

NORME INTERNATIONALE

Transformateurs de puissance -

**Partie 4: Essais au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs
de puissance et bobines d'inductance**

get full document from standards.iteh.ai



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2026 IEC, Geneva, Switzerland

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	5
1 Domaine d'application	7
2 Références normatives	7
3 Termes et définitions	7
4 Généralités	7
5 Formes d'onde spécifiées	8
6 Circuit d'essai	8
7 Vérification du système de mesure de la tension de choc avant un essai	10
8 Essais au choc de foudre	10
8.1 Formes d'onde	10
8.1.1 Généralités	10
8.1.2 Temps de montée T_1	10
8.1.3 Éléments non linéaires	11
8.1.4 Temps à demi-valeur T_2	12
8.2 Chocs en onde coupée sur la queue	12
8.2.1 Temps de découpe	12
8.2.2 Fonction de tension d'essai pour les essais au choc de foudre en onde coupée sur la queue	13
8.2.3 Fonction de tension d'essai et présentation des résultats d'essai	13
8.2.4 Vitesse de chute et amplitude de polarité inverse du choc en onde coupée	13
8.3 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances	14
8.3.1 Raccordements aux bornes	14
8.3.2 Méthodes applicables de détection de défaillances	15
8.4 Méthodes d'essai	15
8.5 Enregistrement des essais	16
8.5.1 Généralités	16
8.5.2 Systèmes d'enregistrement numériques	16
8.5.3 Vacant	16
8.5.4 Enregistrement numérique	16
9 Essais au choc de manœuvre	18
9.1 Exigences particulières	18
9.2 Transformateurs – Essais au choc de manœuvre	18
9.2.1 Formes d'onde	18
9.2.2 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances	19
9.2.3 Méthodes d'essai	20
9.2.4 Enregistrement des essais	21
9.3 Bobines d'inductance – Essais au choc de manœuvre	22
9.3.1 Formes d'onde	22
9.3.2 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances	22
9.3.3 Méthodes d'essai	23
9.3.4 Enregistrement numérique de la forme d'onde de la tension de choc et du courant de choc	23
10 Interprétation des oscillogrammes	23

10.1	Généralités	23
10.2	Choc de foudre – Interprétations des oscillogrammes	24
10.2.1	Généralités	24
10.2.2	Enregistrements de tension – Essais en onde pleine	25
10.2.3	Enregistrements de courant – Essais en onde pleine	25
10.2.4	Enregistrements de tension et de courant – Essais en onde coupée	26
10.3	Choc de manœuvre – Interprétations des oscillogrammes	26
10.3.1	Enregistrements de tension	26
10.3.2	Enregistrements du courant de choc	27
11	Enregistrement numérique – Analyse de fonction de transfert	27
12	Rapport d'essai de choc	30
13	Circuits d'essai de choc et raccordements aux bornes	31
Annexe A (informative)	Principes de contrôle de la forme d'onde	37
A.1	Généralités	37
A.2	Enroulements d'impédance élevée ($L_t > 100$ mH)	37
A.3	Enroulements de faible impédance ($L_t < 20$ mH)	38
Annexe B (informative)	Oscillogrammes et enregistrements numériques types	45
Annexe C (informative)	Exemples d'oscillogrammes avec dépassements	67
Bibliographie		74
Figure 1	– Circuit d'essai de choc type	31
Figure 2	– Raccordements aux bornes pour l'essai au choc de foudre et méthodes applicables de détection de défaillances	32
Figure 3	– Formes d'onde de choc de manœuvre d'un transformateur et d'une bobine d'inductance	33
Figure 4	– Raccordements aux bornes pour l'essai au choc de manœuvre et méthodes de détection de défaillances	34
Figure 5	– Connexions d'essai du transformateur triphasé (noyau à trois colonnes) pour le choc de manœuvre	35
Figure 6	– Connexions d'essai du transformateur triphasé (noyau à cinq colonnes) pour le choc de manœuvre	36
Figure A.1	– Contrôle de la forme d'onde pour des enroulements d'impédance élevée	37
Figure A.2	– Contrôle de la queue d'onde pour des enroulements de faible impédance	39
Figure A.3	– Oscillation amortie	40
Figure A.4	– Effets dus à la courte longueur de la queue d'onde	42
Figure A.5	– Enroulement mis à la terre par résistance	43
Figure A.6	– Circuit de Glaninger	44
Figure B.1	– Choc de foudre, défaillance en onde pleine – Claquage ligne au neutre à travers l'enroulement haute tension du transformateur élévateur 400 kV	46
Figure B.2	– Choc de foudre, défaillance en onde pleine – Claquage entre disques à l'entrée de l'enroulement haute tension d'un transformateur 115 kV	47
Figure B.3	– Choc de foudre, claquage entre couches dans un enroulement des prises à pas grossier d'un transformateur 400/220 kV	48
Figure B.4	– Choc de foudre, défaillance en onde pleine – Claquage entre les connexions de deux sections 1,1 % de l'enroulement des prises extérieur du transformateur élévateur 400 kV	49
Figure B.5	– Choc de foudre, défaillance en onde pleine – Claquage court-circuitant une section de l'enroulement des prises à pas fin d'un transformateur 220 kV	50

