifs			5.12	
Essai de perturbations sur le système de mesure			5.12	
Essai de tension de tenue sous pluie ou sous pollution sur le dispositif de conversion	5.13.1 (le cas échéant)			
Essai de tension de tenue à sec sur le dispositif de conversion		5.13.1 (le cas échéant)		
Essai de courant de tenue		5.13.2		
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion		5.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble		5.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure		5.2		
Responsabilité	Pour les constitu	ants: constructeur	Pour le systèn utilisa	ne de mesure: ateur
Fréquence recommandée	Une seule fois (essai de type et individuel de série)		En fonction de la stabilité, mais au moins tous les 5 ans	En fonction de la stabilité, mais au moins tous les ans

Tableau 5 – Essais exigés pour un courant continu de courte durée

La conformité aux exigences des essais de type peut être démontrée par des essais sur un dispositif de même conception ou déduite à partir des données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque dispositif. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

8.4.5 Contrôle des caractéristiques

8.4.5.1 Généralités

Le coefficient de conversion d'un système de mesure approuvé peut être contrôlé par l'une des méthodes suivantes.

8.4.5.2 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant peuvent être contrôlés en utilisant un calibrateur interne ou externe dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 1 %. Si les coefficients de conversion des constituants individuels ne diffèrent pas de leurs valeurs précédentes de plus de 1 %, le coefficient de conversion affecté précédent du système de mesure est considéré comme encore valide. Si une quelconque différence dépasse 1 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.3).

NOTE Une mesure en courant continu de la résistance d'un shunt de conversion de courant suffit en général pour le contrôle des caractéristiques.

8.4.5.3 Contrôle du coefficient de conversion du système de mesure

Le système de mesure est comparé à un autre système de mesure approuvé selon la procédure de 5.3.2. Si la différence entre les deux valeurs mesurées n'est pas supérieure à 3 %, le coefficient de conversion affecté précédent est considéré comme encore valide. Si la différence est plus importante, le coefficient de conversion affecté doit alors être obtenu par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.3).

8.4.6 Essai de linéarité

L'essai de linéarité peut être réalisé soit avec un courant continu de courte durée, soit avec un courant asymétrique à fréquence industrielle d'un facteur de crête d'environ 2. Les procédures de 5.3 doivent être suivies.

La valeur à déterminer est la valeur de crête du premier courant de crête. L'essai de linéarité est exigé pour une seule polarité.

8.5 Procédures d'essai

Le comité d'études concerné définit les procédures d'essai.

9 Courant alternatif de courte durée

9.1 Application

Les applications couvrent des essais à haute intensité. Le courant alternatif de courte durée est un courant alternatif à durée limitée (par exemple, jusqu'à 5 s) avec ou sans composante continue transitoire, c'est-à-dire un courant asymétrique ou symétrique. Lors de la mesure de grandeurs caractéristiques, des coupures de courant peuvent également générer des phénomènes transitoires qui risquent d'être déterminants pour la susceptibilité aux perturbations des systèmes de mesure du courant.



- 157 -

Figure 17 – Exemple de courant alternatif de courte durée

Les procédures données ci-après pour la mesure du courant d'essai s'appliquent tant à l'étalonnage qu'à la mesure.

9.2 Termes et définitions

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

9.2.1 valeur de crête

î

amplitude instantanée maximale du courant

9.2.2 valeur efficace vraie d'un événement

*I*_{eff} valeur obtenue à partir de l'expression:

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i^2(t) \, dt}$$

où

- 0 est l'instant temporel (t = 0) au cours duquel le courant s'écarte pour la première fois de zéro;
- T est la durée que prend le courant pour s'écarter de zéro pour la dernière fois;

i(t) est la valeur instantanée du courant.

NOTE 1 La valeur efficace vraie d'un événement peut en général être calculée à partir d'un enregistrement numérique de tout événement limité dans le temps, à condition de prélever un nombre d'échantillons suffisant.

NOTE 2 La valeur efficace vraie d'un événement tient également compte de la contribution de la composante continue.

9.2.3

composante alternative symétrique

valeur efficace vraie du courant après décroissance de l'éventuelle composante

9.2.4

facteur de crête

rapport de la valeur maximale absolue d'une grandeur alternative à sa valeur quadratique moyenne

9.2.5 angle d'impédance φ défini par l'expression $\varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R}$

où

- ω est la pulsation de l'alimentation;
- L est l'inductance;
- *R* est la résistance du circuit équivalent du courant alternatif de courte durée.

L'angle d'impédance est souvent caractérisé par la valeur de cos φ et appelé "facteur de puissance".

NOTE 1 L'angle d'impédance est une caractéristique du circuit d'essai proprement dit.

NOTE 2 Les méthodes de détermination de l'angle d'impédance peuvent être données dans des normes de produit. Une procédure générale est décrite dans l'Annexe G.

9.3 Courant d'essai

9.3.1 Exigences relatives au courant d'essai

Le courant d'essai est en général caractérisé par:

- la valeur de crête;
- la composante alternative symétrique;
- la fréquence;
- le facteur de puissance (cos φ) du circuit (voir l'Annexe G);
- la durée.

Pour certaines applications, d'autres paramètres peuvent être pris en compte, comme par exemple l'intégrale de Joule:

$$I_{\rm eff}^2 \times T = \int_0^T i^2(t) \, \mathrm{d}t$$

NOTE L'Annexe G fournit des procédures pratiques de détermination des valeurs efficaces.

9.3.2 Tolérances

Sauf spécification contraire du comité d'études concerné, les exigences de tolérance applicables au courant d'essai doivent être conformes au Tableau 6.

Grandeur	Tolérance %
Valeur de crête	±5
Composante alternative symétrique	±5
$\cos \varphi$	±0,05
Fréquence	±5
Durée	A définir par le comité d'études concerné

Tableau 6 – Exigences de tolérance applicables aux paramètresd'essai de courant alternatif de courte durée

NOTE 1 Il est souligné que la tolérance constitue la différence admise entre la valeur spécifiée et la valeur effectivement mesurée. Il convient de distinguer cette différence de l'incertitude d'une mesure.

NOTE 2 Le comité d'études concerné peut spécifier d'autres limites de tolérance.

9.4 Mesure du courant d'essai

9.4.1 Exigences applicables à un système de mesure approuvé

L'exigence générale consiste à mesurer la valeur de crête et la composante alternative symétrique dans l'étendue de mesure affectée contenue dans le recueil de caractéristiques, avec une incertitude élargie $U_{\rm mes}$ (avec une probabilité de couverture de 95 %) d'au plus 5 %, sauf indication contraire de la norme de matériel concernée.

NOTE 1 Il convient de mesurer l'angle d'impédance, exprimé par cos φ , avec une incertitude élargie d'au plus 0,05. L'incertitude de la mesure peut cependant être affectée par d'autres systèmes de mesure utilisés pour cette détermination.

NOTE 2 Dans les systèmes qui utilisent des transformateurs de courant avec fer comme dispositifs de conversion, il convient d'accorder une attention toute particulière aux effets éventuels de la saturation du noyau dus à la succession de courants d'essai asymétriques.

9.4.2 Contributions à l'incertitude

Pour un système de mesure du courant alternatif de courte durée, l'incertitude élargie doit être évaluée selon 5.10.3 et, si nécessaire, selon les Annexes A et B. Les contributions individuelles qui doivent être prises en compte sont indiquées dans le Tableau 9. Les informations sont uniquement données à titre indicatif; d'autres contributions peuvent dans certains cas se révéler significatives et doivent également être prises en compte.

9.4.3 Comportement dynamique

9.4.3.1 Exigences

Les exigences de comportement dynamique dépendent du type d'essai réalisé. Dans chaque cas, le système de mesure doit être caractérisé par une fréquence minimale et une fréquence maximale auxquelles les exigences de 9.4.1 sont satisfaites. Le Tableau 7 fournit une liste des essais typiques et des exigences correspondantes. Les procédures de 5.4 doivent être suivies.

Type d'essai	Fréquence fondamentale du courant	Gamme des fréquences exigée	Commentaires
Essais de courant de tenue de crête et de courant de tenue de courte durée	Fréquence industrielle	0,2 Hz à 7 fois la fréquence fondamentale du courant d'essai	La composante continue doit également être mesurée
Essais de fermeture et de coupure	Fréquence industrielle	0,2 Hz à 7 fois la fréquence fondamentale du courant d'essai	Normalement sans coupure
Essais de manœuvre de bobine d'inductance de shunt	Fréquence industrielle	0,2 Hz à 7 fois la fréquence fondamentale du courant d'essai	Essai de courant à réamorçage multiple, mesure du courant non requise pour l'évaluation de l'essai
Essais de manœuvre en courant capacitif	A fréquence industrielle mais coupure de courant, et 4 250 Hz à la fermeture lors d'essais « en opposition »	Courant continu à 8 500 Hz	Le courant est naturellement sinusoïdal
Essais synthétiques	Dans une gamme de 250 Hz à 1 000 Hz	0,2 Hz à 7 fois la fréquence fondamentale du courant d'essai	Courant d'injection au cours des essais synthétiques: le courant est naturellement sinusoïdal
Essais de fusible de limitation du courant	Fréquence industrielle avec courant de coupure	20 Hz à 5 000 Hz	Mesure du courant de coupure

Tableau 7 – Liste des essais typiques réalisés dans un laboratoire d'essai à haute intensité et gamme de fréquences minimales exigée du système de mesure

Tableau 8 – Exigences de tolérance du coefficient de conversion

A la fréquence fondamentale	A la limite inférieure de la gamme de fréquences %	A la limite supérieure de la gamme de fréquences %
Voir 5.2	±15	±15

En général, un système de mesure qui remplit les exigences ci-dessus applicables au coefficient de conversion est considéré comme satisfaisant aux exigences de 9.4.1 et la contribution à l'incertitude u_{dyn} due à sa réponse en fréquence est considérée comme négligeable. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

9.4.3.2 Détermination directe de la réponse amplitude-fréquence

Afin de déterminer le comportement dynamique, le système est soumis à une grandeur d'entrée sinusoïdale d'amplitude connue, habituellement à bas niveau, et la grandeur de sortie est mesurée. Cette mesure est répétée pour une gamme appropriée de fréquences.

9.4.3.3 Détermination de la réponse amplitude-fréquence par la fonction de densité spectrale

Le système est soumis à un choc de courant puis ses grandeurs d'entrée et de sortie sont mesurées. La grandeur d'entrée est mesurée au moyen d'un système de mesure de référence ayant une réponse uniforme dans la gamme de fréquences représentative. Il convient que le courant de choc ait un temps de montée plus court que le temps de montée le plus court pour lequel le système en essai doit être qualifié. Il convient que la durée totale du courant de choc corresponde au type de courant pour lequel le système en essai doit être qualifié. La réponse amplitude-fréquence est estimée à partir du rapport entre la grandeur d'entrée (mesurée par le système de mesure correct/de référence) et la grandeur de sortie.

9.4.3.4 Estimation des incertitudes par les techniques de convolution

Il est possible d'estimer les incertitudes d'un système de mesure, dues à la réponse temporelle du système de mesure, à partir d'une réponse indicielle en utilisant les techniques de convolution (voir l'Annexe D).

9.4.4 Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé

Tableau 9 –	Essais	exiaés	pour u	n courant	alternatif	de	courte	durée
	Loouio	ONIGOU	pour u	i ooarant	antornatin	~~	000110	u u. 00

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion du système de mesure au moment de l'étalonnage			5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				9.4.5
Extension de la linéarité		5.3 et 9.4.6 (le cas échéant)	5.3 et 9.4.6 (le cas échéant)	
Comportement dynamique du système de mesure		9.4.3 (le cas échéant)		
Stabilité à court terme du dispositif de conversion		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (le cas échéant)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet des trajets de courant voisins sur le dispositif de conversion	5.8 (le cas échéant)			
Effet du logiciel	5.9 (le cas échéant)			
Essai de perturbations sur un système de transmission incluant des éléments actifs; rapport de perturbations			5.12	
Essai de perturbations sur le système de mesure; rapport de perturbations			5.12	
Essai de tension de tenue à sec sur le dispositif de conversion		5.13.1 (le cas échéant)		
Essai de courant de tenue		5.13.2		
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion		5.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble		5.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure		5.2		
Responsabilité	Pour les c const	constituants: ructeur	Pour le systèr utilis	ne de mesure: ateur
Fréquence recommandée	Une s (essai de typ de	eule fois be et individuel série)	En fonction de la stabilité, mais au moins tous les 5 ans	En fonction de la stabilité, mais au moins tous les ans

La conformité aux exigences des essais de type peut être démontrée par des essais sur un dispositif de même conception ou déduite à partir des données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque dispositif. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

9.4.5 Contrôle des caractéristiques

9.4.5.1 Généralités

Le coefficient de conversion d'un système de mesure approuvé peut être contrôlé par l'une des méthodes suivantes.

9.4.5.2 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant peuvent être contrôlés en utilisant un calibrateur interne ou externe dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 1 %. Si les coefficients de conversion des constituants individuels ne diffèrent pas de leurs valeurs précédentes de plus de 1 %, le coefficient de conversion affecté du système de mesure est considéré comme encore valide. Si une quelconque différence dépasse 1 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.2).

NOTE Des mesures en courant continu de la résistance d'un shunt de conversion de courant suffisent en général pour le contrôle des caractéristiques.

9.4.5.3 Contrôle du coefficient de conversion du système de mesure

Le système de mesure est comparé à un autre système de mesure approuvé selon la procédure de 5.2.1. Si la différence entre les deux valeurs mesurées n'est pas supérieure à 3 %, le coefficient de conversion affecté est considéré comme encore valide. Si la différence est plus importante, le coefficient de conversion affecté doit alors être obtenu par un essai de détermination des caractéristiques (voir 5.2).

NOTE Une comparaison corrélative entre deux systèmes de mesure mesurant le même courant peut généralement être réalisée au moyen de deux phases d'un circuit triphasé connecté en série.

9.4.6 Essai de linéarité

L'essai de linéarité doit être réalisé avec un courant asymétrique à fréquence industrielle d'un facteur de crête de 2,8 (ou du facteur de crête maximal valable pour le circuit d'essai). Les procédures de 5.3 doivent être suivies.

La valeur à déterminer est la valeur de crête du premier courant de crête. L'essai doit être effectué pour les deux polarités de la composante continue.

NOTE 1 Du fait des phénomènes de saturation qui apparaissent dans certains dispositifs de conversion, tels que les transformateurs de courant avec fer, il peut être nécessaire de changer la polarité de la composante continue dans les applications de courant ultérieures.

NOTE 2 Le décalage d'un système de mesure peut être identifié par des essais aux deux polarités.

9.4.7 Essai de perturbations

L'essai de perturbations et les exigences correspondantes sont décrits en 5.11.

Pour les systèmes utilisés uniquement pour les mesures de courants à fréquence industrielle, l'essai de perturbations doit être réalisé à la fréquence industrielle.

