

norme européenne

NF EN 60076-3

Février 2002

norme française

Indice de classement : C 52-176-3

ICS 29.180

Transformateurs de puissance

Partie 3 : Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air

E : Power transformers

Part 3 : Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air

D : Leistungstransformatoren

Teil 3 : Isolationspegel, Spannungs-prüfungen und äußere Abstände in Luft

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'afnor le 5 janvier 2002 pour prendre effet à compter du 5 février 2002.

Remplace la partie 3 de la norme homologuée NF C 52-100 d'août 1990 ainsi que son amendement 1 d'août 1996.

Correspondance

La norme européenne EN 60076-3:2001 a le statut d'une norme française. Elle reproduit intégralement la publication CEI 60076-3:2000 + corrigendum 2000.

Analyse

Le présent document s'applique aux transformateurs de puissance immergés dans l'huile triphasés et monophasés (comprenant les autotransformateurs), à l'exception de certaines catégories de petits transformateurs et de transformateurs spéciaux telles que définies par le domaine d'application de la CEI 60076-1. Le présent document identifie les enroulements des tranformateurs suivant leur tension la plus élevée par le matériel U_m associé à leurs niveaux d'isolement assignés correspondants et présente en détail les essais diélectriques appropriés applicables et les distances minimales d'isolement dans l'air entre parties sous tension des traversées et les objets au potentiel de la terre.

dow : 2004-01-01

Descripteurs

Transformateur de puissance, définition, niveau d'isolement, tension de tenue, essai diélectrique, essai au choc électrique, distance d'isolement

Modifications

Par rapport au document remplacé, adoption de la norme européenne EN 60076-3:2001.

Correction

éditée et diffusée par l'Union Technique de l'Electricité et de la Communication (UTE) – BP 23 – 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex – Tél: 01 40 93 62 00 – Fax: 01 40 93 44 08 – E-mail: ute@ute.asso.fr – Internet: <http://www.ute-fr.com/>
diffusée également par l'association française de normalisation (afnor), 11, rue de Pressensé, 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex – tél. : 01 41 62 80 00



AVANT-PROPOS NATIONAL

Ce document constitue la version française complète de la norme européenne EN 60076-3:2001 en reprenant le texte de la publication CEI 60076-3:2000 + corrigendum 2000 avec modifications.

Les modifications du CENELEC sont signalées par une ligne verticale dans la marge gauche du texte.

Après consultation de son Conseil d'Administration et enquête probatoire, l'Union technique de l'Électricité et de la Communication a voté favorablement au CENELEC sur le projet de EN 60076-3, en février 2000.

**Correspondance entre les documents internationaux cités en référence
et les documents CENELEC et/ou français à appliquer**

Document international cité en référence	Document correspondant	
	CENELEC (EN ou HD)	français (NF ou UTE)
CEI 60050-421	- -	NF C 01-421
CEI 60060-1	- HD 588.1 S1 (1991)	-
CEI 60060-2	- EN 60060-2 (1994) + A11 (1998)	NF EN 60060-2 (C 41-102) (1995) (C 41-102/A1) (1998)
CEI 60071-1 (1993)	EN 60071-1 (1995)	NF EN 60071-1 (1995) (C 10-100)
CEI 60071-2 (1976)	HD 540.2 S1 (1991)	-
CEI 60076-1 (mod)	- EN 60076-1 (1997)	NF EN 60076-1 + A11 (2000) (C 52-176-1)
CEI 60137 (1995)	EN 60137 (1996)	NF EN 60137 (1996) (C 66-550)
CEI 60270	- EN 60270 (2001)	NF EN 60270 (2001) (C 41-301)
CEI 60722	- -	-
CEI 60790	- HD 479 S1 (1986)	-
CEI 61083-1 (mod)	- EN 61083-1 (1993)	-
CEI 61083-2	- EN 61083-2 (1997)	NF EN 61083-2 (1997) (C 41-108)
CISPR 16-1 (1993)	- -	-

Note : Les documents de la classe C sont en vente à l'Union technique de l'Électricité et de la Communication – BP 23 - 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex - Tél. : 01 40 93 62 00 ainsi qu'au service diffusion de l'Association française de normalisation – 11, rue de Pressensé – 93571 Saint Denis la Plaine Cedex - Tél. : 01 41 62 80 00.