Figure B.6 – Choc de foudre, défaillance en onde pleine – Claquage entre les conducteurs parallèles d'un enroulement principal à haute tension d'un transformateur 220/110 kV.....	50
Figure B.7 – Choc de foudre, défaillance en onde pleine – Claquage entre clinquants de traversée 66 kV sur l'enroulement soumis à l'essai	51
Figure B.8 – Choc foudre, défaillance en onde pleine – Mise à la terre de la bride de traversée	52
Figure B.9 – Choc de foudre, défaillance onde coupée – Claquage entre spires dans l'enroulement principal à haute tension d'un transformateur 115 kV	53
Figure B.10 – Choc de foudre, défaillance onde coupée – Claquage entre spires dans un enroulement des prises à pas fin d'un transformateur 220 kV.....	54
Figure B.11 – Choc de foudre en onde coupée – Chocs à différents niveaux de tension avec des temps de découpe identiques lors des essais d'un transformateur 115 kV.....	55
Figure B.12 – Choc de foudre en onde coupée – Effets des différences dans les temps de découpe lors des essais d'un transformateur 220 kV.....	56
Figure B.13 – Choc de foudre en onde pleine – Effet des résistances non linéaires incorporées dans la sortie du neutre du changeur de prises en charge, d'un transformateur avec des enroulements séparés	57
Figure B.14 – Choc de foudre en onde pleine – Effet des différences de démarrage des étages du générateur à différents niveaux de tension lors des essais d'un transformateur 400 kV	58
Figure B.15 – Choc de manœuvre – Essai satisfaisant sur un transformateur élévateur triphasé 400 kV.....	59
Figure B.16 – Choc de manœuvre – Claquage par claquage axial de l'enroulement principal à haute tension d'un transformateur élévateur monophasé 525 kV.....	60
Figure B.17 – Choc de manœuvre – Essai satisfaisant sur une bobine d'inductance monophasée 525 kV, 33 MVAR.....	61
Figure B.18 – Choc de foudre en onde pleine – Évaluation d'une forme d'onde non normalisée – Influence des algorithmes de lissage intégrés dans les numériseurs	62
Figure B.19 – Choc de foudre en onde pleine – Forme d'onde non normalisée, oscillations superposées avec amplitude > 50 % et fréquence < 500 kHz	62
Figure B.20 – Choc de foudre en onde coupée – Onde coupée non normalisée sur un enroulement de type couche	63
Figure B.21 – Choc de foudre – Comparaison de la fonction de transfert d'une onde pleine et d'une onde coupée	64
Figure B.22 – Choc de foudre en onde pleine – Problème du circuit d'essai provoqué par un amorçage à la terre d'un câble de mesure.....	65
Figure B.23 – Choc de foudre en onde pleine – Enregistrements numériques de défaillances présentant un claquage sur les connexions entre prises d'un changeur de prises et un claquage entre enroulements des prises à pas grossier et à pas fin.....	66
Figure C.1 – Oscillogramme d'un choc de foudre avec un dépassement d'une fréquence supérieure à 500 kHz ($\beta_k = \beta' = 7,35\%$) – Transformateur triphasé 27,6 kV/208 V, 150 kVA, YNyn0.....	68
Figure C.2 – Oscillogramme d'un choc de foudre avec un dépassement d'une fréquence supérieure à 500 kHz ($\beta_k = \beta' = 10,3\%$) – Transformateur 138 kV/13,8 kV, 33,3 MVA, Dyn1	69
Figure C.3 – Oscillogramme d'un choc de foudre avec un dépassement d'une fréquence supérieure à 500 kHz ($\beta_k = \beta' = 14,2\%$) – Transformateur monophasé 14,4 kV/120 V-240 V, 50 kVA.....	70
Figure C.4 – Oscillogramme d'un choc de foudre avec un dépassement d'une fréquence supérieure à 500 kHz ($\beta_k = \beta' = 30,2\%$) – Transformateur triphasé 34,5 kV/560 V, 3 600 kVA	70

