

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-4

Première édition
First edition
2002-06

Transformateurs de puissance –

Partie 4:

**Guide pour les essais au choc de foudre
et au choc de manoeuvre –**

**Transformateurs de puissance
et bobines d'inductance**

Power transformers –

Part 4:

**Guide to the lightning impulse and
switching impulse testing –**

Power transformers and reactors



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60076-4:2002

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI** (www.iec.ch)
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/catlg-f.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/JP.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

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

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- **IEC Web Site** (www.iec.ch)
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/catlg-e.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/JP.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-4

Première édition
First edition
2002-06

Transformateurs de puissance –

Partie 4:

**Guide pour les essais au choc de foudre
et au choc de manoeuvre –
Transformateurs de puissance
et bobines d'inductance**

Power transformers –

Part 4:

**Guide to the lightning impulse and
switching impulse testing –
Power transformers and reactors**

© IEC 2002 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XB

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives	10
3 Généralités	12
4 Formes d'onde spécifiées	12
5 Circuit d'essai	12
6 Etalonnage	16
7 Essais d'impulsion de choc de foudre	16
7.1 Formes d'onde	16
7.2 Impulsions hachées sur la traîne	18
7.3 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances	20
7.4 Méthodes d'essai	22
7.5 Enregistrement des essais	24
8 Essais d'impulsion de choc de manœuvre	30
8.1 Prescriptions particulières	30
8.2 Transformateurs	30
8.3 Bobines d'inductance	38
9 Interprétation des oscillogrammes ou des enregistrements numériques	42
9.1 Impulsion de choc de foudre	42
9.2 Impulsion de choc de manœuvre	46
10 Traitement numérique, comprenant l'analyse de fonction de transfert	48
11 Rapports d'essai de l'impulsion de choc	52
Annexe A (informative) Principes de contrôle de la forme d'onde	62
Annexe B (informative) Oscillogrammes et enregistrements numériques typiques	76
Figure 1 – Circuit d'essai d'impulsion de choc typique	54
Figure 2 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de foudre et méthodes applicables de détection de défaillances	56
Figure 3 – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de transformateur et de bobine d'inductance	58
Figure 4 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de manœuvre et méthodes de détection de défaillances	60
Figure A.1 – Contrôle de la forme d'onde pour des enroulements d'impédance élevée	62
Figure A.2 – Contrôle de la queue d'onde pour des enroulements d'impédance faible	66
Figure A.3 – Oscillation amortie	68
Figure A.4 – Effets dus à la courte longueur de la queue d'onde	72
Figure A.5 – Enroulement mis à la terre par une résistance	74
Figure A.6 – Mise à la terre par résistance des enroulements à basse d'impédance	74
Figure B.1 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage ligne au neutre à travers l'enroulement haute tension du transformateur rotatif 400 kV	80
Figure B.2 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre disques à l'entrée de l'enroulement haute tension du transformateur 115 kV	82

CONTENTS

FOREWORD	7
1 Scope	11
2 Normative references	11
3 General	13
4 Specified waveshapes	13
5 Test circuit	13
6 Calibration	17
7 Lightning impulse tests	17
7.1 Waveshapes	17
7.2 Impulses chopped on the tail	19
7.3 Terminal connections and applicable methods of failure detection	21
7.4 Test procedures	23
7.5 Recording of tests	25
8 Switching impulse tests	31
8.1 Special requirements	31
8.2 Transformers	31
8.3 Reactors	39
9 Interpretation of oscillograms or digital recordings	43
9.1 Lightning impulse	43
9.2 Switching impulse	47
10 Digital processing, including transfer function analysis	49
11 Impulse test reports	53
Annex A (informative) Principles of waveshape control	63
Annex B (informative) Typical oscillograms and digital recordings	77
Figure 1 – Typical impulse test circuit	55
Figure 2 – Lightning impulse test terminal connections and applicable methods of failure detection	57
Figure 3 – Transformer and reactor switching impulse waveshapes	59
Figure 4 – Switching impulse test terminal connections and methods of failure detection	61
Figure A.1 – Waveshape control for high-impedance windings	63
Figure A.2 – Wavetail control for low impedance windings	67
Figure A.3 – Damped oscillation	69
Figure A.4 – Effects due to short length of wavetail	73
Figure A.5 – Winding earthed through a resistor	75
Figure A.6 – Resistance earthing of low-impedance windings	75
Figure B.1 – Lightning impulse, full-wave failure – Line-to-neutral breakdown across high-voltage winding of 400 kV generator transformer	81
Figure B.2 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between discs at entrance to high-voltage winding of 115 kV transformer	83

Figure B.3 – Impulsion de choc de foudre, claquage entre couches, dans l'enroulement à prises à pas grossier d'un transformateur 400/220 kV	84
Figure B.4 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre les fils de deux sections 1,1 % de l'enroulement à prises extérieur du transformateur rotatif 400 kV	86
Figure B.5 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage court-circuitant une section de l'enroulement à prises à pas fin d'un transformateur 220 kV	88
Figure B.6 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre les conducteurs parallèles dans un enroulement principal à haute tension d'un transformateur 220/110 kV	90
Figure B.7 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre clinquants de bague 66 kV sur l'enroulement essayé	92
Figure B.8 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée – Claquage entre spires dans l'enroulement principal à haute tension d'un transformateur 115 kV	94
Figure B.9 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée – Claquage entre spires dans un enroulement à prises à pas fin d'un transformateur 220 kV	96
Figure B.10 – Impulsion hachée de choc de foudre – Impulsions à différents niveaux de tension avec des temps de hachage identiques, lors des essais d'un transformateur 115 kV	98
Figure B.11 – Impulsion hachée de choc de foudre – Effets des différences dans les temps de hachage lors des essais d'un transformateur 220 kV	100
Figure B.12 – Pleine impulsion de choc de foudre – Effet des résistances non linéaires incorporées dans la sortie du neutre du changeur de prises en charge, d'un transformateur avec des enroulements séparés	102
Figure B.13 – Pleine impulsion de choc de foudre – Effet des différences de démarrage des étages du générateur à différents niveaux de tension, lors des essais d'un transformateur 400 kV	104
Figure B.14 – Impulsion de choc de manœuvre – Essai satisfaisant sur un transformateur rotatif triphasé 400 kV	106
Figure B.15 – Impulsion de choc de manœuvre – Claquage par amorçage axial de l'enroulement principal à haute tension d'un transformateur rotatif monophasé 525 kV	108
Figure B.16 – Impulsion de choc de manœuvre – Essai satisfaisant sur une bobine d'inductance monophasée 525 kV, 33 Mvar	110
Figure B.17 – Impulsion de choc de manœuvre – Comparaison de la fonction de transfert d'une pleine onde et d'une onde hachée	112
Figure B.18 – Pleine impulsion de choc de foudre – Evaluation d'une forme d'onde non normalisée – Influence des algorithmes de lissage intégrés dans les numériseurs	114
Figure B.19 – Pleine impulsion de choc de foudre – Forme d'onde non normalisée, oscillations superposées avec amplitude >50 % et fréquence <0,5 MHz	114
Figure B.20 – Impulsion hachée de choc de foudre – Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche	116
Figure B.21 – Pleine impulsion de choc de foudre – Forme d'onde non normalisée, comparaison de formes d'onde non normalisées avec des numériseurs de différentes fabrications à partir du même enregistrement	118
Figure B.22 – Pleine impulsion de choc de foudre – Problème de circuit d'essai provoqué par un amorçage à la terre d'un câble de mesure	120
Figure B.23 – Pleine impulsion de choc de foudre – Oscillogramme de défaillance montrant un amorçage de fil de changeur de prises entre prises et un amorçage entre enroulement des pas grossier et fin	122
Tableau B.1 – Sommaire des exemples illustrés par les oscillogrammes et les enregistrements numériques	76

Figure B.3 – Lightning impulse, interlayer breakdown in coarse-step tapping winding of a 400/220 kV transformer.....	85
Figure B.4 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between leads of two 1,1 % sections of outside tapping winding of 400 kV generator transformer.....	87
Figure B.5 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown short-circuiting one section of the fine-step tapping winding of a 220 kV transformer	89
Figure B.6 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between parallel conductors in a multi-conductor main high-voltage winding of a 220/110 kV transformer.....	91
Figure B.7 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between foils of 66 kV bushing on tested winding.....	93
Figure B.8 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in the main high-voltage winding of a 115 kV transformer	95
Figure B.9 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in a fine-step tapping winding of a 220 kV transformer	97
Figure B.10 – Chopped lightning impulse – Impulses at different voltage levels with identical times to chopping when testing a 115 kV transformer	99
Figure B.11 – Chopped lightning impulse – Effects of differences in times to chopping when testing a 220 kV transformer.....	101
Figure B.12 – Full lightning impulse – Effect of non-linear resistors embodied in neutral end on-load tap-changer of a transformer with separate windings.....	103
Figure B.13 – Full lightning impulse – Effect of generator firing differences at different voltage levels when testing a 400 kV transformer.....	105
Figure B.14 – Switching impulse – Satisfactory test on a 400 kV three-phase generator transformer	107
Figure B.15 – Switching impulse – Breakdown by axial flashover of the main high-voltage winding of a 525 kV single-phase, generator transformer.....	109
Figure B.16 – Switching impulse – Satisfactory test on a 33 Mvar, 525 kV single-phase shunt reactor.....	111
Figure B.17 – Lightning impulse – Comparison of the transfer function of a full wave and a chopped wave	113
Figure B.18 – Full lightning impulse – Evaluation of a non-standard waveshape – Influence of in-built smoothing algorithms in digitizers	115
Figure B.19 – Full lightning impulse – Non-standard waveshape, superimposed oscillations with >50 % amplitude and frequency <0,5 MHz.....	115
Figure B.20 – Chopped lightning impulse – Non-standard chopped wave on a layer type winding	117
Figure B.21 – Full lightning impulse – Non-standard waveshape, comparison of non-standard waveshapes by digitizers of different make from the same recording.....	119
Figure B.22 – Full lightning impulse – Test-circuit problem caused by a sparkover to earth from a measuring cable.....	121
Figure B.23 – Full lightning impulse – Failure digital recordings of a flashover between tap leads of a tap changer and of a flashover between coarse and fine tapping winding.....	123
Table B.1 – Summary of examples illustrated in oscillograms and digital recordings	77

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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 60076-4 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Cette norme internationale annule et remplace la CEI 60722 publiée en 1982 dont elle constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/413/FDIS	14/446/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 3.

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –

**Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing –
Power transformers and reactors**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60076-4 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This International Standard cancels and replaces IEC 60722 published in 1982 and constitutes a technical revision of that document.

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

FDIS	Report on voting
14/413/FDIS	14/446/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 3.

Annexes A and B are for information only.

La CEI 60076 se compose des parties suivantes, sous le titre général *Transformateurs de puissance*:

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Echauffement
- Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air
- Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance
- Partie 5: Tenue au court-circuit
- Partie 8: Guide d'application
- Partie 10: Détermination des niveaux de bruit (disponible en anglais seulement)

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2007. A cette date, la publication sera

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-4:2002

IEC 60076 consists of the following parts, under the general title *Power transformers*:

- Part 1: General
- Part 2: Temperature rise
- Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- Part 4: Guide to lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors
- Part 5: Ability to withstand short-circuit
- Part 8: Application guide
- Part 10: Determination of sound levels

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2007. At this date, the publication will be

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-4:2002

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 donne des directives et des commentaires explicatifs sur les méthodes d'essais d'impulsions de choc de foudre et de manœuvre existantes pour les transformateurs de puissance, afin de compléter les prescriptions de la CEI 60076-3. Il est également généralement applicable aux essais des bobines d'inductance (voir la CEI 60289): Les modifications aux méthodes des transformateurs de puissance sont indiquées, si nécessaire.

Des informations sont données sur les formes d'onde, les circuits d'essai comprenant les connexions d'essai, les pratiques de mise à la terre, les méthodes de détection de défaillance, les méthodes d'essai, les techniques de mesurage et l'interprétation des résultats.

Partout où elles sont applicables, les techniques d'essai sont celles qui sont recommandées par la CEI 60060-1 et la CEI 60060-2.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais*

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

CEI 60076-3, *Transformateurs de puissance – Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

CEI 60289, *Bobines d'inductance*

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

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

POWER TRANSFORMERS –

Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors

1 Scope

This part of IEC 60076 gives guidance and explanatory comments on the existing procedures for lightning and switching impulse testing of power transformers to supplement the requirements of IEC 60076-3. It is also generally applicable to the testing of reactors (see IEC 60289), modifications to power transformer procedures being indicated where required.

Information is given on waveshapes, test circuits including test connections, earthing practices, failure detection methods, test procedures, measuring techniques and interpretation of results.

Where applicable, the test techniques are as recommended in IEC 60060-1 and IEC 60060-2.

2 Normative references

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

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

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

IEC 60076-3, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

IEC 60289, *Reactors*

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

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

3 Généralités

La présente norme est principalement basée sur l'utilisation des générateurs conventionnels d'impulsion de choc d'essais de foudre et de manœuvre des transformateurs et des bobines d'inductance. La pratique de la génération d'impulsion de choc de manœuvre avec la décharge d'un condensateur séparé dans un enroulement de tension intermédiaire ou de basse tension est également applicable. Toutefois la méthode qui met en oeuvre une inductance additionnelle en série avec le condensateur, pour donner des oscillations légèrement amorties transférées dans l'enroulement haute tension, n'est pas applicable.

Les moyens alternatifs de génération d'impulsion de choc de manœuvre ou de simulation, tels que l'interruption de courant continu dans un enroulement de tension intermédiaire ou de basse tension ou l'application d'une partie de période de la tension à la fréquence du réseau, ne sont pas traités, car ces méthodes ne sont pas applicables d'une manière aussi générale.

Les différentes considérations dans le choix des circuits d'essai (connexions des raccordements) pour la foudre et des essais de choc de manœuvre s'appliquent pour des transformateurs et des bobines d'inductance. Sur des transformateurs, tous les raccordements et les enroulements peuvent être essayés en impulsion de choc de foudre à des niveaux spécifiques et indépendants. Cependant, en essais d'impulsion de choc de manœuvre, en raison de la tension transférée par magnétisme, un niveau d'essai spécifié ne peut être obtenu que sur un seul enroulement (voir la CEI 60076-3).

Alors que, sur les bobines d'inductance, l'essai d'impulsion de choc de foudre est semblable à celui effectué sur des transformateurs, c'est-à-dire que toutes les bornes peuvent être essayées séparément, d'autres facteurs interviennent et différents problèmes apparaissent pour les essais d'impulsion de choc de manœuvre. Par conséquent, dans cette norme, les essais d'impulsion de choc de foudre sont couverts par un texte commun, à la fois pour les transformateurs et les bobines d'inductance, alors que les essais d'impulsion de choc de manœuvre sont traités séparément pour les deux types d'appareils.

4 Formes d'onde spécifiées

Les formes d'onde de tension à utiliser normalement pendant les essais d'impulsion de choc de foudre et de manœuvre sur les transformateurs et les bobines d'inductance sont donnés dans la CEI 60076-3 et les méthodes pour leur détermination figurent dans la CEI 60060-1.

5 Circuit d'essai

L'aménagement physique des équipements d'essai, de l'objet en essai et des circuits de mesure peut être divisé en trois circuits principaux:

- le circuit principal comprenant le générateur d'impulsion, les composants additionnels de mise en forme de l'onde et l'objet en essai;
- le circuit de mesure de tension;
- éventuellement le circuit de hachage.

Cet aménagement de base est donné à la figure 1.

3 General

This standard is primarily based on the use of conventional impulse generators for both lightning and switching impulse testing of transformers and reactors. The practice of switching impulse generation with discharge of a separate capacitor into an intermediate or low-voltage winding is also applicable. However, the method which employs an additional inductance in series with the capacitor to provide slightly damped oscillations transferred into the high-voltage winding is not applicable.

Alternative means of switching impulse generation or simulation such as d.c. current interruption on an intermediate or low-voltage winding or the application of a part-period of power frequency voltage are not discussed since these methods are not as generally applicable.

Different considerations in the choice of test circuits (terminal connections) for lightning and switching impulse tests apply for transformers and reactors. On transformers, all terminals and windings can be lightning impulse tested to specific and independent levels. In switching impulse testing, however, because of the magnetically transferred voltage, a specified test level may only be obtained on one winding (see IEC 60076-3).

Whilst, on reactors, lightning impulse testing is similar to that on transformers, i.e., all terminals can be tested separately, different considerations apply and different problems arise in switching impulse testing. Hence, in this standard, lightning impulse testing is covered by a common text for both transformers and reactors whilst switching impulse testing is dealt with separately for the two types of equipment.

4 Specified waveshapes

The voltage waveshapes to be used normally during lightning and switching impulse testing of transformers and reactors are given in IEC 60076-3 and the methods for their determination are given in IEC 60060-1.

5 Test circuit

The physical arrangement of test equipment, test object and measuring circuits can be divided into three major circuits.

- the main circuit including the impulse generator, additional waveshaping components and the test object;
- the voltage measuring circuit;
- the chopping circuit where applicable.

This basic arrangement is shown in figure 1.

Les paramètres suivants influencent la forme d'onde de l'impulsion:

- a) la capacité effective C_t , et l'inductance de l'objet en essai, L_t ; C_t est constante pour une conception donnée et pour une forme d'onde donnée, L_t est également une constante pour une conception donnée. Cependant, L_t effective peut être influencée par le traitement du raccordement. Elle varie entre l'inductance de fuite, L_s , pour les bornes court-circuitées et L_o pour les bornes en circuit ouvert. Plus de détails à cet égard sont donnés en 7.1 et 7.3 et à l'annexe A;
- b) la capacité du générateur C_g ;
- c) les composants de mise en forme de l'onde, internes et externes au générateur, R_{si} , R_{se} , R_p , C_L (plus éventuellement, l'impédance d'un diviseur de tension Z_1);
- d) l'inductance et la capacité parasite du générateur et le circuit d'essai complet;
- e) éventuellement les équipements de hachage.

Le temps d'attaque T_1 est déterminé principalement par la combinaison de la capacité effective en surtension de l'objet en essai, y compris C_L , et des résistances série internes et externes du générateur.

Le temps à demi-valeur T_2 des impulsions de choc de foudre, est principalement déterminé par la capacité du générateur, l'inductance de l'objet en essai et la résistance de décharge du générateur ou de toute autre résistance parallèle. Cependant, il y a des cas où la résistance série aura également un effet significatif sur la queue d'onde, par exemple des enroulements d'inductance extrêmement faible. Pour les impulsions de choc de manœuvre, d'autres paramètres interviennent; ceux-ci sont traités à l'article 8.

Les équipements d'essai utilisés pour les applications d'impulsion de choc de foudre et de manœuvre sont fondamentalement identiques. Les différences portent uniquement sur des détails, comme les valeurs de résistances et de condensateurs (et les connexions bornes de l'objet en essai).

Pour satisfaire aux différentes prescriptions de forme d'onde pour les impulsions de choc de foudre et de manœuvre, une attention particulière doit être accordée au choix des paramètres du générateur d'impulsion, tels que capacité et résistances (parallèles) série et de décharge. Pour les impulsions de choc de manœuvre, de valeurs élevées des résistances série et/ou des condensateurs de charge peuvent être nécessaires, dont la conséquence sera une réduction significative de l'efficacité.

Alors que la tension de sortie du générateur d'impulsion est déterminée par les niveaux d'essai des enroulements en rapport avec leur plus haute tension U_m donnée par les équipements pour l'objet en essai, le volume de stockage d'énergie requis dépend essentiellement des impédances inhérentes à l'objet en essai.

Une brève explication des principes du contrôle de la forme d'onde est donnée en annexe A.

L'aménagement de l'installation d'essai, de l'objet en essai et des câbles d'interconnexion, des brides de mise à la terre et autres équipements, est limité par l'espace disponible dans la salle d'essai et, en particulier, par l'effet de proximité de toutes les structures. Pendant les essais d'impulsion, le potentiel ne peut pas être supposé nul partout dans les systèmes de mise à la terre du fait des valeurs élevées et des taux importants de variation des courants et des tensions d'impulsion et des impédances finies mises en jeu. Par conséquent, le choix d'une terre de référence appropriée est important.

The following parameters influence the impulse waveshape;

- a) the effective capacitance C_t , and inductance of the test object, L_t ; C_t is constant for any given design and any given waveshape, L_t is also a constant for any given design. The effective L_t , however, may be influenced by the terminal treatment. It varies between the leakage inductance L_s for short-circuited terminals and L_o for open-circuited terminals. More details in this respect are given in 7.1 and 7.3 and in annex A;
- b) the generator capacitance C_g ;
- c) waveshaping components, both internal and external to the generator, R_{si} , R_{se} , R_p , C_L (plus, where applicable, the impedance of a voltage divider Z_1);
- d) the stray inductance and capacitance of the generator and the complete test circuit;
- e) chopping equipment, where applicable.

The front time T_1 is determined mainly by combination of the effective surge capacitance of the test object, including C_L , and the generator internal and external series resistances.

The time to half-value T_2 is, for lightning impulses, primarily determined by the generator capacitance, the inductance of the test object and the generator discharge resistance or any other parallel resistance. However, there are cases, for example windings of extremely low inductance, where the series resistance will have a significant effect also on the wavetail. For switching impulses, other parameters apply; these are dealt with in clause 8.

The test equipment used in lightning and switching impulse applications is basically the same. Differences are in details only, such as values of resistors and capacitors (and the terminal connections of the test object).

To meet the different requirements of the waveshape for lightning and switching impulses, due consideration has to be given to the selection of the impulse generator parameters, such as capacitance and series and discharge (parallel) resistances. For switching impulses, large values of series resistors and/or load capacitors may be necessary, which will result in significant reduction of the efficiency.

While the output voltage of the impulse generator is determined by the test levels of the windings with respect to their highest voltage for equipment U_m for the test object, the required energy storage capability is essentially dependent on the inherent impedances of the test object.

A brief explanation of the principles of waveshape control is given in annex A.

The arrangement of the test plant, test object and the interconnecting cables, earthing strips, and other equipment is limited by the space in the test room and, particularly, the proximity effect of any structures. During impulse testing, zero potential cannot be assumed throughout the earthing systems due to the high values and rates of change of impulse currents and voltages and the finite impedances involved. Therefore, the selection of a proper reference earth is important.

Il convient que le chemin de retour du courant entre l'objet en essai et le générateur d'impulsion soit à basse impédance. Il est de bonne pratique de relier correctement ce chemin de retour du courant au système général de mise à la terre de la salle d'essai, de préférence près de l'objet en essai. Il convient que ce point de connexion soit utilisé comme la terre de référence, et pour obtenir une bonne mise à la terre de l'objet en essai, il convient de le relier à la terre de référence par un ou plusieurs conducteurs à basse impédance (voir la CEI 60060-2).

Il convient que le circuit de mesure de tension, qui est une boucle séparée de l'objet en essai véhiculant uniquement le courant de mesure et non pas une partie importante du courant d'impulsion traversant les enroulements en essai, soit également relié efficacement à la même terre de référence.

Dans l'essai d'impulsion de choc de manœuvre, puisque les taux de variation des tensions et des courants d'impulsion sont réduits de manière importante par rapport à ceux d'un essai d'impulsion de choc de foudre et qu'aucun circuit de hachage n'est impliqué, les problèmes des gradients de potentiels autour du circuit d'essai et qui concernent la terre de référence sont moins critiques. Néanmoins, nous suggérons qu'à titre de précaution, les mêmes pratiques en matière de mise à la terre que celles utilisées pour l'essai d'impulsion de choc de foudre soient suivies.

6 Etalonnage

Cette norme n'est pas destinée à donner des recommandations pour les systèmes de mesure ou leur étalonnage mais, bien entendu, il convient que l'appareillage utilisé soit approuvé selon la CEI 60060. Avant un essai, une vérification globale du circuit d'essai et du système de mesure peut être exécutée à une tension plus faible que le niveau de tension réduite. Pour cette vérification, la tension peut être déterminée au moyen d'un éclateur à sphères ou par une mesure comparative avec un autre dispositif approuvé. Lors de l'utilisation d'un éclateur à sphères, il convient d'admettre que cela est seulement une vérification et ne remplace pas l'étalonnage du système de mesure approuvé, exécuté périodiquement. Après toute vérification, il est important que, ni le circuit de mesure, ni le circuit d'essai ne soit modifié, excepté pour le démontage d'un appareil pour vérification.

Des informations sur des types de diviseurs de tension, leurs applications, précision, étalonnage et vérification sont données dans la CEI 60060-2.

7 Essais d'impulsion de choc de foudre

7.1 Formes d'onde

Il est quelquefois impossible d'obtenir les valeurs de forme d'onde spécifiées. Lors de l'essai d'impulsion de choc sur de gros transformateurs de puissance et sur des bobines d'inductance de faible inductance d'enroulement et/ou de forte capacité en surtension, des tolérances plus larges peuvent devoir être acceptées.

La capacité en surtension du transformateur en essai étant constante, la résistance série peut devoir être réduite afin d'essayer d'obtenir le temps d'attaque correct T_1 ou la vitesse de montée correcte, mais il convient que la réduction ne soit pas de nature à entraîner des oscillations sur la crête de l'onde de tension qui deviendraient excessives. Si on considère qu'il est souhaitable d'avoir un temps d'attaque court (de préférence dans les limites spécifiées), alors les oscillations et/ou les dépassements supérieurs à $\pm 5\%$ de la tension de crête, autorisés par la CEI 60060-1, peuvent devoir être acceptés. Dans un tel cas, un compromis entre l'importance des oscillations autorisées et le temps d'attaque qui peut être obtenu, est nécessaire. En général, il convient de viser des oscillations inférieures ou égales à $\pm 10\%$, même avec des allongements du temps d'attaque, au besoin et comme convenu entre le constructeur et l'acheteur. La valeur de la tension d'essai est déterminée en accord avec les principes de la CEI 60060-1.

The current return path between the test object and the impulse generator should be of low impedance. It is good practice to firmly connect this current return path to the general earth system of the test room, preferably close to the test object. This point of connection should be used as reference earth and to attain good earthing of the test object it should be connected to the reference earth by one or several conductors of low impedance (see IEC 60060-2).

The voltage measuring circuit, which is a separate loop of the test object carrying only the measuring current and not any major portion of the impulse current flowing through the windings under test, should also be effectively connected to the same reference earth.

In switching impulse testing, since the rates of change of the impulse voltages and currents are much reduced compared with those in a lightning impulse test and no chopping circuit is involved, the problems of potential gradients around the test circuit and with respect to the reference earth are less critical. Nevertheless, it is suggested that, as a precaution, the same earthing practices should be followed as used for lightning impulse testing.

6 Calibration

It is not the intention of this standard to give any recommendation on measuring systems or their calibration but, of course, the apparatus which is used should be approved in accordance with IEC 60060. Before a test, an overall check of the test circuit and the measuring system may be performed at a voltage lower than the reduced voltage level. In this check, voltage may be determined by means of a sphere gap or by comparative measurement with another approved device. When using a sphere gap, it should be recognized that this is only a check and does not replace the periodically performed calibration of the approved measuring system. After any check has been made, it is essential that neither the measuring nor the test circuit is altered except for the removal of any devices for checking.

Information on types of voltage dividers, their applications, accuracy, calibration and checking is given in IEC 60060-2.

7 Lightning impulse tests

7.1 Waveshapes

The values of waveshape specified may not always be obtainable. In the impulse testing of large power transformers and reactors, of low winding inductance and/or high surge capacitance, wider tolerances may have to be accepted.

The surge capacitance of the transformer under test being constant, the series resistance may have to be reduced in an attempt to obtain the correct front time T_1 or rate of rise, but the reduction should not be to the extent that oscillations on the crest of the voltage wave become excessive. If it is considered desirable to have a short front time (preferably within the specified limits) then oscillations and/or overshoots greater than $\pm 5\%$ of the peak voltage, allowed in IEC 60060-1, may have to be accepted. In such an event, a compromise between the extent of allowable oscillations and the obtainable front time is necessary. In general, oscillations not greater than $\pm 10\%$ should be aimed at, even with extensions to the front time as necessary and as agreed between manufacturer and purchaser. The value of the test voltage is determined according to the principles of IEC 60060-1.

Pour de gros transformateurs de puissance et en particulier pour leurs enroulements intermédiaires et basse tension, le temps virtuel de demi-valeur T_2 peut ne pas être réalisable dans la valeur fixée par la tolérance. L'inductance de tels enroulements peut être si faible que la forme d'onde résultante sera oscillatoire. Ce problème peut être résolu dans une certaine mesure par l'utilisation d'une forte capacité dans le générateur, par le fonctionnement d'étages en parallèle, par l'ajustement de la résistance série ou par des raccordements d'essai spécifiques des bornes des enroulements non en essai ou, en plus, des bornes non essayées des enroulements en essai.

La mise à la terre avec une impédance, plutôt que la mise à la terre directe, des bornes d'enroulement non essayées a comme conséquence une augmentation significative de l'inductance effective. Pour les bornes directement mises à la terre, seule l'inductance de fuite (déterminée par l'impédance de court-circuit) est impliquée. Pour les bornes mises à la terre avec une impédance, l'inductance principale devient prépondérante. Cela peut rendre l'inductance effective 100 à 200 fois plus grande qu'avec la mise à la terre directe.

Lorsque la mise à la terre avec une impédance d'une borne non essayée est utilisée, il est nécessaire de s'assurer que la tension par rapport à la terre apparaissant sur une borne non essayée n'excède pas:

- 75 % de la tension de tenue de foudre nominale de cette borne pour des enroulements connectés en étoile;
- 50 % de la tension de tenue de foudre nominale de cette borne pour des enroulements connectés en triangle (en raison des tensions de polarité opposée par rapport à la terre sur les bornes du triangle, voir également 7.4).

Lorsque la forme d'onde est oscillatoire du fait de l'inductance extrêmement basse et/ou de la faible capacité du générateur d'impulsion, il convient que l'amplitude de la polarité opposée ne dépasse pas 50 % de la valeur maximale de la première amplitude. Avec cette limitation, des directives sont données à l'annexe A, pour choisir la capacité du générateur d'impulsion et ajuster les formes d'onde.

7.2 Impulsions hachées sur la traîne

7.2.1 Temps de hachage

Les différents temps de hachage T_c (comme défini par la CEI 60060-2), auront comme conséquence différentes contraintes (tension et durée) dans différentes parties du ou des enroulements, en fonction de la construction de ces derniers et de leur arrangement. Par conséquent, il n'est pas possible de fixer un temps de hachage, qui serait le plus contraignant, soit en général, soit pour un transformateur particulier ou une bobine d'inductance particulière. Le temps de hachage n'est donc pas considéré comme un paramètre d'essai, à condition qu'il soit dans les limites de 2 μ s et 6 μ s, selon les exigences de la CEI 60076-3.

Toutefois, les oscillogrammes ou les enregistrements numériques des ondes hachées, sont uniquement comparables pour des temps de hachage presque identiques.

7.2.2 Vitesse de chute et amplitude de polarité inverse de l'impulsion hachée

Les événements caractéristiques pendant le hachage dépendent en grande partie de l'aménagement géométrique du circuit de hachage impliqué, de l'impédance du circuit de hachage et de l'objet en essai, qui déterminent tous, à la fois la vitesse de chute et l'amplitude de la crête de polarité opposée.