Pour les systèmes qui sont également utilisés à des fréquences autres que la fréquence industrielle, il est recommandé d'effectuer des essais de perturbations supplémentaires dans la gamme de fréquences du courant d'essai.

9.5 Procédures d'essai

Les procédures d'essai sont définies par le comité d'études concerné ou doivent être convenues avec le client.

10 Courants de choc

10.1 Application

Les applications couvrent des essais de tenue aux chocs de courant, comme par exemple des essais de parafoudre, des essais CEM et des essais de tenue aux chocs de courant de foudre. Voir les Figures 18 à 21.

Les procédures données ci-après pour la mesure du courant d'essai s'appliquent tant à l'étalonnage qu'à la mesure.

NOTE Lors des essais de tensions de choc, la résolution et la reproductibilité de la forme d'onde du courant traversant l'objet en essai peuvent être d'une importance primordiale. Ces cas sont couverts par l'Article 11.

10.2 Termes et définitions

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

10.2.1

courant de choc exponentiel

courant qui croît de zéro jusqu'à la valeur de crête pendant une courte durée, puis décroît ensuite jusqu'à zéro, soit à peu près de manière exponentielle, soit à la façon d'une sinusoïde fortement amortie. Ce type de courant est défini par la durée du front T_1 (voir 10.2.4) et la durée jusqu'à mi-valeur T_2 (voir 10.2.6); il est généralement appelé courant de choc T_1/T_2 (voir la Figure 18)

NOTE D'autres chocs sont également utilisés pour les essais, comme par exemple les ondes sinusoïdales commutées et les ondes sinusoïdales fortement amorties (en anneau).



Figure 18 – Courant de choc exponentiel





Figure 19 – Courant de choc exponentiel – Oscillations sur la queue

10.2.2

courant de choc rectangulaire

courant de forme d'onde sensiblement rectangulaire, défini par la durée T_d de la crête (voir 10.2.7) et la durée totale T_t (voir 10.2.8). Il est généralement appelé courant de choc T_d/T_t (voir Figure 20)



Figure 20 - Courant de choc - Rectangulaire, lisse



- 165 -

Figure 21 – Courant de choc – Rectangulaire avec oscillations

10.2.3 valeur du courant de choc valeur de crête du courant d'essai

NOTE Dans certains circuits d'essai, on peut rencontrer des lancés de courant ou des oscillations sur la forme d'onde du courant Dans ce type de cas, la crête est déterminée par la valeur extrême du courant, à moins que le comité d'études concerné n'ait spécifié une autre procédure, comme par exemple le traçage d'une ligne moyenne au milieu des oscillations.

10.2.4 durée du front

T_1

paramètre conventionnel d'un courant de choc exponentiel défini comme étant égal à 1,25 fois l'intervalle de temps T, entre le moment où le courant de choc atteint 10 % et celui où il atteint 90 % de sa valeur de crête (voir la Figure 18)

10.2.5

origine conventionnelle

0₁

moment qui précède de $0,1T_1$ celui où le courant de choc exponentiel atteint 10 % de sa valeur de crête, et où pour les enregistrements à échelles de temps linéaire, il s'agit de l'intersection entre l'axe des temps et une ligne droite passant par les points de référence 10 % et 90 % du front

10.2.6 durée jusqu'à mi-valeur

 T_2

paramètre conventionnel d'un courant de choc exponentiel défini comme étant l'intervalle de temps entre l'origine conventionnelle O_1 et le moment où le courant a décru jusqu'à la moitié de sa valeur de crête (voir la Figure 18), et où, si la queue présente des oscillations, T_2 est pris comme la moyenne temporelle de la première et de la dernière instance au cours desquelles le courant a décru jusqu'à la moitié de la valeur de crête (voir la Figure 19)

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

10.2.7

durée T_d

durée au cours de laquelle le courant de choc rectangulaire est supérieur à 90 % de sa valeur de crête (voir les Figures 20 et 21) et pour laquelle, si des oscillations sont observées, T_d est pris comme étant la durée la plus longue au cours de laquelle le courant est globalement supérieur à 90 % de sa valeur de crête

10.2.8

durée totale

 T_{t}

paramètre conventionnel défini comme la période pendant laquelle le courant de choc rectangulaire est supérieur de 10 % à sa valeur de crête (voir les Figures 20 et 21)

NOTE En cas de présence de petites oscillations sur le front, il convient de tracer une courbe moyenne afin de déterminer l'instant où la valeur de 10 % est atteinte.

10.2.9

époque nominale (partie frontale d'un choc uniquement)

 τ_{N}

plage de valeurs comprise entre les valeurs minimale (t_{min}) et maximale (t_{max}) des paramètres temporels relatifs aux chocs pour lesquels le système de mesure est approuvé

NOTE 1 Les paramètres temporels concernés sont:

- la plage de durées de front T_1 pour un courant de choc exponentiel;

- la plage de la moitié de la différence entre T_t et T_d pour un courant de choc rectangulaire.

NOTE 2 Un système de mesure peut avoir une, deux ou plusieurs époques nominales pour différentes formes d'onde.

NOTE 3 Pour un courant de choc rectangulaire, il convient que l'époque nominale soit prise comme étant:

$$t_{\min} = \min\left(\frac{T_{t} - T_{d}}{2}\right) et \quad t_{\max} = \max\left(\frac{T_{t} - T_{d}}{2}\right)$$

10.2.10 charge d'un courant de choc

Q

intégrale temporelle de la valeur absolue du courant instantané:

$$Q = \int_{0}^{\infty} \left| i(t) \right| \mathrm{d}t$$

NOTE 1 Pour des raisons d'ordre pratique, il convient de choisir la limite supérieure de l'intégrale, de façon à ce que la contribution résiduelle soit inférieure à une valeur spécifiée fournie par le comité d'études concerné.

NOTE 2 La valeur absolue du courant est applicable dans les cas où il existe des points de pied d'arc présentant une chute de tension sensiblement constante.

10.2.11

intégrale de Joule d'un courant de choc

I^2t

intégrale temporelle du carré du courant instantané:

$$I^2 t = \int_0^\infty i^2(t) \, \mathrm{d}t$$

NOTE Pour des raisons d'ordre pratique, il convient de choisir la limite supérieure de l'intégrale, de façon à ce que la contribution résiduelle soit inférieure à une valeur spécifiée fournie par le comité d'études concerné.

10.3 Courant d'essai

10.3.1 Généralités

Différents courants de choc normalisés sont utilisés au cours des essais. Des exemples de courants de choc exponentiels sont donnés dans le Tableau 10, d'autres exemples étant fournis dans l'Annexe H. D'autres formes d'onde peuvent être spécifiées par les comités d'études CEI concernés.

NOTE Des études ultérieures sont envisagées afin de réduire le nombre de formes d'onde différentes.

Type de choc	Durée du front $T_1 \ \mu$ s	Durée jusqu'à mi-valeur T ₂ μs	Tolérances sur les paramètres temporels
1 / ≤20	1	≤20	T ₁ ±10 % T ₂ ≤20 μs
8/20	8	20	$\begin{array}{c} T_1 \pm 20 \% \\ T_2 \pm 20 \% \end{array}$
10/350	10	350	T ₁ ±30 % T ₂ ±20 %

Tableau 10 – Exemples de types de courants de choc exponentiels

10.3.2 Tolérances

10.3.2.1 Courant de choc exponentiel

Sauf spécification contraire du comité d'études concerné, les tolérances sur les valeurs spécifiées concernant les courants de choc exponentiels sont les suivantes:

- charge 0 %, limite supérieure spécifiée par le comité d'études concerné:
- intégrale de Joule
 0 %, limite supérieure spécifiée par le comité d'étudeconcerné;
- valeur du courant d'essai ±10 %;
- durée du front T_1 ±20 %;
- durée jusqu'à mi-valeur T_2 ±20 %.

NOTE 1 Ces tolérances s'appliquent à certains types de chocs difficiles à réaliser avec des éléments linéaires uniquement, du fait de leurs limites physiques (par exemple, des chocs 4/10 et 8/20; voir l'Annexe E). Le comité d'études concerné peut spécifier des détails supplémentaires ou modifier les tolérances.

NOTE 2 Dans les cas où la charge ou l'énergie spécifique est importante pour l'essai, la tolérance pour T_2 peut être de ± 50 %.

L'éventuelle crête d'inversion de polarité après que le courant d'essai soit passé à zéro ne doit pas dépasser 30 % de la valeur du courant de choc, c'est-à-dire la valeur de crête, sauf spécification contraire du comité d'études concerné.

10.3.2.2 Courant de choc rectangulaire

- charge
 0 %, limite supérieure spécifiée par le comité d'études
 concerné;
- intégrale de Joule
 0 %, limite supérieure spécifiée par le comité d'études concerné;
- valeur de crête
 0 %, +20 %;

- 168 –
- durée T_d du courant de crête 0 %, +20 %;
- durée totale T_{t} <1,5 T_{d} .

Il convient que la crête d'inversion de polarité après que le courant d'essai soit passé à zéro ne dépasse pas 10 % de la valeur du courant de choc, c'est-à-dire la valeur de crête.

10.4 Mesure du courant d'essai

10.4.1 Exigences applicables à un système de mesure approuvé

Les exigences générales sont les suivantes:

- la mesure de la valeur du courant de choc, c'est-à-dire la valeur de crête avec une incertitude élargie U_{mes} (avec une probabilité de couverture de 95 %) d'au plus 3 %;
- la mesure des paramètres temporels (qui définissent la forme d'onde) avec une incertitude élargie (avec une probabilité de couverture de 95 %) d'au plus 10 %;
- l'obtention d'un décalage de la grandeur de sortie suffisamment faible pour permettre le calcul de la charge d'un courant de choc ainsi que l'intégrale de Joule.

10.4.2 Contributions à l'incertitude

Pour un système de mesure du courant de choc, l'incertitude élargie doit être évaluée selon 5.10.3 et, si nécessaire, selon les Annexes A et B. Les contributions individuelles qui doivent être prises en compte sont indiquées dans le Tableau 11. Les informations sont uniquement données à titre indicatif; d'autres contributions peuvent dans certains cas se révéler significatives et doivent également être prises en compte.

10.4.3 Comportement dynamique

10.4.3.1 Exigences

Le comportement dynamique d'un système de mesure convient pour le domaine de formes d'onde spécifiées dans le recueil de caractéristiques si:

- le coefficient de conversion est constant à 1 % près sur chaque domaine de formes d'onde;
- l'incertitude élargie des paramètres temporels mesurés plus leurs erreurs n'est pas supérieure à 10 %.

Le comportement dynamique du système de mesure doit être déterminé pour l'époque nominale au moyen de courants de choc ayant deux formes d'onde différentes, telles que:

- *t*_{min} est égal au paramètre temporel le plus court dans l'époque nominale (voir 10.2.9);
- *t*_{max} est égal au paramètre temporel le plus long dans l'époque nominale (voir 10.2.9).

Il convient que la durée jusqu'à mi-valeur (la durée totale si la forme d'onde est rectangulaire) s'approche de la durée la plus longue pour laquelle le système de mesure doit être approuvé.

La contribution à l'incertitude u_{dyn} due à la variation du coefficient de conversion sur l'époque nominale doit être évaluée selon 5.4.

10.4.3.2 Comparaison avec un système de mesure de référence (méthode à privilégier)

On peut utiliser les mêmes enregistrements que ceux de l'essai décrit en 5.2.1 et les paramètres temporels significatifs des chocs mesurés sont évalués pour chaque système. Les erreurs sur les paramètres temporels mesurés par le système en cours d'étalonnage doivent être évaluées. L'incertitude de l'erreur doit également être évaluée, en tenant compte à la fois de l'incertitude du système de mesure de référence et des incertitudes dues au processus d'étalonnage.

NOTE Si l'approbation concerne un groupe de types de chocs, t_{min} peut être choisi à partir d'un type de choc donné et t_{max} à partir d'un autre. Dans ce type de cas, il convient d'utiliser la durée jusqu'à mi-valeur la plus longue de tous les types de chocs.

10.4.3.3 Méthode alternative fondée sur la convolution

Le coefficient de conversion d'un système de mesure est déterminé par toute méthode appropriée. La forme d'onde utilisée pour déterminer le coefficient de conversion doit s'inscrire dans le domaine couvert par la méthode de convolution décrite ci-dessous.

Le comportement dynamique est déterminé à partir de la mesure de la réponse indicielle sur le système de mesure et à partir de la convolution de la réponse indicielle enregistrée avec les formes d'onde nominales dont l'approbation est requise. Il est possible d'estimer, à partir de la convolution, les erreurs introduites par le système de mesure pour différentes formes d'onde. Il est possible d'évaluer l'incertitude de mesure à partir de ces erreurs. La variation du coefficient de conversion sur l'époque nominale doit rester à 1 %. La réponse indicielle doit être enregistrée conformément à 10.4.3.6. Voir également les Annexes C et D.

10.4.3.4 Etalonnage sur la base des constituants

Les coefficients de conversion des constituants du système de mesure sont déterminés par toute méthode appropriée. La forme d'onde utilisée pour déterminer le coefficient de conversion doit s'inscrire dans le domaine couvert par la méthode de convolution décrite cidessous.

Le comportement dynamique est déterminé à partir des mesures de la réponse indicielle des constituants et à partir de la convolution des réponses indicielles enregistrées les unes avec les autres, ainsi qu'avec les formes d'onde nominales dont l'approbation est requise. Il est possible d'estimer, à partir de la convolution, les erreurs introduites par le constituant examiné, pour différentes formes d'onde. Il est possible d'évaluer l'incertitude de mesure à partir de ces erreurs. La variation du coefficient de conversion de l'ensemble du système de mesure sur l'époque nominale doit rester à 1 %. La réponse indicielle doit être enregistrée conformément à 10.4.3.6. Pour plus d'informations sur la convolution, voir l'Annexe D.

10.4.3.5 Enregistrement de référence (optionnel)

Lorsque l'on souhaite utiliser la réponse indicielle du système de mesure lors des contrôles de caractéristiques, celle-ci doit être enregistrée selon la méthode décrite en 10.4.3.6. La réponse indicielle doit être incluse dans le recueil de caractéristiques à titre d'enregistrement de référence (« signature ») en vue de détecter des variations dans le comportement dynamique lors de contrôles de caractéristiques réalisés ultérieurement (voir 10.4.5).

10.4.3.6 Enregistrement de la réponse indicielle

Le système est soumis à un choc de courant puis ses grandeurs d'entrée et de sortie sont mesurées. La grandeur d'entrée est mesurée au moyen d'un système de mesure de référence ayant une réponse uniforme dans la gamme de fréquences représentative. Il convient que le courant de choc ait un temps de montée plus court que le temps de montée le plus court t_{min} (voir 10.2.9) pour lequel le système en essai doit être qualifié. Il convient que la durée totale du courant de choc corresponde au type de choc pour lequel le système en essai doit être qualifié.