Figure C.5 – Oscillogramme d'un choc de foudre avec un dépassement – $\beta' = 6,80 \%$ Autotransformateur monophasé 267 MVA – 420 kV/247 kV/28 kV – Borne BT 247 kV	71
Figure C.6 – Oscillogramme d'un choc de foudre avec un dépassement – $\beta' = 13,40 \%$ Autotransformateur triphasé 600 MVA – 345 kV/141,5 kV/13,8 kV – Borne BT 141,5 kV	71
Figure C.7 – Oscillogramme d'un choc de foudre avec un dépassement – $\beta' = 23,22 \%$ Autotransformateur monophasé 267 MVA – 420 kV/247 kV/28 kV – Borne TV 28 kV	72
Figure C.8 – Exemple d'oscillogramme d'un choc de foudre sur une traversée (objet d'essai de capacité) avec un dépassement $\beta' = 3,92 \%$, sans oscillations complexes	73
Tableau B.1 – Récapitulatif des exemples représentés sur les oscillogrammes et les enregistrements numériques	45
Tableau C.1 – Récapitulatif des oscillogrammes d'essai au choc de foudre avec un dépassement	67

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

Transformateurs de puissance - Partie 4: Essais au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs de puissance et bobines d'inductance

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 60076-4 a été établie par le comité d'études 14 de l'IEC: Transformateurs de puissance. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2002. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) essais au choc de foudre en présence d'une valeur de dépassement relatif de 5 % ou plus (8.1.2). L'édition 2002 ne précisait pas comment procéder lorsque le dépassement dépasse 5 %. Dans cette révision, le laboratoire d'essai peut effectuer les essais à condition de mettre en œuvre le calcul de la fonction de tension défini dans l'IEC 60060-1:2010;
- b) tension d'essai nouvellement adoptée pour les essais au choc de foudre en onde coupée sur la queue (8.2.2);
- c) essais de choc de manœuvre sur transformateurs triphasés, connexions d'essai (voir la Figure 5 et la Figure 6);
- d) nouveau circuit de Glaninger à l'Article A.3 pour les enroulements à faible impédance ($L_t < 20$ mH);
- e) nouvelle Annexe C comportant des exemples d'oscillogrammes avec un dépassement de la tension de crête.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
14/1204/FDIS	14/1208/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60076, publiées sous le titre général *Transformateurs de puissance*, se trouve sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60076 s'applique aux essais au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs de puissance et des bobines d'inductance.