Dans la CEI 60076-3, la valeur de l'amplitude du dépassement à la polarité opposée a été limitée à 30 % de l'amplitude de l'impulsion hachée. Cela, en fait, représente des directives pour l'aménagement du circuit de hachage et peut nécessiter l'introduction d'une impédance additionnelle Z_c dans ce circuit pour satisfaire la limite (voir la figure 1).

For large power transformers and particularly the intermediate and low-voltage windings thereof, the virtual time to half-value T_2 may not be achievable within the value set by the tolerance. The inductance of such windings may be so low that the resulting waveshape is oscillatory. This problem may be solved to some extent by the use of large capacitance within the generator, by parallel stage operation, by adjustment of the series resistor or by specific test connections of the terminals of windings not under test or, in addition, of the non-tested terminals of windings under test.

Impedance earthing, rather than direct earthing, of the non-tested winding terminals results in a significant increase in the effective inductance. For directly earthed terminals, only the leakage inductance (determined by the short-circuit impedance) is involved. For impedance earthed terminals, the main inductance becomes predominant. This can make the effective inductance 100 to 200 times greater than with direct earthing.

When impedance earthing of any non-tested terminal is employed, it is necessary to ensure that the voltage to earth appearing on any non-tested terminal does not exceed

- 75 % of the rated lightning withstand voltage of that terminal for star-connected windings;
- 50 % of the rated lightning withstand voltage of that terminal for delta-connected windings (because of opposite polarity voltages to earth on the delta terminals – see also 7.4).

When the waveshape is oscillatory due to extremely low inductance and/or small impulse generator capacitance, the amplitude of the opposite polarity should not exceed 50 % of the peak value of the first amplitude. With this limitation, guidance for selecting impulse generator capacitance and adjusting waveshapes is given in annex A.

7.2 Impulses chopped on the tail

7.2.1 Time to chopping

Different times to chopping T_c (as defined in IEC 60060-2), will result in different stresses (voltage and duration) in different parts of the winding(s) depending on the winding construction and arrangement employed. Hence, it is not possible to state a time to chopping which is the most onerous either in general or for any particular transformer or reactor. The time to chopping is therefore not regarded as a test parameter provided that it is within the limits of 2 μ s and 6 μ s as required by IEC 60076-3.

Oscillograms or digital recordings of chopped waves, however, are only comparable for almost identical times to chopping.

7.2.2 Rate of collapse and amplitude of reversed polarity of the chopped impulse

The characteristic events during chopping are largely dependent on the geometrical arrangement of the chopping circuit involved and on the impedance of the chopping circuit and of the test object, all of which determine both the rate of collapse and the amplitude of the opposite polarity peak.

In IEC 60076-3, the amount of overswing to opposite polarity has been limited to 30 % of the amplitude of the chopped impulse. This, in fact, represents a guideline for the arrangement of the chopping circuit and may entail the introduction of additional impedance Z_c in this circuit to meet the limit (see figure 1).

Cependant, il convient que la boucle de hachage soit aussi petite que possible pour obtenir la vitesse de chute la plus élevée, mais il convient aussi que l'amplitude du dépassement de polarité opposée soit limitée à une valeur inférieure ou égale à 30 %. Sur des enroulements multicouches, l'impédance de couche peut atténuer naturellement la chute dans la mesure où elle n'oscille pas autour de zéro (voir la figure B.20).

La recommandation de la CEI 60076-3, d'utiliser un éclateur de hachage de type à déclencheur, a pour avantage d'obtenir la cohérence du temps de hachage, facilitant de ce fait la comparaison des enregistrements oscillographiques ou numériques, non seulement avant, mais également après le hachage. La dernière partie sera comparable seulement pour des temps de hachage sensiblement identiques.

7.3 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances

7.3.1 Raccordements aux bornes

Il est important que les raccordements aux bornes de l'objet en essai et les pratiques en matière de mise à la terre utilisés soient rattachés à la méthode de détection de défaillances adoptée.

Les raccordements pour l'essai de l'impulsion choc sont détaillés dans la CEI 60076-3 en ce qui concerne les transformateurs et dans la CEI 60289 en ce qui concerne les bobines d'inductance. Normalement les bornes non essayées de l'enroulement de la phase en essai sont mises à la terre et les enroulements de la phase non essayés sont court-circuités et mis à la terre. Cependant, afin d'améliorer la queue d'onde T_2 , la mise à la terre par une résistance des enroulements non essayés peut être avantageuse (voir l'article 5 et 7.1) et, en plus, les bornes de ligne non essayées de l'enroulement à l'essai peuvent également être mises à la terre avec une résistance.

En plus des méthodes d'ajustement de la forme d'onde de 7.1, les facteurs suivants doivent être pris en compte:

- a) si une borne a été spécifiée pour être directement mise à la terre ou reliée à un câble à basse impédance, en service, alors il convient que cette borne soit directement mise à la terre pendant l'essai ou soit mise à la terre par une résistance avec une valeur ohmique n'excédant pas l'impédance caractéristique du câble;
- b) la mise à la terre par un shunt à basse impédance pour des raisons de mesures de courants de réponse à l'impulsion de choc peut être considérée comme équivalente à la mise à la terre directe.

Lorsque des éléments non linéaires ou des dispositifs antisurtension – intégrés au transformateur ou externes – sont installés pour la limitation des transitoires de surtension transférés, il convient que la méthode d'essai d'impulsion de choc soit débattue à l'avance, pour chaque cas particulier. Se référer également à la CEI 60076-3.

7.3.2 Méthodes applicables de détection de défaillances

La détection des défaillances est normalement réalisée par l'examen des données oscillographiques ou brutes des enregistrements numériques de la tension d'essai et du courant de réponse d'impulsion.

Différentes transitoires peuvent être enregistrées et utilisées séparément ou en association, comme cela est représenté à la figure 2 et indiqué ci-dessous aux points a) à e). Il est important, dans l'essai de recette, d'enregistrer au moins une des transitoires énumérées, en plus de la tension d'essai appliquée:

- a) le courant de neutre (pour les enroulements connectés en étoile et en zigzag pour lesquels le neutre peut être mis à la terre pendant l'essai);

The chopping loop, however, should be as small as possible to obtain the highest rate of collapse, but the overswing to opposite polarity should be limited to less than, or equal to 30 %. On multiple layer windings, the layer impedance may damp the collapse normally to the extent that it does not oscillate around zero (see figure B.20).

The recommendation in IEC 60076-3 to use a triggered-type chopping gap is made because of its advantage in obtaining consistency of the time to chopping, thereby facilitating the comparison of oscillographic or digital recordings not only before but also after chopping. The latter part will only be comparable for reasonably identical times to chopping.

7.3 Terminal connections and applicable methods of failure detection

7.3.1 Terminal connections

It is essential that the terminal connections of the test object and the earthing practices employed relate to the method of failure detection adopted.

Connections for impulse testing are detailed in IEC 60076-3 for transformers and in IEC 60289 for reactors. Normally the non-tested terminals of the phase winding under test are earthed and the non-tested phase windings are shorted and earthed. However, in order to improve the wavetail T_2 , resistance earthing of the non-tested windings may be advantageous (see clause 5 and 7.1) and, in addition, the non-tested line terminals of the winding under test may also be resistance earthed.

In addition to the methods of waveshape adjustment in 7.1, the following factors have to be considered:

- a) if a terminal has been specified to be directly earthed or connected to a low-impedance cable in service, then that terminal should be directly earthed during the test or earthed through a resistor with an ohmic value not in excess of the surge impedance of the cable;
- b) earthing through a low-impedance shunt for the purpose of impulse response current measurements may be considered the equivalent of direct earthing.

When non-linear elements or surge diverters – built into the transformer or external – are installed for the limitation of transferred overvoltage transients, the impulse test procedure should be discussed in advance for each particular case. Refer also to IEC 60076-3.

7.3.2 Applicable methods of failure detection

Failure detection is normally accomplished by examination of the oscillographic or raw data digital records of the applied test voltage and the impulse response current.

Different transients can be recorded and used separately or in combination, as shown in figure 2. These are listed a) to e) below. It is essential, in acceptance testing, to record at least one of these transients in addition to the applied test voltage:

- a) the neutral current (for star and zigzag connected windings of which the neutral may be earthed during the test);

- b) le courant d'enroulement (pour tous les autres enroulements et les enroulements connectés en étoile et en zigzag, pour lesquels le neutre ne peut pas être mis à la terre pendant l'essai);
- c) le courant transféré à un enroulement adjacent court-circuité et non essayé, parfois désigné sous le nom de courant transféré par capacité;
- d) le courant de cuve;
- e) la tension transférée à un enroulement non essayé.

La somme des points a), c) et d) ou des points b), c) et d) ci-dessus, est parfois désignée sous le nom de courant de ligne.

Lors de l'essai des bobines d'inductance, les deux types shunt et série, les points c) et e) sont inapplicables; le point d) peut être appliqué mais uniquement comme un moyen supplémentaire d'enregistrement de transitoires, car il est probablement moins sensible que lorsqu'il est utilisé dans l'essai de transformateur.

7.4 Méthodes d'essai

Les séquences d'essais appropriées pour les essais en pleine onde ou pour les essais en pleine onde et en onde hachée, sont données dans la CEI 60076-3.

La méthode d'essai préférée est celle de l'application directe bien que, dans des cas particuliers où l'enroulement intermédiaire ou basse tension ne peut pas, en service, être soumis aux surtensions de foudre à partir du système qui lui est connecté, la méthode de surtension transférée puisse être utilisée comme alternative. L'essai d'impulsion de choc de l'enroulement basse tension est alors effectué simultanément avec l'essai de l'enroulement haute tension associé. Dans ces conditions, la forme d'onde de la tension transférée n'est pas conforme à celle spécifiée dans la CEI 60076-3. Il est plus important d'essayer et d'obtenir le niveau de tension requis à l'aide des résistances d'extrémité de valeur suffisamment élevée. Cependant, cela peut quelquefois être impossible, même avec les valeurs de résistance les plus élevées. Dans cet essai, de fortes tensions interphases peuvent se produire sur les enroulements connectés en triangle et le risque de trop contraindre l'isolement interphase, interne ou externe, peut limiter la tension qui peut être appliquée à l'enroulement basse tension. Des limites appropriées peuvent être établies par l'analyse des transitoires avec un générateur de surtension récurrent de basse tension.

De par leur nature même, les dispositifs de protection non linéaires connectés entre les enroulements peuvent provoquer des différences entre les oscillogrammes des impulsions pleine onde et pleine onde réduite ou les enregistrements numériques. Pour prouver que ces différences sont bien provoquées par le fonctionnement de ces dispositifs, il convient de le démontrer en faisant deux essais ou plus, en impulsion pleine onde réduite, à différents niveaux de tension, pour mettre en évidence la tendance de leur fonctionnement. Pour montrer la réversibilité des effets non linéaires, il convient que les mêmes impulsions pleine onde réduite fassent suite à la tension d'essai pleine onde, d'une manière inversée.

Exemple: 60 %, 80 %, 100 %, 80 %, 60 %.

Les méthodes d'essai pour les neutres de transformateur sont données par la CEI 60076-3. Quand la méthode indirecte est utilisée, c'est-à-dire par une impulsion transmise au neutre à partir d'une ou plusieurs bornes de ligne, la forme d'onde ne peut pas être spécifiée puisqu'elle est fondamentalement contrôlée par les paramètres du transformateur. La méthode directe, supposant une tension d'impulsion appliquée au neutre avec toutes les bornes de ligne mises à la terre, permet une plus longue durée du front d'onde, jusqu'à 13 μ s. Dans ce cas, la charge inductive du générateur est sensiblement augmentée et il peut être difficile de réaliser les temps à demi-valeur édictés par les tolérances. La mise à la terre par une impédance des bornes non essayées de l'enroulement à l'essai peut alors être appliquée.

- b) the winding current (for all other windings and star and zigzag connected windings of which the neutral may not be earthed during the test);
- c) the current transferred to an adjacent shorted and non-tested winding, sometimes referred to as capacitively transferred current;
- d) the tank current;
- e) the voltage transferred to a non-tested winding.

The sum of items a), c) and d) or of items b), c) and d), is sometimes referred to as line current.

When testing reactors, both of the shunt and series types, items c) and e) are inapplicable; item d) may be applied but only as an additional means of transient recording since it is likely to be less sensitive than when used in transformer testing.

7.4 Test procedures

The relevant test sequences for full-wave tests or for full- and chopped-wave tests are given in IEC 60076-3.

The preferred method of test is that of direct application although in special cases where the intermediate or low-voltage winding cannot, in service, be subjected to lightning overvoltages from the system connected to it, the "transferred surge" method may alternatively be employed. The impulse test of the low-voltage winding is then carried out simultaneously with the test of the associated high-voltage winding. In these conditions, the waveform of the transferred voltage does not conform with that specified in IEC 60076-3. It is more important to try to obtain the required voltage level by means of termination resistors of sufficiently high value. However, this may not always be possible even with the highest values of resistors. In this test, high inter-phase voltages may occur on delta-connected windings and the danger of overstressing inter-phase insulation, internal or external, may limit the voltage that can be applied to the low-voltage winding. The appropriate limits may be established by transient analysis with a low-voltage recurrent surge generator.

By their very nature, non-linear protection devices connected across the windings may cause differences between the reduced full-wave and the full-wave impulse oscillograms or digital recordings. Proof that these differences are indeed caused by operation of these devices should be demonstrated by making two or more reduced full-wave impulse tests at different voltage levels to show the trend in their operation. To show the reversibility of any non-linear effects, the same reduced full-wave impulses should follow up the full-wave test voltage in a reversed way.

Example: 60 %, 80 %, 100 %, 80 %, 60 %.

Test methods for transformer neutrals are given in IEC 60076-3. When the indirect method is used, i.e. by an impulse transmitted to the neutral from one or more line terminals, the waveshape cannot be specified since it is controlled basically by the transformer parameters. The direct method, involving an impulse voltage applied to the neutral with all line terminals earthed, permits a longer duration of wavefront, up to 13 μ s. In this case, the inductive loading of the generator is significantly increased and it may be difficult to achieve times to half-value set by the tolerances. Impedance earthing of the non-tested terminals of the winding under test may then be applied.

7.5 Enregistrement des essais

7.5.1 Généralités

Des systèmes d'enregistrement analogiques ou numériques peuvent être utilisés pour l'enregistrement de la tension d'impulsion de choc de foudre et des formes d'onde de réponse en courant.

7.5.2 Systèmes d'enregistrement analogiques et numériques

Les prescriptions pour les oscilloscopes analogiques et les enregistreurs numériques sont données dans la CEI 61083-1.

L'enregistrement numérique offre des possibilités d'interprétation mathématique des résultats et permet d'utiliser des traitements mathématiques supplémentaires, par exemple pour l'analyse de panne dans des enregistrements. Ces techniques sont prometteuses mais l'interprétation des résultats n'est pas encore établie, ni débarrassée de toute les ambiguës.

Il convient de souligner que, dans un but de présentation des résultats pour la recette, par comparaison des tracés, il est recommandé que les formes d'onde obtenues par des mesures numériques soient produites à partir des données brutes et ne soient pas soumises à un traitement mathématique, un filtrage, un lissage, etc.

Il est également important d'utiliser les données brutes pour l'évaluation des formes d'onde non normalisées.

(Les figures B.18, B.19 et B.21 montrent des différences significatives d'amplitudes et les évaluations du temps d'attaque T_1 et du temps à demi-valeur T_2 .)

Lorsque les enregistreurs numériques sont utilisés comme simples instruments de mesure d'enregistrement des formes d'onde de tension et de courant, sans traitement mathématique des données enregistrées (voir l'article 10), ils doivent être considérés comme des instruments analogiques perfectionnés.

La CEI 60076-3 prescrit simultanément la mesure de

- a) la tension appliquée;
- b) au moins une des transitoires indiquées en 7.3.2;

par conséquent, au moins deux canaux d'enregistrement indépendants sont nécessaires.

Alors que la tension appliquée est définie de manière unique, le choix de l'autre caractéristique à enregistrer dépend du choix de la méthode de détection de défaillances.

7.5.3 Enregistrement analogique des formes d'onde

Pour faciliter l'évaluation des résultats d'essai, qui sont principalement basés sur la comparaison d'enregistrements à des niveaux réduits et maximaux, il est intéressant de prévoir des enregistrements d'amplitude égale par l'utilisation d'atténuateurs appropriés sur les oscilloscopes.

7.5 Recording of tests

7.5.1 General

Either analogue or digital recording systems may be used for the recording of lightning impulse voltage and current response waveshapes.

7.5.2 Analogue and digital recording systems

The requirements for analogue oscilloscopes and digital recorders are given in IEC 61083-1.

Digital recording offers the potential for mathematical interpretation of the results and allows additional mathematical processing to be used, for example, for fault analysis in recordings. These techniques show promise but interpretation of the results is not yet proven nor unambiguous.

It should be emphasized that for the purpose of presenting results for acceptance by comparison of traces, the waveforms obtained by digital measurements should be produced from the raw data and not subjected to any mathematical processing, filtering, smoothing, etc.

It is equally important to use the raw data for non-standard waveshape evaluation.

(Figures B.18, B.19 and B.21 show significant differences in amplitude and front time T_1 and time to half value T_2 evaluations.)

When digital recorders are used as straight-forward measuring instruments for recording of voltage and current waveshapes, without the purpose of mathematical processing (see clause 10) of the recorded data, they are to be regarded as technically advanced analogue instruments.

IEC 60076-3 requires simultaneously the measurement of

- a) the applied voltage;
- b) at least one of the transients listed in 7.3.2;

hence, at least two independent recording channels are necessary.

While the applied voltage is uniquely defined, the choice of the other characteristic to be recorded is dependent on the selection of the method of failure detection.

7.5.3 Analogue recording of waveshapes

To facilitate the assessment of the test results, which is primarily based on the comparison of recordings taken at reduced and full levels, it is advantageous to provide for recordings of equal amplitude by the use of appropriate attenuators at the oscilloscopes.

7.5.3.1 Enregistrement analogique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

a) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

Le temps de balayage préférentiel pour les enregistrements faits pour déterminer la forme d'onde pendant le réglage préliminaire des paramètres du circuit d'essai est $\leq 10 \mu\text{s}$ pour l'enregistrement du front d'onde (des temps de balayage plus longs peuvent être nécessaires lors de l'essai des neutres du transformateur). Il convient que l'enregistrement d'une queue d'onde permette l'évaluation du temps à demi-valeur et occasionnellement l'amplitude de polarité inverse.

b) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et de permettre la détection de tout défaut qui peut être présent:

- pour les ondes pleines, il convient que le temps de balayage ne soit pas inférieur à $100 \mu\text{s}$;
- pour les ondes hachées, un temps de balayage de $10 \mu\text{s}$ à $25 \mu\text{s}$ est habituellement considéré comme suffisant.

Pour le rapport d'essais (voir l'article 11) un enregistrement convenable est normalement suffisant pour l'essai de recette; toutefois, pour l'essai de diagnostic plusieurs enregistrements avec différents temps de balayage peuvent être requis.

7.5.3.2 Enregistrement analogique du courant de réponse à l'impulsion

Le courant d'impulsion est normalement le paramètre le plus sensible dans la détection de défaillances. Par conséquent, les ondes de courant enregistrées sont les critères principaux du résultat d'essai.

En fonction de la forme du tracé de courant et de l'utilisation de balayages linéaires ou exponentiels, il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs enregistrements avec différents temps de balayage. Il convient que la résolution obtenue garantisse que

- a) une représentation aussi claire que possible des oscillogrammes soit obtenue, y compris les composantes aux plus hautes fréquences proches du front de l'onde;
- b) l'enregistrement de courant soit de durée suffisante pour permettre la détection de toutes les anomalies se produisant à retardement. Il est difficile de fixer des règles à privilégier pour les vitesses de balayage et pour ce qui est appelé à retardement, car la réponse de chaque transformateur est différente et la vitesse est, dans une certaine mesure, dépendante du type d'enroulement utilisé. Lors de l'enregistrement du courant de neutre ou de l'enroulement, il convient de poursuivre l'enregistrement au moins jusqu'à ce que la crête inductive ait été atteinte, permettant de ce fait, l'examen de l'onde pour déterminer s'il y a eu un changement de l'inductance provoquée par le court-circuit de spires résultant d'un défaut d'isolement.

7.5.4 Enregistrement numérique des formes d'onde

Le principe de l'enregistrement numérique est la mesure des formes d'onde de tension ou de courant en prenant des échantillons pendant l'essai à des intervalles de temps réguliers. Il convient que ces échantillons soient présentés directement en tant que données brutes pour l'évaluation des paramètres de forme d'onde (voir 7.5.3.1) et également pour l'évaluation des résultats d'essai basés sur la comparaison d'enregistrements à des niveaux réduits et maximaux (voir 7.5.3.2). En plus, les données enregistrées peuvent également être traitées par des algorithmes analysant l'onde, par exemple, pour l'analyse de défaillance dans les enregistrements (voir l'article 10).

7.5.3.1 Analogue recording of the impulse voltage waveshape

a) Determination of the impulse voltage waveshape

The preferred sweep time for records taken for waveshape determination during preliminary adjustment of the test circuit parameters is $\leq 10 \mu\text{s}$ for the wavefront record (longer sweep times may be necessary when testing transformer neutrals). The wavetail record should permit the evaluation of the time to half-value and, on occasions, the amplitude of reversed polarity.

b) Applied impulse test voltage wave recording

In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present:

- for full waves, the sweep time should not be less than $100 \mu\text{s}$;
- for chopped waves, a sweep time of $10 \mu\text{s}$ to $25 \mu\text{s}$ is usually found sufficient.

For the test report (see clause 11) one pertinent recording is normally sufficient for acceptance tests; for diagnostic testing, however, several records with different sweep times may be required.

7.5.3.2 Analogue recording of the impulse response current

Impulse current is normally the most sensitive parameter in failure detection. Therefore, the recorded current waves are the main criteria of the test result.

Depending on the form of the current trace and on the use of linear or exponential sweeps, it may be necessary to use more than one record with different sweep times. The resolution achieved should ensure that

- a) as clear a representation as possible is obtained from the oscillograms, including the higher frequency components near the front of the wave;
- b) the current record is of sufficient duration to permit detection of any discrepancies occurring late in time. It is difficult to lay down preferred rules for sweep speeds and what is meant by late in time as the response of every transformer is different and the speed is to some extent dependent on the type of winding employed. When recording neutral or winding current, recording should continue at least until the inductive peak has been reached, thus permitting examination of the wave to determine if there has been any change in inductance caused by short-circuiting of turns as a result of insulation failure.

7.5.4 Digital recording of waveshapes

The principle of digital recording is the measurement of voltage or current waveshapes by taking samples during the test at regular time intervals. These samples should be presented directly as raw data for evaluating waveshape parameters (see 7.5.3.1) and also for the assessment of test results based on the comparison of recordings taken at reduced and full impulse voltage levels (see 7.5.3.2). Additionally, the recorded data may also be processed by wave analysing algorithms, for example, for fault analysis in recordings (see clause 10).

Pendant les essais d'impulsion de choc, des champs électromagnétiques élevés sont produits à proximité de l'installation d'essai. La protection contre ces champs des dispositifs électroniques sensibles du système d'enregistrement numérique, de l'ensemble de l'équipement de traitement et de son alimentation en énergie est requise.

Il convient que les écrans du numériseur aient une résolution à $\geq 768 \times 1\,024$ pixels et que les imprimantes aient ≥ 300 points par pouce.

7.5.4.1 Enregistrement numérique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

a) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

La période préférentielle de présentation des données pour les enregistrements faits pour déterminer la forme d'onde pendant le réglage préliminaire des paramètres du circuit d'essai est $\leq 10\ \mu\text{s}$ pour l'enregistrement du front d'onde (des temps de présentation plus longs peuvent être nécessaires lors de l'essai des neutres du transformateur). Il convient que l'enregistrement d'une queue d'onde permette l'évaluation du temps à demi-valeur et occasionnellement l'amplitude de polarité inverse.

La CEI 61083-1 spécifie un numériseur de résolution minimale de 9 bits, 60 MHz pour l'enregistrement des formes d'onde d'impulsion de tension et de courant. En zoomant sur des périodes de temps de $10\ \mu\text{s}$ ou moins pour évaluer le front d'onde ou les impulsions hachées, il convient d'envisager d'utiliser un numériseur 10 bits et de fréquence d'échantillonnage 100 MHz.

Historiquement, l'évaluation de la forme d'onde est basée sur les enregistrements oscilloscopiques, les règles de conception et l'évaluation visuelle des paramètres de forme d'onde. Avec l'utilisation des enregistreurs numériques pour les essais à haute tension des transformateurs de puissance, il convient qu'un avertissement relatif à l'amplitude et aux paramètres de temps soit donné, en ce qui concerne l'évaluation des formes d'onde non normalisées. En particulier, en essayant des enroulements basse tension de forte puissance nominale, avec comme résultat, des surtensions unipolaires à des fréquences inférieures à 0,5 MHz, la CEI 61083-2 existante n'est pas applicable pour l'évaluation de l'amplitude d'une telle forme d'onde non normalisée. Des erreurs supérieures à 10 % ont été observées du fait des algorithmes de lissage de courbe intégrés dans les numériseurs (voir les figures B.18, B.19 et B.21).

Dans ces cas une évaluation soigneuse des données brutes des graphiques est requise en usant de discernement technique. Une mesure parallèle de la tension de crête, par un voltmètre de crête suivant la CEI 61083-1, est fortement recommandée.

b) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et de permettre la détection de tout défaut qui peut être présent

- pour les ondes pleines, il convient que la période de présentation des données échantillonnées ne soit pas inférieure à $100\ \mu\text{s}$;
- pour les ondes hachées, une période de présentation de $10\ \mu\text{s}$ à $25\ \mu\text{s}$ est habituellement considérée comme suffisante.

Les fréquences d'échantillonnage de 10 MHz à 20 MHz par canal du numériseur suffisent normalement, parce que les fréquences maximales de résonance de la partie de l'enroulement n'excèdent habituellement pas 1 MHz à 2 MHz. Si l'on observe de hautes fréquences dans les tracés de tension ou de courant, elles sont dues à la résonance parasite du circuit de mesure ou à du bruit dans le système de mise à la terre. Il est donc recommandé d'utiliser des fréquences d'échantillonnage plus élevées, comme mentionné auparavant, pour distinguer le bruit dans le circuit de mesure du comportement réel de l'objet en essai.

Pour l'analyse d'onde, il est important de prendre des échantillons sur la forme d'onde complète jusqu'à l'amortissement total de l'onde, en utilisant la mémoire maximale disponible du numériseur. Il est important de programmer le numériseur de telle manière que suffisamment d'échantillons soient présents pour déterminer le point de départ virtuel de l'onde.

During impulse tests, high electromagnetic fields are produced in the vicinity of the test set-up. Protection of the sensitive electronic devices in the digital recording system, the entire processing equipment and its power supply against these fields is required.

The digitizer screens should have a resolution of $\geq 768 \times 1\,024$ pixels and the printers should have ≥ 300 dots per inch.

7.5.4.1 Digital recording of the impulse voltage waveshape

a) Determination of the impulse voltage waveshape

The preferred period for the presentation of data for the records taken for waveshape determination during preliminary adjustment of test-circuit parameters is $\leq 10\ \mu\text{s}$ for the wavefront record (longer presentation times may be necessary when testing transformer neutrals). The wavetail record should permit the evaluation of the time to half-value and, on occasions, the amplitude of reversed polarity.

IEC 61083-1 specifies a 9-bit, 60 MHz digitizer as the minimum resolution of the digitizer for the registration of impulse voltage and current waveshapes. When zooming in on $10\ \mu\text{s}$ time-periods or less for the evaluation of the wavefront or for the evaluation of chopped impulses, the use of a 10-bit digitizer and 100 MHz sampling frequency should be considered.

Historically, waveshape evaluation is based on oscilloscopic records, engineering rules and eye evaluation of waveshape parameters. With the application of digital recorders in high-voltage testing of power transformers, a warning with respect to amplitude and time parameters should be given with respect to the evaluation of non-standard waveshapes. In particular, when testing high-power-rated low-voltage windings with resulting unipolar overshoots with frequencies less than 0,5 MHz, IEC 61083-2 is not applicable for the amplitude evaluation of such non-standard waveshapes. Errors in excess of 10 % have been observed due to the built-in curve smoothing algorithms in the digitizers (see figures B.18, B.19 and B.21).

In such cases, careful evaluation of the raw data plots using engineering judgement is required. A parallel measurement of the peak voltage by a peak voltmeter according to IEC 61083-1 is highly recommended.

b) Applied impulse test voltage wave recording

In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present

- for full waves, the period for the presentation of sampled data should not be less than $100\ \mu\text{s}$;
- for chopped waves, a period for presentation of $10\ \mu\text{s}$ to $25\ \mu\text{s}$ is usually found sufficient.

Sampling frequencies of 10 MHz to 20 MHz per channel of the digitizer normally suffice because the maximum frequencies of part winding resonance normally do not exceed 1 MHz to 2 MHz. If high frequencies are observed in the voltage or current traces these are due to parasitic resonance in the measuring circuit or noise in the earthing system. It is therefore recommended that higher sampling frequencies (as mentioned before) be used to discriminate noise in the measuring circuit from the actual behaviour of the test object.

For wave analysis, it is important to take samples over the complete waveshape until the wave is completely damped, using the maximum available memory of the digitizer. It is important to programme the digitizer in such a way that a sufficient number of samples is present to determine the virtual starting-point of the wave.

Il est en outre important d'utiliser la résolution maximale disponible des amplificateurs d'entrée du numériseur. Pour cette raison, un certain nombre de «pré-tirs" à 50 % peuvent être nécessaires pour déterminer la plage optimale de l'amplitude de l'onde de tension et/ou le décalage de chaque canal.

Il convient qu'une attention particulière soit portée à la valeur de l'amplitude de crête de polarité opposée des impulsions de choc de foudre. Lors de la mesure cette amplitude de crête, un écrêtage de la forme d'onde enregistrée peut se produire par la saturation de l'amplificateur d'entrée du numériseur dans la plage sélectionnée.

Un enregistrement correct est normalement suffisant pour l'essai de recette (voir l'article 11). Cependant dans un but de diagnostic, le logiciel du système offre la possibilité d'examiner l'onde sur le temps total d'échantillonnage ou une partie de l'onde, car toutes les informations sont stockées dans la mémoire de l'ordinateur. Le logiciel peut soustraire la pleine onde et l'onde réduite et mettre en évidence les différences, avec un agrandissement réglable. Cependant, des problèmes pourraient surgir pour la partie en montée rapide de la forme d'onde, où le réglage de temps correct des deux courbes peut être difficile à réaliser.

7.5.4.2 Enregistrement numérique du courant de réponse à l'impulsion

Le courant d'impulsion est normalement le paramètre le plus sensible dans la détection de défaillances. Par conséquent, les ondes de courant enregistrées sont les critères principaux du résultat d'essai. La présentation des enregistrements pour l'essai de recette est la même que pour la présentation des oscillogrammes en 7.5.2.2.

Cependant, les données stockées dans la mémoire du numériseur permettent d'autres présentations du même enregistrement, en zoomant en avant ou en arrière, à différentes échelles de temps. Les prescriptions concernant les fréquences d'échantillonnage et la résolution des canaux d'entrée du numériseur sont identiques à celles données en 7.5.3.1.

Afin de tirer tout le bénéfice des outils mathématiques d'investigation additionnels pour l'examen des résultats d'essai, comme l'analyse de la fonction de transfert (voir l'article 10), il est important d'utiliser le même temps d'enregistrement pour l'enregistrement de l'impulsion de courant et de tension.