10.4.4 Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéris- tiques	Contrôle des caractéris- tiques
Coefficient de conversion du système de mesure au moment de l'étalonnage			5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				10.4.5
Extension de la linéarité		5.3 (le cas échéant)	5.3 (le cas échéant)	
Comportement dynamique du système de mesure	10.4.3 (le cas échéant)		10.4.3 (le cas échéant)	10.4.5.4 (le cas échéant
Stabilité à court terme du dispositif de conversion		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (le cas échéant)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet des trajets de courant voisins sur le dispositif de conversion	5.8 (le cas échéant)			
Effet du logiciel	5.9 (le cas échéant)			
Essai de perturbations sur un système de transmission incluant des éléments actifs; rapport de perturbations			5.12	
Essai de perturbations sur le système de mesure; rapport de perturbations			5.12	
Essai de tension de tenue à sec sur le dispositif de conversion		5.13.1 (le cas échéant)		
Essai de courant de tenue		5.13.2		
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion		5.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble		5.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure		5.2		
Responsabilité	Pour les co constr	onstituants: ucteur	Pour le systèr utilis	ne de mesure: ateur
Fréquence recommandée	Une se (essai de type sé	Une seule fois (essai de type et individuel de série) En fonction de la stabilité, mais au moins tous les 5 ans		

Tableau 11 – Essais exigés pour le courant de choc

La conformité aux exigences des essais de type peut être démontrée par des essais sur un dispositif de même conception ou déduite à partir des données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque dispositif. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

10.4.5 Contrôle des caractéristiques

10.4.5.1 Généralités

Le coefficient de conversion d'un système de mesure approuvé peut être contrôlé par l'une des méthodes suivantes.

10.4.5.2 Contrôle du coefficient de conversion du système de mesure

Le système de mesure doit être comparé à un autre système de mesure approuvé selon la procédure de 5.2.1. Si la différence entre les deux valeurs de courant mesurées n'est pas supérieure à 3 %, le coefficient de conversion affecté est considéré comme encore valide. Si la différence est plus importante, le coefficient de conversion affecté doit alors être obtenu par un essai de détermination des caractéristiques.

10.4.5.3 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant peuvent être contrôlés en utilisant un calibrateur interne ou externe dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 1 %. L'incertitude élargie des calibrateurs de courants de choc utilisés pour l'étalonnage des instruments de mesure du courant de choc ne doit pas dépasser 1,5 %. Si les coefficients de conversion des constituants individuels ne diffèrent pas de leurs valeurs précédentes de plus de 1 %, le coefficient de conversion affecté du système de mesure est considéré comme encore valide. Si une quelconque différence dépasse 1 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée par un essai de détermination des caractéristiques.

10.4.5.4 Contrôle du comportement dynamique

Il convient de contrôler le comportement dynamique par comparaison avec un autre système de mesure approuvé (ou système de mesure de référence) à l'aide de la procédure de 10.4.3.2.

En variante, il convient d'effectuer un contrôle par des mesures de la réponse indicielle qui doit être enregistrée de la même manière dans chaque contrôle et dans le même circuit que celui utilisé pour obtenir l'enregistrement de référence (voir 10.4.3.5). L'enregistrement de la réponse indicielle doit être comparé avec ceux obtenus lors des précédents contrôles. On peut s'attendre à de petites différences entre contrôles et le degré des variations acceptables doit être déterminé par l'analyse des précédents contrôles. Toute variation importante doit faire l'objet d'un examen et un essai de détermination des caractéristiques doit alors être effectué.

10.5 Procédures d'essai

Les procédures d'essai doivent être définies par le comité d'études concerné ou doivent être convenues avec le client.

11 Mesure du courant lors d'essais diélectriques à haute tension

11.1 Application

Dans le cadre des essais diélectriques à haute tension, les systèmes de mesure de courants de choc sont utilisés pour détecter la rupture de l'isolement lors d'essais de tension de choc de foudre sur, par exemple, des transformateurs et des bobines d'inductance. En général, le système de mesure est branché à la borne neutre du transformateur (ou de la bobine d'inductance) et/ou à la borne qui n'est pas soumise à la tension de choc. Le principal objectif est de vérifier que le courant de choc varie de manière linéaire en fonction de la tension d'essai appliquée, démontrant ainsi qu'aucune rupture interne n'a eu lieu. Il n'est imposé aucune exigence relative à la détermination des valeurs réelles de courant.

NOTE Lors des essais de tension de choc, la résolution et la reproductibilité de la forme d'onde du courant traversant l'objet en essai peuvent être d'une importance primordiale. Dans ces conditions, il convient que les exigences applicables aux paramètres à mesurer soient indiquées par le comité d'études concerné.

Pour l'essai à haute tension, les paramètres temporels du courant enregistré dépendent de l'impédance complexe de l'objet en essai (par exemple, un transformateur ou une bobine d'inductance) et des réflexions dans les bobinages souvent très longs. Aucune connaissance de la forme d'onde ne peut être postulée a priori. Cependant, il est généralement possible de

supposer que le temps de montée le plus rapide est du même ordre de grandeur que le temps de montée de la tension d'essai appliquée. On estime conventionnellement que le front des chocs le plus rapide à enregistrer est supposé avoir des durées de 0,3 µs.

11.2 Termes et définitions

Non applicable.

11.3 Mesure du courant d'essai

11.3.1 Exigences applicables à un système de mesure approuvé

Exigences générales:

- le coefficient de conversion ne doit pas varier de plus de 1 % entre deux chocs d'essai de même forme mais d'amplitudes différentes jusqu'à un facteur de 2, tel qu'on le rencontre au cours d'une séquence d'essais donnée;
- le comportement dynamique doit être suffisant pour reproduire un choc de courant ayant une durée de front de 0,3 μs.

11.3.2 Contributions à l'incertitude

L'évaluation de l'incertitude doit prendre en compte la stabilité à court terme ainsi que la linéarité du système de mesure du courant.

11.3.3 Comportement dynamique

Le comportement dynamique du système de mesure du courant doit convenir à la gamme de formes d'onde que l'on peut rencontrer lors d'essais diélectriques à haute tension. La conformité présumée à cette exigence peut être fondée sur la satisfaction aux exigences de l'Article 10 concernant les systèmes de mesure utilisés pour le courant de choc 1/20.

11.3.4 Etalonnages et essais pour un système de mesure approuvé

Tableau 12 – Essais exigés pour le courant de choc dans le cadre d'essais diélectriques à haute tension

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéris- tiques	Contrôle des caractéris- tiques
Coefficient de conversion d'un système de mesure			Non applicable	
Contrôle du coefficient de conversion				10.4.5
Extension de linéarité		5.3 (le cas échéant)	5.3 (le cas échéant)	
Comportement dynamique du système de mesure	10.4.3 (le cas échéant)		10.4.3 (le cas échéant)	10.4.5.4 (le cas échéant)
Stabilité à court terme du dispositif de conversion		5.5		
Stabilité à long terme				
Effet de la température ambiante				
Effet des trajets de courant voisins sur le dispositif de conversion				
Effet du logiciel	5.9 (le cas échéant)			
Essai de perturbations sur un système de transmission incluant des éléments actifs; rapport de perturbations			5.12	

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéris- tiques	Contrôle des caractéris- tiques
Essai de perturbations sur le système de mesure; rapport de perturbations			5.12	
Essai de tension de tenue à sec sur le dispositif de conversion		5.13.1 (le cas échéant)		
Essai de courant de tenue		5.13.2		
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion		5.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble		5.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure		5.2		
Responsabilité	Pour les constituants: constructeur		Pour le système de mesure: utilisateur	
Fréquence recommandée	Une seule fois (essai de type et individuel de série)		En fonction de la stabilité, mais au moins tous les 5 ans.	En fonction de la stabilité, mais au moins tous les ans

La conformité aux exigences des essais de type peut être démontrée par des essais sur un dispositif de même conception ou déduite à partir des données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque dispositif. Voir 4.6 pour les détails et 4.4.2 pour les exceptions.

11.3.5 Contrôle des caractéristiques

Le contrôle des caractéristiques de systèmes de mesure destinés à mesurer le courant de choc au cours des essais diélectriques à haute tension dépend de la stabilité à court terme et du comportement dynamique.

La conformité présumée aux exigences peut cependant être démontrée par un contrôle portant sur le coefficient de conversion du système de mesure, conformément aux exigences de 10.4.5.

11.3.6 Essai de linéarité

Voir 5.3.

11.3.7 Essai de perturbations

L'essai de perturbations et les exigences correspondantes sont décrits en 5.12.

11.4 Procédures d'essai

Les procédures d'essai sont définies par le comité d'études concerné ou doivent être convenues avec le client.

12 Systèmes de mesure de référence

12.1 Généralités

L'incertitude du système de mesure de référence doit être suffisamment faible pour permettre d'atteindre les incertitudes requises lors de l'étalonnage des systèmes de mesure approuvés. Un système de mesure doit également faire référence à des étalons nationaux et/ou internationaux par une chaîne ininterrompue de mesures comparatives ayant toutes des incertitudes bien définies.

12.2 Intervalle entre étalonnages successifs de systèmes de mesure de référence

En l'absence de preuves contraires, il convient de répéter les étalonnages d'un système de mesure de référence une fois par an, mais au moins une fois tous les cinq ans.

Il est recommandé de n'utiliser le système de mesure de référence que pour les mesures comparatives des essais de détermination des caractéristiques. Toutefois, des systèmes de mesure de référence peuvent être utilisés pour d'autres mesures, y compris un usage de routine quotidien, s'il est démontré qu'un tel usage n'affecte pas leurs caractéristiques. (Les contrôles de caractéristiques prescrits dans la présente norme suffisent à le vérifier.) Par ailleurs, il doit être accepté de remplacer un instrument de mesure par un autre du même type qui satisfait aux exigences de la norme CEI correspondante.

Annexe A (informative)

Incertitude de mesure

A.1 Généralités

L'Article 5 décrit une procédure simplifiée d'évaluation de l'incertitude de mesure dans les conditions généralement applicables et pleinement suffisantes pour des essais à haute intensité. Cependant, dans certains cas, il peut être nécessaire ou souhaitable d'évaluer les incertitudes de manière plus complexe. L'Annexe A donne un aperçu général des procédures à utiliser dans ce type de cas.

Toute mesure d'une grandeur présente un certain degré d'imperfection et le résultat d'une mesure donnée n'est qu'une approximation ("estimation") de la valeur "vraie" (généralement inconnaissable) du mesurande. L'incertitude de mesure donne une indication claire de la qualité d'une mesure. Elle permet à l'utilisateur de comparer et de pondérer les résultats de mesure, obtenus par exemple par différents laboratoires, et fournit des informations quant à la conformité ou non d'un résultat de mesure aux limites spécifiées par une norme donnée. Le Guide ISO/CEI 98-3 est aujourd'hui accepté à l'échelle pour l'estimation de l'incertitude de mesure.

Le Guide ISO/CEI 98-3 fournit des règles générales d'évaluation et d'expression de l'incertitude dans un large spectre de mesures, à différents niveaux d'incertitude. Il est par conséquent nécessaire d'extraire du Guide ISO/CEI 98-3 un ensemble de règles spécifiques traitant du domaine particulier des mesures à haute intensité, ainsi que de son niveau de précision et de complexité. Conformément aux principes fondamentaux du Guide ISO/CEI 98-3, les incertitudes sont groupées en deux catégories, selon leurs méthodes d'évaluation (type A et type B). Les deux méthodes sont fondées sur des lois de probabilité des grandeurs d'influence de la mesure ainsi que sur des incertitudes-types quantifiées par des variances ou des écarts-types. Cela permet un traitement uniforme des deux catégories d'incertitudes et l'évaluation d'une incertitude-type combinée du mesurande. Dans le cadre du présent document, il est exigé une incertitude élargie correspondant à une probabilité de couverture d'environ 95 %.

Une version simplifiée des principes de base Guide ISO/CEI 98-3, ainsi que des exemples de détermination des incertitudes de mesure à haute intensité, sont présentés ci-après. Les équations et exemples fournis ici sont valables pour des grandeurs d'entrée non corrélées, ce qui est souvent le cas dans les mesures à haute intensité.

A.2 Termes et définitions en complément de 3.6

A.2.1

grandeur mesurable

attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement

A.2.2

valeur d'une grandeur

expression quantitative d'une grandeur spécifique, généralement sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre

A.2.3

mesurande grandeur particulière soumise à un mesurage

A.2.4

variance

espérance mathématique du carré de l'écart d'une variable aléatoire autour de son espérance

A.2.5

corrélation

relation entre deux ou plusieurs variables aléatoires dans une distribution à deux ou plusieurs variables aléatoires

A.2.6

probabilité de couverture

fraction, en général importante, de la distribution de valeurs qui, comme résultat d'une mesure, pourrait raisonnablement être attribuée au mesurande

A.2.7

évaluation de type A (d'incertitude-type) méthode d'évaluation d'une incertitude-type par analyse statistique de séries d'observations

A.2.8

évaluation de type B (d'incertitude-type)

méthode d'évaluation d'une incertitude-type par des moyens autres qu'une analyse statistique de séries d'observations

A.3 Fonction modèle

Chaque mesure peut être décrite par une relation fonctionnelle, f:

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_i, ..., X_N)$$
(A.1)

où *Y* est la grandeur de sortie (mesurande), qui dépend de *N* grandeurs d'entrée mesurables X_i . Au sens du Guide ISO/CEI 98-3, la fonction modèle *f* comprend toutes les valeurs de mesure, grandeurs d'influence, corrections, facteurs de correction, constantes physiques, ainsi que toute autre donnée qui peut contribuer d'une quantité appréciable à la valeur de *Y* et à son incertitude. Il peut s'agir d'une expression analytique ou numérique simple ou à multiples facettes ou encore d'une combinaison des deux. En général, les valeurs de X_i ne peuvent pas être connues avec exactitude, du fait des variations aléatoires des grandeurs d'influence (effets aléatoires) et sont donc appelées estimations de grandeurs d'entrée x_i dont les valeurs possibles ont des lois de probabilité spécifiques, qui sont associées à des incertitudes-types $u(x_i)$ de type A ou de type B. La combinaison des deux types d'incertitude selon les règles du Guide ISO/CEI 98-3, donne l'incertitude-type u(y) de l'estimation de la grandeur de sortie *y*.

NOTE 1 La fonction modèle f dans l'Equation (A.1) est également valable pour les estimations de grandeurs d'entrée et de sortie x_i et y, respectivement.

NOTE 2 Dans une série d'observations, la $k^{\text{ème}}$ valeur observée de la grandeur d'entrée X ou X_i est désignée par X_k ou $X_{i,k}$ et l'estimation de la grandeur d'entrée correspondante par x_k ou $x_{i,k}$, respectivement.