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 mesure et l'interprétation des résultats.

Partout où elles s'appliquent, les techniques d'essai sont celles qui sont décrites dans l'IEC 60060-1 et l'IEC 60060-2.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60060-1:2010, *Techniques d'essais à haute tension - Part 1: Terminologie générale et exigences d'essai*

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

IEC 60076-3:2013, *Transformateurs de puissance - Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

IEC 60076-6, *Transformateurs de puissance - Partie 6: Bobines d'inductance*

IEC 61083-1, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesurages pendant les essais à tension et courant élevés - Partie 1: Exigences pour les appareils utilisés pour les essais de choc*

3 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

4 Généralités

Le présent document est principalement fondé sur l'utilisation des générateurs de chocs conventionnels dans les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs et des bobines d'inductance. La pratique de la génération de choc de manœuvre avec la décharge d'un condensateur séparé dans un enroulement de tension intermédiaire ou de basse tension s'applique également. Toutefois, la méthode qui met en œuvre une inductance additionnelle en série avec le condensateur pour donner des oscillations légèrement amorties transférées dans l'enroulement haute tension ne s'applique pas.

Les moyens alternatifs de génération 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 s'appliquent pas aussi largement.

Le choix des circuits d'essai (raccordements aux bornes) pour les essais au choc de foudre et de manœuvre fait l'objet de considérations différentes pour les transformateurs et les bobines d'inductance. Sur les transformateurs, toutes les bornes et tous les enroulements peuvent être soumis à l'essai au choc de foudre à des niveaux spécifiques et indépendants. Cependant, lors d'un essai au choc de manœuvre, en raison de la tension induite transférée, un niveau d'essai spécifié ne peut être obtenu que sur un seul enroulement (voir l'IEC 60076-3).

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

5 Formes d'onde spécifiées

Les formes d'onde de tension généralement utilisées pendant les essais au choc de foudre et de manœuvre sur les transformateurs et les bobines d'inductance sont données dans l'IEC 60076-3 et l'IEC 60076-6, et les méthodes pour leur détermination doivent faire référence à l'IEC 60060-1.

6 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 de choc, 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 découpe.

Cet aménagement de base est représenté à la Figure 1.

Les paramètres suivants influencent la forme d'onde de choc:

- a) la capacité effective C_t et l'inductance de l'objet en essai L_t ; C_t est constante pour toute conception donnée et pour toute forme d'onde donnée, L_t est également une constante pour toute conception donnée. Cependant, la L_t effective peut être influencée par le traitement des bornes. 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 8.1 et 8.3 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 parasites du générateur et le circuit d'essai complet;
- e) les équipements de découpe, le cas échéant;
- f) les éléments non linéaires dans le transformateur, qui peuvent être à l'origine de différences entre les chocs à différents niveaux de tension.

Le temps de montée 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 chocs 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 a également un effet significatif sur la queue d'onde, par exemple des enroulements d'inductance extrêmement faible. Pour les chocs de manœuvre, d'autres paramètres interviennent; ceux-ci sont traités à l'Article 9.

Les équipements d'essai utilisés pour les applications au 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 raccordements aux bornes de l'objet en essai).

Pour satisfaire aux différentes exigences de forme d'onde pour les chocs de foudre et de manœuvre, une attention particulière doit être accordée au choix des paramètres du générateur de choc, tels que la capacité, la résistance série et la résistance (parallèle) de décharge. Lors de la génération de chocs de manœuvre, des résistances série, capacités de charge de grande valeur, ou les deux, peuvent être exigées, ce qui peut réduire considérablement l'efficacité.

Alors que la tension de sortie du générateur de choc 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 exigé dépend essentiellement des impédances inhérentes à l'objet en essai.