8 Essais d'impulsion de choc de manœuvre

8.1 Prescriptions particulières

La réponse des transformateurs et des bobines d'inductance aux impulsions de choc de manœuvre est très différente parce que les transformateurs ont un circuit magnétique fermé et la durée relativement longue de l'impulsion de choc de manœuvre permet donc l'établissement d'un flux de noyau important, (voir la CEI 60076-3). Ce n'est pas le cas pour les bobines d'inductance pour lesquelles, en plus, les problèmes de forme d'onde et les méthodes d'essai sont différents. Par conséquent, les deux composants sont traités séparément.

8.2 Transformateurs

8.2.1 Formes d'onde

Comme indiqué dans la CEI 60076-3, il n'y a aucune valeur stricte spécifiée pour le temps d'attaque virtuel d'une onde d'impulsion de choc de manœuvre. Toutefois, il convient qu'il soit suffisamment long pour assurer une distribution essentiellement uniforme de la tension. Cela nécessite ordinairement des temps d'attaque $\geq 100 \mu s$. Il est déterminé par la capacité effective de l'enroulement, les capacités de charge et les résistances série.

It is, furthermore, important to use the maximum available resolution of the input amplifiers of the digitizer. For that reason, a number of 50 % pre-shots may be needed to determine the optimum range for the amplitude of the voltage wave and/or the offset for each channel.

Special attention should be given to the amount of overswing to opposite polarity of lightning impulses. When measuring such overswing, clipping of the recorded waveshape may occur by saturation of the input amplifier in the digitizer in the chosen range.

One pertinent recording (see clause 11) is normally sufficient for acceptance tests. For diagnostic purposes, however, the software of the system offers the possibility to examine the wave over the entire sampling time, or part of the wave as all information is stored in the computer memory. The software can subtract the full wave and the reduced wave and show differences on an adjustable magnified scale. However, problems might arise for the fast rising part of the waveshape where the proper time adjustment of the two curves can be difficult to accomplish.

7.5.4.2 Digital recording of the impulse response current

Impulse current is normally the most sensitive parameter in failure detection. Therefore, the recorded current waves are the main criteria of the test result. The presentation of the recordings for the acceptance test are the same as for the presentation of oscillograms in 7.5.2.2.

The stored data in the memory of the digitizer, however, allows for any other presentation of the same recording by zooming in or out at different time scales. Requirements with respect to sampling frequencies and resolution of the digitizers' input channels are the same as given in 7.5.3.1.

In order to benefit from additional mathematical investigation tools, such as transfer function analysis (see clause 10), for the examination of the test results, it is important that the same recording time for the recording of the impulse current and voltage is used.

8 Switching impulse tests

8.1 Special requirements

The response of transformers and reactors to switching impulses is very different because transformers have a complete magnetic circuit and the relatively long duration of the switching impulse therefore allows the establishment of a significant amount of core flux (see IEC 60076-3). This is not the case for reactors for which, in addition, waveshape problems and test procedures are different. Therefore, the two items of equipment are dealt with separately.

8.2 Transformers

8.2.1 Waveshapes

As indicated in IEC 60076-3, there are no strict values specified for the virtual front time of a switching impulse wave. It should, however, be sufficiently long to ensure essentially uniform distribution of voltage. This normally requires front times of $\geq 100 \mu\text{s}$. It is determined by the effective winding capacitance, any load capacitance and the series resistances.

La queue d'onde est influencée, non seulement par les composantes habituelles de mise en forme de l'onde, mais également par une saturation probable du noyau. Pour la plupart des transformateurs, au niveau d'essai maximal, la décroissance exponentielle de la queue d'onde est interrompue par une chute soudaine à zéro, en un temps variable après la crête, du fait de la saturation du noyau. Par conséquent, le temps virtuel à demi-valeur n'est pas utilisé pour spécifier la queue d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre appliquée. Au lieu de cela, la forme d'onde est définie par son temps supérieur à 90 % de T_d et par la prescription du temps au premier passage à zéro T_z . $T_d \geq 200 \mu s$ et $T_z \geq 500 \mu s$, mais de préférence $1\,000 \mu s$, sont définis par la CEI 60076-3. Ces quantités sont illustrées à la figure 3a.

Le temps mis pour saturer le noyau dépend de la taille du noyau, de son état initial de magnétisation, du niveau et de la forme d'onde de la tension appliquée. Sauf si l'état de magnétisation du noyau est identique avant chaque application de l'impulsion de choc de manœuvre à un niveau de tension donné, pour des applications successives, il ne sera pas obtenu de formes d'onde identiques. De plus, des formes d'onde identiques ne peuvent pas être obtenues aux niveaux d'essai réduits et maximaux. Voir en 8.2.3 la méthode d'essai qui réduit les effets de la saturation du noyau.

La saturation du noyau ne se produit pas habituellement pour des applications de tension à niveau réduit et peut même ne pas se produire pour des applications au niveau maximal. Quand elle se produit, son effet sur la forme d'onde de tension peut être important ou faible selon la grandeur de la saturation impliquée. Pour cette raison, lorsque les impulsions de choc de manœuvre sont appliquées à partir du côté haute tension du transformateur, il est possible d'établir T_1 et T_d à partir d'applications de tension réduite. T_z ne peut pas être établi tant que la première application de niveau de tension maximal n'est pas faite. Lorsque les impulsions de choc de manœuvre sont exécutées à partir du côté basse tension du transformateur, seul T_1 peut être établi à partir d'applications de tension réduite. Dans ce cas, T_d et T_z peuvent uniquement être déterminés à partir de tirs au niveau d'essai maximal.

Il convient de noter qu'il peut y avoir des différences significatives dans la forme de la queue d'onde sur les différentes colonnes d'un transformateur, dues aux différentes réluctances du circuit magnétique en jeu.

8.2.2 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances

8.2.2.1 Raccordements aux bornes

Afin d'être conforme aux prescriptions de la CEI 60076-3, seule une connexion d'essai est admissible pour les transformateurs triphasés. Cette connexion est illustrée à la figure 4, qui indique qu'il convient que le neutre soit toujours mis à la terre et que les bornes des phases non essayées soient de préférence reliées ensemble. (Cette interconnexion des bornes non essayées n'est pas nécessaire pour les transformateurs équipés d'enroulements connectés en triangle).

Ce circuit a été choisi pour les transformateurs triphasés avec des noyaux à 3 et à 5 colonnes pour réaliser simultanément l'essai d'isolement phase – terre et entre phases avec 1,0 p.u. (par unité) et 1,5 p.u. respectivement.

Le choix de l'enroulement sur lequel la tension d'essai doit être directement appliquée et le niveau de cette tension d'essai peut généralement être laissé au constructeur; il doit correspondre à la prescription que le niveau nominal de tenue de l'impulsion de choc de manœuvre est atteint dans l'enroulement avec la tension nominale la plus élevée.

Court-circuiter les enroulements qui ne sont pas en essai n'est pas réalisable, car l'effet d'un tel court-circuit pendant l'essai de l'impulsion de choc de manœuvre est fondamentalement le même que pour un essai de tension induite.

The wavetail is influenced not only by the usual waveshaping components but also by a probable saturation of the core. For most transformers, at full test level, the exponential decay of the wavetail is interrupted by a sudden fall through zero, at a variable time after the crest, due to core saturation. Therefore, the virtual time to half-value is not used to specify the wavetail of the applied switching impulse. Instead, the waveshape is defined by its time above 90 % T_d and by the requirement of the time to first zero passage T_z . $T_d \geq 200 \mu s$ and $T_z \geq 500 \mu s$, but preferably 1 000 μs , are defined in IEC 60076-3. These quantities are illustrated in figure 3a.

The time taken to saturate the core is dependent on the core size, its initial state of magnetization and the level and waveshape of the applied voltage. Unless the core magnetization state is identical before each switching impulse application at a given voltage level, identical waveshapes on successive applications will not be obtained. In addition, identical waveshapes at reduced and full test levels cannot be obtained. See 8.2.3 for test procedure which reduces the effects of core saturation.

Core saturation does not usually occur on reduced-level voltage applications and may not even occur on full-level applications. When it does occur, its effect on the voltage waveshape may be large or small depending on the amount of saturation involved. For this reason, when switching impulses are applied from the high-voltage side of the transformer, it is possible to establish T_1 and T_d from the reduced voltage applications. T_z cannot be established until the first full-level voltage application is made. When switching impulses are performed from the low-voltage side of the transformer, only T_1 can be established from reduced voltage applications. In this case, T_d and T_z can only be determined from full test-level shots.

It should be noted that there may be significant differences in the shape of the wavetail on different limbs of a transformer due to the different reluctances of the magnetic circuit involved.

8.2.2 Terminal connections and applicable methods of failure detection

8.2.2.1 Terminal connections

In order to comply with the requirements of IEC 60076-3, there is only one admissible test connection for three-phase transformers. This connection is shown in figure 4, which indicates that the neutral should always be earthed and the terminals of the non-tested phases preferably interconnected. (This interconnection of non-tested terminals is not necessary for transformers provided with a delta-connected winding.)

This circuit was selected for three-phase transformers with both three- and five-limb cores to perform simultaneously testing of the phase-to-earth and phase-to-phase insulation with 1,0 p.u. (per unit) and 1,5 p.u. respectively.

The choice of winding to which the test voltage is to be directly applied and the level of that test voltage may normally be left to the manufacturer, commensurate with the requirement that the rated switching impulse withstand level is achieved in the winding with the highest rated voltage.

Short-circuiting of windings not under test is not practicable since the effect of such short-circuiting during the switching impulse test is basically the same as in an induced voltage test.

Pendant que l'onde primaire de l'impulsion de choc de manœuvre est transférée par induction, le couplage capacitif entre phases, les capacités et les inductances propres aux phases peuvent provoquer des oscillations supplémentaires qui sont superposées aux tensions transférées. La figure B.14, donne un exemple évident de cet effet. Par conséquent, la prescription de la CEI 60076-3 qui stipule qu'une tension de $1,5 U$ entre phases apparaîtra quand une tension U est appliquée à une borne, n'est valide qu'en principe. Donc, pendant un essai, les tensions entre phases sont susceptibles d'être supérieures à $1,5 U$ si aucune mesure n'est prise sur les bornes non essayées pour supprimer les tensions oscillatoires au moyen de mise à la terre avec une impédance ohmique élevée. Les tensions phase – terre sur les bornes non essayées peuvent être bien supérieures à $0,5 U$.

La charge ohmique élevée des bornes des phases qui ne sont pas essayées de l'ensemble des enroulements en essai et/ou sur les bornes des phases des enroulements qui ne sont pas essayés est un moyen commode de réaliser l'amortissement approprié. Cependant, l'application d'une charge résistive provoque un allongement significatif du front d'onde sur les bornes non essayées, ayant pour résultat une tension entre phases inférieure à $1,5 U$. Cela résulte des temps légèrement différents auxquels apparaissent la tension maximale appliquée (U) et la tension induite ($0,5 U$). Quand l'application d'une charge est trop sévère (une résistance trop faible), le temps de traîne de l'impulsion de choc de manœuvre appliquée est sensiblement raccourci dans la mesure où les effets de saturation peuvent ne pas avoir lieu.

La prescription, stipulant qu'une tension de 1,5 fois la tension entre phase et neutre doit être développée entre les phases, ne peut pas être satisfaite sur les transformateurs cuirassés et les transformateurs à noyau à cinq colonnes sans enroulements connectés en triangle, car le flux ne peut pas être dirigé par les enroulements sur les colonnes non essayées. Si aucun enroulement en triangle n'est disponible, seuls les essais phase – terre de 1,0 p.u. peuvent être réalisés en court-circuitant et en mettant à la terre les bornes des enroulements des phases non essayées.

Des considérations semblables concernant les oscillations superposées sont également valides pour les autotransformateurs monophasés.

8.2.2.2 Méthodes de détection de défaillances

Pour la détection de défaillances, généralement seule la mesure de la tension appliquée est suffisante, mais quand l'essai est réalisé en appliquant l'impulsion à une borne intermédiaire ou basse tension, il convient que la tension soit mesurée sur la borne avec la plus forte tension pour l'équipement U_m . Le courant s'écoulant à la terre par l'enroulement essayé peut être utilisé en plus.

8.2.3 Méthode d'essai

La méthode d'essai est décrite dans la CEI 60076-3. Cette procédure comprend la référence aux mesures qui peuvent être prises pour augmenter la durée de l'impulsion en retardant le début possible de la saturation du noyau.

Pour la méthode de l'application directe à l'enroulement haute tension, objet principal de ce guide, la procédure implique l'application, à chaque borne de phase, de

- une impulsion de niveau d'essai réduit, de polarité négative (entre 50 % et 75 % du niveau de tenue à l'impulsion de choc de manœuvre);
- l'introduction d'une rémanence de polarité opposée, soit au moyen d'impulsions de polarité positive d'approximativement 50 % d'amplitude, soit par l'application de courant continu;
- trois impulsions de polarité négative au niveau de tenue de l'impulsion de choc de manœuvre avec l'introduction d'une rémanence de polarité opposée avant chaque impulsion.

Whilst the basic switching impulse wave is inductively transferred, the interphase capacitive coupling and the inherent phase capacitances and inductances can cause additional oscillations which are superimposed on the transferred voltages. Figure B.14 gives a clear example of this effect. Hence, the requirement in IEC 60076-3 that a phase-to-phase voltage of $1,5 U$ will occur when a voltage U is applied to one terminal, is valid only in principle. Therefore, during a test, the interphase voltages are likely to be higher than $1,5 U$ if no measures are taken at the non-tested terminals to suppress the oscillatory voltages by means of high ohmic impedance earthing. The phase-to-earth voltages at the non-tested terminals can be much higher than $0,5 U$.

High ohmic loading of the non-tested phase terminals of the winding system under test and/or at the non-tested winding phase terminals is a convenient means to achieve appropriate damping. However, resistive loading causes a significant lengthening of the wavefront at the non-tested terminals, resulting in a phase-to-phase voltage of less than $1,5 U$. This results from the slightly different times at which the maxima of applied (U) and induced ($0,5 U$) voltages occur. When the loading is too severe (too low a resistance), the tail time of the applied switching impulse is significantly shortened to the extent that saturation effects may not occur.

The requirement that 1,5 times the voltage between phase and neutral shall be developed between phases cannot be met on shell-type and five-limb core-type transformers without delta-connected windings, as the flux cannot be directed through the windings on the non-tested limbs. If no delta windings are available, only 1,0 p.u. phase-to-earth tests can be achieved by short-circuiting and earthing of the winding terminals of the non-tested phases.

Similar considerations with respect to superimposed oscillations are valid also for single-phase auto-transformers.

8.2.2.2 Methods of failure detection

For failure detection, normally only the measurement of the applied voltage is sufficient, but when the test is performed by applying the impulse to an intermediate or low-voltage terminal, the voltage should be measured at the terminal with the highest voltage for equipment U_m . The current flowing to earth through the tested winding can additionally be used.

8.2.3 Test procedures

The test procedure is outlined in IEC 60076-3. This procedure includes reference to measures which may be taken to increase the impulse duration by delaying the possible onset of core saturation.

For the method of direct application to the high-voltage winding, primarily referred to in this guide, the procedure involves the application, to each phase terminal, of

- one negative polarity, reduced test level impulse (between 50 % and 75 % of the switching impulse withstand level);
- introduction of opposite polarity remanence, either by means of positive polarity impulses of approximately 50 % amplitude or direct current application;
- three negative polarity impulses at the switching impulse withstand level with introduction of opposite polarity remanence prior to each impulse.

La méthode à privilégier pour introduire la rémanence est l'application d'impulsions de polarité opposée (c'est-à-dire positive) d'approximativement 50 % du niveau de l'essai. Pour réaliser des oscillogrammes sensiblement identiques ou des enregistrements numériques à n'importe quel niveau d'essai, il est recommandé d'établir toujours le même point de rémanence, de préférence le point de rémanence de saturation. Ce point est atteint quand le temps au passage au premier zéro reste constant lors d'applications consécutives de l'impulsion. Le nombre d'impulsions de prémagnétisation nécessaire et leur niveau dépend du niveau de la tension d'essai envisagé. Pour éviter tout problème de claquages externes pendant cette procédure, il convient que le niveau de ces impulsions de prémagnétisation de polarité positive ne dépasse pas 50 % à 60 % de la tension d'essai.

8.2.4 Enregistrement des essais

8.2.4.1 Généralités

L'enregistrement de la tension à la borne haute tension est requis pendant l'essai de choc de manœuvre. Toutefois, en raison des tensions excessives possibles par rapport à la terre sur les bornes non essayées ou entre les phases, comme expliqué en 8.2.2 il est conseillé de vérifier au moins ces tensions.

L'enregistrement de tension indiquera aussi généralement, d'une manière satisfaisante, tout défaut sur des enroulements couplés magnétiquement et non directement soumis à l'impulsion de choc de manœuvre. Les courants de l'impulsion peuvent être enregistrés et donneront, dans la plupart des cas, des informations supplémentaires sur un défaut.

Pour l'enregistrement de tension d'impulsion de choc de manœuvre, il est préférable d'utiliser des diviseurs de tension de type capacitif, car les diviseurs de tension résistifs auraient une influence sur la forme d'onde et peuvent être surchargés thermiquement. Lorsque des diviseurs de tension résistifs sont utilisés pour vérifier la tension des bornes non essayées, il convient de les laisser dans le circuit parce qu'ils représentent une charge significative de ce dernier. Des prises sur des bagues capacitatives correctement calibrées peuvent être utilisées comme diviseurs de tension.

8.2.4.2 Enregistrement analogique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

a) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

Pour l'enregistrement du front d'onde pris pour la détermination de forme d'onde pendant l'ajustement préliminaire des paramètres du circuit d'essai, un balayage englobant la crête de l'onde est nécessaire et il s'étend généralement sur 100 μ s à 300 μ s. Pour l'enregistrement de la queue d'onde, qui est utilisé pour déterminer uniquement le temps supérieur à 90 % de T_d , un temps de balayage de 500 μ s à 1 000 μ s est recommandé.

b) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et permettre la détection de tout défaut qui peut être présent, le temps de balayage doit être assez long pour englober le premier passage par zéro. Ce temps est plus long que le temps attendu T_z , et il est normalement de 1 000 μ s à 2 000 μ s. Dans des cas exceptionnels, des temps de balayage encore plus longs peuvent être nécessaires, par exemple 2 000 μ s à 3 000 μ s.

8.2.4.3 Enregistrement numérique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

a) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc.

Il est nécessaire de prendre des échantillons sur la forme d'onde complète, depuis le début jusqu'au moment où l'onde est complètement amortie, en utilisant la mémoire disponible maximale du numériseur. Il est important de programmer le numériseur de telle manière que suffisamment d'échantillons soient présents pour déterminer le point de départ virtuel de l'onde. Pour enregistrer l'impulsion de choc de manœuvre, une fréquence d'échantillonnage de 10 MHz est suffisante. Les prescriptions pour le numériseur, comme mentionnées en 7.5.3 pour l'enregistrement numérique des tensions de choc de foudre, sont suffisantes pour l'enregistrement des impulsions de choc de manœuvre.

The preferred method of introducing remanence is the application of opposite (i.e. positive) polarity impulses of approximately 50 % test level. To achieve reasonably identical oscillograms or digital recordings at any test level, it is recommended that the same remanence point should always be established, preferably saturation remanence. This point is reached when the time to the first zero passage remains constant on consecutive impulse applications. The number of the required pre-magnetizing impulses and their level depend on the level of test voltage aimed for. To avoid any problems with external flashovers during this procedure, the level of such positive polarity pre-magnetizing impulses should not exceed 50 % to 60 % of the test voltage.

8.2.4 Recording of tests

8.2.4.1 General

Recording of the voltage of the high-voltage terminal is required during switching impulse testing. However, due to the possible excessive voltages to earth on the non-tested terminals or between phases, explained in 8.2.2, it is advisable to at least check these voltages.

The voltage record will normally also satisfactorily indicate any fault on magnetic coupled windings not directly subjected to the switching impulse. Impulse currents may be recorded and will in many cases give additional information about a fault.

For switching impulse voltage recording, it is preferable to use capacitive types of voltage dividers, as resistive voltage dividers would have an influence on the waveshape and may be thermally overloaded. When resistive voltage dividers are used to check the voltage of the non-tested terminals, they should remain in the circuit because they represent a significant loading of the circuit. Properly calibrated capacitive bushing taps can be employed as voltage dividers.

8.2.4.2 Analogue recording of the impulse voltage waveshape

a) Determination of the impulse voltage waveshape

For the wavefront record taken for waveshape determination during preliminary adjustment of the test circuit parameters, a sweep which encompasses the peak of the wave is necessary, which normally means 100 μs to 300 μs . For the wavetail record, which is used only to determine the time above 90 % T_d , a sweep time of 500 μs to 1,000 μs is recommended.

b) Applied impulse test voltage wave recording

In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present, the sweep time has to be long enough to encompass the first zero passage. This time is longer than the expected time T_z and is normally 1 000 μs to 2 000 μs . In exceptional cases, even longer sweep times, for example, 2 000 μs to 3 000 μs may be necessary.

8.2.4.3 Digital recording of the impulse voltage waveshape

a) Determination of the impulse voltage waveshape

It is necessary to take samples over the complete waveshape, from the start to the time where the wave is completely damped, using the maximum available memory of the digitizer. It is important to programme the digitizer in such a way that a sufficient number of samples is present to determine the virtual starting-point of the wave. To record the switching impulse, a sampling frequency of 10 MHz is sufficient. The requirements for the digitizer as mentioned in 7.5.3 for the digital recording of lightning impulses are sufficient for the recording of switching impulses.

Il est important d'utiliser la résolution maximale disponible des amplificateurs d'entrée du numériseur. Un certain nombre d'impulsions de niveau réduit de 50 % sont nécessaires pour déterminer la plage optimale de la tension et/ou du décalage pour chaque canal.

Il convient de porter une attention particulière à l'effet de la saturation magnétique du noyau et la possibilité d'écèlement des enregistrements de tension et de courant en raison de la saturation des amplificateurs d'entrée du numériseur.

b) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué.

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et permettre la détection de tout défaut qui peut être présent, l'enregistrement doit être assez long pour englober le premier passage par zéro, qui est plus long que le temps attendu T_z . Cela nécessite généralement des temps d'enregistrement de 1 000 μ s à 2 000 μ s ou de 2 000 μ s à 3 000 μ s dans les cas exceptionnels.

8.2.4.4 Enregistrement analogique et numérique du courant de réponse à l'impulsion

Comme indiqué en 8.2.2, le courant d'impulsion peut être enregistré pour retrouver d'éventuelles décharges partielles. Quand ce courant est mesuré sur l'enroulement auquel la tension d'impulsion est directement appliquée, que ce soit ou non l'enroulement sur lequel le niveau de tension d'essai spécifié est à appliquer, il comprend trois parties:

- une impulsion de courant capacitive initiale;
- une faible valeur de la composante inductive du courant et allant graduellement en augmentant, qui coïncide avec la traîne de la tension appliquée;
- une crête de courant concomitante avec toute saturation. Cette crête de courant coïncidera avec une chute ou une décroissance de la tension si elle est due à l'effet de la saturation.

Tout défaut de spire à spire ou d'une partie de l'enroulement produira également une crête de courant instantané, mais avec une chute beaucoup plus rapide de tension, indiquant un blocage du flux.

Lorsque les oscillogrammes ou les enregistrements numériques du courant de réponse d'impulsion sont réalisés, il est préférable d'utiliser le même temps de balayage ou d'échantillonnage que celui utilisé pour l'enregistrement de tension.

8.3 Bobines d'inductance

8.3.1 Formes d'onde

La forme d'onde que l'on peut obtenir sur les bobines d'inductance sera d'une forme en cosinus amorti, sans aucun effet de saturation sur la traîne, puisqu'il n'y a aucun circuit ferromagnétique fermé dans les enroulements. Il convient que cette forme d'onde soit caractérisée principalement par sa fréquence, déterminée par l'inductance de la bobine d'inductance, la capacité du générateur et le coefficient d'amortissement. Toutefois, dans la pratique il a été spécifié des formes d'onde de bobine d'inductance comme pour les transformateurs, c'est-à-dire avec T_1 , T_d et T_z (voir les figures 3b et B.16).

Le temps d'attaque virtuel est principalement déterminé, comme pour les transformateurs, par la capacité effective d'enroulement, la capacité de charge additionnelle et la résistance série. Il convient qu'il soit assez long pour garantir une distribution approximativement uniforme dans tout l'enroulement essayé. Pour de grandes valeurs de T_1 , le coefficient d'amortissement sera grand, entraînant ainsi un temps T_z relativement court. Pour de petites valeurs de T_1 , T_d deviendra court et la crête de polarité opposée peut très bien approcher les 75 % du niveau de la tension d'essai avec un risque consécutif de claquages entre phase et terre ou entre phases. En raison de ces implications, il semble logique, comme dans le cas des transformateurs, de limiter la crête de polarité opposée maximale à un niveau de sécurité, inférieur à 50 %, et accepter les valeurs correspondantes de T_1 , T_d et T_z .

It is important to use the maximum available resolution of the input amplifiers of the digitizer. A number of 50 % reduced level impulses are needed to determine the optimum range of the voltage and/or the offset for each channel.

Special attention should be given to the effect of magnetic saturation of the core and the possibility of clipping of voltage and current recordings because of saturation of the input amplifiers of the digitizer.

b) Applied impulse test voltage wave recording

In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present, the recording has to be long enough to encompass the first zero passage, that is, longer than the expected time T_z . This normally requires recording times of 1 000 μ s to 2 000 μ s or 2 000 μ s to 3 000 μ s in exceptional cases.

8.2.4.4 Analogue and digital recording of the impulse response current

As mentioned in 8.2.2, impulse current may be recorded to possibly trace partial discharges. When this current is measured on the winding to which the impulse voltage is directly applied, whether or not this is the winding on which the specified test voltage level is to be achieved, the current comprises three parts:

- an initial capacitive current pulse;
- a low and gradually rising value of the inductive current component, coincident with the tail of the applied voltage;
- a peak of current coincident with any saturation. This current peak will be coincident with a voltage collapse or decay if it is due to the saturation effect.

Any turn-to-turn or part winding fault will also produce an instantaneous current peak, but with a much more rapid voltage collapse, indicating a flux blockage.

When oscillograms or digital recordings of the impulse response current are taken, it is preferable to employ the same sweep time or sampling time as used for the voltage record.

8.3 Reactors

8.3.1 Waveshapes

The waveshape obtainable on reactors will be of a damped cosine form, without any saturation effects on the tail, since there is no complete ferro-magnetic circuit through the windings. This waveshape should be characterized mainly by its frequency, determined by the reactor inductance and the generator capacitance, and the damping coefficient. However, practice has been to specify reactor waveshapes as for transformers, that is, by T_1 , T_d and T_z (see figures 3b and B.16).

The virtual front time is determined, as for transformers, primarily by the effective winding capacitance, additional load capacitance and the series resistance. It should be long enough to ensure approximately uniform distribution throughout the tested winding. For large values of T_1 , the damping coefficient will be large thus resulting in a relatively short time T_z . For small values of T_1 , T_d will become short and the opposite polarity peak may well approach 75 % of the test voltage level with an ensuing risk of phase-to-earth or phase-to-phase flashover. Due to these implications, it appears logical, as in the case of transformers, to limit the maximum opposite polarity peak to a safe level, of not more than 50 %, and to accept the corresponding values of T_1 , T_d and T_z .

Généralement la caractéristique du transformateur de $T_d \geq 200 \mu s$ n'est pas un problème pour les petites bobines d'inductance (< 100 Mvar pour les bobines d'inductance triphasées avec des impédances relativement élevées). Pour de grandes bobines d'inductance, T_d et T_z comme spécifiés pour les transformateurs exigeraient une augmentation excessive des capacités du générateur d'impulsion. Pour de tels cas, il convient que les valeurs minimales pour T_d et T_z soient respectivement de $120 \mu s$ et $500 \mu s$, pour assurer une contrainte tension – temps appropriée.

8.3.2 Raccordements aux bornes et méthodes de détection de défaillances applicables

8.3.2.1 Raccordements aux bornes

Puisqu'il n'y a qu'un enroulement par phase, le point d'application de la tension d'essai est la borne de ligne de l'enroulement de la phase qui doit être essayée. Il convient de mettre à la terre l'autre borne de l'enroulement de cette phase.

Pour les bobines d'inductance triphasées, la prescription stipulant qu'une tension de 1,5 fois la tension entre phase et neutre doit être développée entre les phases, comme indiqué à la figure 4, ne peut pas être satisfaite. Le flux dans ces bobines d'inductance ne peut pas être dirigé par les enroulements sur les colonnes non essayées. Par conséquent, les méthodes normales d'essai d'impulsion sont requises, comme pour les essais d'impulsion de choc de foudre.

8.3.2.2 Méthodes de détection de défaillances

Pour la détection des défaillances, comme pour les transformateurs, seule la mesure de la tension appliquée est généralement suffisante, mais il convient d'utiliser en plus le courant s'écoulant à la terre par l'enroulement essayé.

8.3.3 Méthodes d'essai

Puisqu'il n'y a aucun effet de saturation de noyau, les méthodes d'essai pour des bobines d'inductance sont les mêmes que pour les essais d'impulsion de choc de foudre. Elles comprennent:

- la détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc;
- l'application d'une impulsion de niveau d'essai réduit de polarité négative;
- l'application de trois impulsions de polarité négatives au niveau de tenue de l'impulsion de choc de manœuvre, sans aucune mesure de prémagnétisation.

8.3.4 Enregistrement analogique et numérique de la forme d'onde de la tension et du courant de réponse à l'impulsion de choc

Les mêmes principes généraux que ceux des transformateurs s'appliquent aux enregistrements de la tension et du courant des bobines d'inductance sous réserve des différences de forme d'onde décrites en 8.3.1. Toutefois, il est conseillé d'utiliser les temps de balayage, pour la tension et le courant, qui couvrent la deuxième moitié du cycle de la tension appliquée.

Pour les enregistrements de courant, il peut être avantageux d'utiliser, en plus, un temps de balayage plus court afin de pouvoir surveiller plus en détail le courant capacitif initial. La forme d'onde de base du courant correspondant à l'onde de tension en cosinus est sinusoïdale (voir les figures 3b et B.16).

Normally the transformer characteristic of $T_d \geq 200 \mu\text{s}$ is not a problem for small reactors (<100 Mvar for three-phase reactors with relatively high impedances). For large reactors, T_d and T_z as specified for transformers would require excessive impulse generator extension. For such cases, a minimum value for T_d and T_z should be 120 μs and 500 μs respectively to assure adequate volt-time stress.

8.3.2 Terminal connections and applicable methods of failure detection

8.3.2.1 Terminal connections

Since there is only one winding per phase, the application point for the test voltage is the line terminal of the phase winding which is to be tested. The other terminal of this phase winding should be earthed.

For three-phase reactors, the requirement, as in figure 4, that 1,5 times the voltage between phase and neutral shall be developed between phases, cannot be met. The flux in these reactors cannot be directed through the windings on the non-tested limbs. Hence, the normal impulse test procedures as used for lightning impulse tests are required.

8.3.2.2 Methods of failure detection

For failure detection, as for transformers, normally only the measurement of the applied voltage is sufficient but the current flowing to earth through the tested winding should additionally be used.