A.4 Evaluation de type A de l'incertitude-type

La méthode d'évaluation de type A s'applique à des grandeurs qui varient de manière aléatoire et pour lesquelles il a été obtenu *n* observations indépendantes x_k dans les mêmes conditions de mesure. On peut généralement supposer une loi de probabilité normale (Gaussienne) p(x) des *n* observations d'une variable aléatoire *x* (voir la Figure A.1). La moyenne arithmétique des estimations x_k d'une série d'observations de la grandeur d'entrée X_k est définie par:

62475 © CEI:2010

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} x_k \tag{A.2}$$

et est considérée comme la meilleure estimation (valeur conventionnellement vraie) de X. Son incertitude-type de type A est égale à l'écart-type expérimental de la moyenne $s(\overline{x})$:

$$u(\overline{x}) = s(\overline{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}}$$
(A.3)

où $s(x_k)$ est l'échantillon ou l'écart-type expérimental (des valeurs individuelles):

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n} (x_k - \bar{x})^2}$$
(A.4)

Les valeurs quadratiques $s^2(x_k)$ et $s^2(\overline{x})$ sont respectivement appelées la variance échantillon et la variance de la moyenne. Il convient que le nombre d'observations soit $n \ge 10$; dans le cas contraire, la fiabilité de l'évaluation de type A de l'incertitude-type doit être vérifiée par le nombre effectif de degrés de liberté (voir l'Article A.8).

NOTE Dans certains cas, une estimation groupée (combinée) de la variance s_p^2 peut être disponible à partir d'un grand nombre d'observations préalables dans des conditions bien définies. Ainsi, l'incertitude-type d'une mesure comparable ayant un moindre nombre n (n = 1, 2, 3, ...) est mieux estimée par $u(\bar{x}) = s_p / \sqrt{n}$ que par l'Equation (A.3).

A.5 Evaluation de type B de l'incertitude-type

La méthode d'évaluation de type B s'applique à tous les cas autres qu'à l'analyse statistique d'une série d'observations. L'incertitude-type de type B est établie par jugement scientifique sur la base de l'ensemble des informations disponibles concernant l'éventuelle variabilité d'une grandeur d'entrée X_i , telles que:

- la méthode d'évaluation des grandeurs;
- l'incertitude de l'étalonnage du système de mesure et de ses constituants;
- la non-linéarité des dispositifs de conversion du courant et des instruments de mesure;
- la stabilité à court terme, due par exemple à l'auto-échauffement;
- la stabilité à long terme, due par exemple à la dérive;
- les conditions ambiantes pendant les mesures;
- la résolution limitée des instruments numériques et/ou de la lecture des instruments analogiques;
- l'effet des trajets de courant voisins;
- les perturbations électromagnétiques;
- la variation du coefficient de conversion en fonction de la fréquence ou de la forme d'onde de choc;
- les effets du logiciel utilisé dans les instruments ou pour l'évaluation des résultats.

Les informations relatives aux grandeurs d'entrée et les incertitudes peuvent être obtenues à partir de mesures réelles et préalables, de certificats d'étalonnage, de caractéristiques données dans des manuels et des normes, de spécifications des constructeurs ou de

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

connaissances des caractéristiques de matériels ou d'instruments pertinents. Les cas suivants d'une évaluation de type B des incertitudes peuvent être différenciés:

- a) Il est fréquent qu'une seule valeur d'entrée x_i et son incertitude-type $u(x_i)$ soient connues, par exemple, une seule valeur mesurée, une valeur de correction ou une valeur de référence extraite de la littérature. Cette valeur et son incertitude sont récupérées dans la fonction modèle (Equation A.1). Dans le cas où $u(x_i)$ n'est pas connue, elle doit être calculée à partir d'autres données pertinentes d'incertitude ou être estimée sur la base des expériences acquises.
- b) L'incertitude d'un dispositif est présentée comme le k multiple d'une incertitude-type; par exemple, l'incertitude élargie U d'un voltmètre numérique dans un certificat d'étalonnage (voir Article A.7). Si le voltmètre est utilisé dans un système de mesure complexe, il contribue à l'incertitude de mesure par:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \tag{A.5}$$

où k est le facteur d'élargissement. On peut trouver, en lieu et place de l'expression de l'incertitude élargie et du facteur d'élargissement, une indication du niveau de confiance, par exemple 68,3 %, 95,45 % ou 99,7 %. En général, on peut supposer une loi normale selon la Figure A.1, l'indication du niveau de confiance étant équivalente respectivement au facteur d'élargissement k = 1, 2, ou 3.

c) La valeur x_i d'une grandeur d'entrée X_i est estimée contenue dans l'intervalle a_- à a_+ avec une certaine loi de probabilité $p(x_i)$. Souvent, il n'y a aucune connaissance particulière de $p(x_i)$ et on suppose alors une loi de loi rectangulaire des valeurs probables (Figure A.2). Dans ce cas, la valeur prévue de X_i est la valeur médiane de l'intervalle:

$$x_i = \frac{(a_- + a_+)}{2} \tag{A.6}$$

et l'incertitude-type associée:

 $u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{A.7}$

où $a = (a_{+} - a_{-})/2$.

Dans certains cas, d'autres lois de probabilité peuvent être plus appropriées. Sachant que la discontinuité de la loi rectangulaire aux limites est souvent immatérielle, il semble raisonnable de remplacer la loi rectangulaire par une loi trapézoïdale, triangulaire ou normale.

NOTE 1 L'incertitude-type est $u(x_i) = a/\sqrt{6}$ pour la loi de distribution triangulaire et $u(x_i) = \sigma$, où σ est l'écart-type de la loi normale. Cela signifie que la loi rectangulaire donne une incertitude-type plus importante que les autres lois.

Il est explicitement indiqué dans le Guide ISO/CEI 98-3 qu'il convient de ne pas noter deux fois une incertitude de type B si l'effet particulier correspondant a déjà contribué à une incertitude de type A. En outre, il convient que l'évaluation de l'incertitude soit réaliste et fondée sur des incertitudes-types, ce qui évite d'utiliser des facteurs subjectifs ou d'éventuels autres coefficients de sécurité pour obtenir des incertitudes plus importantes que celles évaluées selon le Guide ISO/CEI 98-3. Il est fréquent de devoir ajuster ou corriger une grandeur d'entrée X_i pour éliminer les effets systématiques d'amplitude significative, fondés par exemple sur certaines dépendances vis-à-vis de la température ou du courant. Cependant, l'incertitude $u(x_i)$ associée à cette correction, doit encore être prise en compte.

NOTE 2 II est possible que des contributions à l'incertitude soient prises en compte deux fois lorsqu'un enregistreur numérique est utilisé pour les mesures de chocs répétitifs, par exemple lors de l'étalonnage du coefficient de conversion. La dispersion des *n* valeurs de mesure qui donne lieu à l'incertitude-type de type A est en partie due à la résolution limitée de l'enregistreur et à son bruit interne. Il n'est pas nécessaire de prendre en compte une nouvelle fois la résolution intégralement, mais uniquement dans une petite proportion, en tant qu'incertitude résiduelle de type B. Cependant, si l'enregistreur numérique est ensuite utilisé au cours d'un essai
de courant de choc pour obtenir une seule valeur de mesure, il convient que la résolution limitée soit considérée comme une incertitude de type B.

NOTE 3 L'évaluation des incertitudes de type B nécessite une connaissance et une expérience approfondies des rapports physiques pertinents, des grandeurs d'influence et des techniques de mesure. L'évaluation proprement dite n'étant pas une science exacte donnant lieu à une seule et unique solution, il n'est pas rare que des ingénieurs d'essai expérimentés jugent le processus de mesure de manière différente et obtiennent des valeurs d'incertitude de type B différentes.

A.6 Incertitude-type combinée (u_c)

L'incertitude-type $u(x_i)$ de l'estimation x_i de chaque grandeur d'entrée X_i , évaluée par la méthode A ou B, contribue à l'incertitude-type de la grandeur de sortie par:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \tag{A.8}$$

où c_i est le coefficient de sensibilité. Il décrit la manière dont l'estimation de la sortie y est affectée par les variations de l'estimation de la grandeur d'entrée x_i . Ce coefficient peut être directement évalué comme dérivée partielle de la fonction modèle *f* par rapport à X_i :

$$c_{i} = \frac{\partial f}{\partial X_{i}} \bigg|_{X_{i} = x_{i}} = \frac{\partial f}{\partial x_{i}}$$
(A.9)

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

ou en utilisant des méthodes numériques et expérimentales équivalentes. Le signe de c_i peut être positif ou négatif. Dans les cas où des grandeurs d'entrée ne sont pas corrélées, il n'est pas nécessaire de tenir compte outre mesure du signe, car seules les valeurs quadratiques des incertitudes-types sont utilisées au cours des phases suivantes.

Les *N* incertitudes-types $u_i(y)$ définies par l'Equation (A.8) contribuent à une incertitude-type combinée $u_c(y)$ de la grandeur de sortie conformément à la "loi de propagation de l'incertitude":

$$u_{c}^{2}(y) = u_{1}^{2}(y) + u_{2}^{2}(y) + \dots + u_{N}^{2}(y) = \sum_{i=1}^{N} u_{i}^{2}(y)$$
 (A.10)

à partir de là, $u_{c}(y)$ est évaluée comme la racine carrée positive:

$$u_{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} u_{i}^{2}(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} [c_{i} u(x_{i})]^{2}}$$
(A.11)

Si la grandeur de sortie Y est un produit ou un quotient des grandeurs d'entrée X_i , on peut obtenir une relation similaire à celle qui est donnée dans les Equations (A.10) et (A.11) pour les incertitudes relatives $u_c(y)/|y|$ et $u(x_i)/|x_i|$. La loi de propagation de l'incertitude s'applique ainsi aux deux types de fonction modèle pour des grandeurs d'entrée non corrélées.

NOTE Lorsqu'il existe une corrélation, des termes linéaires sont présents dans la loi de propagation de l'incertitude et le signe des coefficients de sensibilité est alors significatif. Il y a corrélation lorsque, par exemple, le même instrument est utilisé pour mesurer deux ou plusieurs grandeurs d'entrée. Pour éviter des calculs compliqués, la corrélation peut être éliminée en ajoutant des grandeurs d'entrée supplémentaires dans la fonction modèle *f* avec des corrections et des incertitude-type combinée. Ainsi, la prise en compte de la corrélation est notamment essentielle pour une analyse sophistiquée de l'incertitude permettant d'obtenir une estimation très précise de cette incertitude. La corrélation n'est pas traitée outre mesure dans la présente norme.

A.7 Incertitude élargie

Dans le domaine de mesures appliquant des tensions et des courants élevés, comme dans la plupart des autres applications industrielles, il est exigé une indication de l'incertitude correspondant à une probabilité de couverture, p, d'environ 95 %. Cela est obtenu en multipliant l'incertitude-type combinée $u_{c}(y)$ de l'Equation (A.11) par un facteur d'élargissement k:

$$U = k \times u_{\rm c}(\gamma) \tag{A.12}$$

où U est l'incertitude élargie.

Le facteur d'élargissement k = 2 est utilisé lorsque:

- une loi normale peut être attribuée à l'estimation de la grandeur de sortie y; et
- $u_{c}(y)$ est suffisamment fiable, en d'autres termes, lorsque le nombre effectif de degrés de liberté de $u_{c}(y)$ est suffisamment grand (voir Article A.8). Dans le cas contraire, une valeur de k > 2 doit être déterminée pour obtenir p = 95 %.

NOTE 1 Dans certaines normes plus anciennes, le terme "incertitude globale" est utilisé. Dans la plupart des cas, le terme est interprété comme une incertitude élargie U dont le facteur d'élargissement k est égal à 2.

NOTE 2 Les incertitudes étant définies comme des nombres positifs, le signe de U est toujours positif. Dans le cas où U signifie un intervalle d'incertitude, il est indiqué par $\pm U$.

A.8 Nombre effectif de degrés de liberté

L'hypothèse d'une loi normale de l'estimation de la grandeur de sortie y est en général satisfaite lorsque plusieurs (c'est-à-dire $N \ge 3$) composantes de l'incertitude de valeurs comparables et ayant une loi de probabilité bien définie (Gaussienne, rectangulaire, etc.) contribuent à l'incertitude-type combinée et lorsque l'incertitude de type A est fondée sur $n \ge 10$ observations répétées. Ces conditions sont satisfaites pour de nombreux étalonnages de systèmes de mesure à haute intensité. Si l'hypothèse d'une loi normale (Gaussienne) n'est pas justifiée, une valeur de k > 2 doit être évaluée pour obtenir une probabilité de couverture d'environ 95 %. Le facteur d'élargissement approprié peut être évalué sur la base du nombre effectif de degrés de liberté v_{eff} de l'incertitude-type combinée $u_c(y)$:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{c}}^{4}(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_{i}^{4}(y)}{v_{i}}}$$
(A.13)

où

 $u_i(y)$ est obtenu par l'Equation (A.8) pour i = 1, 2, ..., N; et

 v_i est le nombre de degrés de liberté correspondants.

Les valeurs fiables de v_i sont:

- $v_i = n 1$ pour une incertitude de type A fondée sur *n* observations indépendantes;
- $v_i \ge 50$ pour une incertitude de type B extraite d'un certificat d'étalonnage et lorsqu'il est indiqué que la probabilité de couverture n'est pas inférieure à 95 %;
- $v_i = \infty$ pour une incertitude de type B en supposant une loi rectangulaire dans l'intervalle compris entre a_- et a_+ .

Le nombre effectif de degrés de liberté peut ensuite être calculé par l'Equation (A.13) et le facteur d'élargissement pris dans le Tableau A.1 qui est fondé sur une loi de *t* (loi de Student) évaluée pour une probabilité de couverture de p = 95,45 %. Si v_{eff} n'est pas un nombre entier, il est obtenu par interpolation ou troncature à la valeur entière inférieure suivante.

Tableau A.1 – Facteur d'élargissement k pour un nombre effectif de degrés de liberté v_{eff} (p = 95,45 %)

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	8
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

La formule suivante peut également être utilisée afin de calculer k à partir de v_{eff} :

$$k = 1,96 + \frac{2,374}{v_{\text{eff}}} + \frac{2,818}{v_{\text{eff}}^2} + \frac{2,547}{v_{\text{eff}}^3}$$
(A.14)

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

NOTE Il est également possible de calculer cette loi *t* inverse au moyen d'un tableur.

A.9 Bilan des incertitudes

Le bilan des incertitudes de mesure donne un aperçu général d'une analyse détaillée de toutes les sources et valeurs d'incertitude fondées sur la fonction modèle *f*. Il convient de conserver les données correspondantes pour contrôle sous la forme d'un tableau similaire ou comparable au Tableau A.2. La dernière ligne donne les valeurs du résultat de mesure *y*, le nombre effectif de degrés de liberté v_{eff} , ainsi que l'incertitude-type combinée $u_c(y)$.

Grandeur X _i Y	Estimation x _i y	Incertitude- type des constituants $u(x_i)$	Degrés de liberté ^V i v _{eff}	Coefficient de sensibilité $\frac{c_i}{-}$	Contribution à l'incertitude $u_i(y)$ $u_c(y)$
<i>X</i> ₁	<i>X</i> ₁	<i>u</i> (<i>x</i> ₁)	v ₁	C ₁	<i>u</i> ₁ (<i>y</i>)
X ₂	<i>x</i> ₂	$u(x_2)$	v ₂	c2	$u_2(y)$
:	:	:	:	:	:
X _N	x _N	$u(x_N)$	v _N	c _N	$u_{N}(y)$
Y	Y	-	$v_{\sf eff}$	-	$u_{c}(y)$

 Tableau A.2 – Présentation d'un bilan des incertitudes

NOTE Des logiciels validés sont disponibles dans le commerce ou peuvent être développés par l'utilisateur à partir de logiciels d'usage général permettant un calcul automatisé des grandeurs données dans le Tableau A.2 à partir de la fonction modèle, *f*. Il est recommandé de présenter dans le bilan des incertitudes des valeurs absolues (et non relatives) de $u(x_i)$, y compris les unités correspondantes.