Une brève explication des principes du contrôle de la forme d'onde est donnée à l'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 de choc, le potentiel ne peut pas être considéré comme 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 de choc 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 de choc soit de faible 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 d'utiliser ce point de connexion 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 de faible impédance (voir l'IEC 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 de choc traversant les enroulements en essai, soit également relié efficacement à la même terre de référence.

Dans l'essai au choc de manœuvre, puisque les taux de variation des tensions et des courants de choc sont réduits de manière importante par rapport à ceux d'un essai au choc de foudre et qu'aucun circuit de découpe 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, à titre de précaution, il convient de suivre les mêmes pratiques en matière de mise à la terre que celles utilisées pour les essais au choc de foudre.

Brouillage électromagnétique:

- Les transformateurs de puissance sont de plus en plus souvent équipés de dispositifs de contrôle et de protection, qui sont sensibles aux surtensions provoquées par des transitoires (rapides).
- Les différences de potentiel, provoquées par des mises à la terre particulières lors des essais au choc de foudre et de manœuvre. La mise à la terre différente du dispositif de contrôle et de protection (en ce qui concerne la sécurité) peut endommager les parties électroniques.

Exemples de dispositifs concernés:

- Gros transformateurs principalement équipés de systèmes (informatisés) de surveillance d'état.
- Équipements de refroidissement (ventilateurs, pompes) fonctionnant en fonction de la charge et du bruit du transformateur et commandés par des dispositifs électroniques, etc.

Il est recommandé de déconnecter, pendant les essais de choc, tous les équipements électriques et électroniques installés sur le transformateur.

7 Vérification du système de mesure de la tension de choc avant un essai

Le système de mesure de la tension de choc doit être vérifié conformément à l'IEC 60060 (toutes les parties). 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 la tension d'essai réduite. Pour cette vérification, la tension peut être déterminée au moyen d'un éclateur à sphères ou par un mesurage comparatif 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 soient modifiés, excepté pour le démontage d'un appareil pour vérification.

Les informations sur des types de diviseurs de tension, leurs applications, leur exactitude, leur étalonnage et leur vérification doivent être conformes à l'IEC 60060-2.

8 Essais au choc de foudre

8.1 Formes d'onde

8.1.1 Généralités

Les valeurs de forme d'onde spécifiée ne peuvent pas toujours être obtenues. Lors des essais de choc sur de gros transformateurs de puissance et sur des bobines d'inductance, soit de faible inductance d'enroulement ou de forte capacité en surtension, soit des enroulements de faible résistance ohmique, ou les deux, des tolérances plus larges peuvent devoir être acceptées (Tableau B.1).

8.1.2 Temps de montée T_1

La capacité en surtension du transformateur en essai étant constante, la résistance série doit être réduite afin d'essayer d'obtenir le temps de montée correct T_1 ou la vitesse de montée correcte, mais il convient que la réduction ne soit pas de nature à entraîner des oscillations excessives sur la crête de l'onde de tension. Si un temps de montée court (de préférence dans les limites spécifiées) est jugé souhaitable, les oscillations, les dépassements ou les deux peuvent devoir être acceptés. Dans un tel cas, un compromis entre l'importance des oscillations admissibles et le temps de montée, qui peut être obtenu, est nécessaire. En règle générale, il convient de disposer le circuit d'essai de sorte que le dépassement et l'oscillation soient minimaux.

Des exemples d'oscillogrammes avec un dépassement sont récapitulés dans le Tableau C.1 et représentés à la Figure C.1, à la Figure C.2, à la Figure C.3, à la Figure C.4, Figure C.5, à la Figure C.6, à la Figure C.7 et à la Figure C.8.