8.3.3 Test procedures

Since there is no core saturation effect, the test procedures for reactors is the same as for lightning impulse tests. They comprise

- the determination of the impulse voltage waveshape;
- the application of one negative polarity reduced test level impulse;
- the application of three negative polarity impulses at the switching impulse withstand level without any pre-magnetization measures.

8.3.4 Analogue and digital recording of impulse voltage waveshape and impulse response current

Subject to the waveshape differences described in 8.3.1, the same general principles apply to voltage and current recordings on reactors as for transformers. It is, however, advisable to use sweep times for both voltage and current which cover the second half-cycle of the applied voltage.

For current recordings, it may be advantageous to use, in addition, a shorter sweep time so as to be able to monitor the initial capacitive current in more detail. The basic waveform of the current corresponding to the cosine voltage wave is sinusoidal (see figures 3b and B.16).

9 Interprétation des oscillogrammes ou des enregistrements numériques

La méthode de base utilisée pour l'évaluation des résultats d'un essai consiste à comparer les formes d'ondes d'essai obtenues au cours d'une séquence d'essai particulière. Généralement, il convient que les tracés enregistrés sur le même canal, dans les mêmes conditions d'essai et en utilisant les mêmes constantes de circuit d'essai, soient identiques sauf dans le cas de dispositifs non linéaires. Il est recommandé que les différents niveaux de tension d'essai soient compensés par des atténuations appropriées pour obtenir le même niveau d'enregistrement.

L'annexe B contient un certain nombre d'oscillogrammes et d'enregistrements numériques pris pendant les essais réels sur des transformateurs et bobines d'inductance, montrant quelles sont les conditions de défaut et de non-défaut. Cependant, il est manifeste que des divergences de forme d'onde similaires sur une autre unité peuvent ne pas être nécessairement considérées comme résultantes de la même cause que les défauts qui se présenteront différemment d'une conception à une autre.

9.1 Impulsion de choc de foudre

9.1.1 Généralités

L'interprétation des oscillogrammes ou des enregistrements numériques est fondée sur la comparaison des formes d'onde des enregistrements de tension et de courant entre les tensions d'essai réduites et nominales ou entre des enregistrements successifs à la tension d'essai nominale. C'est une tâche qui demande de la compétence et il est souvent difficile de trancher quant à la signification des divergences, même avec une expérience considérable, en raison du grand nombre de sources de perturbation possibles. Les divergences de toutes sortes sont concernées et il convient qu'elles soient étudiées.

Pour la recherche de ces divergences, il est recommandé de vérifier d'abord que le circuit d'essai, le circuit de mesure et les procédés de mise à la terre ne sont pas la cause des perturbations. Si les perturbations proviennent du circuit d'essai, il convient de faire tous les efforts pour les éliminer ou au moins pour réduire leur effet au minimum. Il convient de se souvenir que dans les générateurs à plusieurs étages, les différences dans les temps de démarrage des différents étages, peuvent donner lieu à des changements infimes de l'amplitude des enregistrements de courant avec des oscillations initiales à haute fréquence (sans changer la fréquence de base). Voir la figure B.13. Toutefois, dans la majorité des cas, ces changements sont limités à une période de temps correspondant à 50 % du front d'onde de l'impulsion appliquée.

Il y a parfois aussi des divergences après la crête, qui peuvent également provenir du générateur avec fonctionnement en multi-étages parallèles, si les circuits de décharge ne coïncident pas dans le temps. Cela peut nécessiter un nouveau réglage des éclateurs à décharge sur les générateurs qui ont des éclateurs série et parallèles.

Deuxièmement, il convient de vérifier que la mise à la terre du noyau ou des éléments non linéaires de l'objet en essai n'est pas la source des perturbations. Les résistances sans éclateur et non linéaires peuvent produire une évolution logique et progressive ou une modification avec une augmentation des niveaux de tension, voir figure B.12.

Ayant éliminé ou expliqué les sources des divergences ci-dessus, les variations dans les enregistrements de forme d'onde de tension ou de courant entre la tension d'essai réduite et nominale ou entre des enregistrements successifs à la tension d'essai nominale dont on ne peut pas prouver que l'origine provient du circuit d'essai ou des résistances non linéaires dans l'objet en essai, sont des preuves de défaut d'isolement lors de l'essai.

9 Interpretation of oscillograms or digital recordings

The basic method for judging the results of a test is by comparison between the test waveforms obtained in a given test sequence. Generally speaking, traces recorded from the same channel, under the same test conditions and using the same test circuit constants, should be identical except in the case of non-linear devices. Different test voltage levels should be compensated by appropriate attenuations to obtain the same recording level.

Annex B contains a number of oscillograms and digital recordings taken during actual tests on transformers and reactors demonstrating fault and non-fault conditions. It is, however, strongly emphasized that similar waveform discrepancies on another unit cannot necessarily be taken as arising from the same cause as the faults will present themselves differently from design to design.

9.1 Lightning impulse

9.1.1 General

Interpretation of oscillograms or digital recordings is based on comparison of the waveshapes of voltages and current records between reduced and rated test voltages or between successive records at rated test voltage. This is a skilled task and it is often difficult to decide the significance of discrepancies, even with considerable experience, because of the large number of possible disturbance sources. Discrepancies of any kind are of concern and should be investigated.

For such an investigation into discrepancies, it is recommended to check first that the test circuit, the measuring circuit and earthing methods are not causing the disturbances. If the disturbances originate in the test circuit, every effort should be made to eliminate them or at least to minimize their effect. It should be remembered that in multi-stage generators, differences in the firing times of the individual stages may give rise to minute changes in the amplitude of current records with high-frequency initial oscillations (without changing the basic frequency). See figure B.13. In the majority of cases, however, these changes are limited to a time period corresponding to 50 % of the wavefront of the applied impulse.

There are sometimes also discrepancies after the peak, which may also originate from the generator, with multiple parallel stage operation, if the discharge circuits are not coincident in time. This may require new setting of the discharge gaps on generators which have both series and parallel gaps.

Secondly, it should be checked that core earthing or any non-linear elements within the test object are not the source of the disturbances. Non-gapped, non-linear resistors may produce a logical and progressive development or change with increasing voltage levels (see figure B.12).

Having eliminated or explained the above sources of discrepancies, variations in the wave-shape of voltage or current records between reduced and rated test voltage or between successive records at rated test voltage, which cannot be proved to originate in the test circuit or in non-linear resistors within the test object, are evidence of insulation failure from the test.

9.1.2 Enregistrements de tension – Essais pleine onde

Les oscillogrammes ou les enregistrements numériques de la tension appliquée sont des moyens relativement mal adaptés à la détection des défaillances. Ainsi, les divergences détectables indiquent les principaux défauts de l'isolement ou du circuit d'essai.

Une analyse plus détaillée des divergences est possible, à condition que la résolution de temps soit suffisamment élevée.

- Les défaillances directes à la terre, près de la borne en essai, auront comme conséquence une chute rapide et totale de la tension. Un claquage progressif, mais néanmoins total dans l'enroulement à l'essai aura comme conséquence une chute légèrement plus lente de la tension, ayant lieu généralement par échelons, voir la figure B.1.
- Un claquage dans une partie de l'enroulement réduira l'impédance de l'enroulement, ayant ainsi pour résultat une diminution du temps à demi-valeur. Des oscillations caractéristiques se produiront également sur l'onde de tension au moment du claquage, voir les figures B.1 à B.5.
- Des défauts moins importants, tels que la rupture de l'isolement de bobine à bobine ou même de spire à spire, ne sont généralement pas reconnaissables sur les enregistrements de tension mais peuvent parfois être détectés comme oscillations à haute fréquence; habituellement les enregistrements de courant révéleront ces défauts. Voir la figure B.6. De même, des défauts naissants sur ou près de la borne à l'essai ne peuvent aussi donner que de petits indices sur les oscillogrammes ou les enregistrements numériques.

Les enregistrements de tension transférée révéleront également les défauts mentionnés ci-dessus. La sensibilité de cette mesure est plus élevée que celle de la tension appliquée.

9.1.3 Enregistrements de courant – Essais pleine onde

Les oscillogrammes ou les enregistrements numériques du courant de réponse de l'impulsion sont les moyens les plus sensibles pour la détection des défaillances. Cependant, cette sensibilité est associée à la possibilité pour les enregistrements de révéler un certain nombre d'effets non directement liés à une défaillance. Quelques possibilités ont été identifiées en 9.1. Elles peuvent être responsables de salves d'oscillations erratiques ou de modifications du front d'onde sur les tracés de courant et il convient de les étudier.

Les modifications majeures dans les enregistrements de courant, tels que l'amplitude et les changements de fréquence, indiquent généralement des claquages d'une partie d'enroulement dans l'enroulement essayé, entre les enroulements ou à la terre, voir la figure B.1. L'allure de la modification sera différente selon la méthode de détection de défaillance utilisée. Les courants peuvent augmenter ou diminuer et la direction de la variation ainsi que la méthode de détection de défaut donneront des renseignements sur la nature et l'endroit du défaut, voir la figure B.3.

Une augmentation significative, combinée avec une modification de la fréquence superposée d'un courant de neutre indique un défaut dans l'enroulement essayé, tandis qu'une diminution indique un défaut entre l'enroulement essayé et un enroulement adjacent ou à la terre.

Le courant transféré par capacité montrera un changement instantané de polarité pour des défauts dans l'enroulement essayé ou à la terre. Il y aura aussi une modification de la fréquence de base et il peut y avoir une diminution de l'amplitude. Un défaut entre l'enroulement essayé et un enroulement adjacent se révélera par une augmentation instantanée d'amplitude dans le même sens de polarité et par une modification de la fréquence de base.

Les petites perturbations locales, dentelées, qui peuvent être étalées sur 2 μ s ou 3 μ s, sont une indication possible de décharge sévère ou de claquage partiel dans l'isolement entre spires ou bobines ou des connexions de bobine. Pour des enroulements de faible capacité série, c'est-à-dire, présentant principalement un comportement d'onde progressive, il peut être possible d'identifier la source des perturbations en évaluant la différence de temps entre l'arrivée au neutre des perturbations capacitatives et les perturbations de l'onde progressive.

9.1.2 Voltage recordings – Full-wave tests

The oscillograms or digital recordings of the applied voltage are a relatively insensitive means for failure detection. Thus, the detectable discrepancies indicate major faults in the insulation or in the test circuit.

Provided that the time resolution is sufficiently high, a more detailed analysis of discrepancies is possible.

- Direct faults to earth near the terminal under test will result in a rapid and total collapse of the voltage. A progressive but nevertheless total flashover across the winding under test will result in a somewhat slower voltage collapse, normally occurring in a stepped manner (see figure B.1).
- A flashover across part of the winding will reduce the impedance of the winding, thus resulting in a decrease of the time to half-value. Characteristic oscillations will also occur on the voltage wave at the moment of flashover (see figures B.1 to B.5).
- Less extensive faults, such as breakdown of coil-to-coil or even turn-to-turn insulation are normally not recognizable on the voltage recordings but may sometimes be detected as high-frequency oscillations; current records will normally detect these faults. See figure B.6. Likewise, incipient faults at or near the terminal under test may also give only small indications on the oscillograms or digital recordings.

Transferred voltage recordings will also indicate the above-mentioned faults. The sensitivity of this measurement is higher than that of the applied voltage.

9.1.3 Current recordings – Full-wave tests

Oscillograms or digital recordings of the impulse response current are the most sensitive means for failure detection. However, this sensitivity is accompanied by the possibility of the recordings indicating a number of effects not directly associated with failure. Some possibilities have been identified in 9.1, which may be responsible for erratic bursts of oscillations or wavefront changes on current traces and should be investigated.

Major changes in current records such as amplitude and frequency changes normally indicate part winding breakdowns within the tested winding, between windings or to earth (see figure B.1). The form of the change will be different depending on the method of failure detection employed. Currents may increase or decrease and the direction of the change together with the method of fault detection will give guidance on the nature and location of the fault (see figure B.3).

A significant increase, combined with a change in superimposed frequency in a neutral current is indicative of a fault within the tested winding whilst a decrease indicates a fault from the tested winding to an adjacent winding or to earth.

Capacitively transferred current will, for faults in the tested winding or to earth, show an instantaneous change in polarity. There will also be a change in basic frequency and there may be a decrease in amplitude. A fault from the tested winding to an adjacent winding will show an instantaneous increase in amplitude in the same polarity sense and a change in basic frequency.

Small, local, jagged disturbances, perhaps spread over 2 μ s or 3 μ s, are a possible indication of severe discharge or partial breakdown in the insulation between turns or coils or coil connections. For windings of small series capacitance, that is, exhibiting essentially travelling wave behaviour, it may be possible to identify the source of disturbances by evaluating the time difference between the arrival at the neutral of the capacitive and the travelling wave disturbances.

9.1.4 Enregistrements de tension et de courant – Essais en onde hachée

La comparaison des enregistrements en onde hachée après l'instant de hachage n'est généralement pas possible, à moins que les instants de hachage soient à peu près identiques. Des instants de hachage similaires, mais non nécessairement identiques sont réalisés au moyen d'éclateurs de hachage de type déclenché, voir la figure B.10. Même les petites différences dans l'instant de hachage, peuvent, pour quelques transformateurs, provoquer des différences marquées dans la forme des oscillations après le coup de hachage (cette forme étant une superposition des phénomènes transitoires dus au front de l'impulsion d'origine et au hachage) et ces différences peuvent compliquer la comparaison entre les enregistrements des applications réussies et celles pour lesquelles un défaut existe (voir la figure B.11).

Lors de l'utilisation des techniques d'enregistrement numérique, l'analyse de fonction de transfert, décrite à l'article 10, peut être utile pour éliminer cette complication (voir la figure B.17).

Il convient d'étudier toute modification de la fréquence des enregistrements de tension et de courant après le hachage. Ces modifications peuvent être provoquées soit par un claquage dans la boucle de retour à la terre du laboratoire, soit par une défaillance interne de l'objet en essai.

Lors de la conduite de l'essai en onde hachée, une défaillance de coupure de l'éclateur de hachage ou l'amorçage d'une partie externe donne une indication précise d'une défaillance de l'objet en essai ou du circuit d'essai, bien que l'enregistrement de tension montre une onde hachée.

A condition que le temps de hachage soit sensiblement identique d'une application de tension à l'autre, les défaillances pendant cet essai seront détectables sur les enregistrements à la fois de tension et de courant par des différences dans les oscillations après hachage. Voir les figures B.8 et B.9. Il y a cependant des cas où le défaut se produit avant l'instant du hachage et de ce fait les mêmes considérations que pour les essais pleine onde s'appliquent (voir les figures B.2 et B.7).

9.2 Impulsion de choc de manœuvre

9.2.1 Enregistrements de tension

Dans les essais d'impulsion de choc de manœuvre, du fait de la distribution uniforme de la tension dans tout l'enroulement, le défaut implique généralement une détérioration importante sous forme de court-circuit entre les sections, les parties d'un enroulement ou même entre les enroulements ou à la terre. Ces types de défauts provoquent une modification importante de l'onde de tension comme une chute totale de l'onde ou un raccourcissement de la traîne ou, parfois, comme un creux temporaire dans le tracé. Par conséquent, les enregistrements de tension lors des essais d'impulsion de choc de manœuvre sont des moyens suffisamment sensibles pour la détection de la plupart des défauts, voir la figure B.15.

Pour des transformateurs, tout défaut d'une partie d'enroulement (défaillance spire à spire, claquage disque à disque ou pannes dans des enroulements à prise) aura comme conséquence un blocage de flux et sera facilement détecté par les enregistrements de tension et de courant.

Pour les bobines d'inductance à noyau à entrefer, qui ont seulement un enroulement par phase et pas de circuit magnétique fermé, la détection des défauts spire à spire peut être très difficile ou bien ils peuvent même rester non détectés. Ici une résolution plus élevée du courant capacitif s'écoulant à la terre ou un second enregistrement de courant (le courant de cuve) peut être utile. Dans ces cas, une résolution d'enregistrement plus élevée est recommandée pour couvrir le moment de la crête et de la polarité opposée de l'onde cosinus appliquée.

9.1.4 Voltage and current recordings – Chopped-wave tests

Comparison of the chopped-wave recordings after the instant of chopping is not normally possible unless the instants of chopping are almost identical. Similar but not necessarily identical instants of chopping are achieved by use of triggered-type chopping gaps (see figure B.10). Even small differences in the instant of chopping, can, for some transformers, give rise to marked differences in the oscillation pattern after the chop (this pattern being a superposition of the transient phenomena due to the front of the original impulse and the chopping) and these differences may confuse comparison between the records of successful applications and those where a fault exists (see figure B.11).

When using digital recording techniques, the transfer function analysis as described in clause 10 may be helpful to eliminate this confusion (see figure B.17).

Any changes in the frequency of the voltage and current recordings after the chopping should be investigated. These changes may be caused by either a flashover in the return loop to the laboratory earth or an internal failure in the test object

When making the chopped wave test, failure of the chopping gap to chop, or any external part to spark over, although the voltage recording shows a chopped wave, gives a definite indication of a failure either within the test object or in the test circuit.

Provided that the time to chopping is reasonably identical from one voltage application to another, failures during this test will be detectable both in the voltage and current recordings by differences in the oscillations after chopping. See figures B.8 and B.9. There are, however, cases where the fault occurs before the instant of chopping and then the same considerations apply as for full-wave tests (see figures B.2 and B.7).

9.2 Switching impulse

9.2.1 Voltage recordings

In switching impulse tests, owing to the uniform distribution of voltage throughout the winding, the fault normally involves major deterioration in the form of a short circuit between sections, parts of a winding or even between windings or to earth. These types of fault cause a significant change in the voltage wave either as a complete collapse of the wave or a shortening of the tail or, sometimes, as a temporary dip in the trace. Hence, the voltage records on switching impulse tests are a sufficiently sensitive means for detection of most faults (see figure B.15).

For transformers, any part-winding defect (turn-to-turn failure, disc-to-disc breakdown, or breakdowns in tapping windings) will result in a flux blockage and will easily be detected by voltage and current records.

For gapped core reactors, which have only one winding per phase and no closed magnetic loop, the detection of turn-to-turn faults may be very difficult, or faults may be even left undetected. Here a higher resolution of the capacitive current flowing to earth, or a second current record (the tank current), may be helpful. In such cases, higher resolution recording to cover the time to peak and to the opposite polarity of the applied cosine wave is recommended.

Tout raccourcissement de la queue d'onde dans les essais de transformateur est habituellement tout à fait reconnaissable de la variation de la longueur de la queue d'onde résultant des états initiaux différents de la magnétisation du noyau pour des applications successives; néanmoins, plus les états initiaux peuvent être mis étroitement en correspondance, plus il devient facile de distinguer une condition de défaut d'une condition de non-défaut.

9.2.2 Enregistrements du courant de réponse à l'impulsion

La forme d'onde générale de l'enregistrement de courant a été décrite en 8.2.4.4 pour les transformateurs et en 8.3.4 pour des bobines d'inductance. Excepté au début de l'onde ou, dans le cas des transformateurs, à proximité de la saturation du noyau, des modifications brusques de courant ayant lieu en même temps qu'une déformation de l'onde de tension sont révélatrices de défaillance. Compte tenu de la nature des défauts attendus, les enregistrements de courant sont aussi sensibles que les enregistrements de tension.

10 Traitement numérique, comprenant l'analyse de fonction de transfert

Avec l'introduction des techniques d'enregistrement numérique dans les essais d'impulsion LI et SI, il existe maintenant les outils complémentaires qui sont disponibles pour l'analyse des défaillances:

Dans l'analyse de fonction de transfert, les enregistrements en temps réel de la tension appliquée $U(t)$ et du courant de réponse de l'impulsion $I(t)$ résultant, au neutre du transformateur ou à l'enroulement non essayé court-circuité à la terre (courant couplé par capacité), peuvent être transférés par les algorithmes de la transformation de Fourier rapide (FFT) dans le domaine des fréquences en respectivement $U(\omega)$ et $I(\omega)$.

Les spectres de tension et de courant ($U(\omega)$ et $I(\omega)$) sont alors traités mathématiquement comme suit:

- a) par division $I(\omega)/U(\omega)$ pour former la fonction d'admittance de transfert,
- ou
- b) par division $U(\omega)/I(\omega)$ pour former la fonction d'impédance de transfert.

Pour le réseau passif d'un transformateur, la fonction d'admittance et la fonction d'impédance sont considérées comme des fonctions caractéristiques dans le domaine des fréquences et devraient être indépendantes de la forme d'onde. Cependant, puisque le spectre de la tension $U(\omega)$ ne présente aucun point nul, la fonction de transfert d'admittance $I(\omega)/U(\omega)$ est utilisée de préférence dans l'analyse de fonction de transfert.

Des exemples d'une telle fonction de transfert sont donnés à la figure B.17.

D'après la théorie du quadripôle¹⁾, pour la fonction d'admittance, les indices de défaillances sont révélés de la manière suivante.

- 1) Tout décalage de pôles significatifs de la fonction de transfert est l'indice d'une panne d'une partie d'enroulement.
- 2) Tout aplatissement des pôles serait un indice de décharges partielles.

¹⁾ La théorie du quadripôle est un outil mathématique pour décrire les relations entre les caractéristiques d'entrée et de sortie d'un circuit électrique linéaire dans les domaines des temps et des fréquences.

Any wavetail shortening in transformer tests is usually quite distinguishable from variation in the length of the wavetail resulting from differing initial states of core magnetization on successive applications; nevertheless, the closer the initial states can be matched, the easier it becomes to distinguish between a fault and a non-fault condition.

9.2.2 Recordings of the impulse response current

The general waveform of the current record has been described in 8.2.4.4 for transformers and in 8.3.4 for reactors. Except at the start of the wave or, in the case of transformers, in the vicinity of core saturation, sharp changes of current occurring at the same time as any distortion of the voltage wave are indicative of failure. With the nature of faults to be expected, current records are as sensitive as voltage records.

10 Digital processing, including transfer function analysis

With the introduction of digital recording techniques in LI and SI impulse testing, there are now additional tools available for failure analysis.

In transfer function analysis, the real time records of both the applied voltage $U(t)$ and the resulting impulse response current $I(t)$, either at the transformer neutral or at the shorted non-tested winding to earth (capacitively transferred current), can be transferred by Fast Fourier Transformation (FFT) algorithms to the frequency domain, respectively $U(\omega)$ and $I(\omega)$.

Then voltage and current spectra ($U(\omega)$ and $I(\omega)$) are mathematically treated as follows:

- a) by division of $I(\omega)/U(\omega)$ to form the transfer admittance function,
- or
- b) by division of $U(\omega)/I(\omega)$ to form the transfer impedance function.

For the passive network of a transformer, both the admittance function and the impedance function are considered as a characteristic function in the frequency domain and should be independent of the waveshape. However, since the voltage spectrum $U(\omega)$ does not exhibit any zero points, the transfer admittance function $I(\omega)/U(\omega)$ is preferably used in transfer function analysis.

Examples of such transfer function are given in figure B.17.

From the quadrupole¹⁾ theory the failure indications are derived as follows for the admittance function.

- 1) Any shift of significant poles in the transfer function is indicative of a part-winding breakdown.
- 2) Any flattening of the poles is said to be indicative of partial discharges.

¹⁾ The quadrupole theory is a mathematical tool to describe the relationship between input and output quantities in a linear electrical network in the time and frequency domain.

Cependant, des modifications de l'impulsion de courant et/ou de la tension appliquée qui ne conduisent pas à une modification de la fonction d'admittance de transfert, indiquent un problème de circuit d'essai plutôt qu'un problème sur l'objet en essai et par conséquent est un outil pour différencier les défaillances internes et externes.

Il est à souligner que cette technique n'est pas entièrement éprouvée pour tous les cas et actuellement elle est uniquement recommandée comme une aide supplémentaire à l'interprétation des résultats. L'acceptation finale des résultats d'essai est toujours basée sur la comparaison des formes d'onde, comme indiqué en 7.5.

Les numériseurs ont été utilisés pour les essais d'impulsion depuis les années 80. Cependant, la documentation et l'expérience concernant l'analyse par fonction de transfert ont été longtemps contradictoires. Il y a plusieurs raisons à ces contradictions, notamment

- a) les transformateurs et en particulier les circuits d'essai d'impulsion de choc de foudre ne peuvent pas être représentés par un élément de circuit linéaire localisé pour lequel la théorie du quadripôle est entièrement applicable.
- b) les numériseurs peuvent avoir des filtres incorporés non normalisés pour filtrer le bruit du signal, qui peut
 - donner lieu à des indications filtrées (donc rejetées) d'un défaut naissant et non identifié;
 - affecter l'indépendance de la forme d'onde de la fonction d'admittance;
- c) les critères bon/mauvais pour les écarts dans les différentes conditions de défaut n'ont pas été encore établis à un degré satisfaisant.

Cette nouvelle technologie représente un outil très puissant à l'avenir, parce qu'elle peut également être utilisée pour la surveillance d'états en ligne, pour les défauts diélectriques et pour les défauts mécaniques après de graves courts-circuits.

Dans ce qui suit, quelques exemples d'enregistrements sont présentés, à la fois pour l'analyse en temps réel et en fonction de transfert.

Cas 1: Exemple d'enregistrements de forme d'onde non normalisée évaluée numériquement

- Forme d'onde non normalisée 1,44/46 μ s avec 19 % de dépassement, évaluée par la tangente sur l'affaiblissement de traîne selon la CEI 60060-1, voir la figure B.18. Ici l'erreur dans l'évaluation d'amplitude peut être supérieure à 10 % du fait de la courbe intégrée non connue des algorithmes de lissage des numériseurs.
- Forme d'onde non normalisée 2,48/50 μ s, ayant des oscillations superposées avec une amplitude supérieure à 50 % et une fréquence inférieure à 0,5 MHz, voir la figure B.19. Ici le numériseur a évalué le temps à demi-valeur comme étant de 5 μ s, en se basant sur le premier passage de l'oscillation superposée, tandis que l'évaluation selon la CEI 60060-1 fait apparaître 50 μ s.
- Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche, voir la figure B.20. Ici l'impédance de couche évite la chute rapide et les oscillations autour de zéro de l'onde hachée vers la terre. (Comparer les oscillogrammes ou les enregistrements numériques des figures B.8 à B.11 avec la figure B.20.)
- Comparaison de formes d'onde non normalisées par des numériseurs de différentes fabrications à partir du même enregistrement. Dans l'exemple de la figure B.21, il est trouvé une différence de 7 % pour l'amplitude (109,9 kV contre 102,3 kV) et de 9 % pour le paramètre T_1 (2,55 μ s contre 2,34 μ s). La différence pour le paramètre T_2 n'est pas explicable. La lecture du voltmètre de crête parallèle étalonné était de 110 kV.

However, changes in the impulse current and/or the applied voltage which do not lead to a change in transfer admittance function, indicate a test circuit problem rather than a test object problem and hence is a tool to differentiate between internal and external failures.

It is emphasized that this technique is not fully proven for all cases and at present is only recommended as an additional aid to interpretation of results. The final acceptance of test results is still based on comparison of waveforms as stated in 7.5.

Digitizers have been used in impulse testing since the 1980s. However, the literature and experience regarding transfer function analysis was for many years contradictory. There are several reasons for these contradictions, namely

- a) transformers and in particular the lightning impulse test circuits cannot be represented by a lumped linear circuit element for which quadrupol theory is fully applicable;
- b) digitizers may have non-standardized in-built filters to filter noise from the signal which may
 - result in incipient fault indications being filtered out and not recognized;
 - affect the waveshape independence of the admittance function;
- c) the good/bad criteria for the deviations in the different fault conditions have not yet been established to an adequate degree.

This new technology represents a very powerful tool for the future, because it may also be used for on-line condition monitoring, both for dielectric defects and for mechanical defects after severe short-circuits.

In the following a few example recordings, both for real time and transfer function analysis, are presented.

Case 1: Example recordings of digitally evaluated non-standard waveshapes

- For non-standard waveshape 1,44/46 μs with 19 % overshoot, evaluated by tangent through tail decay according to IEC 60060-1, see figure B.18. Here the error in amplitude evaluation may be greater than 10 % due to the unknown in-built curve smoothing algorithms of digitizers.
- For non-standard waveshape 2,48/50 μs , having superimposed oscillations with >50 % amplitude and frequency less than 0,5 MHz, see figure B.19. Here the digitizer evaluated the time to half-value as 5 μs , based on the first passage of the superimposed oscillation, whereas evaluation according to IEC 60060-1 shows 50 μs .
- For non-standard chopped wave on a layer type winding, see figure B.20. Here the layer impedance avoids rapid collapse and oscillations around zero of the chopped wave to earth. (Compare oscillograms or digital recordings in figures B.8 to B.11 with figure B.20.)
- For comparison of non-standard waveshapes by digitizers of different make from the same recording: in the example in figure B.21, a difference of 7 % in amplitude (109,9 kV versus 102,3 kV) and of 9 % in the T_1 parameter (2,55 μs versus 2,34 μs) is found. The difference in the T_2 parameter is not explainable. The reading of the calibrated parallel peak voltmeter was 110 kV.

Cas 2: Réponses aux problèmes de circuit d'essai

- Problème de circuit d'essai provoqué par un amorçage à la terre d'un câble de mesure. Voir la figure B.22a. Le courant transféré par capacité de l'enroulement BT amorce à une terre différente de la terre de cuve et de générateur, entraînant, après avoir comparé avec l'essai pleine onde réduite
 - a) aucune indication de la tension;
 - b) une indication claire de courant;
 - c) une indication claire de l'analyse de fonction de transfert.
- Dans la fonction de transfert, l'aplanissement des pôles est présent, mais aucune modification de la fréquence. Cela indique des décharges.
- Après la correction du défaut dans le câble de mesure, l'essai d'impulsion de choc a été répété. La figure B.22b montre une correspondance parfaite entre les fonctions de transfert aux essais d'impulsion pleine onde réduite.

Cas 3: Réponses aux défaillances d'objet en essai

- Un enregistrement numérique de défaillance par claquage de fil de changeur de prises, entre les prises est illustré à la figure B.23a. Les enregistrements en temps réel de tension et de courant à la pleine impulsion et la fonction de transfert montrent des modifications importantes comparées à l'essai d'impulsion pleine onde réduite.
- Un enregistrement numérique de défaillances entre un enroulement de régulation grossière et fine, voir la figure B.23b. Des modifications importantes se produisent dans tous les enregistrements en temps réel et de fonction de transfert.

Comme on peut le voir à partir des enregistrements dans tous les exemples donnés précédemment, tous les défauts ont été aussi détectés par les enregistrements en temps réel.

11 Rapports d'essai de l'impulsion de choc

Il convient qu'un rapport des essais d'impulsion de choc conduits sur l'objet en essai comprenne au moins les informations qui suivent.