A.10 Présentation du résultat de mesure

Dans les certificats d'étalonnage et d'essai, le mesurande *Y* doit être exprimé comme $(y \pm U)$ pour une probabilité de couverture (ou niveau de confiance) d'environ p = 95 %. La valeur numérique de l'incertitude élargie *U* doit être arrondie à au plus deux chiffres significatifs. Si l'arrondi à la valeur inférieure entraîne une réduction de plus de 0,05 *U*, on doit arrondir à la valeur supérieure. La valeur numérique de *y* doit être arrondie au chiffre le moins significatif susceptible d'être affecté par l'incertitude élargie.

NOTE 1 Le résultat d'une mesure de courant est présenté, par exemple de l'une des manières suivantes:

- 182 -

(227,2 ± 2,5) kA;

227,2 \times (1 \pm 0,011) kA.

Une note explicative doit être incluse afin de fournir des informations sur la probabilité de couverture p et le facteur d'élargissement k.

NOTE 2 II est par exemple recommandé d'utiliser la formulation suivante (les termes entre parenthèses s'appliquent aux cas où $v_{eff} < 50$, c'est-à-dire lorsque k > 2,05 selon le Tableau A.1):

"L'incertitude élargie de mesure indiquée est exprimée par l'incertitude-type combinée multipliée par le facteur d'élargissement k = 2 (k = XX), ce qui, pour une loi normale (loi de t avec $v_{eff} = YY$ nombre effectif de degrés de liberté) correspond à une probabilité de couverture d'environ 95 %. L'incertitude-type combinée de mesure a été déterminée conformément à la CEI 62475."



NOTE 3 Le symbol σ est l'écart-type.

NOTE 4 La partie grisée indique l'incertitude-type.

Figure A.1 – Loi normale p(x) d'une variable aléatoire continue x





Figure A.2 – Loi de probabilité rectangulaire symétrique p(x)de l'estimation x d'une grandeur d'entrée X

Annexe B

(informative)

Exemples de calcul de l'incertitude dans les mesures à haute intensité

B.1 Généralités

Il convient de faire clairement la distinction entre l'incertitude d'étalonnage et l'incertitude des mesures réalisées au moyen du système de mesure étalonné. L'incertitude d'étalonnage s'applique à la situation d'étalonnage uniquement. Elle est principalement prise en compte par une analyse du système de mesure de référence, même s'il peut également se révéler nécessaire de tenir compte de certaines composantes de l'incertitude liées au système en cours d'étalonnage.

L'incertitude des mesures réalisées au moyen du système de mesure étalonné est fondée sur une analyse de la combinaison de l'incertitude d'étalonnage et de paramètres liés au système de mesure étalonné et aux conditions d'utilisation.

La présente annexe fournit des exemples concernant la manière d'appliquer l'Article 5 pour l'évaluation des systèmes de mesure.

B.2 Exemple 1: Etalonnage du coefficient de conversion d'un système de mesure de courant alternatif (méthode comparative ou méthode du système de référence)

Un système de mesure du courant alternatif ayant une étendue de mesure affectée de 1 kA à 10 kA, désigné par X, est étalonné par un laboratoire d'étalonnage accrédité dans l'installation d'essai de l'utilisateur. L'étalonnage est réalisé par comparaison avec un système de mesure de référence jusqu'à 5 kA, désigné par N (Figure B.1). Les deux systèmes sont constitués d'un shunt et d'un voltmètre numérique indiquant les tensions efficaces $V_{\rm N}$ et $V_{\rm X}$ aux sorties des shunts. Le coefficient de conversion et l'incertitude élargie relative du système de référence N à une température de 20 °C est $F_{\rm N}$ = 10 025 A/V et $U_{\rm N}$ = 0,8 % (k = 2), respectivement, y compris une faible contribution due à l'instabilité à long terme.

Au cours de l'étalonnage, la température ambiante est de (15 ± 2) °C. De ce fait, le coefficient de conversion de N doit être corrigé de -0,01 % selon le coefficient de température, produisant la valeur réelle $F_{\rm N} = 10$ 024 A/V à une température de 15 °C Cependant, cette correction n'est pas très précise du fait de la variation de température ultérieure dans une limite de ± 2 °C au cours de l'étalonnage, et les valeurs probables de $F_{\rm N}$ sont par conséquent supposées s'inscrire dans un intervalle de \pm 0,1 % et suivre une loi rectangulaire. Des lectures simultanées de $V_{\rm N}$ et $V_{\rm X}$ sont effectuées pour n = 10 applications du courant pendant une courte durée, tout en maintenant une longue période sans courant entre les applications. L'effet de l'échauffement peut par conséquent être ignoré. La linéarité du système en cours d'étalonnage, X est vérifiée de 5 kA jusqu'à 10 kA au moyen d'une bobine de Rogowski (voir 5.2.1.3) et prise en compte comme décrit à l'Article B.3.

L'équation modèle pour le calcul de la valeur de F_X et de son incertitude-type combinée peut être développée comme décrit ci-après. Dans le cas idéal, les deux systèmes de mesure indiquent la même valeur de courant alternatif d'essai *I* (Figure B.1):

$$I = F_{\rm N}V_{\rm N} = F_{\rm X}V_{\rm X} \tag{B.1}$$

Cela conduit à une équation de base pour le calcul du coefficient de conversion du système en cours d'étalonnage:

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

$$F_{\rm X} = \frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}} F_{\rm N} \tag{B.2}$$

Comme décrit ci-dessus, les coefficients de conversion des deux systèmes sont soumis à plusieurs grandeurs d'influence, telles que la dérive, la température, etc. Celles-ci contribuent également aux valeurs du coefficient de conversion et aux incertitudes correspondantes. Ces contributions sont désignées ici par $\Delta F_{N,1}$, $\Delta F_{N,2}$, ... pour le système de référence et $\Delta F_{X,1}$, $\Delta F_{X,2}$, ... pour le système en cours d'étalonnage (les premières contributions déterminent l'incertitude de l'étalonnage, tandis que les dernières constituent l'incertitude des mesures effectuées par le système de mesure étalonné). En général, chaque contribution au coefficient de conversion F_N ou F_X est constituée d'une erreur δ_i et d'une incertitude-type u_i . L'erreur est utilisée pour corriger le coefficient de conversion, la correction étant donc de signe opposé. La contribution à l'incertitude est liée au coefficient de conversion pertinent, F_N ou F_X et évaluée comme décrit à l'Article A.5, c'est-à-dire soit en:

- supposant une loi rectangulaire symétrique dans un intervalle de ±a_i et la demi-largeur a_i, ce qui donne lieu à une incertitude-type u_i = a_i/√3; ou
- dans le cas d'un constituant étalonné, en divisant son incertitude élargie U par le facteur d'élargissement k.

Il n'est pas nécessaire que la contribution ΔF_{Nm} ou $\Delta F_{X,i}$ comporte toujours une erreur (ou δ_i est supposé être négligeable) et, dans ce cas, cette contribution est constituée uniquement d'une contribution à l'incertitude u_i .

L'Equation de base (B.2) est ainsi complétée par les contributions ΔF_{Nm} et $\Delta F_{X,i}$ afin d'obtenir la fonction modèle complète qui permet de déterminer le coefficient de conversion F_X et son incertitude-type combinée. Sachant que la corrélation entre les grandeurs d'influence n'est pas prise en compte, l'Equation (B.2) peut être écrite sous la forme générale suivante:

$$F_{\mathsf{X}} - \sum_{i} \Delta F_{\mathsf{X},i} - \sum_{k} \Delta F_{\mathsf{X},k} = \frac{V_{\mathsf{N}}}{V_{\mathsf{X}}} F_{\mathsf{N}} \left(1 - \sum_{m} \Delta F_{\mathsf{N},m} - \sum_{n} \Delta F_{\mathsf{N},n} \right)$$
(B.3)

NOTE Par définition, les erreurs insérées des deux côtés de l'équation sont de signe négatif. Elles sont définies comme ΔF = (valeur mesurée) – (valeur de référence), (terme 3.6.7).

Le coefficient de conversion $F_{X,cal}$ affecté par la méthode comparative d'étalonnage au système de mesure de courant alternatif peut être exprimé par:

$$F_{\rm X,cal} = \left(\overline{\frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}}} \right) \times \left(F_{\rm N} - \Delta F_{\rm N,temp} \right) = \left(\overline{\frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}}} \right) \times F_{\rm N} \times \left(1 - \frac{\Delta F_{\rm N,temp}}{F_{\rm N}} \right)$$
(B.4)

où

 $\Delta F_{N,temp}$ est la contribution due à une utilisation du système de référence à une température plus basse que celle à laquelle son coefficient de conversion a été établi;

 $\left(\frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}}\right)$

est la moyenne arithmétique des quotients $q=V_N/V_X$ des mesures comparatives.

La mesure comparative donne dix paires de valeurs mesurées V_N et V_X à partir desquelles sont calculés les quotients V_N/V_X , leur moyenne et l'écart-type expérimental *s* (voir Tableau B.1). Un exemple de valeurs mesurées à un courant égal à environ 25 % de I_{Xmax} est donné dans le Tableau B.1. De la même manière, les quotients V_N/V_X et leurs écarts-types correspondants *s* sont obtenus pour un total de *g* = 3 niveaux de courant jusqu'à 5 kA (voir Tableau B.2). Le résultat de l'essai de linéarité est présenté dans le Tableau B.3. Ecart-type expérimental s.

Numéro de la mesure	Système de référence V _N √	Système en essai Vx ∨	Quotient V _N /V _X
1	0,191 4	0,190 8	1,003 1
2	0,191 6	0,190 9	1,003 7
3	0,190 7	0,189 9	1,004 2
4	0,189 9	0,189 0	1,004 8
5	0,190 9	0,189 0	1,010 1
6	0,191 2	0,190 2	1,005 3
7	0,191 3	0,190 4	1,004 7
8	0,191 2	0,190 4	1,004 2
9	0,190 6	0,189 9	1,003 7
10	0,191 3	0,190 7	1,003 1

- 185 -

L'incertitude-type de type A est évaluée à partir de *s* et de *n* conformément à l'Equation (A.3):

$$u_{\rm g} = u \left(\frac{V_{\rm N}}{V_{\rm X}} \right) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0,002\,32}{\sqrt{10}} = 0,000\,73$$
 (B.5)

0,002 32

g N°	Niveau de courant % de I _{Xmax}	V _N /V _X	s(V _N /V _X)	u _{xg}
1	10	1,004 2	0,002 44	0,000 77
2	25	1,004 7	0,002 32	0,000 73
3	50	1,003 7	0,002 88	0,000 91 (= u_{max})
Moyenne		1,004 2		

Tableau B.2 – Résultat de la mesure comparative

De cela, il découle que le coefficient de conversion obtenu à partir de la comparaison avec le système de référence est estimé à:

$$F_{\rm x} = 100\ 25\ {\rm x}\ 1,004\ 2 = 100\ 67,1$$
 (B.6)

L'estimation de l'incertitude de V_N/V_X est évaluée par l'expression suivante:

$$u_{\rm F} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{g=1}^{3} \left| \frac{\overline{F}_{g}}{F} - 1 \right| \right)^{2} + \left(\max_{g=1}^{3} (u_{g}) \right)^{2}} = \sqrt{\frac{1}{3} (0,0005)^{2} + (0,00091^{2})} = 0,0006$$
(B.7)

Les valeurs et les incertitudes-types des grandeurs du côté droit de la fonction modèle (Equation B.4) sont répertoriées dans le bilan des incertitudes (Tableau B.3). Les degrés de liberté sont déterminés selon l'Equation (A.13). La dernière ligne du Tableau B.3 donne le résultat de l'évaluation, constituée du coefficient de conversion, de l'incertitude-type combinée et du nombre effectif de degrés de liberté. La plus grande valeur $v_{eff} = 52$ indique une loi normale des valeurs probables de F_X pour lesquelles k = 2 est valide (Tableau A.1).

Grandeur	Valeur	Incertitude-type des constituants	Degrés de liberté	Coefficient de sensibilité	Contribution à l'incertitude- type combinée	
V _N /V _X	1,004 2	0,000 6ª	8	10 026,002 5	5,8	
F _N	1002 5	40,1 ^a	50	1,004 2	40	
$\Delta F_{\rm N,temp}$	-1,002 5	5,79 ^b	×	-1,004 2	-5,8	
F _X	10 068,1		55		41	
^a Loi normale.					·	
^b Loi rectangulaire.						

Tableau B.3 – Bilan des incertitudes d'étalonnage du coefficient de conversion F_x

L'incertitude-type combinée u_{cal} du Tableau B.3 a été calculée par l'expression:

$$u_{cal} = \sqrt{u_{V_N/V_X}^2 + u_{F_N}^2 + u_{\Delta F_N, temp}^2} =$$

$$= \sqrt{6^2 + 40, 1^2 + 5, 8^2} = 41$$
(B.8)

Enfin, le résultat complet de l'étalonnage est exprimé par:

 $F_{X} = F_{X,cal} = 10\ 068 \pm 82 = 10\ 068 \times (1 \pm 0,008)$ pour une probabilité de couverture d'au moins 95 % (k = 2).

L'incertitude élargie de l'étalonnage du coefficient de conversion est $U_{cal} = 0.8$ %. Pour l'incertitude des mesures réalisées au moyen du système de mesure, d'autres contributions à l'incertitude doivent être prises en considération.

B.3 Exemple 2: Incertitude élargie de mesure utilisant un système de mesure approuvé

Le système de mesure approuvé X pour un courant alternatif a été étalonné comme décrit à l'Article B.2. Le coefficient de conversion et l'incertitude élargie de l'étalonnage étaient $F_X = 100$ 68 et $U_X = 0,8$ % (k = 2). La linéarité du système de mesure approuvé a été vérifiée de 5 kA jusqu'à 10 kA au moyen d'une bobine de Rogowski (les résultats correspondants sont donnés dans le Tableau B.4). D'autres études du comportement dynamique, de la stabilité à court terme, de la plage de températures et des perturbations montrent une influence sur F_X de \pm 0,2 % chacun. L'instabilité à long terme de F_X est estimée, sur la base des données fournies par le constructeur, à \pm 0,3 % jusqu'au prochain étalonnage. Il n'est pas nécessaire de tenir compte en plus de l'effet des trajets de courant voisins car le système de mesure approuvé X est utilisé en position fixe dans l'installation d'essai de l'utilisateur, ce qui signifie que cet effet a été inclus dans l'étalonnage.