Si le dépassement relatif, β' , dépasse 5 %, l'IEC 60076-3:2013, 13.2.1 suggère les options suivantes:

Option 1 – Ajuster T_1

T_1 peut être augmenté. Cependant, s'il dépasse 1,56 μ s, une onde coupée est exigée pour assurer la teneur en hautes fréquences:

- Pour les transformateurs dont $U_m \leq 800$ kV, la limite de T_1 est de 2,5 μ s,
- Pour les transformateurs dont $U_m > 800$ kV, une valeur de $T_1 > 2,5$ μ s peut être acceptée, sous réserve d'un accord entre l'acheteur et le constructeur.

Option 2 – Accepter le dépassement

Si le dépassement relatif (β') dépasse 5 %, les essais peuvent être poursuivis à condition que les paramètres de choc de foudre soient calculés avec la fonction de tension d'essai conformément à l'IEC 60060-1:2010, Annexe B.

NOTE Lorsque β' est élevé et que le dépassement comporte des composantes hautes fréquences (> 500 kHz), la fonction de tension d'essai peut réduire la valeur de la tension d'essai (U_t) sensiblement au-dessous de la valeur de crête U_e de la courbe enregistrée. Cette divergence peut imposer une contrainte électrique plus élevée sur l'isolation et ainsi augmenter le risque de claquage diélectrique.

Pour les essais de transformateurs, l'évaluation manuelle de la tension d'essai au choc de foudre n'est généralement pas fiable. Si le constructeur ne dispose pas du logiciel permettant de mettre en œuvre la fonction de tension d'essai de l'IEC 60060-1, l'acheteur doit en être informé au stade du devis.

8.1.3 Éléments non linéaires

Dans certains transformateurs de puissance, les parties actives sont protégées par des parafoudres non linéaires. Lorsque des essais au choc de foudre sont effectués, ces dispositifs peuvent modifier la forme d'onde de tension; la forme varie en fonction de l'amplitude du choc.

Conformément à l'IEC 60076-3, la séquence d'essai doit consister en:

- trois chocs de référence;
- trois chocs en ondes pleines à 100 %;
- trois chocs de comparaison,

avec au moins un des chocs de référence inférieur à la tension de service (coude) du parafoudre.

NOTE Séquence des chocs de référence (voir l'IEC 60076-3):

- 1) entre 50 % et 60 % de la tension d'essai en onde pleine;
- 2) entre 60 % et 75 % de la tension d'essai en onde pleine;
- 3) entre 75 % et 90 % de la tension d'essai en onde pleine.

8.1.4 Temps à demi-valeur T_2

Pour de gros transformateurs de puissance et en particulier pour leurs enroulements intermédiaires et basse tension, le temps virtuel à demi-valeur T_2 ne peut 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 est 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 connexions d'essai spécifiques des bornes des enroulements non en essai ou, en plus, des bornes d'enroulements en essai qui ne sont pas soumises à l'essai.

Lorsque des essais au choc de foudre sont effectués sur les bornes de phase d'un enroulement en triangle, les bornes de cet enroulement non soumises à l'essai peuvent être mises à la terre par résistance.

Lorsque le neutre d'un enroulement connecté en étoile est soumis à l'essai, les bornes de phase peuvent être mises à la terre par résistance.

Dans le cas où les bornes de phase d'un enroulement connecté en étoile sont soumises à l'essai, la borne de neutre doit être solidement mise à la terre ou doit être mise à la terre par l'intermédiaire d'un shunt faiblement ohmique.

Lorsqu'une borne de ligne non soumise à l'essai est mise à la terre par résistance, il est nécessaire d'assurer que la tension par rapport à la terre apparaissant sur une borne non soumise à l'essai ne dépasse pas:

- 75 % de la tension assignée de tenue aux chocs de foudre de cette borne pour des enroulements connectés en étoile;
- 50 % de la tension assignée de tenue aux chocs de foudre de cette borne pour des enroulements connectés en triangle (en raison des tensions de sous-oscillation par rapport à la terre sur les bornes du triangle, voir également 8.4).