- a) Informations générales incluant
 - le type, les caractéristiques et la tension des équipements essayés;
 - le numéro de série;
 - la position de la prise sur laquelle l'essai est effectué;
 - le lieu et la date de l'essai;
 - l'ingénieur d'essai du constructeur;
 - l'ingénieur de l'acheteur qui assiste à l'essai;
 - la norme à laquelle les équipements sont essayés;
 - les niveaux d'essai et formes d'onde spécifiés.
- b) Une présentation sous forme de tableaux montrant les essais d'impulsion de choc conduits sur chaque borne comprenant
 - le type et l'amplitude des ondes d'essai;
 - la numérotation des enregistrements pour l'identification et pour faciliter la mise en référence croisée;
 - les tensions d'essai réelles pour LI, les ondes pleines ou hachées et pour SI;
 - les paramètres réels d'installation (internes et externes) pour le générateur d'impulsion;

Case 2: Responses from test-circuit problems

- For test-circuit problems caused by a sparkover to earth from a measuring cable, see figure B.22a. The capacitively transferred current from the LV winding sparks to a different earth than the tank and generator earth, resulting, after comparing with the reduced full-wave test, in
 - a) no indication in the voltage;
 - b) clear indication in the current;
 - c) clear indication in the transfer function analysis.
- In the transfer function, flattening of poles is present, but no change in frequency. This indicates discharges.
- After correction of the fault in the measuring cable, the impulse test was repeated. Figure B.22b shows a perfect match between the transfer functions at reduced- and full-wave impulse tests.

Case 3: Responses from test object failures

- A failure digital recording of a tap changer lead flashover between taps is shown in figure B.23a. The real time recordings of voltage and current at the full impulse and the transfer function show significant changes compared to the reduced full-wave impulse test.
- For failure digital recording between a coarse and a fine regulating winding, see figure B.23b. Significant changes occur in all real time and transfer function records.

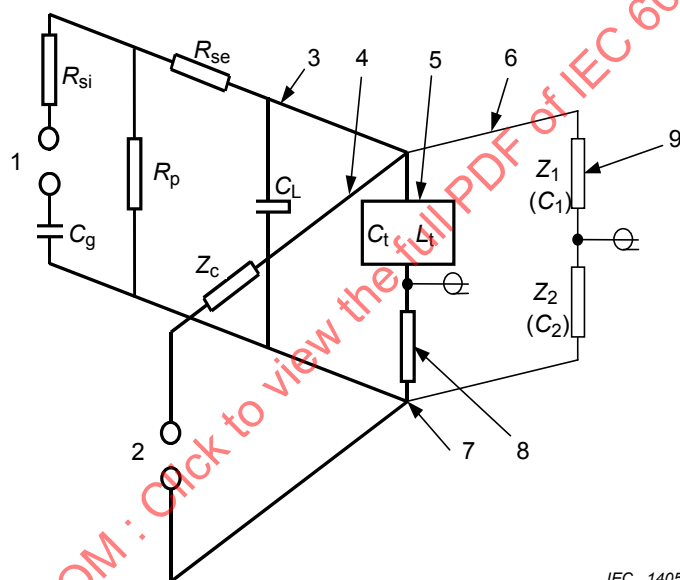
As can be seen from the records in all previously shown examples, all defects were also detected by the real time records.

11 Impulse test reports

A report of the impulse tests conducted on the test object should include at least the following information.

- a) General information, including
 - type, rating and voltage of the equipment tested;
 - serial number;
 - tap position on which the test is carried out;
 - place and date of the test;
 - manufacturer's test engineer;
 - purchaser's witnessing engineer;
 - standard to which the equipment is tested;
 - specified test levels and waveshapes.
- b) A tabulation showing impulse tests conducted on each terminal including
 - type and magnitude of test waves;
 - numbering of recordings for identification and easy cross-referencing;
 - actual test voltages for LI, full or chopped waves, and for SI;
 - actual set-up parameters (internal and external) for the impulse generator;

- les paramètres réels de forme d'onde pour LI (T_1 , T_2 , T_c) et pour SI (T_1 , T_d , T_z);
 - un dessin des raccordements pour chaque essai, incluant
 - les marquages des bornes;
 - à quelle borne l'impulsion est appliquée;
 - les dispositions de mise à la terre des bornes non essayées de la phase essayée et des phases non essayées, y compris les valeurs de toutes les résistances ou impédances de mise à la terre;
 - les caractéristiques du circuit d'essai;
 - les dispositions et les positions de mesure de courant et tension.
- c) Les reproductions des enregistrements pertinents pris pendant l'essai constituent une partie importante du rapport d'essais. Lorsque cela est spécifié, il convient que ces enregistrements soient correctement identifiés et organisés, de sorte que les comparaisons nécessaires entre les pleines ondes et les ondes hachées puissent être facilement réalisées. Il convient que les graduations de chaque axe (c'est à dire amplitude et temps) soient données sur chaque oscillogramme ou enregistrement numérique.



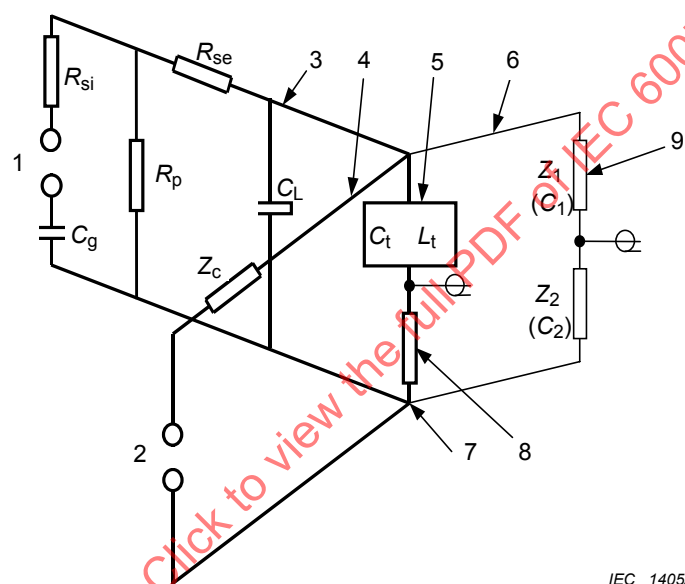
IEC 1405/02

Légende

1	générateur d'impulsion	C_g	capacité du générateur
2	éclateur de hachage	C_L	capacité de charge
3	circuit principal	C_t	capacité effective de l'objet en essai
4	circuit de hachage	L_t	impédance effective de l'objet en essai
5	objet en essai	R_{si}	résistance série interne
6	circuit de mesure de tension	R_{se}	résistance série externe
7	terre de référence	R_p	résistance parallèle
8	shunt de courant	Z_c	impédance additionnelle dans le circuit de hachage
9	diviseur de tension	$Z_1 (C_1)$	impédance (capacité) du côté haute tension du diviseur de tension
		$Z_2 (C_2)$	impédance (capacité) du côté basse tension du diviseur de tension

Figure 1 – Circuit d'essai d'impulsion de choc typique

- actual waveshape parameters for LI (T_1 , T_2 , T_c) and for SI (T_1 , T_d , T_z);
 - a diagram of the connections for each test, including
 - terminal markings;
 - which terminal the impulse is applied to;
 - earthing arrangements of the non-tested terminals of the tested phase and of the non-tested phases, including values of any earthing resistances or impedances;
 - test-circuit details;
 - voltage and current measurement positions and arrangements.
- c) Reproductions of the pertinent recordings taken during the tests are an important part of the test report. When specified, these recordings should be properly identified and arranged so that the necessary comparisons between full waves and chopped waves can be easily made. The scaling of each axis (that is, magnitude and time) should be shown on every oscillogram or digital recording.

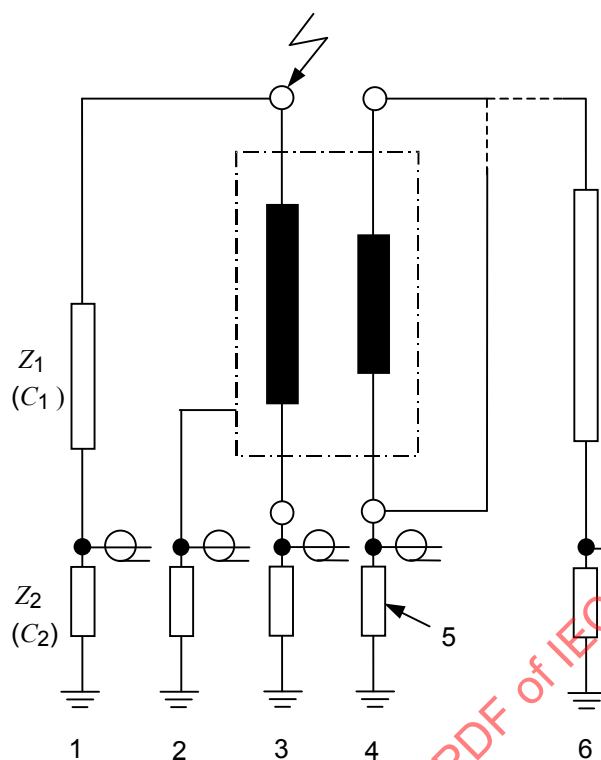


IEC 1405/02

Key

1	impulse generator	C_g	generator capacitance
2	chopping gap	C_L	loading capacitance
3	main circuit	C	effective test object capacitance
4	chopping circuit	L_t	effective test object impedance
5	test object	R_{si}	internal series resistance
6	voltage measuring circuit	R_{se}	external series resistance
7	reference earth	R_p	parallel resistance
8	current shunt	Z_c	additional impedance in the chopping circuit
9	voltage divider	$Z_1 (C_1)$	impedance (capacitance) of the high-voltage arm of the voltage divider
		$Z_2 (C_2)$	impedance (capacitance) of the low-voltage arm of the voltage divider

Figure 1 – Typical impulse test circuit

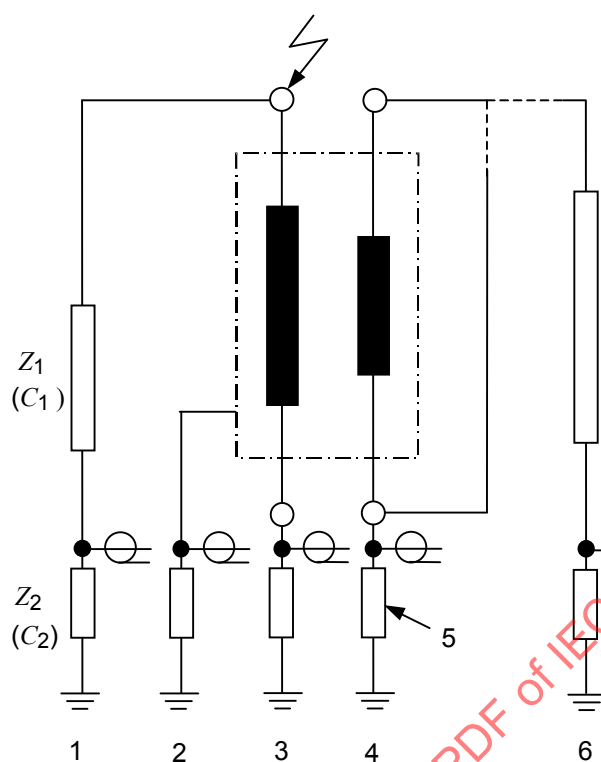


IEC 1406/02

Légende

- | | | | |
|---|----------------------------------|---|--|
| 1 | circuit de mesure de tension | 4 | courant transféré par capacité |
| 2 | courant de cuve | 5 | shunts de courant |
| 3 | neutre, ou courant d'enroulement | 6 | circuit de mesure de tension et tension transférée |
| $Z_1 (C_1)$, $Z_2 (C_2)$ impédances (capacités) du diviseur de tension (voir aussi figure 1) | | | |

Figure 2 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de foudre et méthodes applicables de détection de défaillances



IEC 1406/02

Key

- | | |
|--|---|
| 1 voltage measuring circuit | 4 capacitively transferred current |
| 2 tank current | 5 current shunts |
| 3 neutral or winding current | 6 voltage measuring circuit and transferred voltage |
| $Z_1 (C_1)$, $Z_2 (C_2)$ impedances (capacitances) in the voltage divider (see also figure 1) | |

Figure 2 – Lightning impulse test terminal connections and applicable methods of failure detection

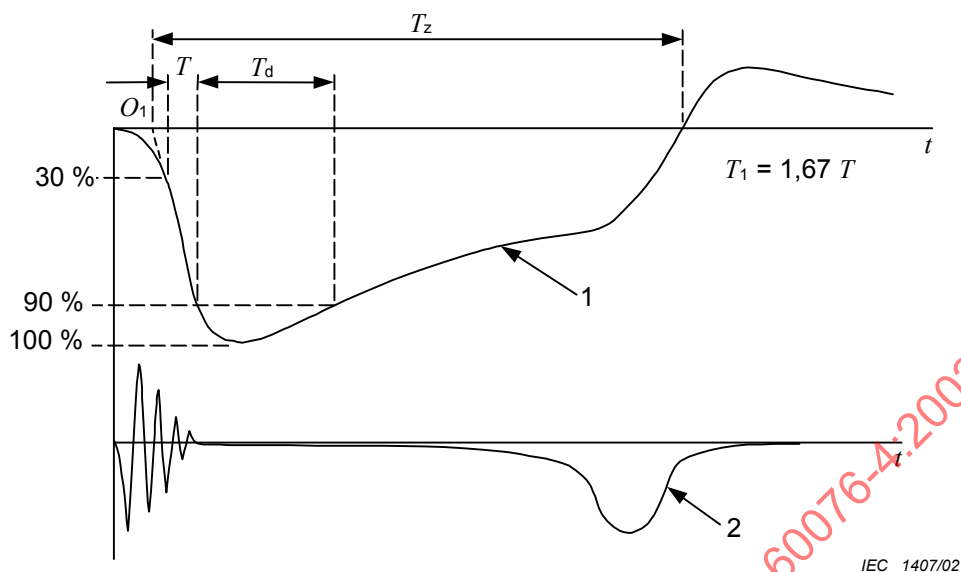


Figure 3a – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de transformateur

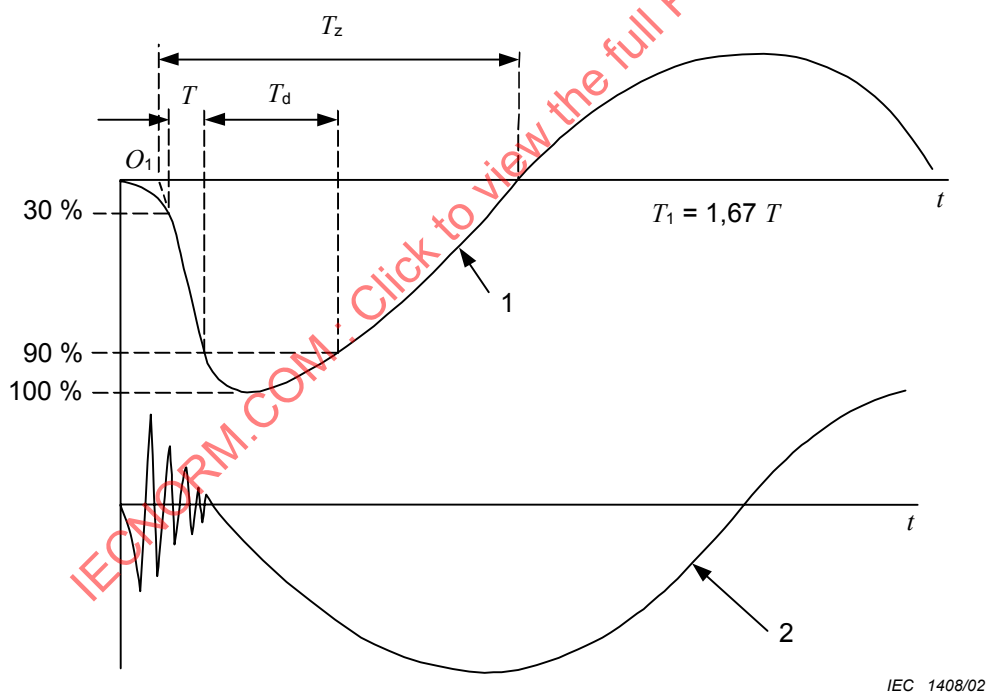


Figure 3b – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de bobine d'inductance

Légende

- | | | | |
|---|-------------------------|-------|---|
| 1 | forme d'onde de tension | T | temps entre l'instant où l'impulsion est à 30 % et à 90 % de la valeur maximale |
| 2 | forme d'onde de courant | T_1 | temps d'attaque virtuel |
| | | T_z | temps du premier passage à zéro |
| | | T_d | temps supérieur à 90 % de l'amplitude spécifiée |

Figure 3 – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de transformateur et de bobine d'inductance

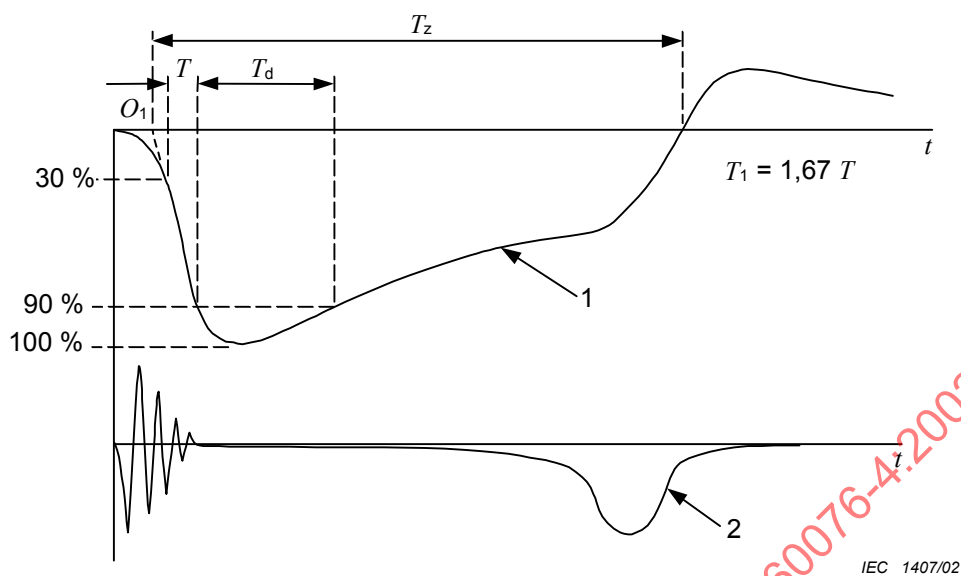


Figure 3a – Transformer switching impulse waveshapes

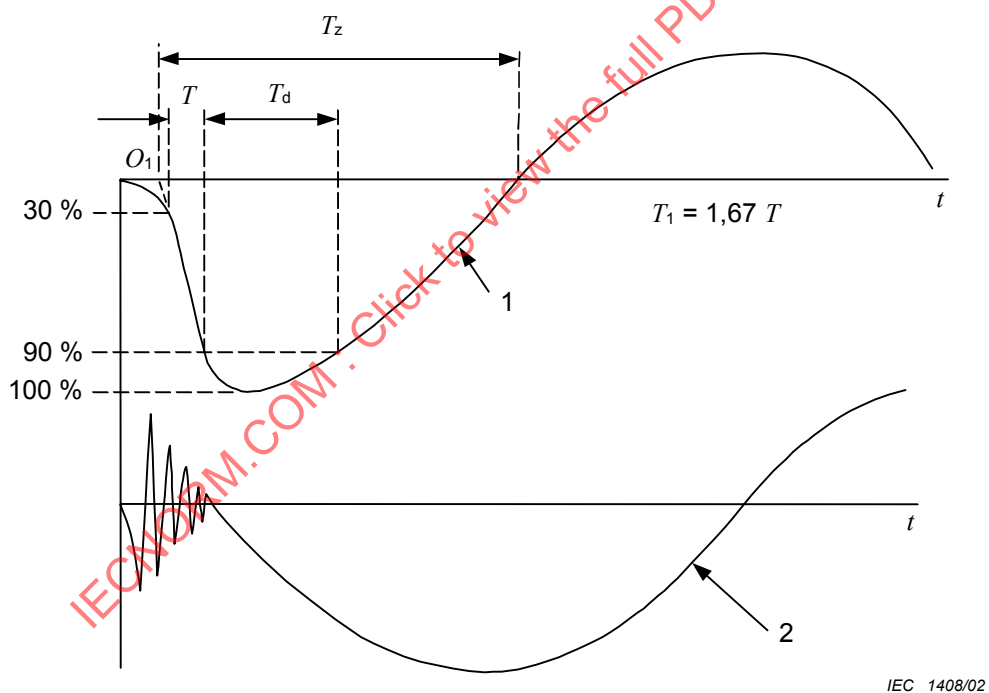


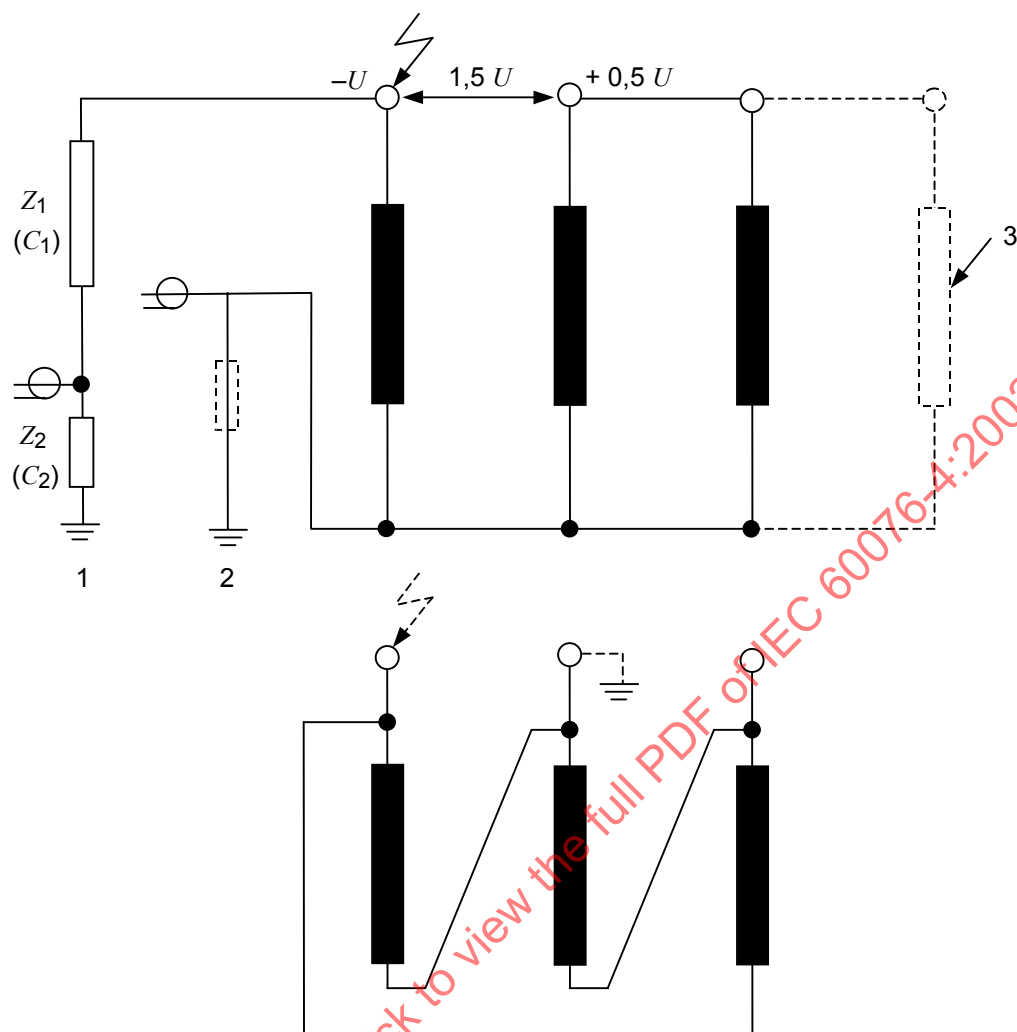
Figure 3b – Reactor switching impulse waveshapes

Key

- 1 voltage waveshape
- 2 current waveshape

- T time between the instant when the impulse is 30 % and 90 % of the peak value
- T_1 virtual front time
- T_z time to first zero passage
- T_d time above 90 % of the specified amplitude

Figure 3 – Transformer and reactor switching impulse waveshapes



IEC 1409/02

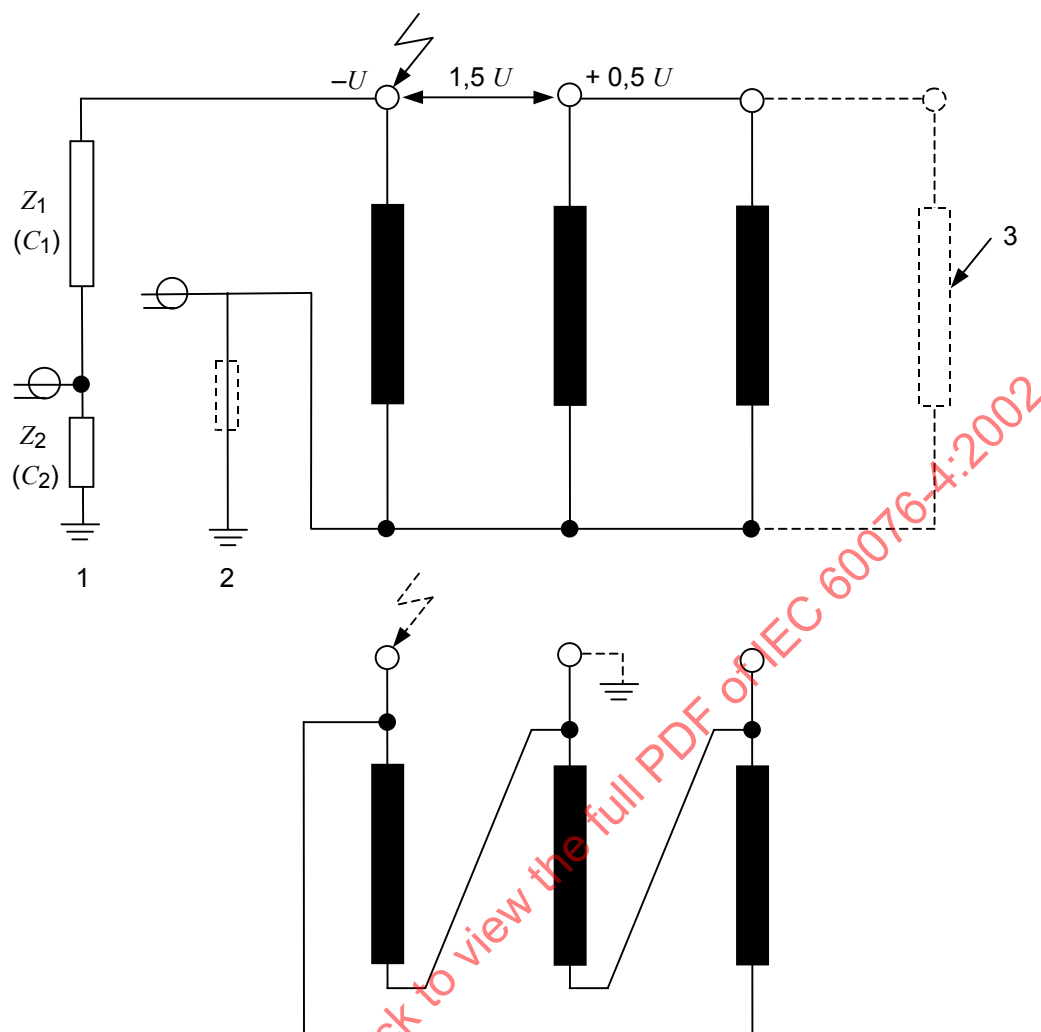
Légende

- 1 circuit de mesure de tension
- 2 circuit de mesure de courant
- 3 résistance de charge, voir 8.2.2.1

$Z_1 (C_1)$, $Z_2 (C_2)$ impédances (capacités) du diviseur de tension (voir aussi figure 1)

NOTE L'application alternative de l'impulsion à l'enroulement connecté en triangle est représentée en pointillés.

Figure 4 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de manœuvre et méthodes de détection de défaillances



IEC 1409/02

Key

- 1 voltage measuring circuit
- 2 current measuring circuit
- 3 loading resistor, see 8.2.2.1

$Z_1 (C_1)$, $Z_2 (C_2)$ impedances (capacitances) in the voltage divider (see also figure 1)

NOTE An alternative application of impulse to delta-connected winding is shown dotted.

Figure 4 – Switching impulse test terminal connections and methods of failure detection

Annexe A (informative)

Principes de contrôle de la forme d'onde

A.1 Généralités

Les ondes d'impulsion sont produites par un montage qui charge un groupe de condensateurs en parallèle et puis les décharge en série. L'amplitude de la tension est déterminée par la tension de charge initiale, le nombre de condensateurs en série en décharge et la régulation du circuit. La forme d'onde est déterminée en grande partie par les capacités et les résistances du générateur et par l'impédance de la charge.

Les principes régissant la façon de contrôler les formes d'onde dans l'essai d'impulsion de choc de foudre des transformateurs sont indiqués au moyen des diagrammes simplifiés donnés par les figures A.1 et A.2. Il est nécessaire de les considérer sous deux aspects principaux:

- pour des enroulements d'impédance élevée;
- pour des enroulements d'impédance faible.

A.2 Enroulements d'impédance élevée ($L_t > 100$ mH)

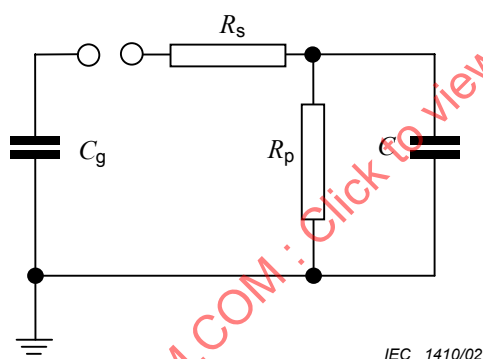


Figure A.1a

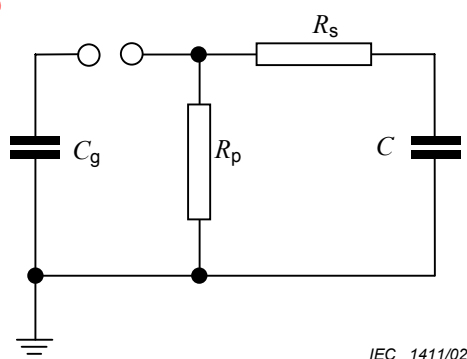


Figure A.1b

Légende

C_g capacité du générateur

$C = C_t + C_L + C_1$ (voir figure 1)

$R_s = R_{si} + R_{se}$, résistance série totale (voir figure 1)

R_p résistance parallèle (voir figure 1)

Figure A.1 – Contrôle de la forme d'onde pour des enroulements d'impédance élevée

Annex A (informative)

Principles of waveshape control

A.1 General

Impulse waves are generated by an arrangement that charges a group of capacitors in parallel and then discharges them in series. The magnitude of the voltage is determined by the initial charging voltage, the number of capacitors in series at discharge, and the regulation of the circuit. The waveshape is determined largely by the capacitances and resistances of the generator and the impedance of the load.

The principles of how to control waveshapes in lightning impulse testing of transformers are indicated by means of the simplified diagrams given in figures A.1 and A.2. They need to be subdivided into two major aspects:

- for high-impedance windings;
- for low-impedance windings.