L'équation modèle pour le calcul de la valeur du coefficient de conversion $F_{X,mes}$ du système de mesure approuvé et son incertitude type combinée est présentée comme suit:

$$F_{\rm X,mes} = F_{\rm X,cal} - \Delta F_{\rm X,lin} - \Delta F_{\rm X,st} - \Delta F_{\rm X,lt} - \Delta F_{\rm X,dyn} - \Delta F_{\rm X,temp}$$
(B.9)

où

F _{X.cal}	est	le	coefficient	de	conversion	résultant	de	l'étalonnage	comparatif	(voir
, , ou	Equ	atio	n (B.2));							

 $\Delta F_{X,lin}$ est la contribution de l'essai de linéarité;

 $\Delta F_{X,st}$ est la contribution due à l'instabilité à court terme du système;

- $\Delta F_{X,lt}$ est la contribution due à l'instabilité à long terme du système;
- $\Delta F_{X,dvn}$ est la contribution due au comportement dynamique du système;
- $\Delta F_{X,temp}$ est la contribution due à la plage de températures dans laquelle il est prévu d'utiliser le système.

Le coefficient de conversion du système subit plusieurs grandeurs d'influence telles que la dérive, la température, etc. Celles-ci contribuent également à la valeur du coefficient de conversion et de ses incertitudes. Les contributions considérées pertinentes dans ce cas sont énumérées ci-après. En général, chaque contribution au coefficient de conversion F_{χ} est constituée d'une erreur δ_i et d'une incertitude-type u_i . L'erreur est utilisée pour corriger le coefficient de conversion, la correction étant donc de signe opposé. La contribution à l'incertitude est évaluée comme décrit en Article A.5, c'est-à-dire soit en supposant une loi rectangulaire avec un intervalle de demi-largeur, a_i , donnant lieu à une incertitude-type $u_i = a_i/\sqrt{3}$, soit, dans le cas d'un constituant étalonné, en divisant son incertitude élargie U par le facteur d'élargissement k. Il n'est pas nécessaire que la contribution $\Delta F_{\chi,i}$ comporte toujours une erreur (ou δ_i est supposé être négligeable), et dans ce cas, cette contribution est constituée uniquement d'une contribution à l'incertitude u_i . La corrélation entre les grandeurs d'influence est négligeable.

Le résultat de l'essai de linéarité est présenté dans le Tableau B.4.

g N°	Niveau de courant % of I _{X,max}	F _{Xg}	(F _{Xg} /F _X)-1
4	50	10 064,1	-0,001 9
5	75	10 077,2	-0,000 6
6	100	10 107,4	+0,002 4
Moyenne		10 082,9	

Tableau B.4 – Résultat de l'essai de linéarité

L'incertitude-type relative u_{lin} est estimée conformément à 5.3:

$$u_{\text{lin}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{g=4}^{6} \left| \frac{F_{\chi_g}}{\overline{F}_{\chi_g}} - 1 \right| = 0,0014$$
(B.10)

Les valeurs et les incertitudes-types des grandeurs du côté droit de la fonction modèle (Equation (B.5)) sont répertoriées dans le bilan des incertitudes (Tableau B.5). Les degrés de liberté sont déterminés selon l'Equation (A.13). La dernière ligne du Tableau B.5 donne le résultat de l'évaluation, constituée du coefficient de conversion, de l'incertitude-type combinée et du nombre effectif de degrés de liberté. La plus grande valeur $v_{eff} = 120$ indique une loi normale des valeurs probables de $F_{X,mes}$ pour lesquelles k = 2 est valide (Tableau B.5).

Grandeur	Valeur	Incertitude-type des constituants	Degrés de liberté	Coefficient de sensibilité	Contribution à l'incertitude- type combinée		
F _{X,cal}	10 068,1	41,1 ^a	50	1,0	41,1		
$\Delta F_{X,lin}$	0	14,1 ^b	8	-1,0	-14,1		
$\Delta F_{X,st}$	0,0	11,6 ^b	∞	-1,0	-11,6		
$\Delta F_{X,lt}$	0,0	17,4 ^b	∞	-1,0	-17,4		
$\Delta F_{X,dyn}$	0,0	11,6 ^b	∞	-1,0	-11,6		
$\Delta F_{X,temp}$	0,0	11,6 ^b	×	-1,0	-11,6		
$\Delta F_{X,prox}$	F _{X,prox} Couvert par l'étalonnage						
F _{X,mes}	10068,3		118		51		
^a Loi normale.	^a Loi normale.						
°Loi rectangulaire.							

Tableau B.5 – Bilan des incertitudes du coefficient de conversion $F_{X,mes}$

L'incertitude-type combinée u_{mes} du Tableau B.5 a été calculée par l'expression:

$$u_{\text{mes}} = \sqrt{u_{\text{X,cal}}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\text{X,Bi}}^2} = \sqrt{u_{\text{X,cal}}^2 + u_{\text{X,lin}}^2 + u_{\text{X,st}}^2 + u_{\text{X,lit}}^2 + u_{\text{X,dyn}}^2 + u_{\text{X,temp}}^2 + u_{\text{X,prox}}^2} = \sqrt{41,1^2 + 14,1^2 + 11,6^2 + 17,4^2 + 11,6^2 + 12,6^2 + 12,6^2} = 50,94$$
(B.11)

Enfin, pour ce qui concerne le coefficient de conversion à utiliser dans les mesures avec le système de mesure approuvé, le résultat complet est exprimé par:

 $F_{X,mes} = 10\ 068 \pm 102 = 10\ 070 \times (1 \pm 0,010)$ pour une probabilité de couverture d'au moins 95 % (k = 2).

Lorsqu'on utilise le système de mesure, l'incertitude élargie du coefficient de conversion est $U_{mes} = 1,0$ %; elle peut être appliquée comme valeur maximale de l'incertitude de mesure élargie jusqu'au prochain étalonnage.



Figure B.1 – Comparaison entre le système en cours d'étalonnage X et le système de référence N

Annexe C

(informative)

Mesures de la réponse indicielle

C.1 Génération de l'échelon de courant

Il convient que la configuration du circuit utilisée pour déterminer la réponse indicielle soit décrite dans le recueil de caractéristiques et qu'elle soit aussi proche que possible des conditions d'utilisation.

Un échelon approximatif de courant est injecté aux bornes d'entrée du dispositif de conversion du courant. Il convient que le temps de montée de l'échelon soit beaucoup plus court que la durée du front (temps de montée) la plus courte du courant à mesurer (il est recommandé un facteur d'au moins 10). Il convient que la partie plate de l'échelon soit aussi longue que possible avec une décroissance minimale et dans tous les cas, il convient qu'elle soit beaucoup plus longue que le temps (durée) de queue le plus long de la forme d'onde de courant à mesurer (il est recommandé un facteur d'au moins 10). La grandeur de sortie du dispositif de conversion (courant ou tension) est mesurée au moyen d'un enregistreur numérique ou d'un oscilloscope.

Deux méthodes de génération de l'échelon de courant sont présentées ci-après. La Figure C.1 illustre un câble coaxial utilisé pour emmagasiner l'énergie nécessaire à l'échelon, tandis qu'à la Figure C.2, un condensateur est utilisé. La forme d'onde de courant générée par le câble coaxial est un rectangle à angles vifs dont l'intervalle correspond au double du temps de déplacement le long du câble. Un éclateur et une résistance placés entre le dispositif d'emmagasinage de l'énergie et le dispositif de conversion du courant sont aussi représentés. La coupure peut être réalisée de différentes manières. Les méthodes suivantes sont fréquemment utilisées:

- coupure par un relais à contacts mouillés au mercure: cela donne des échelons jusqu'à quelques 10 A;
- coupure par un intervalle d'air dont le champ électrique est uniforme, à la pression atmosphérique et avec un écartement de quelques millimètres: cela donne des échelons jusqu'à quelques 100 A;
- coupure par un intervalle dont le champ électrique est uniforme, avec un écartement de quelques millimètres sous pression de gaz: cela donne des échelons jusqu'à quelques kA.

Lorsque l'échelon est produit par un générateur à répétition, la durée de l'échelon et de l'intervalle entre échelons doit être choisie de façon à ce qu'aucune erreur additionnelle ne soit introduite par rapport à un choc unique.

De même, certains laboratoires ont avantageusement utilisé des générateurs d'échelons de courant à dispositifs semi-conducteurs.



Figure C.1 – Circuit de génération d'échelon de courant au moyen d'un câble coaxial





- 190 -

Figure C.2 – Circuit de génération d'échelon de courant au moyen d'un condensateur

où

C est le condensateur d'emmagasinage de l'énergie;

G est l'éclateur qui permet la génération de l'échelon;

D est le dispositif de conversion du courant.

C.2 Termes et définitions

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

C.2.1

niveau de référence (mesures de chocs uniquement) valeur moyenne, l_{R} , de la réponse indicielle sur la plage de $0.5 \times t_{min}$ à $2 \times t_{max}$ (voir Figure C.3)

NOTE Un système de mesure peut avoir plusieurs niveaux de référence; il peut, par exemple du fait de la variation du niveau de réponse, avoir différents coefficients de conversion correspondant à différentes formes d'onde (voir Figure (C.3).

C.2.2

origine d'une réponse indicielle

*0*₁

instant où la courbe de réponse entame pour la première fois une croissance monotone audessus de l'amplitude de bruit au niveau zéro de la réponse indicielle (unitaire) (voir Figure C.3)

NOTE Toutes les valeurs temporelles sont mesurées à partir de l'origine O1.

C.2.3

réponse indicielle unitaire

g(t)

réponse indicielle normalisée de façon à ce qu'un niveau de référence devienne égal à l'unité et que le niveau zéro devienne égal à zéro (Figure C.3)

NOTE Un système de mesure donné a une réponse indicielle unitaire pour chaque niveau de référence. L'origine O_1 de la réponse indicielle est identique à celle de la réponse indicielle unitaire.



- 191 -

Figure C.3 – Définition des paramètres de réponse par rapport à la réponse individuelle

Annexe D

(informative)

Méthode de convolution pour l'estimation du comportement dynamique à partir des mesures des réponses indicielles

D.1 Généralités

La méthode de convolution est utilisée pour évaluer la réponse dynamique d'un dispositif de conversion de courant de choc, d'un enregistreur numérique ou d'un système complet de mesure de courant de choc à partir de leurs réponses indicielles comme décrit dans l'Annexe C.

La méthode de convolution utilise la réponse indicielle du système de mesure pour calculer la forme d'onde du courant de choc en sortie à partir de la forme d'onde du courant de choc en entrée. Les erreurs entre les paramètres de choc de la forme d'onde en sortie et de la forme d'onde en entrée, peuvent être utilisées pour évaluer les caractéristiques du système de mesure pour une forme d'onde particulière à mesurer.

La méthode de convolution suppose que la réponse indicielle du système de mesure est correctement mesurée et que la forme d'onde en entrée utilisée dans le calcul est représentative des formes d'onde des courants de choc réels à mesurer.

D.2 Méthode de convolution

Si la forme d'onde du courant de choc en entrée et la réponse indicielle unitaire (normalisée) (Annexe C) d'un système de mesure du courant de choc sont respectivement $V_{in}(t)$ et g(t), la grandeur en sortie, $V_{out}(t)$, peut être exprimée par l'intégrale de convolution suivante (voir John G. Proakis et Dimitris G. Manolakis, cité dans la bibliographie):

$$V_{\text{out}}(t) = \int_{0}^{t} V_{\text{in}}(\tau) \times g(t-\tau) \times \mathrm{d}\tau$$
 (D.1)

où t est la durée et $V_{in}(t)$ est la première dérivée de la forme d'onde du courant de choc en entrée $V_{in}(t)$.

Si g(t) et $V_{in}(t)$ sont échantillonnés au même intervalle d'échantillonnage et si le nombre d'échantillons de g(t) est inférieur à celui de $V_{in}(t)$, l'intégrale de convolution continue (voir l'Equation (D.1)) réduit la forme causale de la somme de la convolution discrète:

$$V_{\text{out}}(i) = \sum_{k=0}^{i} V_{\text{in}}(k) \times g(i-k) \times \Delta t \quad i = 0, 1, 2, ..., n-1$$
 (D.2)

où

 $V_{out}(i)$ est la matrice de sorties discrètes;

 $V_{in}(i)$ est la prjemière dérivée de la matrice d'entrées;

g(i) est la matrice des réponses indicielles unitaires;

n est le nombre d'échantillons de la matrice d'entrées; et

Δ*t* est l'intervalle d'échantillonnage des matrices d'entrées et de sorties et de la matrice des réponses indicielles.

D.3 Procédure de calcul par la méthode de convolution

Cette procédure est fondée sur la somme de convolution discrète décrite par l'Equation (D.2). Elle est utilisée dans des calculs informatisés avec des formes d'onde de courants de choc numériques. La procédure permet d'estimer les erreurs entre les paramètres de choc des formes d'onde de sortie et d'entrée d'un système de mesure des courants de choc. La présente procédure décrit les principales étapes de calcul. Ces étapes sont les suivantes:

- a) Obtenir la matrice des formes d'onde de courants de choc en entrée $V_{in}(i)$ pour i = 0, 1, 2, ..., n-1, et calculer les paramètres correspondants des courants de choc.
- b) Il convient que la fréquence d'échantillonnage des formes d'onde de courants de choc en entrée soit identique à celle de la réponse indicielle unitaire, et que le nombre d'échantillons correspondant soit égal à celui de la réponse indicielle unitaire (voir l'étape b). Il convient que la forme d'onde en entrée soit lisse en réduisant la fréquence la plus élevée du bruit bien en-dessous de la fréquence de Nyquist (moitié de la fréquence d'échantillonnage de la matrice de courants de choc). Une matrice de formes d'onde lisses d'entrées et les paramètres de courant de choc correspondants peuvent être induits soit:
 - à partir d'une expression analytique du courant de choc, par exemple, la surimposition de deux fonctions exponentielles idéales. Les paramètres de courant de choc de cette forme d'onde peuvent être obtenus soit à partir de l'expression analytique, soit à partir du logiciel de calcul des courants de choc du système de mesure du courant de choc soumis à l'examen, soit
 - 2) à partir d'une forme d'onde réelle enregistrée, lissée au moyen d'un filtre numérique muni d'un passe-bas de précision ou d'un algorithme d'ajustement de courbe spline cubique par morceaux. Les paramètres de courant de choc de cette forme d'onde peuvent être obtenus au moyen d'un logiciel de calcul des courants de choc du système de mesure du courant de choc soumis à l'examen.
- c) Obtenir la première dérivée $V_{in}(i)$ pour i = 0, 1, 2, ..., n-1, de la forme d'onde du courant de choc en entrée $V_{in}(i)$ par dérivation numérique.
- d) Obtenir la matrice de réponses indicielles unitaires g(i) pour i = 1, 2, ..., m-1 et m = n + j, j étant le nombre de points avant l'origine de la réponse indicielle enregistrée O_1 .
 - 1) Obtenir la réponse indicielle unitaire par normalisation de la réponse indicielle mesurée (Annexe C). Pour obtenir une réponse indicielle unitaire à faible bruit à des fins de convolution, il est admis d'effectuer le moyennage de plusieurs enregistrements de réponses indicielles. Le lissage de la matrice des réponses indicielles unitaires g(i) est moins déterminant si l'Equation (D.2) est utilisée pour le calcul de la convolution et si la matrice de courants de choc $V_{in}(i)$ est déjà lissée.