Lorsque la forme d'onde est oscillatoire du fait de l'inductance extrêmement basse ou de la faible capacité du générateur de choc, ou des deux, il convient que l'amplitude de la sous-oscillation ne dépasse pas 50 % de la tension d'essai. Avec cette limitation, des recommandations sont données à l'Annexe A, pour choisir la capacité du générateur de choc et ajuster les formes d'onde.

8.2 Chocs en onde coupée sur la queue

8.2.1 Temps de découpe

Les différents temps de découpe T_c (définis dans l'IEC 60060-2) entraînent l'application de différentes contraintes (tension et durée) dans différentes parties de l'enroulement ou des enroulements, en fonction de la construction de ces derniers et de leur disposition. Par conséquent, il n'est pas possible de fixer un temps de découpe, qui serait le plus contraignant, soit de façon générale, soit pour un transformateur particulier ou une bobine d'inductance particulière. Il convient que le temps de découpe soit compris entre 3 μ s et 6 μ s. Un temps compris entre 2 μ s et 6 μ s peut être admis, à condition que la valeur de crête de l'onde de choc de foudre soit atteinte avant la découpe, comme l'exige le 13.3.1 de l'IEC 60076-3:2013.

Les oscillogrammes ou les enregistrements numériques des ondes coupées sont uniquement comparables aux temps de découpe, sauf lorsque le temps de découpe est sensiblement identique (8.2.4).

8.2.2 Fonction de tension d'essai pour les essais au choc de foudre en onde coupée sur la queue

a) Procédure (transformateurs immergés dans l'huile et transformateurs de type sec)

- Appliquer un choc en onde coupée au niveau d'essai exigé.
La courbe enregistrée fournit la valeur de crête U_e . Si le système n'affiche pas U_e directement, effectuer une évaluation graphique de U_e à partir de l'oscillogramme.
- La courbe de tension d'essai calculée, obtenue à l'aide d'un logiciel intégrant les exigences de l'IEC 60060-1:2010, affiche la valeur de crête U_t .
- Si U_t diffère de la valeur attendue (110 % pour les transformateurs immergés dans l'huile ou 100 % pour les transformateurs de type sec), appliquer la méthode du rapport de réduction de tension (IEEE Std 4™-2013).

b) Méthode du rapport de réduction de tension (transformateurs immergés dans l'huile)

- Appliquer une onde pleine réduite (RFW, *reduced full wave*) et noter U_e .
- Lire la première valeur U_t correspondante fournie par le système de mesure.
- Déterminer le taux de réduction:
$$R_v = U_t / U_e$$
- Effectuer l'essai de choc en onde coupée à 110 % de l'onde pleine.
- Évaluer l'onde coupée à pleine tension en utilisant:
$$U'_t = R_v \times U'_e$$
- Référence du temps de montée: utiliser la valeur de temps de montée mesurée pendant l'essai RFW pour toutes les évaluations ultérieures.

c) Méthode du rapport de réduction de tension (transformateurs à sec)

- Suivre la même séquence, mais effectuer l'essai en onde coupée à 100 % de l'onde pleine au lieu de 110 %.
- Toutes les autres étapes (application de la RFW, calcul du rapport, réutilisation du temps de montée) restent identiques.

8.2.3 Fonction de tension d'essai et présentation des résultats d'essai

Lorsque la fonction de tension d'essai est mise en œuvre, les résultats d'essai suivants doivent être fournis:

U_s est la valeur de crête de la courbe de tension d'essai;

β' est le dépassement relatif.

En option, les éléments suivants peuvent également être affichés:

U_s est la valeur de crête de la courbe enregistrée.

8.2.4 Vitesse de chute et amplitude de polarité inverse du choc en onde coupée

Les événements caractéristiques pendant la découpe dépendent en grande partie de la configuration d'aménagement du circuit de découpe impliqué, de l'impédance du circuit de découpe et de l'objet en essai, qui déterminent tous aussi bien la vitesse de chute que l'amplitude de la sous-oscillation.