A.2 High-impedance windings ($L_t > 100 \text{ mH}$)

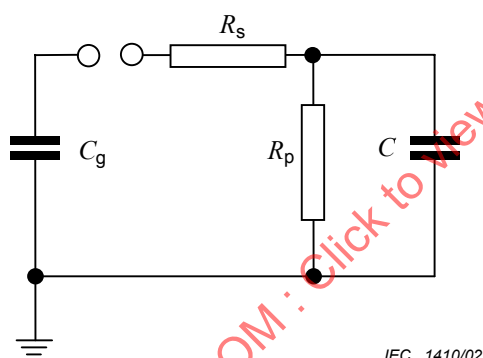


Figure A.1a

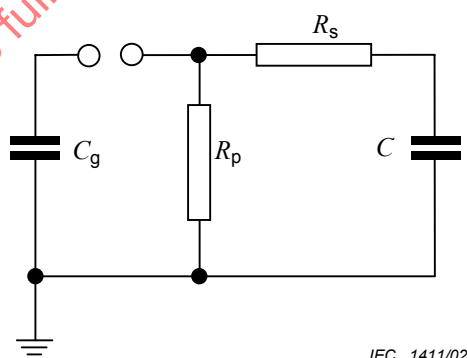


Figure A.1b

Key

C_g generator capacitance

$C = C_t + C_L + C_1$ (see figure 1)

$R_s = R_{si} + R_{se}$, total series resistance (see figure 1)

R_p parallel resistance (see figure 1)

Figure A.1 – Waveshape control for high-impedance windings

Le temps d'attaque sera

$$T_1 \approx 3 \times \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{figure A.1a}) \quad (\text{A.1})$$

ou

$$T_1 \approx 3 R_s \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{figure A.1b}) \quad (\text{A.2})$$

Et le temps à demi-valeur sera

$$T_2 \approx 0,7(R_s + R_p)(C_g + C) \quad (\text{figure A.1a}) \quad (\text{A.3})$$

ou

$$T_2 \approx 0,7 R_p (C_g + C) \quad (\text{figure A.1b}) \quad (\text{A.4})$$

Pour $R_p \gg R_s$ et $C_g \gg C$:

$$T_1 \approx 3 R_s \times C \text{ et } T_2 \approx 0,7 R_p \times C_g \quad (\text{A.5})$$

En général, des paramètres de front et de traîne sont réglés selon ces principes, applicables aux charges purement capacitatives. Il convient cependant de préciser que la capacité effective C_t , incluse dans les valeurs de C est une grandeur physique différente, pour des considérations de front et de traîne.

Pour le temps d'attaque, C_t peut être calculé comme $C_t \approx C_B + \sqrt{(C_s C_e)}$ où C_B est la capacité de bague, C_s est la capacité série de l'enroulement et C_e est la capacité de l'enroulement à la terre.

Pour la queue d'onde (la traîne), C_t peut être estimée comme C_B plus une partie de C_e en fonction de la distribution de tension initiale. Évidemment, la valeur de C_t , pour des considérations de traîne, est de moindre importance dans la plupart des cas pratiques (voir l'équation (A.5)).

Pour les enroulements d'inductances effectives L_t dans la plage de 20 mH à 100 mH, l'impédance de l'enroulement réduit considérablement la constante de temps de décharge ($\tau = R_p C_g$). Dans ces cas, la valeur de T_2 ne peut pas être directement ajustée en accord avec l'équation (A.5). Pour tenir compte de cet effet, l'expérience a montré que R_p doit être augmentée jusqu'à une valeur de deux à dix fois supérieure à la valeur dérivée de l'équation (A.5).

The front time will be

$$T_1 \approx 3 \times \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{figure A.1a}) \quad (\text{A.1})$$

or

$$T_1 \approx 3 R_s \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{figure A.1b}) \quad (\text{A.2})$$

And the time to half-value will be

$$T_2 \approx 0,7(R_s + R_p)(C_g + C) \quad (\text{figure A.1a}) \quad (\text{A.3})$$

or

$$T_2 \approx 0,7 R_p (C_g + C) \quad (\text{figure A.1b}) \quad (\text{A.4})$$

For $R_p \gg R_s$ and $C_g \gg C$:

$$T_1 \approx 3 R_s \times C \text{ and } T_2 \approx 0,7 R_p \times C_g \quad (\text{A.5})$$

In general, both front and tail parameters are adjusted according to these principles applicable for purely capacitive loads. It should, however, be pointed out that the effective transformer capacitance C_t , included in the values of C , is a different physical quantity for front and tail considerations.

For the front time, C_t can be calculated as $C_t \approx C_B + \sqrt{C_s C_e}$ where C_B is the bushing capacitance, C_s is the winding series capacitance and C_e is the winding earth capacitance.

For the wavetail, C_t can be estimated as C_B plus part of C_e , dependent on the initial voltage distribution. Evidently, the value of C_t for tail considerations is of minor importance in most practical cases (see equation (A.5)).

For windings of effective inductances L_t in the range 20 mH to 100 mH, the winding impedance considerably reduces the discharge time constant ($\tau = R_p C_g$). In these cases, the value of T_2 cannot directly be adjusted according to equation (A.5). To account for this effect, experience has shown that R_p has to be increased to a value two to ten times greater than the value derived from equation (A.5).

A.3 Enroulements d'impédance faible ($L_t < 20 \text{ mH}$)

Pour les ajustements du front, le même raisonnement s'applique que pour les enroulements d'impédance élevée.

Pour les ajustements de l'onde de traîne, l'objet en essai peut être représenté par son inductance effective comme indiqué à la figure A.2.

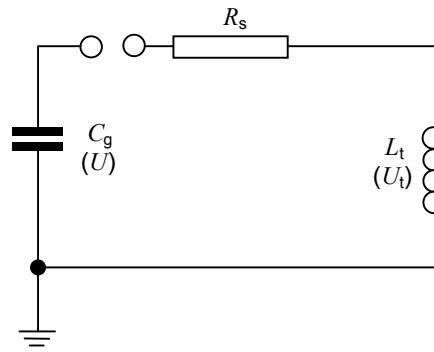


Figure A.2 – Contrôle de la queue d'onde pour des enroulements d'impédance faible

La tension d'essai U_t sera oscillatoire ou exponentielle, selon la valeur du coefficient d'amortissement k du circuit. Des circuits amortis de manière critique ($k = 1$) ou sur-critique ($k > 1$) engendrent des courbes exponentielles. Cependant, ceux-ci ne sont généralement pas applicables, puisque les valeurs correspondantes de résistance donnent des temps d'attaque de longueurs inacceptables.

Lorsque $k < 1$, la tension d'essai est donné par

$$U_t = U e^{-\alpha t} \left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{A.6})$$

où

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_t C_g}$$

$$\alpha = \frac{R_s}{2L_t}$$

$$\tan \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$$

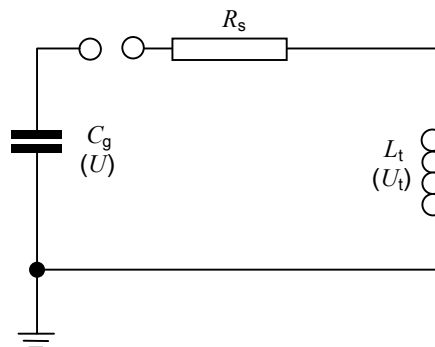
et le coefficient d'amortissement

$$k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2 \sqrt{\frac{L_t}{C_g}}}$$

A.3 Low-impedance windings ($L_t < 20$ mH)

For the front adjustments, the same applies as for high-impedance windings.

For wavetail adjustments, the test object can be represented by its effective inductance as indicated in figure A.2.



IEC 1412/02

Figure A.2 – Wavetail control for low impedance windings

The test voltage U_t will be oscillatory or exponential, depending on the value of the damping coefficient k of the circuit. Critically ($k = 1$) or over-critically ($k > 1$) damped circuits result in exponential curves. However, these are normally not applicable since the corresponding resistance values give unacceptably long front times.

When $k < 1$, the test voltage is given by

$$U_t = U e^{-\alpha t} \left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{A.6})$$

where

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_t C_g}$$

$$\alpha = \frac{R_s}{2L_t}$$

$$\tan \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$$

and the damping coefficient

$$k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2 \sqrt{\frac{L_t}{C_g}}}$$

Cette tension constitue une onde d'oscillation amortie, représentée à la figure A.3.

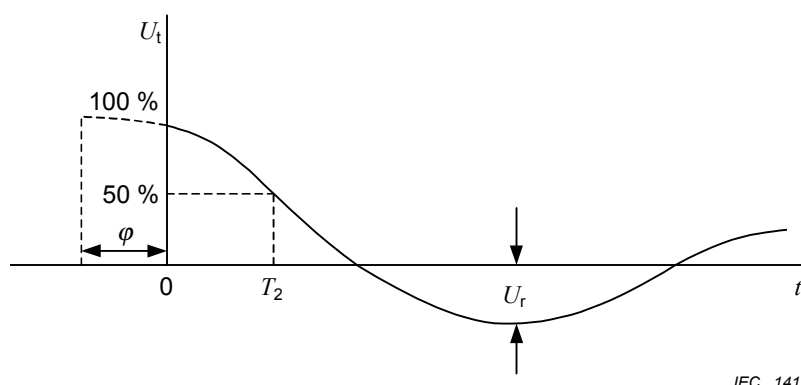


Figure A.3 – Oscillation amortie

Pour une première évaluation de T_2 , R_s est supposé être à zéro. Donc l'équation (A.6) devient:

$U_t = U \cos \omega_0 t$ et le temps à demi-valeur est donné par

$$T_2 = \frac{1}{6} \times \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad (\text{A.7})$$

mais cette condition théorique donnerait une oscillation non amortie avec une crête de polarité opposée de 100%.

Une telle oscillation de polarité opposée de forte valeur peut surcharger l'isolement entre spires et entre enroulements, du fait des fortes contraintes oscillatoires qui peuvent déclencher des décharges partielles et accroître les mécanismes d'électrode, dus uniquement aux limitations d'essai. Il convient donc de limiter la crête de polarité opposée U_r à 50 % de la tension de crête initiale.

Avec la limitation de 50 % de la crête de polarité opposée U_r , un coefficient d'amortissement considérable doit être introduit, avec comme effet, le temps à demi-valeur qui sera alors plus court que la valeur donnée par l'équation (A.7). Pour ce cas, le facteur d'amortissement $k = 0,25$ et le temps à demi-valeur sera

$$T_2 = \sqrt{0,5 L_t C_g} \quad (\text{A.8})$$

Les équations (A.7) et (A.8) donnent des conseils pour le contrôle de la queue d'onde par l'ajustement de l'inductance de l'objet en essai L_t ou de la capacité du générateur C_g .

L_t est influencé par la connexion des enroulements non essayés. Avec les enroulements non essayés court-circuités et étant mis à la terre (connexion habituelle), L_t est l'inductance de fuite du transformateur. L'essai dans cette configuration produit généralement la plus grande contrainte sur l'isolement entre les enroulements ou les parties d'enroulements, même si une traîne plus courte en résulte. Cependant, la courte traîne ne contraindra pas trop le milieu de l'enroulement par rapport à la terre, comme d'autres configurations éventuelles pourraient le faire, puisque la courte traîne ne maintiendra pas longtemps la tension.

This voltage constitutes a damped oscillating wave (shown in figure A.3).

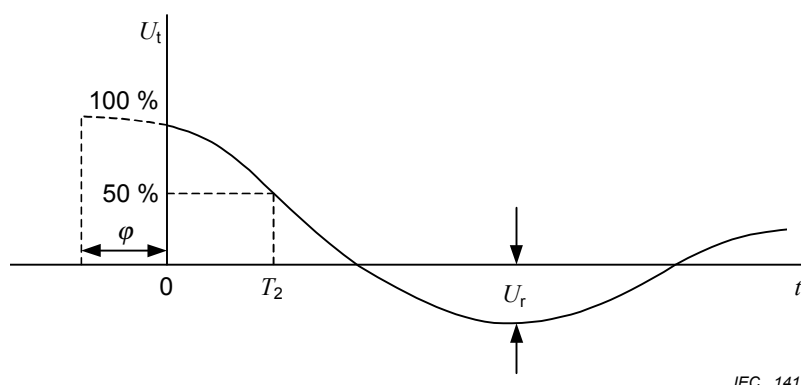


Figure A.3 – Damped oscillation

For a first estimation of T_2 , R_s is assumed to be zero. Then equation (A.6) becomes:

$U_t = U \cos \omega_0 t$ and the time to half-value is given by

$$T_2 = \frac{1}{6} \times \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad (\text{A.7})$$

but this theoretical condition would give an undamped oscillation with an opposite polarity peak of 100 %.

Such high opposite polarity oscillation may overstress inter-turn and inter-winding insulation due to high oscillatory stresses which can trigger partial discharges and enhanced electrode mechanisms only due to testing limitations. The opposite polarity peak U_r should therefore be limited to 50 % of the initial peak voltage.

With the limitation of the 50 % opposite polarity peak U_r , a considerable degree of damping has to be introduced, with the effect that the time to half-value will then be shorter than the value produced by equation (A.7). For this case, the damping factor $k = 0,25$ and the time to half-value will be

$$T_2 = \sqrt{0,5 L_t C_g} \quad (\text{A.8})$$

Equations (A.7) and (A.8) give guidance for the control of the wavetail by adjustment of the inductance of the test object L_t or of the generator capacitance C_g .

L_t is influenced by the connection of the non-tested windings. With the non-tested windings short-circuited and earthed (usual connection), L_t is the leakage inductance of the transformer. Testing in this configuration generally produces the greatest stress to the insulation between windings or portions of windings, even if a shorter tail results. However, the short tail will not stress the middle of the winding to earth so much as some other possible configurations since the short tail will not sustain the voltage for a long time.

L'inductance effective peut être augmentée par la charge d'une résistance sur les enroulements non essayés, avec la limitation cependant, que les tensions sur les bornes de l'enroulement non essayé n'excèdent pas 75 % pour les enroulements raccordés en étoile ou 50 % pour les enroulements raccordés en triangle, par rapport à leur ou leurs niveaux associés de tenue à l'impulsion de choc de foudre.

C_g peut être modifié par la connexion série ou parallèle des étages du générateur d'impulsion. Selon l'équation (A.9), la capacité minimale requise du générateur sera

$$C_g \approx 2 \frac{T_2^2}{L_t} \quad (\text{A.9})$$

Il y a, cependant, des cas où la condition de l'équation (A.9) ne peut pas toujours être satisfaite en raison des valeurs extrêmement basses de L_t ou lorsque L_t ne peut plus n'être augmentée par la mise à la terre par résistance des bornes des enroulements non essayés, en raison de la limitation de tension mentionnée ci-dessus. Dans ces cas, la constante de temps de décharge du circuit est donnée par

$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad (\text{A.10})$$

Cette équation indique encore une manière d'ajuster la queue d'onde. Cependant, une forte réduction de R_s aura comme conséquence un dépassement excessif ou des oscillations superposées à la crête de l'onde d'impulsion et aussi, comme décrit plus haut, une crête de polarité opposée excessive. Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser une capacité additionnelle de charge C_L pour le contrôle du front d'onde. La capacité de charge réduira alors les effets nuisibles d'une faible résistance série R_s .

Si les méthodes de contrôle de la queue d'onde mentionnées ci-dessus ne sont toujours pas suffisantes pour atteindre le temps à demi-valeur approprié, un compromis est nécessaire entre accepter un temps à demi-valeur plus court ou bien le recours à la mise à la terre par résistance à la ou aux bornes non essayées du ou des enroulements à l'essai, en accord avec la figure A.6. Dans ce cas encore, la limitation de tension de 75 %, sur la ou les bornes non essayées pour des enroulements relié en étoile et 50 % pour des enroulements reliés en triangle par rapport à leurs niveaux associés de tenue à l'impulsion de choc de foudre, s'applique. Il convient cependant de donner la préférence à un temps à demi-valeur plus court.

Le repère 3 de la figure A.4 montre le transformateur équivalent avec une extrémité de l'enroulement mis directement à la terre. Si les capacités de traversée C_1 et C_2 sont grandes comparées à la capacité C_3 à la terre, il en résultera alors une distribution de tension semblable à la courbe M du graphique. La distribution finale est donnée par la ligne N, qui signifie que l'enveloppe de l'oscillation sera entre les courbes M et M'. Quand les capacités de traversée sont extrêmement petites comparées à la capacité à la terre, il en résultera alors une distribution de tension semblable à la courbe O, qui donnera une enveloppe de l'oscillation entre les courbes O et O'. Avec cette configuration, il y a des parties de l'enroulement qui peuvent excéder la tension appliquée aux bornes de ligne, mais généralement ces enroulements ont de longues constantes de temps et le temps pour que le point T oscille à son maximum est habituellement assez long pour que la tension appliquée sur les bornes ne soit plus qu'à 50 % de la valeur de crête. Cette configuration ne produit pas de contrainte prolongée entre l'enroulement et la terre, mais elle contraint l'isolement dans l'enroulement.

Cette configuration d'essai est bien appropriée aux mesures de courants puisqu'il n'y a aucune augmentation de la résistance du circuit et le circuit a donc une bonne réponse aux perturbations à haute fréquence.

The effective inductance can be increased by resistance loading of the non-tested windings, with the limitation, however, that the voltages at the non-tested winding terminals should not exceed 75 % for star-connected windings or 50 % for delta-connected windings of their associated lightning impulse withstand level(s).

C_g can be altered by series or parallel connection of the stages of the impulse generator. According to equation (A.9), the required minimum generator capacitance will be

$$C_g \approx 2 \frac{T_2^2}{L_t} \quad (\text{A.9})$$

There are, however, cases where the condition of equation (A.9) cannot always be met because of extremely low values of L_t or where L_t can no longer be increased by resistance earthing of the non-tested winding terminals, because of the voltage limitation referred to above. In these cases, the discharge time constant of the circuit is given by

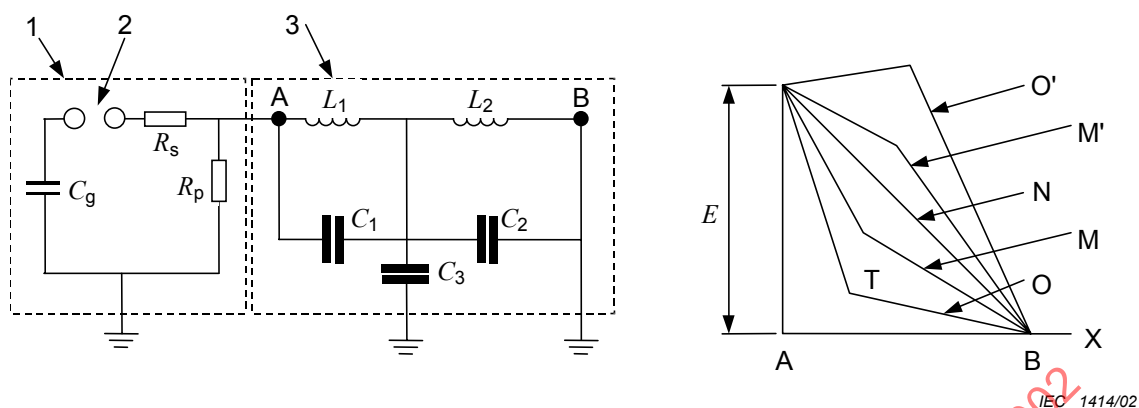
$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad (\text{A.10})$$

This equation indicates another way of adjusting the wavetail. However, severe reduction of R_s will result in excessive overshoot or superimposed oscillations at the crest of the impulse wave and also, as described earlier, in an excessive opposite polarity peak. In such cases, it is recommended that additional load capacitance C_L is used for wavefront control. The load capacitance will then reduce the adverse effects of a small series resistor R_s .

If the above-mentioned methods of wavetail control are still not sufficient to attain the proper time to half-value, a compromise is necessary between either accepting a shorter time to half-value or resorting to resistance earthing at the non-tested terminal(s) of the winding(s) under test, according to figure A.6. Here again, the 75 % voltage limitation on the non-tested terminal(s) for star-connected windings and 50 % for delta-connected windings of their associated lightning impulse withstand level(s) applies. Preference should be given, however, to a shorter time to half-value.

Item 3 in figure A.4 shows the equivalent transformer with one end of the winding solidly earthed. If the through capacitances C_1 and C_2 are large compared to the capacitance C_3 to earth then a voltage distribution similar to curve M in the graph will result. The final distribution is shown by line N, which means that the envelope of oscillation will be between curves M and M'. When the through capacitances are extremely small compared to the capacitance to earth, then a voltage distribution similar to curve O will occur, which will result in an envelope of oscillation between curves O and O'. With this configuration, there are portions of the winding that may exceed the applied voltage to the line terminals, but generally these windings have long time constants, and the time for point T to oscillate to its maximum is usually long enough that the voltage applied at the terminals has decreased to 50 % of the crest value. This configuration does not produce a sustained stress from winding to earth, but it does stress the insulation within the winding.

This test configuration is very suitable for current measurements since there is no increase in the circuit resistance and the circuit therefore has good response to high-frequency disturbances.



Légende

1 générateur d'impulsion

2 éclateur

3 transformateur

X terre

A borne de l'enroulement

B extrémité neutre de l'enroulement

E amplitude de tension à la borne de l'enroulement

C_1, C_2 capacités de traversée

C_3 capacité à la terre

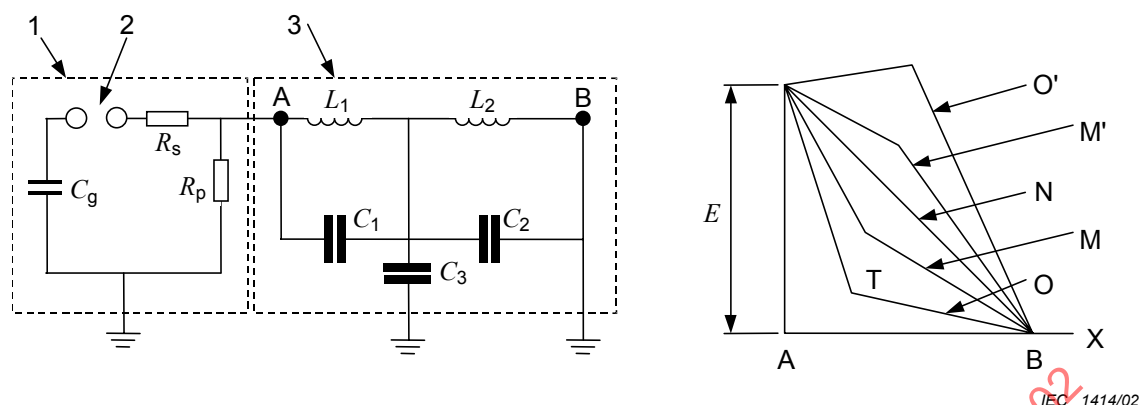
C_g, R_s, R_p (voir figure 1)

L_1, L_2 inductances

Figure A.4 – Effets dus à la courte longueur de la queue d'onde

Une autre configuration possible consiste à insérer une résistance à l'extrémité mise à la terre de l'enroulement en l'essai. Cette configuration tend à modifier les contraintes spire à spire et bobine à bobine, la grandeur de la modification dépendant des constantes de temps de l'enroulement. Le repère 3 de la figure A.5 montre le réseau équivalent typique d'un transformateur avec l'extrémité non essayée de l'enroulement mis à la terre par une résistance. Si les capacités de traversée C_1 et C_2 sont très grandes par rapport à la capacité C_3 à la terre, il en résultera une distribution semblable à la courbe P du graphique. La distribution finale sera semblable à la courbe Q, où toute, ou presque toute la tension apparaît aux bornes de la résistance. L'enveloppe de l'oscillation sera alors entre les courbes P et P'. Quand la capacité à la terre est grande comparée à la capacité de traversée, une distribution initiale semblable à la courbe S du graphique aura lieu et on peut supposer que la distribution finale sera encore la courbe Q. L'enveloppe de l'oscillation est maintenant entre S et S'. Il est encore possible de produire des tensions excessivement élevées par rapport à la terre dans des parties de l'enroulement. Il est généralement habituel d'insérer juste assez de résistance pour produire une longueur de traîne adéquate et la tension apparaissant aux bornes de la résistance est limitée à moins de 75 % du niveau de tenue d'impulsion de choc de foudre associé. Si dans le dernier exemple, la résistance requise pour produire une longueur de traîne adéquate avait été plus petite, la courbe de distribution finale serait abaissée à Q' et l'enveloppe de l'oscillation serait alors S et S'. Il convient de mesurer la longueur de traîne et la tension aux bornes de la résistance pour déterminer la valeur de la résistance à utiliser.

Cette configuration d'essai applique la forme d'onde appropriée à l'isolement d'extrémité de ligne et convient aux mesures de courant de terre, bien que la résistance puisse réduire légèrement la sensibilité de la détection de défaillances. Initialement, la pleine tension d'impulsion est appliquée aux bornes de l'enroulement et de la résistance en série; donc, la contrainte à travers l'enroulement sera réduite.



Key

1 impulse generator

2 spark gap

3 transformer

X earth

A winding terminal

B winding neutral end

E voltage amplitude on the winding terminal

C_1, C_2 through capacitances

C_3 capacitance to earth

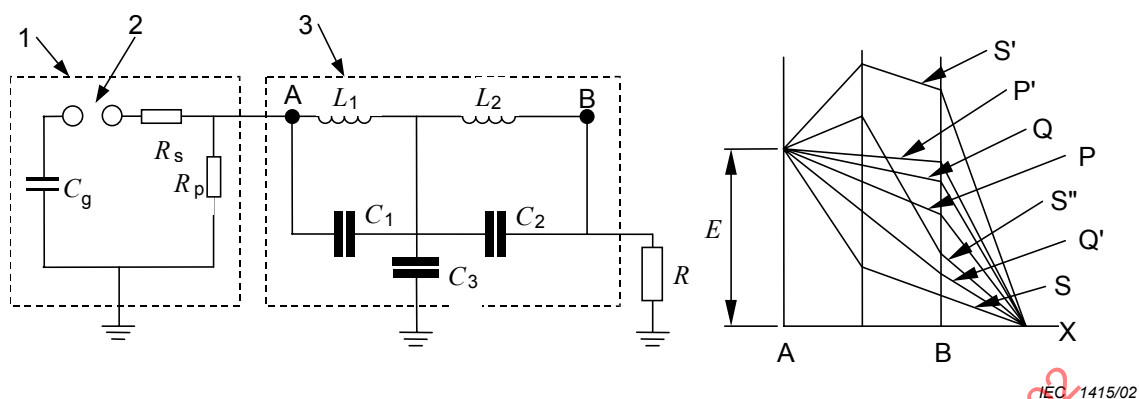
C_g, R_s, R_p (see figure 1)

L_1, L_2 inductances

Figure A.4 – Effects due to short length of wavetail

Another possible configuration is to insert a resistance in the earthed end of the winding under test. This configuration tends to change turn-to-turn and coil-to-coil stresses, the amount of change depending on the winding time constants. Item 3 in figure A.5 shows the typical equivalent network of a transformer with the untested end of the winding earthed through a resistor. If the through capacitances C_1 and C_2 are extremely large compared to the capacitance C_3 to earth, a distribution similar to curve P in the graph will result. The final distribution will be similar to curve Q, where all, or almost all, of the voltage appears across the resistor. The envelope of oscillation will then be between curves P and P'. When the capacitance to earth is large compared to the through capacitance, an initial distribution similar to curve S in the graph will occur and the final distribution can again be assumed to curve Q. The envelope of oscillation is now between S and S'. Again it is possible to produce excessively high voltages to earth in parts of the winding. It is general practice to insert only enough resistance to produce an adequate length tail and the voltage appearing across the resistor is limited to not more than 75 % of the associated lightning impulse withstand level. If in the last example, the resistance required to produce an adequate length tail had been smaller, the final distribution line would be lowered to Q', and the envelope of oscillation would then be between S and S''. The tail length and the voltage across the resistance should be measured to determine the value of resistance to be used.

This test configuration applies the proper waveshape to the line-end insulation and is suitable for earth current measurements, although the resistance may reduce slightly failure detection sensitivity. Initially, the full impulse voltage is applied across the winding and resistance in series; therefore, the stress across the winding will be reduced.



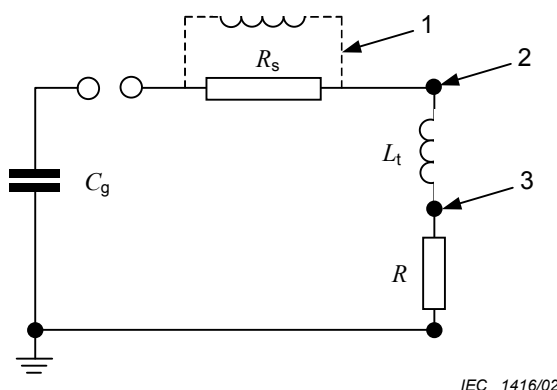
Légende

- 1 générateur d'impulsion
- 2 éclateur
- 3 transformateur
- X terre

Figure A.5 – Enroulement mis à la terre par une résistance

L'insertion d'une inductance entre le générateur d'impulsion et l'enroulement à essayer, parfois en parallèle avec R_s (voir la figure A.6), augmente l'inductance globale du circuit et peut souvent augmenter le temps de traîne au-delà de ce que peut faire le générateur d'impulsion seul. Cette configuration se fonde sur un transfert d'énergie vers l'inducteur à partir du générateur d'impulsion pendant le front d'onde et un transfert d'énergie de l'inducteur à l'enroulement pendant la queue d'onde. La grandeur de l'amélioration du temps de traîne avec cette configuration dépend des caractéristiques de l'enroulement et des valeurs d'inductance disponibles.

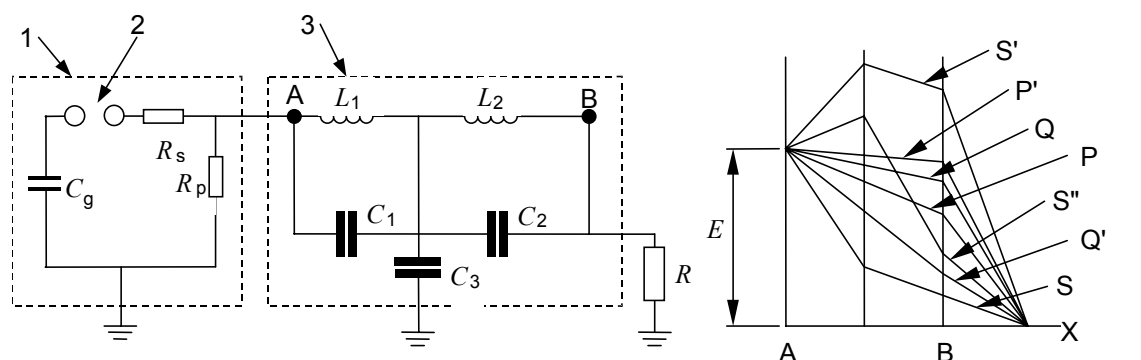
Presque les mêmes considérations s'appliquent pour l'ajustement du temps d'attaque de l'impulsion de choc de manœuvre. Cependant, dans ce cas la capacité effective du transformateur C_t pour le temps d'attaque plus long est égale à la capacité effective d'enroulement à la terre C_e .