NOTE 1 Pour des systèmes de mesure à haute intensité, une réponse indicielle ayant un temps de montée suffisamment court et un temps de queue suffisamment long peut être impossible à obtenir. Dans ce type de cas, une réponse indicielle approximative peut éventuellement être obtenue, en combinant un enregistrement court (utilisant le front) et un enregistrement long (utilisant la queue). Ces enregistrements peuvent avoir été obtenus par des méthodes différentes.

- Obtenir le niveau zéro, l₀, de la réponse indicielle en calculant la moyenne des échantillons de la matrice des réponses indicielles enregistrée s(i) avant de commencer l'étape.
- 3) Obtenir le niveau de référence, l_R, de la réponse indicielle en calculant la moyenne des échantillons de la matrice des réponses indicielles enregistrée s(i) sur une plage de temps qui comprend la durée du front la plus courte à laquelle le système de mesure doit être utilisé et allant jusqu'à une durée qui reflète la fréquence à laquelle le coefficient de conversion du dispositif de conversion a été déterminé.
- 4) Normaliser la matrice des réponses indicielles s(i) en une matrice provisoire des réponses indicielles unitaires, $g_0(i)$, en utilisant la formule suivante:

$$g_0(i) = \frac{s(i) - l_0}{l_{\mathsf{R}} - l_0} \tag{D.3}$$

- 5) Trouver l'amplitude du bruit au niveau zéro en établissant l'écart-type, d_0 , des échantillons de la matrice $g_0(i)$ avant de commencer l'étape. Par une recherche régressive à partir de l'extrémité de $g_0(i)$, trouver l'échantillon dont la valeur est supérieure à trois fois l'écart-type d_0 . L'instant de cet échantillon est défini comme étant l'origine O_1 , de $g_0(i)$. Donner à cet échantillon l'indice *j*.
- 6) Construire la réponse indicielle unitaire g(t) à partir de l'origine en éliminant les échantillons de $g_0(i)$ qui se trouvent avant l'origine, c'est-à-dire:

$$g(i-j) = g_0(i), \ i = j, \ \dots, \ m-1$$
 (D.4)

NOTE 2 L'enregistrement de $g_0(i)$ comprend m + j points. La réponse indicielle unitaire g(i-j) comprend n = m points après le retrait de j points avant l'origine O_{1} .

- e) Obtenir la matrice des grandeurs de sortie et la matrice correspondante de paramètres de courants de choc:
 - Obtenir la matrice de formes d'onde du courant de choc en sortie V_{out}(i) par calcul au moyen de l'Equation (D.2) soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel.
 - 2) Calculer les paramètres de courant de choc de $V_{out}(i)$ au moyen du logiciel de calcul de courant de choc du système de mesure du courant de choc.
 - Calculer les erreurs de V_{out}(i) comme la différence entre les paramètres de courant de choc de V_{out}(i) et V_{in}(i).

D.4 Contributions à l'incertitude

Les erreurs calculées par la méthode de convolution peuvent en principe être utilisées pour corriger les paramètres calculés. Cependant, cette correction nécessite a priori une connaissance de la forme d'onde, ce qui signifie qu'elle ne peut être fiable que si le courant de choc a une forme d'onde régulière connue. Les erreurs et leur dispersion pour différentes formes d'onde peuvent être utilisées comme contribution à l'incertitude de l'incertitude de mesure combinée du paramètre concerné. Il convient de calculer l'incertitude conformément au Guide ISO/CEI 98-3. L'Annexe A donne des recommandations concernant les calculs de l'incertitude, en utilisant également les exemples donnés en Annexe B.

D.5 Interprétation des erreurs calculées des paramètres de courant de choc

D.5.1 Erreur d'amplitude de crête

En général, le niveau unitaire de la réponse indicielle unitaire n'est pas constant. Par conséquent, l'erreur calculée de l'amplitude de crête est souvent significative si on la compare à l'erreur numérique du calcul convolutif, même si elle peut être faible par rapport à l'incertitude de mesure requise de l'amplitude de crête. Il convient que l'erreur relative calculée de l'amplitude de crête soit égale à la différence relative entre l'unité et la valeur de g(i) pour une durée environ égale à 2 fois la durée du front $g(i)_1$ du courant de choc en entrée $V_{in}(i)$. L'erreur calculée d'amplitude de crête peut être comparée à la réponse indicielle unitaire pour s'assurer que le calcul convolutif a été correctement effectué.

D.5.2 Erreur de durée du front

Le calcul convolutif peut révéler une modification de la forme d'onde du courant de choc due aux caractéristiques du système de mesure, et par conséquent l'amplitude de l'erreur de durée du front, qui ne peut pas être révélée par la réponse indicielle proprement dite. Le ralentissement de la réponse indicielle génère une durée du front du courant de choc en sortie plus importante. Cependant, la durée du front est également influencée par le surdépassement/sous-dépassement de la réponse indicielle. En fonction des positions dans la durée du sur-dépassement et du sous-dépassement de la réponse indicielle, la partie frontale de la forme d'onde du courant de choc peut prendre différentes formes qui entraînent une augmentation ou une réduction de la valeur de la durée du front.

D.5.3 Erreur de la durée jusqu'à mi-valeur

La durée jusqu'à mi-valeur est principalement affectée par la différence entre la valeur g(i) pour une durée égale à environ 2 fois la durée du front T_1 et la valeur g(i) pour une durée égale à T_2 du courant de choc évalué. Le calcul convolutif peut être utilisé pour estimer l'amplitude de l'erreur de T_2 , qui ne peut pas être directement estimée à partir de la réponse indicielle proprement dite.

Annexe E

(informative)

Contraintes liées à certaines formes d'onde

Il a été observé que certaines formes d'onde de courant, à l'origine utilisées pour les essais d'éléments non linéaires, ont également été appliquées à des éléments linéaires, ce qui peut entraîner un certain nombre de problèmes pour obtenir une forme d'onde normalisée. Par exemple, la forme d'onde 8/20 est définie dans le cadre des essais de parafoudre, lorsque le parafoudre est un élément fortement non linéaire. Pour des charges non linéaires, cette forme d'onde peut être facilement obtenue. Les paramètres applicables sont les suivants:

- valeur de crête: ±10 %;
- $T_1 = 8 \ \mu s \pm 10 \ \%;$
- $T_2 = 20 \ \mu s \pm 10 \ \%;$
- crête inverse: 20 % de la valeur de crête.

Cependant, dans le cas des charges linéaires, ces paramètres sont généralement irréalisables car, lorsqu'on emploie un circuit générateur utilisant uniquement des éléments R, L et C, il n'est possible d'obtenir qu'une très petite fraction de toutes les combinaisons de paramètres admissibles T_1 et T_2 .

Le calcul de la forme d'onde dans une condition de sous-dépassement inférieure à 20 % permet d'obtenir un rapport 2,7 $< T_2/T_1 < 3,8$ (voir S. Sato, T. Harada et M. Hanai, cité dans la bibliographie). La Figure E.1 présente les étendues de mesure effectives (zones grisées) de T_1 et T_2 et avec une tolérance admissible de 10 % et 20 % sur T_1 et T_2 , à la fois pour une inversion de polarité tolérée de 20 % et 30 %. Par exemple, pour déterminer $T_2 = 20 \ \mu$ s, on a pour T_1 une étendue comprise entre 6,4 μ s et 7,4 μ s avec une tolérance de ±20 % sur les paramètres temporels. Dans le cas d'une tolérance de ±10 %, l'étendue est seulement de 7,2 μ s à 7,4 μ s pour T_1 .

De ce fait, il est recommandé d'accepter des écarts sur des sous-dépassements plus importants lorsque les essais concernent uniquement des objets en essai linéaires, voir les Figures E.2 et E.3.



Figure E.1 – Zone grisée montrant les combinaisons réalisables de paramètres temporels pour le courant de choc 8/20 avec un sous-dépassement maximal de 20 % et une tolérance de 20 % sur les paramètres temporels



NOTE Les résultats peuvent également s'appliquer à des courants de choc de formes d'onde 1/2,5 et 4/10.

Figure E.2 – Zone limite des paramètres temporels réalisables en fonction du sousdépassement admissible pour des formes d'onde de courant de choc 8/20



30 / 80 choc



Figure E.3 – Zone limite des paramètres temporels réalisables en fonction du sousdépassement admissible pour un courant de choc 30/80

Annexe F

(informative)

Echauffement des résistances de mesure

Dans des conditions d'utilisation normales de courants de choc et/ou de courants de courte durée, les shunts de conversion de courant doivent dissiper une quantité considérable d'énergie en un temps si court que les conditions d'échauffement du matériau de la résistance sont virtuellement adiabatiques. Dans ces circonstances, l'échauffement Δv^{ϑ} et la variation de la résistance ΔR , peuvent être calculés de la manière suivante:

$$\Delta \vartheta = \frac{W}{m \times c}$$

$$\Delta R = \Delta \vartheta \times R \times \alpha$$

où

 $\Delta \vartheta$ est l'échauffement, exprimé en K;

- W est l'énergie dissipée dans le shunt de conversion de courant, exprimée en J;
- *m* est la masse du matériau de la résistance, exprimée en kg;
- c est la chaleur massique du matériau de la résistance, exprimée en J/(kg×K);
- *R* est la résistance du shunt de conversion de courant, exprimée en Ω ;

 ΔR est la variation de la résistance *R* exprimée en Ω ;

 α est le coefficient de température, exprimé en K⁻¹.

En cas de défaillance de l'objet en essai soumis, par exemple à un essai de courant de choc, l'énergie emmagasinée du générateur de chocs est principalement dissipée dans le shunt de conversion de courant. Il est suggéré que les caractéristiques du shunt soient telles que, même dans ce cas, l'échauffement ne dépasse pas 200 K.

En ce qui concerne l'élévation progressive de température associée à la répétition des applications de courant, l'échauffement total admissible dépend du coefficient de température du matériau de la résistance et de la classe de température du matériau isolant utilisé.

Annexe G (informative)

Détermination des valeurs efficaces d'un courant alternatif de courte durée

G.1 Caractérisation générale d'un courant alternatif de courte durée

Le schéma d'un circuit équivalent pour l'essai de courant de court-circuit est illustré à la Figure G.1. Ce schéma décrit la situation derrière un transformateur, montrant son inductance de fuite, *L*, mais ne tenant pas compte de l'inductance d'aimantation. Cependant, ce schéma ne décrit pas entièrement les conditions de court-circuit, au niveau ou à proximité des bornes d'un générateur, car ses réactances transitoires et sub-transitoires peuvent accroître de manière significative la valeur de crête initiale du courant de court-circuit.



Figure G.1 – Circuit équivalent d'essai de court-circuit

Pour le circuit illustré à la Figure G.1, avec un début du court circuit à t = 0 (c'est-à-dire que l'instant arbitraire de fermeture de l'interrupteur est pris comme la référence de temps zéro sur l'onde de tension), l'expression mathématique qui décrit le comportement du courant est donnée par application de la loi des tensions de Kirchhoff:

$$\hat{u} \times \sin(\omega t + \psi) = L \times \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} + R \times i_k$$
 (G.1)

où ψ est l'angle de l'onde de tension auquel l'interrupteur est fermé.

La résolution de cette équation différentielle donne lieu à l'expression suivante:

$$i_{k} = \hat{i}_{k} \times \left[\sin\left(\omega t + \psi - \varphi\right) - \sin\left(\psi - \varphi\right) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$
(G.2)

où

- $\hat{\imath}_k$ est la valeur de crête du courant;
- $\omega = 2\pi \times f$ est la pulsation, avec *f* étant la fréquence industrielle;
- φ est l'angle de phase (ou angle d'impédance): $\varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R}$ (G.3)

τ

est la constante

de temps:
$$au = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R}$$
 (G.4)

• ψ est l'angle de manœuvre, c'est-à-dire l'angle sur l'onde de tension, auquel l'interrupteur est fermé.

L'Equation (G.2) peut être divisée en deux parties. La première partie décrit la composante alternative en régime établi du courant de courte durée:

$$i_{kd} = \hat{\imath}_k \times \sin(\omega t + \psi - \varphi)$$
 (G.5)

La seconde partie décrit la décroissance de la composante continue du courant:

$$i_{dc} = -\hat{\imath}_{k} \times \sin(\psi - \varphi) \times e^{-\frac{t}{\tau}}$$
 (G.6)

Cette équation montre que la valeur maximale de la composante continue dépend également de la constante de temps $\frac{L}{R}$. Pour des raisons techniques, l'angle de phase (ou d'impédance) est souvent exprimé par $\cos \varphi$ (c'est-à-dire le facteur de puissance) à partir duquel la constante de temps $\frac{L}{R}$ peut être induite.

G.2 Valeur efficace vraie

Pour ce qui concerne la valeur efficace vraie d'un courant périodique, voir 7.2.2, et pour la valeur efficace vraie d'un événement, voir 9.2.2.

G.3 Composante alternative symétrique (valeur efficace)

La composante alternative symétrique du courant alternatif de court-circuit (tel que le courant de court-circuit présumé d'un circuit d'essai particulier exempt de toute impédance supplémentaire de l'objet en essai ou la valeur réelle du courant d'essai de court-circuit traversant l'objet en essai) est définie comme étant la valeur efficace décrite à la Figure G.2:



Figure G.2 – Composante alternative symétrique d'un courant alternatif de court-circuit

La composante symétrique du courant est $\frac{A_2}{2\sqrt{2}}$.

G.4 Méthode numérique d'obtention de la valeur efficace vraie par la règle du trapèze

Pour obtenir la valeur efficace vraie d'un courant alternatif périodique donné, il est en premier lieu nécessaire de calculer l'intégrale de l'expression suivante, dans un nombre entier de cycles:

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i^2(t) \, \mathrm{d}t}$$

L'aire de la fonction $i^2(t)$ au moyen de la règle du trapèze est donnée par:

$$A_i = \frac{h}{2} \times [i^2(t_i) + i^2(t_{i+1})]$$

où i = (0, ..., n-1).





La somme de toutes les aires partielles donne la valeur efficace vraie du courant:

$$A(n) = \frac{h}{2} \sum_{i=0}^{n-1} [i^2(t_i) + i^2(t_{i+1})] = \frac{h}{2} \times \left(i^2(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} i^2(t_i) + i^2(T) \right) = I_{\text{eff}}^2 \times T$$
$$\Rightarrow I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{h}{2T} \left(i^2(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} i^2(t_i) + i^2(T) \right)}$$

Pour obtenir une erreur faible qui soit acceptable dans cette intégration numérique, il est nécessaire d'utiliser un nombre suffisant d'échantillons n (par exemple 800 échantillons pour une forme d'onde de courant de 50 Hz).

