

NORME INTERNATIONALE

CEI 60076-4

Première édition
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

(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[IEC 60076-4:2002](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14f4d568ef28/iec-60076-4-2002)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14f4d568ef28/iec-60076-4-2002>

*Cette version **française** découle de la publication d'origine **bilingue** dont les pages anglaises ont été supprimées. Les numéros de page manquants sont ceux des pages supprimées.*



Numéro de référence
CEI 60076-4:2002(F)

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/searchpub) 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/online_news/justpub) 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

NORME INTERNATIONALE

CEI 60076-4

Première édition
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

(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

<https://standards.iteh.ai>
IEC 60076-4:2002

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14f4d568ef28/iec-60076-4-2002>

© IEC 2002 Droits de reproduction réservés

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.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembe, 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

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

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

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.

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.

iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[IEC 60076-4:2002](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14f4d568ef28/iec-60076-4-2002)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14f4d568ef28/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*

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

[IEC 60076-4:2002](https://standards.ieclibrary.org/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14f4d568ef28/iec-60076-4-2002)

<https://standards.ieclibrary.org/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14f4d568ef28/iec-60076-4-2002>

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.

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.

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.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/44d1dbd8-352c-416d-974c-14fd568ef28/iec-60076-4-2002>

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.

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).

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 transférées, 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);

- 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.