Légende

- 1 Il est développé une autre méthode d'amélioration du temps à demi-valeur qui utilise un inducteur additionnel en parallèle avec R_s , augmentant de ce fait l'inductance globale du circuit.
- 2 borne essayée
- 3 borne non essayée

Figure A.6 – Mise à la terre par résistance des enroulements à basse d'impédance

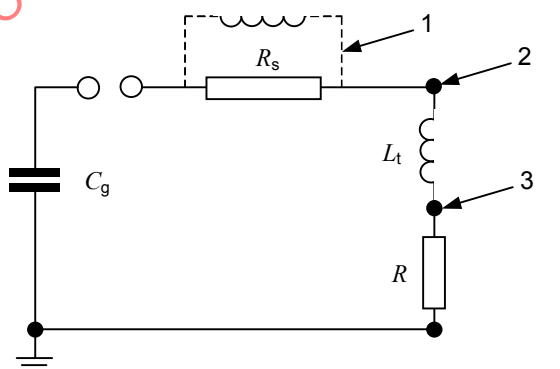
**Key**

- 1 impulse generator
- 2 spark gap
- 3 transformer
- X earth

Figure A.5 – Winding earthed through a resistor

Inserting an inductance between the impulse generator and the winding being tested, sometimes in parallel with R_s (see figure A.6) increases the total circuit inductance and can often increase the tail time beyond that available with the impulse generator alone. This configuration relies on a transfer of energy to the inductor from the impulse generator during the front portion of the wave and a transfer of energy from the inductor to the winding during the tail portion of the wave. The amount of improvement in the tail time with this configuration is dependent on the characteristic of the winding and the values of inductance available.

Nearly the same considerations apply for the adjustment of the switching impulse front time. However, in this case the effective transformer capacitance C_t for the longer front time is equal to the effective winding earth capacitance C_e .

**Key**

- 1 A further method of improving the time to half-value is being developed which uses an additional inductor in parallel with R_s , thus increasing the total circuit inductance.
- 2 tested terminal
- 3 non-tested terminal

Figure A.6 – Resistance earthing of low-impedance windings

Annexe B (informative)

Oscillogrammes et enregistrements numériques typiques

Les oscillogrammes et les enregistrements numériques des états de défaut et de non-défaut reproduits aux pages suivantes sont extraits d'enregistrements d'essais réels sur des transformateurs de puissance de type à noyau avec des enroulements cylindriques concentriques et sur des bobines d'inductance shunt. L'attention est de nouveau attirée sur le fait que, même si ces oscillogrammes sont typiques, on ne peut pas supposer qu'une divergence trouvée sur un autre transformateur ou sur une autre bobine d'inductance de tension, de conception et fabrication différentes, même semblables en apparence à ce qui est mentionné ici, soit provoquée par un défaut identique. L'intention est uniquement de donner des directives générales en les illustrant par des défauts particuliers.

**Tableau B.1 – Sommaire des exemples illustrés par les oscillogrammes
et les enregistrements numériques**

Figures	Exemples	Articles
Essais d'impulsion de choc de foudre		
Défauts pleine onde		
B.1	Claquage, ligne au neutre, à travers l'enroulement haute tension essayé	9.1.2; 9.1.3
B.2	Claquage, entre disques, à l'entrée de l'enroulement haute tension essayé	9.1.2; 9.1.4
B.3	Claquage, entre couches, dans l'enroulement à prises à pas grossier	9.1.2; 9.1.3
B.4	Claquage entre les fils de prélèvement à l'extérieur de l'enroulement à prises	9.1.2
B.5	Claquage à travers une section dans un enroulement à prises à pas fin	9.1.2
B.6	Claquage entre conducteurs parallèles d'un enroulement principal à haute tension	9.1.2
B.7	Claquage entre les clinquants de bague	9.1.4
Défauts onde hachée		
B.8	Claquage entre les spires dans l'enroulement principal haute tension essayé	9.1.4; 10
B.9	Claquage entre les spires dans un enroulement à prises à pas fin	9.1.4; 10
Ondes hachées – Effets des différences au hachage		
B.10	Essais avec des temps de hachage identiques	9.1.4; 10
B.11	Essais avec de grandes et petites différences de temps de hachage	9.1.4; 10
Non-défauts provoquant des divergences		
B.12	Effet des résistances non linéaires dans le changeur de prises	9.1.1
B.13	Effet des différences de démarrage des étages du générateur	9.1.1
Essais d'impulsion de choc de manœuvre		
B.14	Essai satisfaisant sur un transformateur	8.2.2.1
B.15	Claquage de l'enroulement principal haute tension en essai d'un transformateur	9.2.1
B.16	Essai satisfaisant sur une bobine d'inductance	8.3.1; 8.3.4
Analyse de fonction de transfert		
B.17	Comparaison de la fonction de transfert d'une pleine onde et d'une onde hachée	9.1.4; 10

Annex B (informative)

Typical oscillograms and digital recordings

The oscillograms and digital recordings of fault and non-fault conditions reproduced on the following pages are extracted from records of actual tests on core-type power transformers with concentric cylindrical windings and on shunt reactors. Attention is again drawn to the fact that whilst these oscillograms are typical, it cannot be assumed that a discrepancy found on another transformer or reactor of different voltage, design and manufacture, although apparently similar to one illustrated herein, is caused by an identical fault. The intention of illustrating particular faults is to give general guidance only.

Table B.1 – Summary of examples illustrated in oscillograms and digital recordings

Figure	Example	Clause
Lightning impulse test		
Full-wave faults		
B.1	Breakdown, line to neutral, across tested high-voltage winding	9.1.2; 9.1.3
B.2	Breakdown, between discs, at entrance to tested high-voltage winding	9.1.2; 9.1.4
B.3	Breakdown, interlayer, in course-step tapping winding	9.1.2; 9.1.3
B.4	Breakdown between tapping leads of outside tapping winding	9.1.2
B.5	Breakdown across one section in a fine-step tapping winding	9.1.2
B.6	Breakdown between parallel conductors of a main high-voltage winding	9.1.2
B.7	Breakdown between bushing foils	9.1.4
Chopped-wave faults		
B.8	Breakdown between turns in tested main high-voltage winding	9.1.4; 10
B.9	Breakdown between turns in a fine-step tapping winding	9.1.4; 10
Chopped waves – Effects of differences to chopping		
B.10	Tests with identical times to chopping	9.1.4; 10
B.11	Tests with large and small differences in times to chopping	9.1.4; 10
Non-faults causing discrepancies		
B.12	Effect of non-linear resistors in tap-changer	9.1.1
B.13	Effect of generator firing differences	9.1.1
Switching impulse tests		
B.14	Satisfactory test on a transformer	8.2.2.1
B.15	Breakdown of tested main high-voltage winding of a transformer	9.2.1
B.16	Satisfactory test on a reactor	8.3.1; 8.3.4
Transfer function analysis		
B.17	Comparison of the transfer function of a full wave and a chopped wave	9.1.4; 10

Tableau B.1 (suite)

Évaluation de formes d'onde non normalisées		
B.18	Influence des algorithmes de lissage de courbe des numériseurs	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.19	Evaluation avec des oscillations superposées	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.20	Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche	7.2.2; 10
B.21	Comparaison de forme d'onde non normalisée avec différents numériseurs	7.5.2; 10; 7.5.4.1
Réponses aux problèmes de circuit d'essai		
B.22	Problème de circuit d'essai provoqué par l'amorçage à la terre d'un câble de mesure	10
Réponses aux défaillances d'objet en essai		
B.23	Pleine impulsion de choc de foudre, défaillance entre les prises du changeur de prises et entre enroulements des pas grossier et fin	10

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-4:2002

Table B.1 (continued)

Evaluation of non-standard waveshapes		
B.18	Influence of curve smoothing algorithms of digitizers	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.19	Evaluation with superimposed oscillations	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.20	Non-standard chopped wave on a layer winding	7.2.2; 10
B.21	Comparison of non-standard waveshapes with different digitizers	7.5.2; 10; 7.5.4.1
Responses from test-circuit problems		
B.22	Test-circuit problem caused by sparkover to earth from a measuring cable	10
Responses from test object failure		
B.23	Full lightning impulse, failure between taps of tap changer and between coarse and fine tapping windings	10

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-4:2002

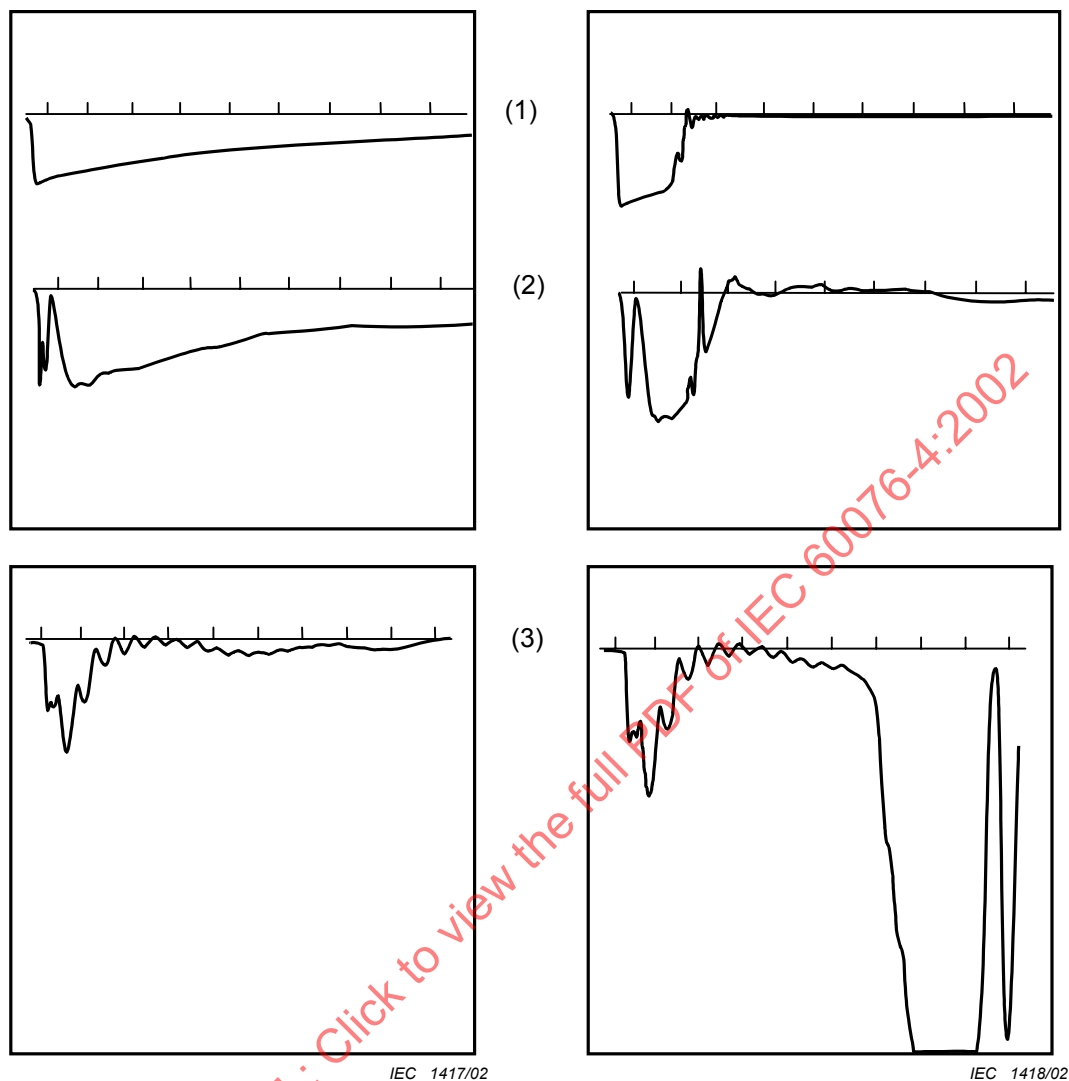


**Figure B.1a – Pleine onde réduite (75 %)
sans défaut**

**Figure B.1b – Pleine onde (100 %)
avec défaut**

(Amplitudes non égalisées)

Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100 μ s
- 2 tension transférée à l'enroulement basse tension, balayage de 100 μ s
- 3 courant de neutre, balayage de 25 μ s

**Figure B.1 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –
Claquage ligne au neutre à travers l'enroulement haute tension
du transformateur de centrale 400 kV**

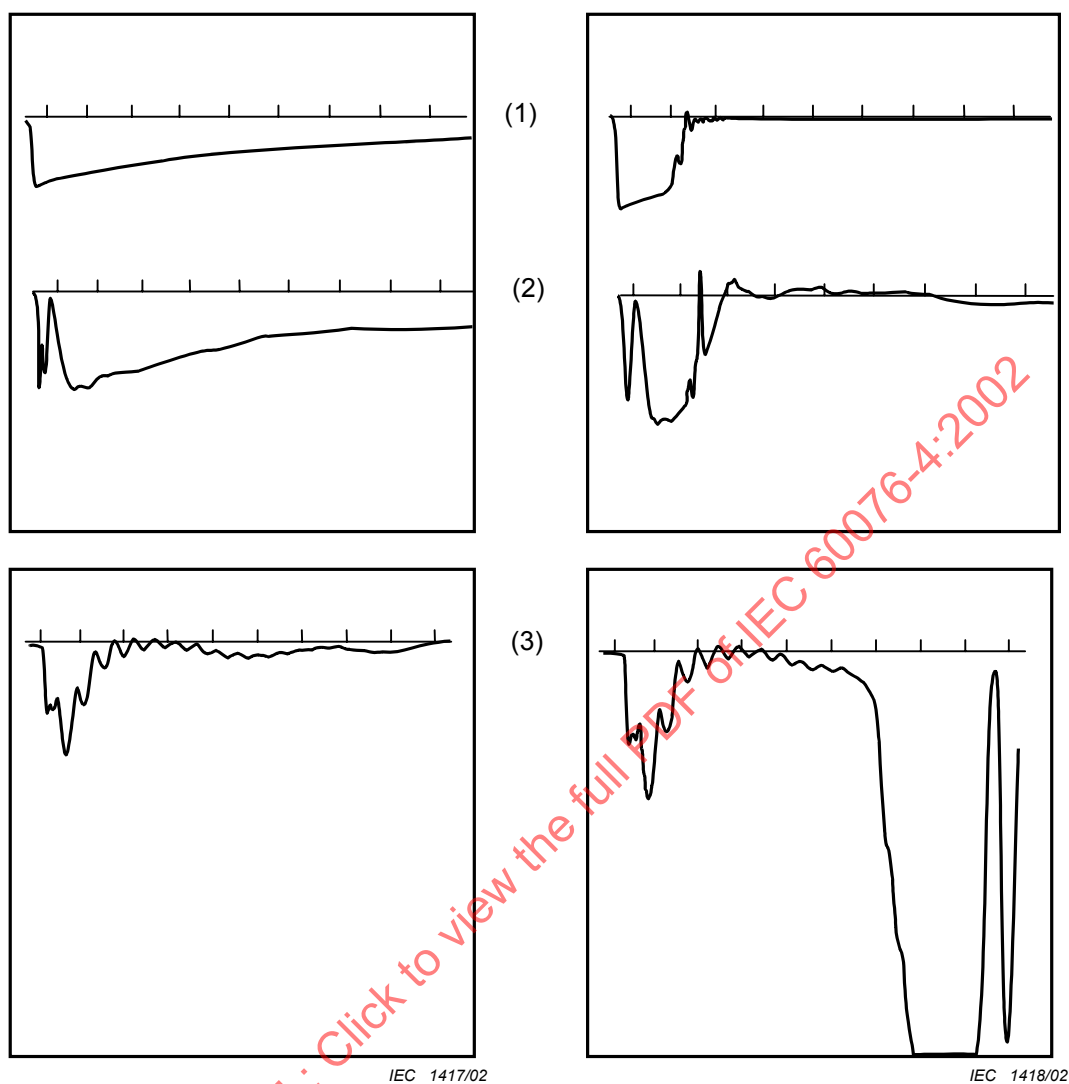


Figure B.1a – Reduced full wave (75 %) without fault

Figure B.1b – Full wave (100 %) with fault

(Amplitudes not equalized)

Key

- 1 applied impulse, 100 μ s sweep
- 2 voltage transferred to low-voltage winding, 100 μ s sweep
- 3 neutral current, 25 μ s sweep

**Figure B.1 – Lightning impulse, full-wave failure –
Line-to-neutral breakdown across high-voltage winding
of 400 kV generator transformer**

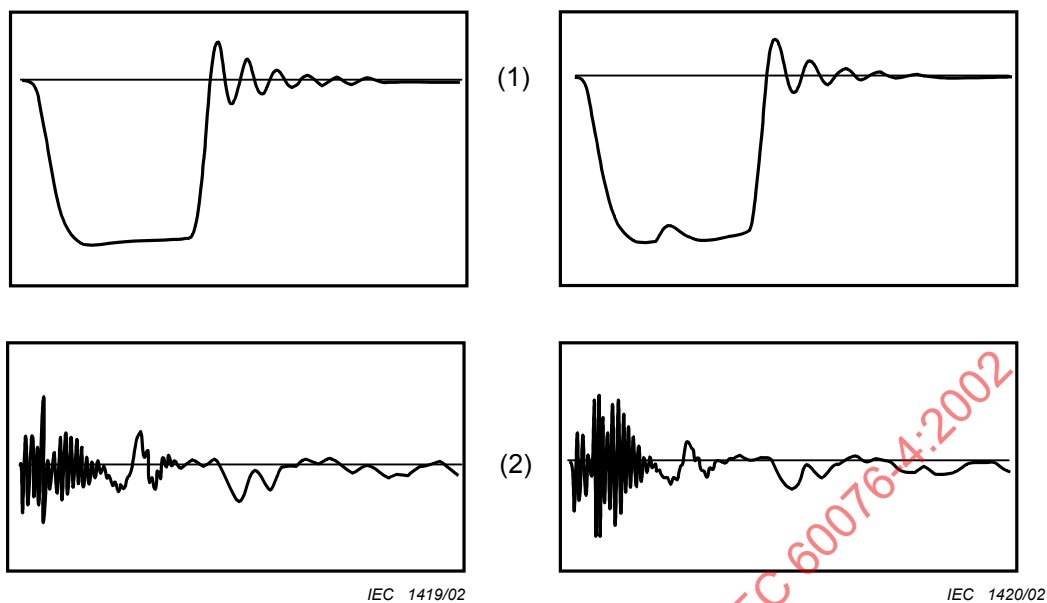


Figure B.2a – Onde hachée (100 %) sans défaut (Note 1)

Figure B.2b – Onde hachée (100 %) avec défaut (Notes 1 et 2)

Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10 μ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100 μ s

NOTE 1 Puisque la défaillance s'est produite avant l'instant de hachage, elle est considérée comme une défaillance pleine onde.

NOTE 2 Défaillance après approximativement 2 μ s clairement indiquée par les oscillogrammes de tension et courant de neutre.

Figure B.2 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre disques à l'entrée de l'enroulement haute tension du transformateur 115 kV

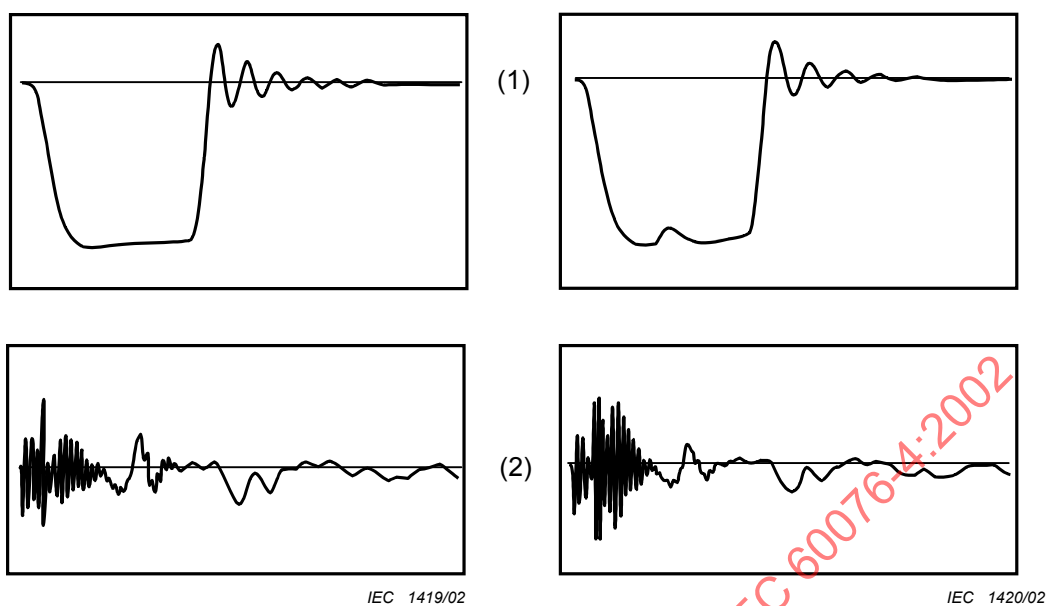


Figure B.2a – Chopped wave (100 %) without fault (Note 1)

Figure B.2b – Chopped wave (100 %) with fault (Notes 1 and 2)

Key

- 1 applied impulse, 10 μ s sweep
- 2 neutral current, 100 μ s sweep

NOTE 1 Since failure occurred before the instant of chopping it is therefore regarded as a full-wave failure.

NOTE 2 Failure after approximately 2 μ s clearly indicated in the voltage and neutral current oscillograms.

Figure B.2 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between discs at entrance to high-voltage winding of 115 kV transformer

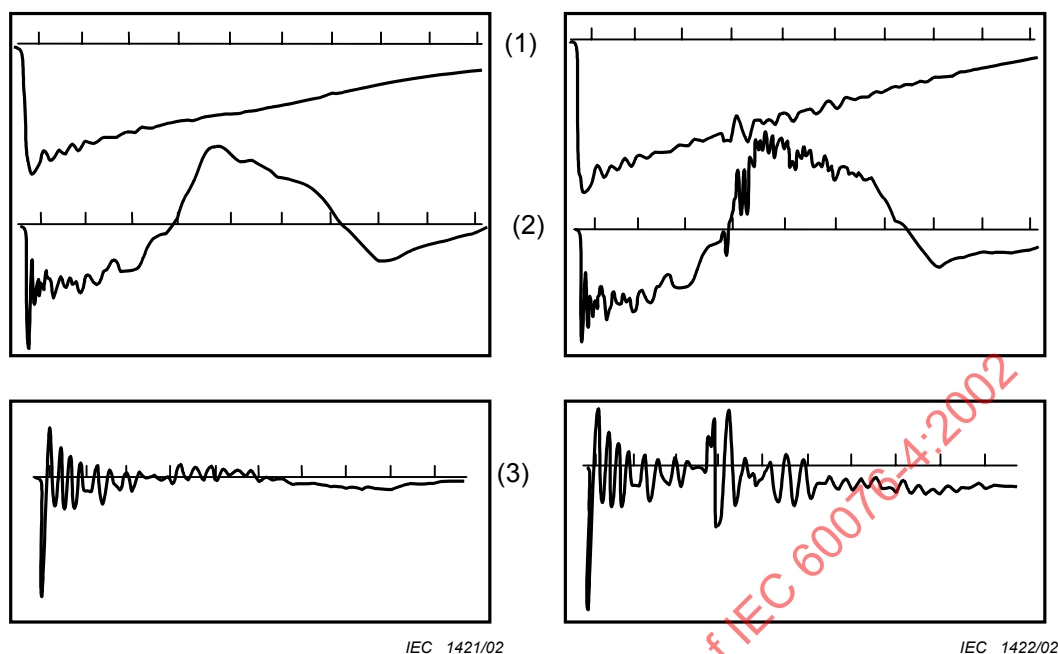


Figure B.3a – Pleine onde réduite (62,5 %) sans défaut

Figure B.3b – Pleine onde réduite (75 %) avec défaut

(Amplitudes non égalisées)

Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100 μ s
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 100 μ s
- 3 courant de neutre, balayage de 100 μ s

NOTE Défaillance après 30 μ s, clairement indiquée par les oscillogrammes de tension, courant transféré par capacité et courant de neutre.

Figure B.3 – Impulsion de choc de foudre, claquage entre couches, dans l'enroulement à prises à pas grossier d'un transformateur 400/220 kV

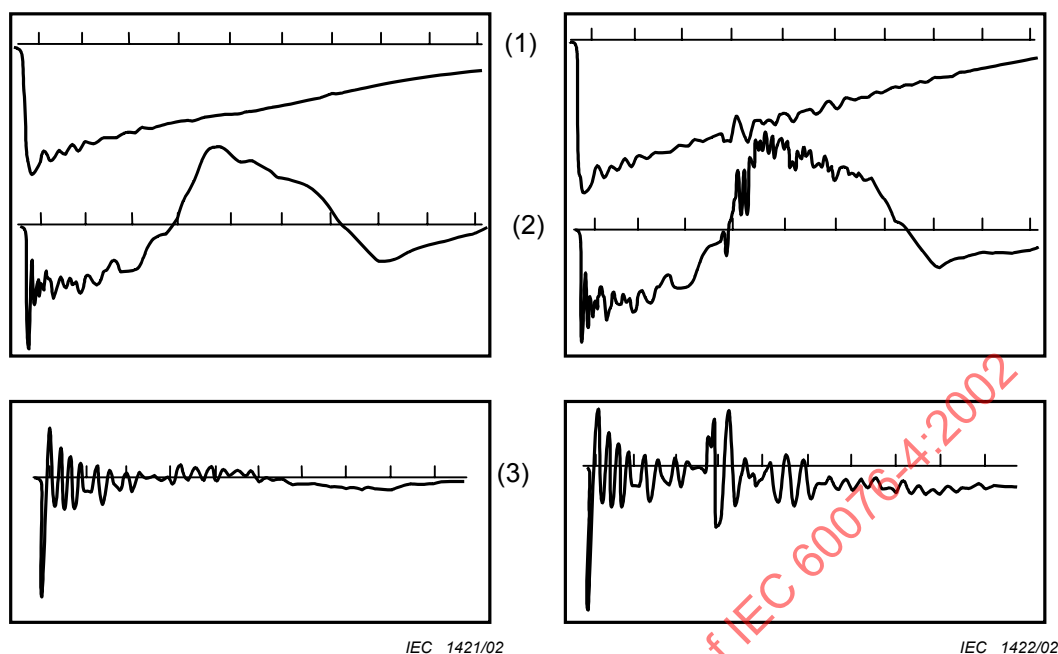


Figure B.3a – Reduced full wave (62,5 %) without fault

Figure B.3b – Reduced full wave (75 %) with fault

(Amplitudes not equalized)

Key

- 1 applied impulse, 100 μ s sweep
- 2 capacitively transferred current from the shorted, adjacent winding to earth, 100 μ s sweep
- 3 neutral current, 100 μ s sweep

NOTE Failure after 30 μ s, clearly indicated in voltage, capacitively transferred current and neutral current oscillograms.

Figure B.3 – Lightning impulse, interlayer breakdown in coarse-step tapping winding of a 400/220 kV transformer

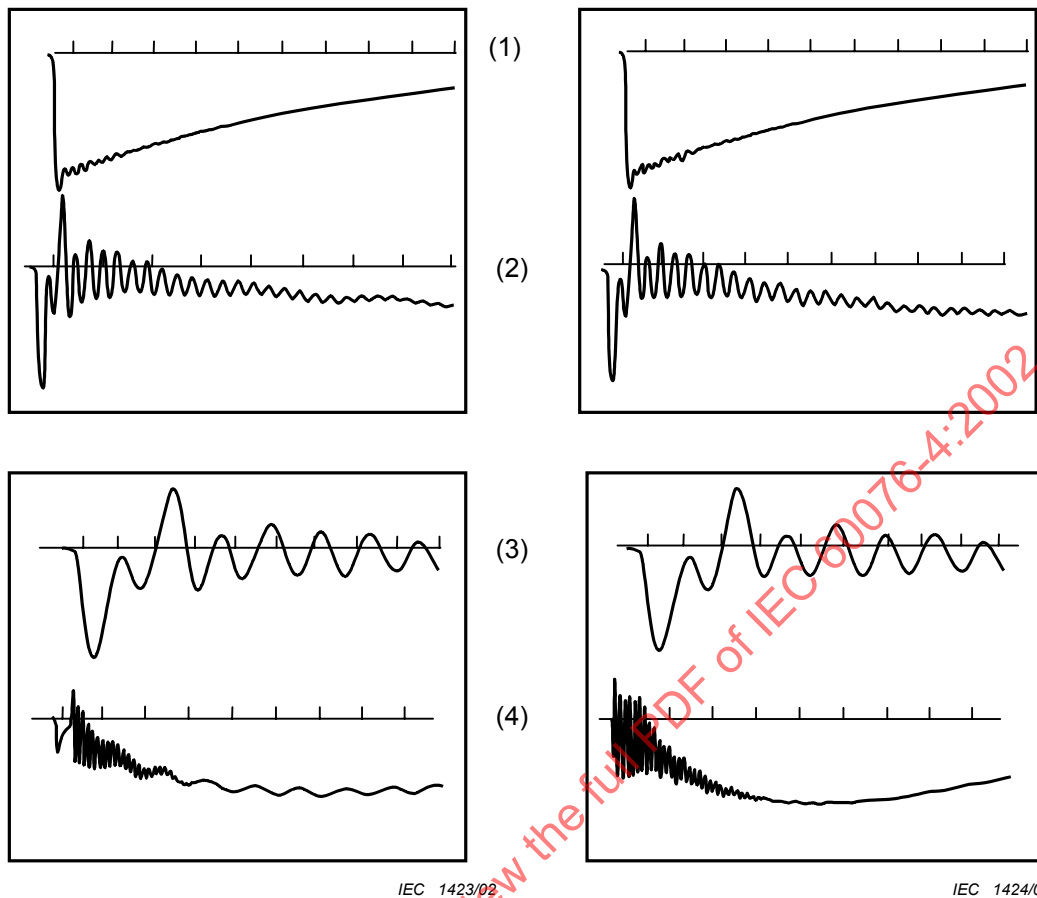


Figure B.4a – Pleine onde (100 %) sans défaut

Figure B.4b – Pleine onde (100 %) avec défaut

Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100 μ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100 μ s
- 3 courant de neutre, balayage de 25 μ s
- 4 courant de neutre, balayage de 250 μ s

NOTE Défaillance indiquée par des variations mineures sur tous les enregistrements de la deuxième application de la pleine d'onde de tension.