G.5 Valeur efficace conventionnelle de la composante alternative

La valeur efficace conventionnelle I_{conv} de la composante alternative est déterminée au moyen de trois valeurs de crête consécutives $A(t_{i-1}, Y_{i-1})$, $B(t_i, Y_i)$, et $C(t_{i+1}, Y_{i+1})$. Cette méthode est également appelée méthode des trois crêtes,

où

t_i est l'instant temporel où la crête a lieu;

 Y_i est la valeur instantanée à l'instant t_i .



Figure G.4 – Méthode des trois crêtes

La valeur efficace I_{conv} est mesurée comme étant $\frac{[DD]}{2 \times \sqrt{2}}$. Cette valeur peut être obtenue sous forme graphique ou par calcul en utilisant les données numériques et la formule suivante:

$$I_{\rm conv} = \frac{\frac{A+C}{2} - B}{\frac{2}{2 \times \sqrt{2}}}$$

ou en calculant les deux lignes comme étant:

f_i(t) étant une ligne droite entre les valeurs de crête *A* et *C*, relativement à l'instant moyen *t_i*:

$$f_i(t) = a_i \times t_i + b_f$$

où

$$a_i = \frac{Y_{i+1} - Y_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

$$b_f = Y_{i+1} - a_i \times t_{i+1}$$
 ou $b_f = Y_{i-1} - a_i \times t_{i-1}$

• gi(t) étant une ligne droite parallèle à $f_i(t)$ passant par la valeur de crête B:

$$g_i(t) = a_i \times t_i + b_g \qquad b_g = Y_i - a_i \times t_i$$

G.6 Valeur efficace conventionnelle d'un courant d'arc

Pour éviter tout effet éventuel de la variation du courant et/ou de la fréquence, la valeur efficace d'un courant d'arc est obtenue à partir d'une moyenne non pondérée des valeurs efficaces (méthode des trois crêtes, comme décrit à l'Article G.5). Chaque valeur efficace est obtenue par glissement d'une crête à la précédente. Pour éviter les effets de bordure, le premier et, éventuellement, le dernier cycle (boucle) doivent être omis.



IEC 2201/10

Figure G.5 – Evaluation de la valeur efficace conventionnelle d'un courant d'arc par la méthode des trois crêtes

La valeur efficace d'un signal à N crêtes [1, ..., N] est donnée par l'expression suivante:

$$I = \frac{1}{N-4} \times \sum_{i=3}^{N-2} (X_i) \text{ ou}$$

$$I = \frac{1}{N-4} \times \frac{1}{\sqrt{8}} \times \sum_{i=3}^{N-4} (Z_i)$$

où

 X_i est la valeur efficace du courant d'arc au numéro de crête *i* et;

Z_i est la valeur crête à crête du courant d'arc au numéro de crête i.

Sous forme analytique, la valeur efficace est donnée pour un signal de N crêtes par l'expression suivante:

$$I = \frac{1}{N-4} \times \frac{1}{\sqrt{8}} \times \sum_{i=3}^{N-2} (a_i \times t_i + b_i - y_i)$$

où

- *t_i* est l'instant (abscisse des temps) du numéro de crête *i*;
- y_i est la valeur de crête du numéro de crête i;
- a_i est la pente de la ligne droite $f_i(t)$;
- b_i est l'origine de la ligne droite $f_i(t)$ à l'instant t = 0.

G.7 Valeur efficace équivalente d'un courant de courte durée pendant un court circuit d'une durée donnée

Si le courant de courte durée ne présente pas une valeur efficace symétrique constante, la valeur efficace équivalente peut être déterminée à partir de l'oscillogramme, au moyen de la méthode décrite ci-après:



Figure G.6 – Evaluation de la valeur efficace équivalente d'un courant de courte durée au cours d'un essai de court-circuit

- AA' et BB' est l'enveloppe du courant de court-circuit;
- CC' est le déplacement de la ligne zéro de la forme d'onde de courant, à partir de la ligne de zéro normal, à tout instant;
- $Z_0, ..., Z_{10}$ est la valeur efficace de la composante alternative de courant, à tout instant, mesurée à partir du zéro normal: la composante continue n'est pas prise en compte;
- *X*₀ est la valeur de crête de la composante alternative de courant à l'instant où le court-circuit est généré;
- BT est la durée (temps total) du court circuit (t_t) .

La durée totale t_t de l'essai est divisée en 10 parties égales par des verticales 0 – 0,1 –, …, 1 et la valeur efficace de la composante alternative du courant est mesurée au niveau de ces verticales.

Ces valeurs sont désignées par: $Z_0, Z_1, ..., Z_{10}$

où

$$Z = \frac{X}{\sqrt{2}}$$
 et

X est la valeur de crête de la composante alternative du courant.

La valeur efficace équivalente au cours de l'instant t_t est donnée par:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{30} \times \left[Z_0^2 + 4 \times \left(Z_1^2 + Z_3^2 + Z_5^2 + Z_7^2 + Z_9^2 \right) + 2 \times \left(Z_2^2 + Z_4^2 + Z_6^2 + Z_8^2 \right) + Z_{10}^2 \right]}$$

La composante continue du courant, représentée par CC' n'est pas prise en compte.

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

G.8 Détermination de l'angle d'impédance

L'angle d'impédance peut être obtenu par la mesure du courant dans un circuit d'essai ayant un angle de fermeture de 0°, au moyen des équations suivantes:

Le facteur de crête <u>k</u> peut être induit à partir du courant mesuré après décroissance de la composante continue:

$$\kappa = \frac{I_p}{\sqrt{2} \times I_{\text{eff}}^{"}}$$

ou

2,0

*I*_p est la valeur de crête (voir 9.2.1);

*I*_{eff} est la valeur efficace vraie du courant après décroissance de l'éventuelle composante continue (voir 9.2.3).

L'angle d'impédance est illustré sur le graphique de la Figure G.7 et peut être calculé à l'aide des équations suivantes:

$$\frac{R}{X} = \sqrt{\frac{\cos \varphi^2}{1 - \cos \varphi^2}}$$
$$\kappa = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X}\right)^2}} * e^{\frac{R}{X}\left(\frac{\pi}{2} + \arctan\frac{X}{R}\right)}\right]$$



Figure G.7 – Relation entre le facteur de crête, k, et le facteur de puissance $cos(\varphi)$

Annexe H

(informative)

Exemples de normes CEI relatives aux essais à haute intensité

Tableau H.1 – Liste d'essais types utilisant un courant alternatif de courte durée

Type d'essais	Référence à des normes CEI (exemples)
Essais de courant de tenue de crête et de courant de tenue de courte durée	CEI 60076-5 CEI 60439-2 CEI 60947-1, CEI 60947-2, CEI 6047-3 CEI 61230 CEI 61439-1 CEI 62271-1
Essais de fermeture et de coupure	CEI 60265-1 CEI 60947-1, CEI 60947-2, CEI 6047-3 CEI 62271-100, CEI 62271-102, I CEI 62271-104, CEI 62271-105
Essais de manœuvre de bobine d'inductance de shunt	CEI 62271-110
Essais de manœuvre en courant capacitif	CEI 62271-100
Essais synthétiques	CEI 62271-101
Essais de fusible de limitation du courant	CEI 60282-1

Type de matériel soumis à l'essai	Référence à des normes CEI	Type de choc	Tolérances sur les paramètres temporels
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 60099-4	1 / ≤ 20	T ₁ ±10 %
			T ₂ ≤20 μs
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 60099-4	4/10	(3,5 < T ₁ <4,5) μs
			T ₂ ±10 %
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 60099-4	8/20	(7 <t<sub>1 <9) μs (18 <t<sub>2 <22) μs</t<sub></t<sub>
Essai de parafoudres	Future CEI 61643-11		T ₁ ±10 %
			T ₂ ±10 %
Dispositifs électroniques	CEI 61000-4-5		$T_1 \pm 20 \%$ $T_2 \pm 20 \%$
Parafoudres connectés aux réseaux de télécommunications et de signalisation	CEI 61643-21		$T_1 \pm 20 \%$ $T_2 \pm 20 \%$
Dispositifs de protection contre les surtensions connectés aux réseaux de distribution basse tension			
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 60099-4	30/80	(25 < <i>T</i> ₁ <35) μs (70 < <i>T</i> ₂ <90) μs
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 60099-4	30-100 / (60-200)	
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 60099-4:2004, Tableaux 5 et 6	T _d de 500 μs, 1 000 μs ou 2 000 μs ou entre 2 000 μs et 3 200 μs	$T_1 \pm 20 \%$ $T_2 \pm 20 \%$
Dispositifs de protection contre les surtensions connectés aux réseaux de télécommunications et de signalisation	CEI 61643-21	5/300	$T_1 \pm 30 \%$ $T_2 \pm 20 \%$
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 62305-1	10/350	Non indiqué
Dispositifs de protection contre les surtensions connectés aux réseaux de télécommunications et de signalisation	CEI 61643-21	10/350 10/250	T ₁ ±30 % T ₂ ±20 %

Tableau H.2 – Liste d'essais types utilisant un courant de choc exponentiel

Tableau H.3 – Liste d'essais types utilisant un courant de choc rectangulaire

Type de matériel soumis à l'essai	Référence à des normes CEI	Type de choc
Essai de parafoudres sans éclateurs	CEI 60099-4:2004, Tableaux 5 et 6	T _d de 500 μs, 1 000 μs ou 2 000 μs ou entre 2 000 μs et 3 200 μs

Bibliographie

CEI 60050-151:2001, Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 151 : Dispositifs électriques et magnétiques

CEI 60050-300:2001, Vocabulaire Electrotechnique International – Mesures et appareils de mesure électriques et électroniques – Partie 311 : Termes généraux concernant les mesures – Partie 312 : Termes généraux concernant les mesures électriques – Partie 313 : Types d'appareils électriques de mesure – Partie 314 : Termes spécifiques selon le type d'appareil

CEI 60050-321:1986, Vocabulaire Electrotechnique International – Mesures et appareils de mesure électriques et électroniques – Partie 31 :Transformateurs de mesure

CEI 60076-5:2000, Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit

CEI 60099-4:2004, Parafoudres – Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateurs pour réseaux à courant alternatif

CEI 60265-1:1998, Interrupteurs à haute tension – Partie 1: Interrupteurs pour tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures à 52 kV

CEI 60282-1:2009, Fusibles à haute tension - Partie 1: Fusibles limiteurs de courant

CEI 60947-1:2007, Appareillage à basse tension – Partie 1: Règles générales

CEI 60947-2:2006, Appareillage à basse tension – Partie 2: Disjoncteurs

CEI 60947-3:2008, Appareillage à basse tension – Partie 3: Interrupteurs, sectionneurs, interrupteurs-sectionneurs et combinés-fusibles

CEI 61000-4-5, Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-5: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux ondes de choc

CEI 61083-1:2001, Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension - Partie 1: Prescriptions pour les appareils

CEI 61083-2:1996, Enregistreurs numériques pour les mesures pendant les essais de choc á haute tension – Partie 2: Evaluation du logiciel utilisé pour obtenir les paramètres de formes d'onde de choc

CEI 61180-2:1994, Techniques des essais à haute tension pour matériels à basse tension – Partie 2: Matériel d'essai

CEI 61230:2008, Travaux sous tension – Equipements portables de mise à la terre ou de mise à la terre et en court-circuit

CEI 61643-1:2005, Parafoudres basse tension – Partie 1: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Exigences et essais

CEI 61643-11, Parafoudres basse tension – Partie 11: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Exigences de fonctionnement et méthodes d'essais²

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

CEI 61643-21, Parafoudres basse tension – Partie 21: Parafoudres connectés aux réseaux de signaux et de télécommunications – Prescriptions de fonctionnement et méthodes d'essais

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

CEI 62271-100:2008, Appareillage à haute tension – Partie 100: Disjoncteurs à courant alternatif

CEI 62271-101, Appareillage à haute tension - Partie 101: Essais synthétiques

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

CEI 62271-103, Appareillage à haute tension – Partie 103: Interrupteurs pour tensions assignées supérieures à 1 kV et jusqu'à 52 kV inclus³

CEI 62271-104, Appareillage à haute tension – Partie 104: Interrupteurs à courant alternatif pour tensions assignées égales ou supérieures à 52 kV

CEI 62271-105:2002, Appareillage à haute tension – Partie 105: Combinés interrupteursfusibles pour courant alternatif

CEI 62271-110:2009, Appareillage à haute tension – Partie 110: Manœuvre de charges inductives

CEI 62305-1, Protection contre la foudre – Partie 1: Principes généraux

ISO/CEI 17025:2005, Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais

Guide ISO/CEI 99:2007, Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)

European Association of National Metrology Institutes (EUROMET), Metrology in short: Euromet, ISBN: 87-988154-1-2 (disponible uniquement en anglais)

JCGM 100:2008 (GUM 1995 avec des corrections mineures): *Evaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, http://www.bipm.org/en/publications/guides*

JCGM 101:2008, Evaluation des données de mesure – Supplément 1 du « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » – Propagation de distributions par une méthode de Monte Carlo, http://www.bipm.org/en/publications/guides

JCGM 104: 2009, Evaluation des données de mesure – Une introduction au « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » et aux documents qui le concernent, http://www.bipm.org/en/publications/guides

JCGM 200:2008, Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), http://www.bipm.org/en/publications/guides

SATO, S., HARADA, T. and HANAI, M. "IEC 60060-1 Requirements in Impulse Current Waveform Parameters", Proceedings of the 7th International Power Engineering Conference, CD-ROM, No.TM-3.4, pp.1-5, Singapore, (2005)

³ A l'étude.

SATO, Shuji, HARADA, Tatsuya and HANAI, Masahiro, "IEC 60060-1 Requirements in Impulse Current Waveform Parameters", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 6, Art 7. pp.1-12, 2006, June

SATO, Shuji, HARADA, Tatsuya, YOKOYAMA, Taizou, SAKAGUCHI, Sumiko, EBANA, Takao and SAITO, Tatsunori, "Impulse Current Waveform Compliance with IEC 60060-1", IEEJ Trans. FM, Vol. 125, No.8, pp.609-613, (2005)

PROAKIS, John G. and MANOLAKIS, Dimitris G. "*Introduction to Digital Signal Processing*", Macmillan Publishing Company, New York, 1988.

RUNGIS, Y. Li, J. and PFEFFER, A. "The Voltage and Time Parameter Measurement Uncertainties of a Large Damped Capacitor Divider due to its Non-ideal Step Response", proceedings of 15th International Symposium on High Voltage Engineering, 27 – 31 August 2007, Ljubljana, Slovenia

MALEWSKI, R., NGUYEN, C.T., FESER, K., HYLTÉN-CAVALLIUS, N., "Elimination of the skin effect error in heavy current shunts", IEEE Transactions, PAS-100, 1981

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

Copyrighted material licensed to BR Demo by Thomson Reuters (Scientific), Inc., subscriptions.techstreet.com, downloaded on Nov-28-2014 by James Madison. No further reproduction or distribution is permitted. Uncontrolled when print

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