**Figure B.4 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –
Claquage entre les fils de deux sections 1,1 % de l'enroulement
à prises extérieur du transformateur de centrale 400 kV**

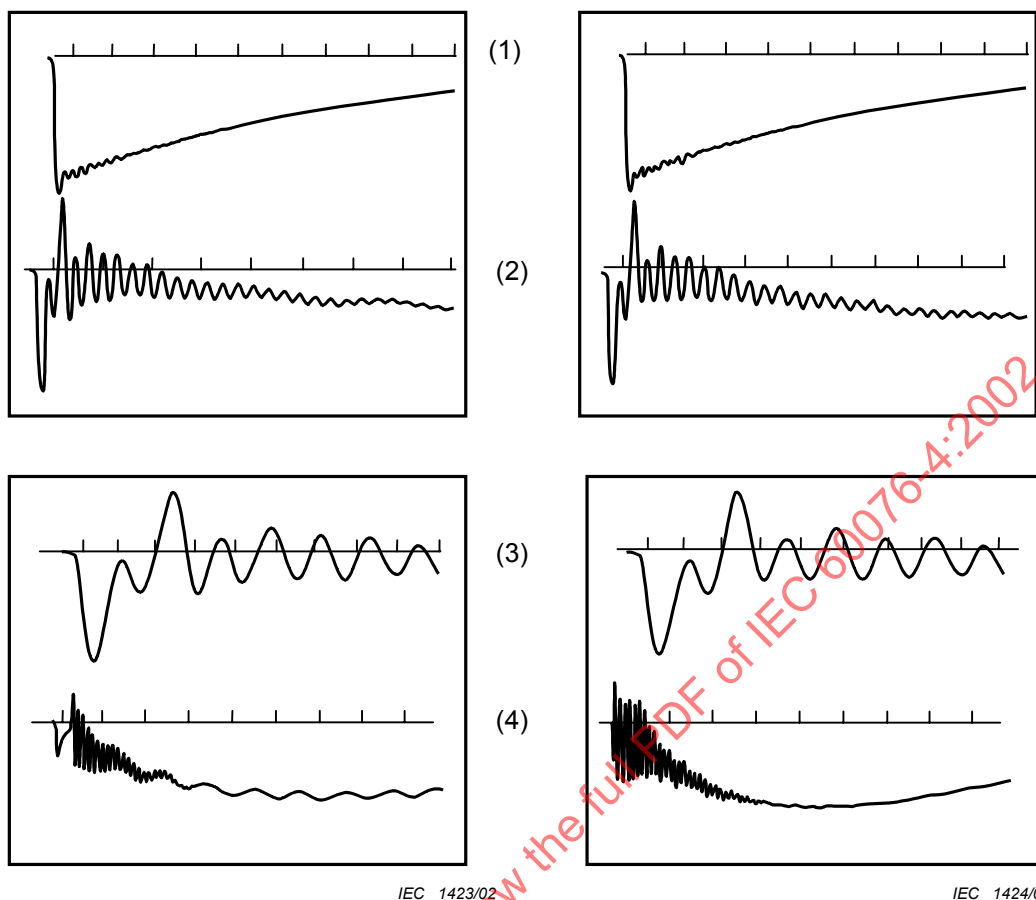


Figure B.4a – Full wave (100 %) without fault

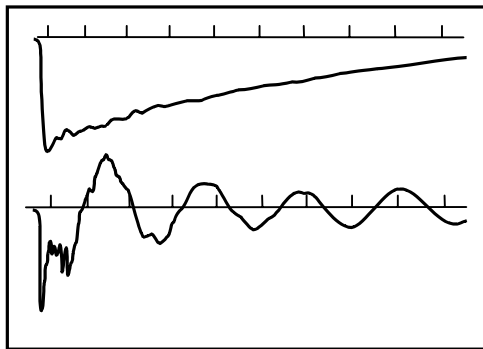
Figure B.4b – Full wave (100 %) with fault

Key

- 1 applied impulse, 100 μs sweep
- 2 neutral current, 100 μs sweep
- 3 neutral current, 25 μs sweep
- 4 neutral current, 250 μs sweep

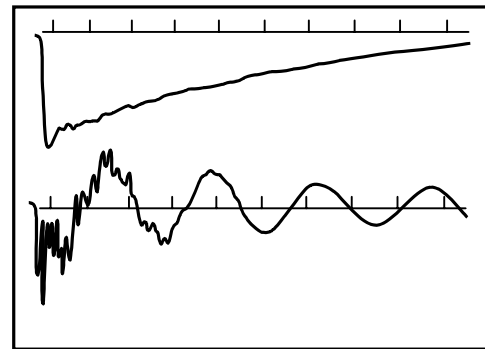
NOTE Failure indicated by minor variations on all records of second full-wave voltage application.

Figure B.4 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between leads of two 1,1 % sections of outside tapping winding of 400 kV generator transformer



IEC 1425/02

Figure B.5a – Pleine onde réduite (62,5 %) sans défaut



IEC 1426/02

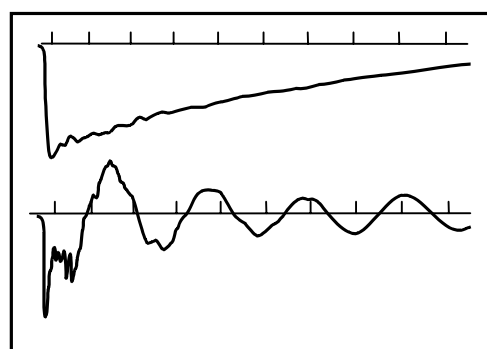
Figure B.5b – Pleine onde (100 %) avec défaut

Légende

- 1 impulsion appliquée, pleine onde, balayage de 100 μ s
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 100 μ s

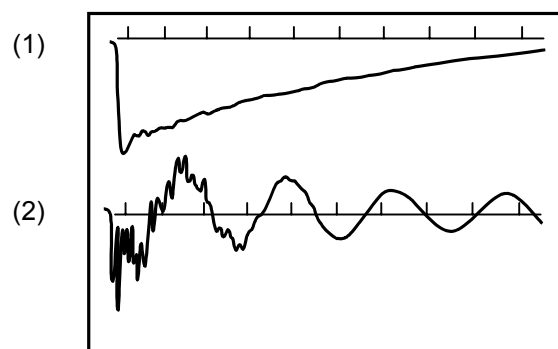
NOTE Défaillance indiquée par les oscillogrammes de tension et de courant transféré par capacité.

**Figure B.5 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –
Claquage court-circuitant une section de l'enroulement à prises à pas fin
d'un transformateur 220 kV**



IEC 1425/02

Figure B.5a – Reduced full wave (62,5 %) without fault



IEC 1426/02

Figure B.5b – Full wave (100 %) with fault

Key

- 1 applied impulse, full wave, 100 μ s sweep
- 2 capacitively transferred current from shorted adjacent winding to earth, 100 μ s sweep

NOTE Failure indicated in both voltage and capacitively transferred current oscillograms.

Figure B.5 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown short-circuiting one section of the fine-step tapping winding of a 220 kV transformer

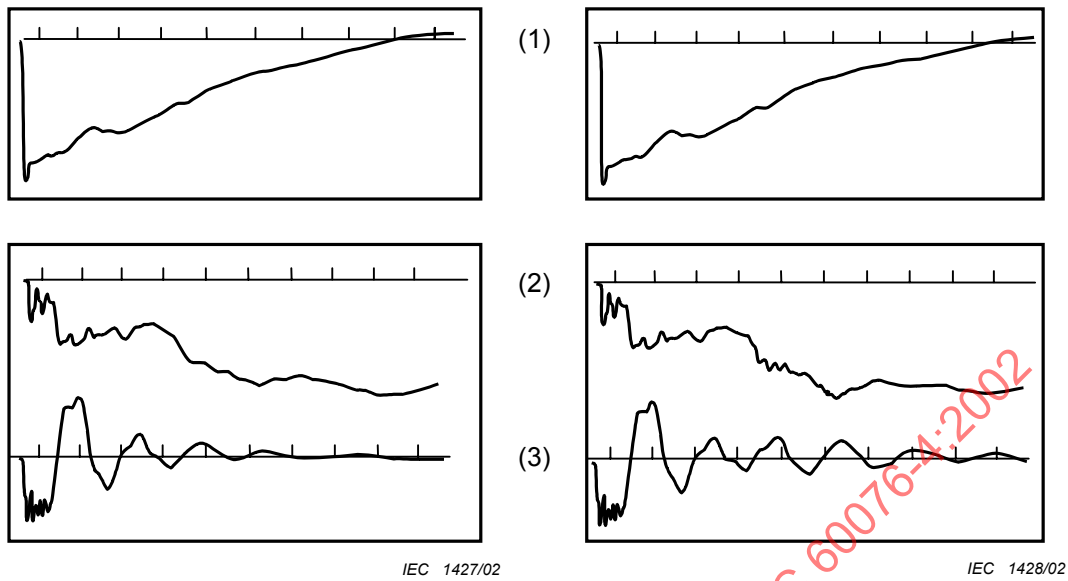


Figure B.6a – Pleine onde réduite (62,5 %) sans défaut

Figure B.6b – Pleine onde (100 %) avec défaut

Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100 μ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100 μ s
- 3 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 100 μ s

NOTE Défaillance après 30 μ s à 35 μ s, clairement indiquée par les oscillogrammes des courants de neutre et transféré par capacité et aucune indication dans l'oscillogramme de tension appliqué.

Figure B.6 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre les conducteurs parallèles d'un enroulement principal à haute tension d'un transformateur 220/110 kV

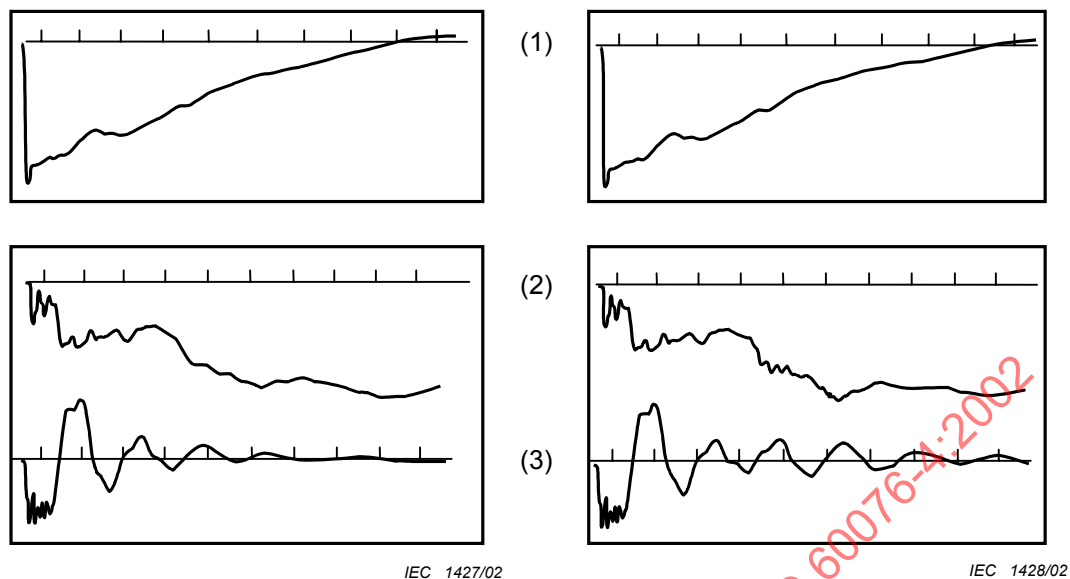


Figure B.6a – Reduced full wave (62,5 %) without fault

Figure B.6b – Full wave (100 %) with fault

Key

- 1 applied impulse, 100 μ s sweep
- 2 neutral current, 100 μ s sweep
- 3 capacitively transferred current from shorted adjacent winding to earth, 100 μ s sweep

NOTE Failure after 30 μ s to 35 μ s, clearly indicated in both neutral and capacitively transferred current oscillograms and no indication in the applied voltage oscillogram.

Figure B.6 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between parallel conductors of a main high-voltage winding of a 220/110 kV transformer

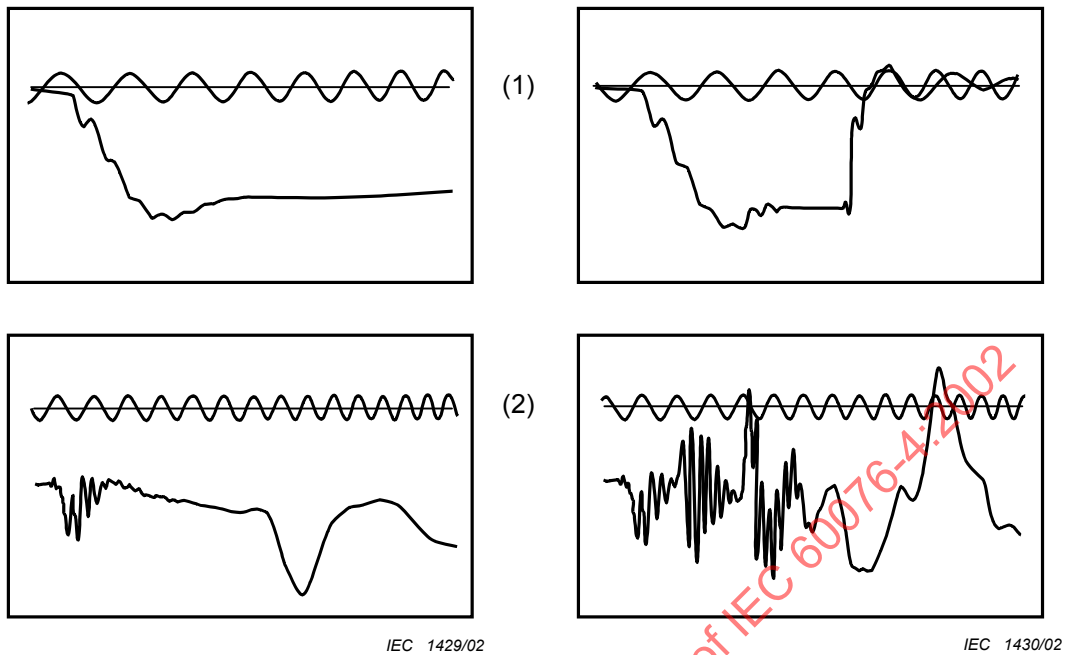


**Figure B.7a – Pleine onde (100 %)
sans défaut**

**Figure B.7b – Onde hachée (115 %)
avec défaut (Note 1)**

(Amplitudes non égalisées)

Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10 μ s
- 2 courant de neutre, balayage de 15 μ s

NOTE 1 Puisque la défaillance s'est produite avant l'instant de hachage, elle est considérée comme une défaillance pleine onde.

NOTE 2 Défaillance juste après la crête et avant l'instant de hachage indiquée par une chute de 10 % de l'onde de tension et par l'oscillogramme de courant de neutre.

**Figure B.7 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –
Claquage entre clinquants de bague 66 kV sur l'enroulement essayé**

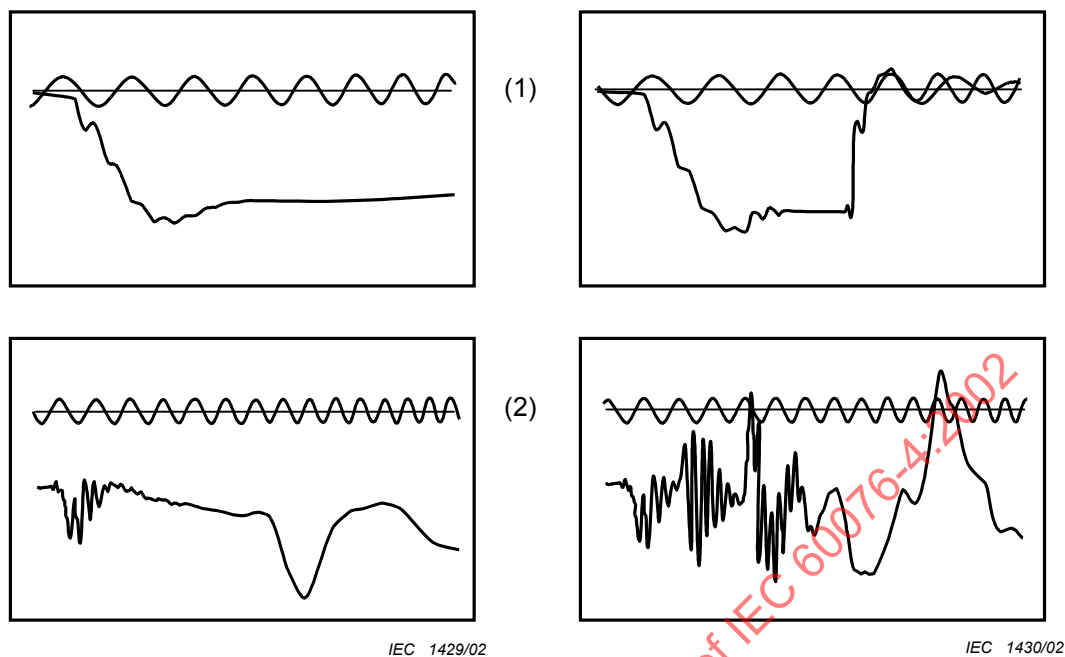


**Figure B.7a – Full wave (100 %)
without fault**

**Figure B.7b – Chopped wave (115 %)
With fault (Note 1)**

(Amplitudes not equalized)

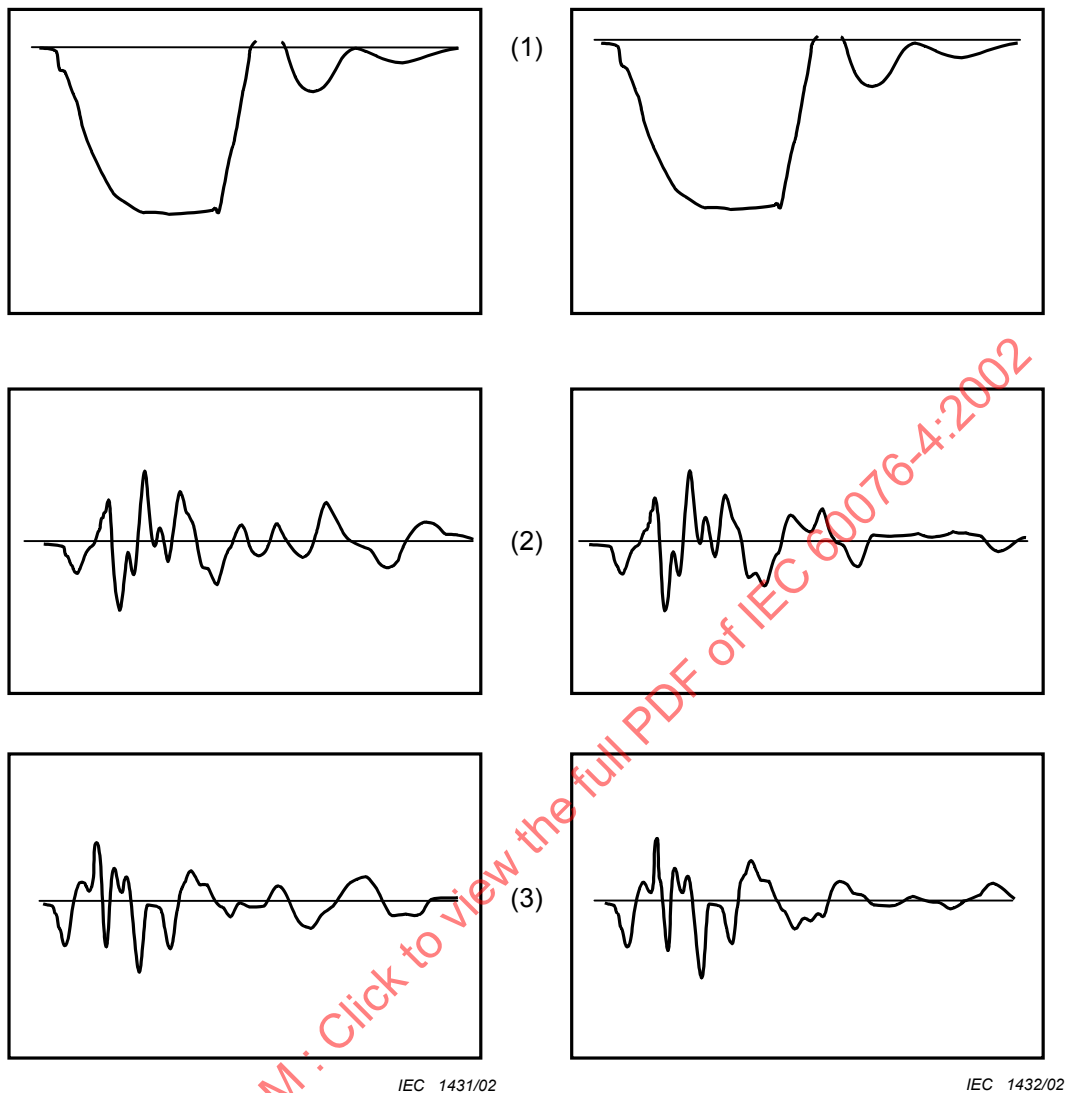
Key

- 1 applied impulse, 10 μ s sweep
- 2 neutral current, 15 μ s sweep

NOTE 1 Since failure occurred before the instant of chopping it is therefore regarded as a full-wave failure.

NOTE 2 Failure just after the peak and before the instant of chop indicated by a 10 % drop in the voltage wave and by the neutral current oscillogram.

**Figure B.7 – Lightning impulse, full-wave failure –
Breakdown between foils of 66 kV bushing on tested winding**



Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10 μ s
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 50 μ s
- 3 courant de neutre, balayage de 50 μ s

NOTE Défaillance après 10 μ s à 15 μ s clairement indiquée par les oscillogrammes de courant transféré et de courant de neutre.

**Figure B.8 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée –
Claquage entre spires dans l'enroulement principal à haute tension
d'un transformateur 115 kV**

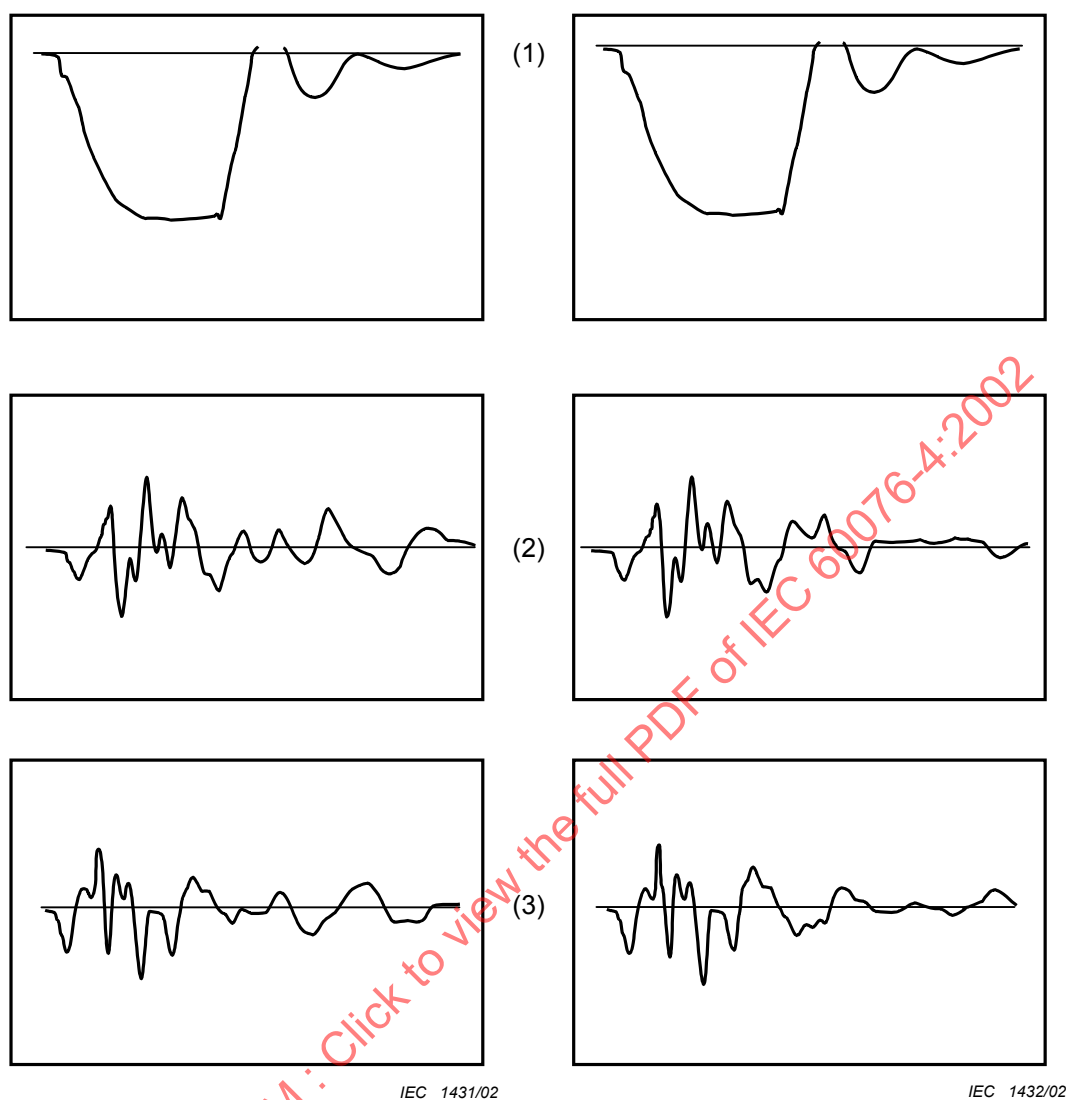


Figure B.8a – Reduced chopped wave (60 %) without fault

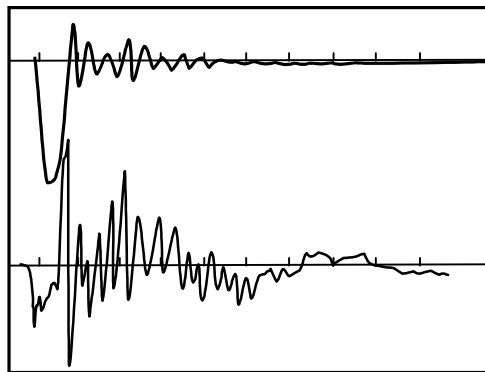
Figure B.8b – Chopped wave (100 %) with fault

Key

- 1 applied impulse, 10 μ s sweep
- 2 capacitively transferred current from the shorted adjacent winding to earth, 50 μ s sweep
- 3 neutral current, 50 μ s sweep

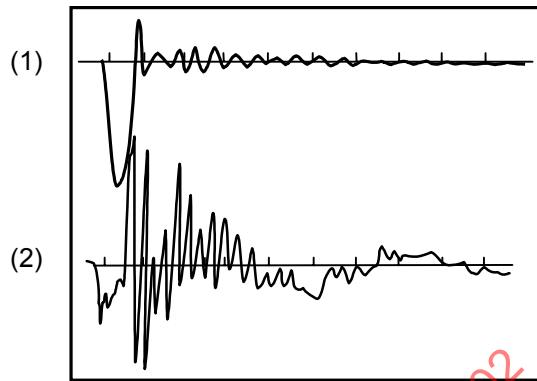
NOTE Failure after 10 μ s to 15 μ s clearly indicated in transferred current and neutral current oscillograms.

Figure B.8 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in the main high-voltage winding of a 115 kV transformer



IEC 1433/02

**Figure B.9a – Onde hachée réduite (70 %)
sans défaut**



IEC 1434/02

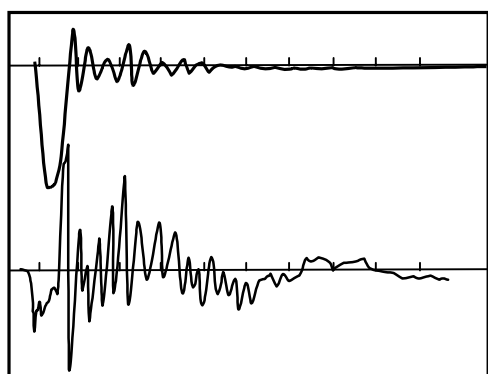
**Figure B.9b – Onde hachée (115 %)
avec défaut**

Légende

- 1 impulsion appliquée, onde hachée, balayage de 50 μ s
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 50 μ s

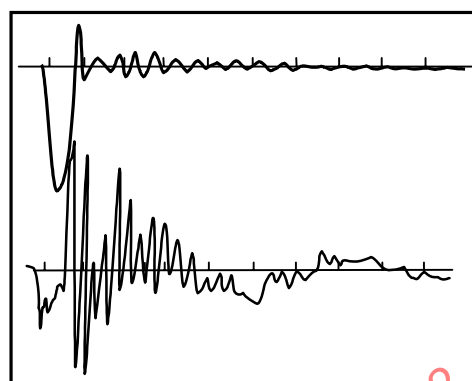
NOTE Défaillance indiquée immédiatement après le hachage par les oscillogrammes de tension et de courant transféré par capacité

**Figure B.9 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée –
Claquage entre spires dans un enroulement à prises à pas fin
d'un transformateur 220 kV**



IEC 1433/02

Figure B.9a – Reduced chopped wave (70 %) without fault



IEC 1434/02

Figure B.9b – Chopped wave (115 %) with fault

Key

- 1 applied impulse, chopped wave, 50 μ s sweep
- 2 capacitively transferred current from the shorted adjacent winding to earth, 50 μ s sweep

NOTE Failure indicated immediately after chopping in both the voltage and capacitively transferred current oscillograms.

Figure B.9 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in a fine-step tapping winding of a 220 kV transformer

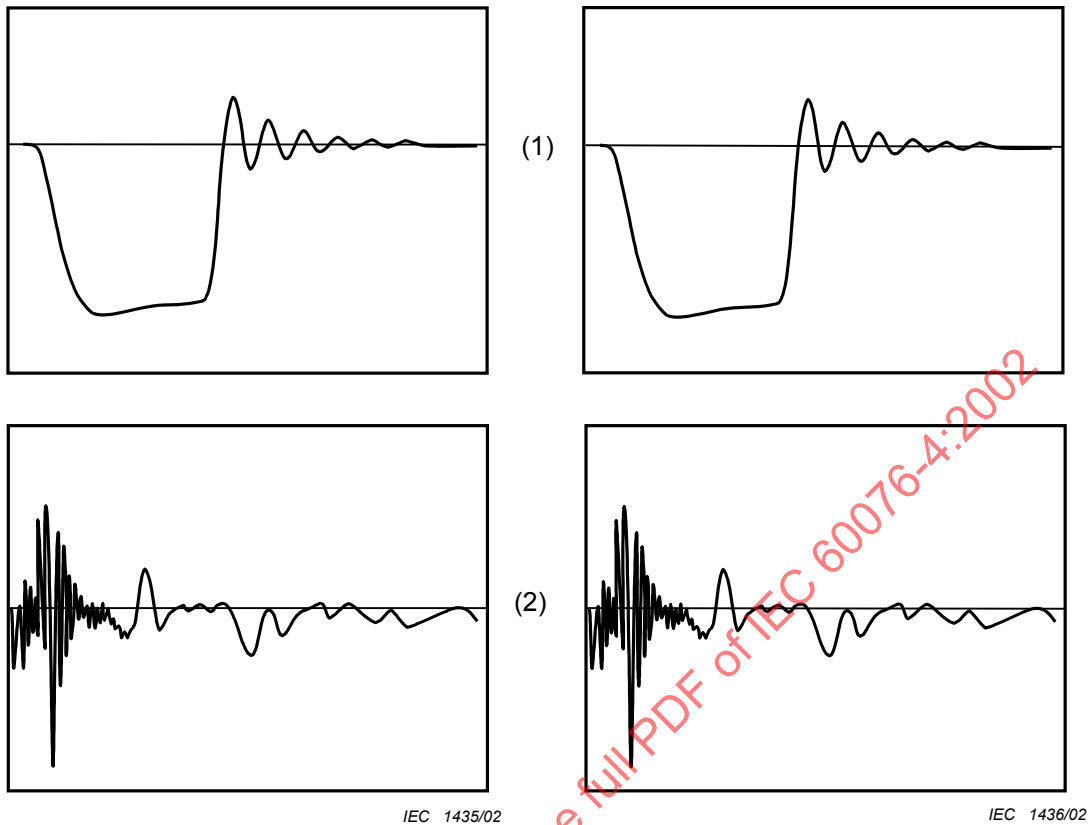


Figure B.10a – Onde hachée réduite (75 %)

Figure B.10b – Onde hachée (100 %)

Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10 μ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100 μ s

NOTE Enregistrements de tension et de courant de neutre identiques, obtenus quand il n'y a aucune différence dans les temps de hachage

**Figure B.10 – Impulsion hachée de choc de foudre –
Impulsions à différents niveaux de tension avec des temps de hachage identiques,
lors des essais d'un transformateur 115 kV**