Les documents CEI sont en vente à l'UTE.

NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD

EN 60076-3

Mai 2001

ICS 29.180

Remplace HD 398.3 S1:1986 + A1:1995

Descripteurs : Transformateur de puissance, définition, niveau d'isolement, tension de tenue, essai diélectrique, essai au choc électrique, distance d'isolement

Version française

Transformateurs de puissance
Partie 3 : Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances
d'isolement dans l'air
(CEI 60076-3:2000 + corrigendum 2000)

Leistungstransformatoren
Teil 3: Isolationspegel, Spannungs-
prüfungen und äußere Abstände in Luft
(IEC 60076-3:2000 + corrigendum 2000)

Power transformers
Part 3: Insulation levels, dielectric tests
and external clearances in air
(IEC 60076-3:2000 + corrigendum 2000)

La présente Norme européenne a été adoptée par le CENELEC le 2001-01-01. Les membres du CENELEC sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la Norme européenne.

Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Secrétariat Central ou auprès des membres du CENELEC.

La présente Norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CENELEC dans sa langue nationale, et notifiée au Secrétariat Central, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CENELEC sont les comités électrotechniques nationaux des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

CENELEC

Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization

Secrétariat Central: rue de Stassart 35, B - 1050 Bruxelles

Avant-propos

Le texte du document 14/347FDIS, future édition 2 de la CEI 60076-3, préparé par le CE 14 de la CEI, Transformateurs de puissance, a été soumis au vote parallèle CEI-CENELEC et a été approuvé par le CENELEC comme EN 60076-3 le 2001-01-01.

Cette Norme européenne remplace le HD 398.3 S1:1986 + A1:1995.

Les dates suivantes ont été acceptées :

- date limite à laquelle la EN doit être mise en application
au niveau national par publication d'une norme
nationale identique ou par entérinement (dop) 2001-10-01
- date limite à laquelle les normes nationales
conflictuelles doivent être annulées (dow) 2004-01-01

Les annexes appelées "normatives" font partie du corps de la norme. Les annexes appelées "informatives" ne sont données que pour information. Dans la présente norme, les annexes D, ZA et ZB sont normatives et les annexes A, B et C sont informatives.

Les annexes ZA et ZB ont été ajoutées par le CENELEC.

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	2
INTRODUCTION	5
Articles	
1 Domaine d'application	6
2 Références normatives	6
3 Définitions	7
4 Généralités	7
5 Tension la plus élevée pour le matériel et niveau d'isolement	8
6 Règles pour certains types particuliers de transformateurs	10
7 Prescriptions pour l'isolement et les essais diélectriques – Règles de base	11
7.1 Généralités	11
7.2 Exigences concernant l'isolement	12
7.3 Essais diélectriques	14
7.4 Exigences d'isolement et d'essais pour la borne neutre d'un enroulement	16
8 Essais sur un transformateur comportant un enroulement à prises	17
9 Renouvellement des essais diélectriques	18
10 Isolement des circuits auxiliaires	18
11 Essai par tension appliquée à fréquence industrielle par source séparée	18
12 Essai par tension induite en FI (FI CD, FI LD)	19
12.1 Généralités	19
12.2 Essai de tenue par tension induite en FI de courte durée (FI CD) pour transformateurs avec enroulements haute tension à isolation uniforme	19
12.3 Essai de tenue de tension induite en FI de courte durée phase-terre (FI CD) avec enroulements haute tension à isolation non uniforme	22
12.4 Essai de tension induite en FI de longue durée avec enroulement haute tension à isolation non uniforme et/ou à isolation uniforme (FI LD), conformément au tableau 1	24
13 Essai au choc de foudre (CF)	27
13.1 Généralités	27
13.2 Séquence d'essai	28
13.3 Connexions d'essais	28
13.4 Enregistrements de l'essai	30
13.5 Sanction de l'essai	30
14 Essai au choc de foudre coupé sur la queue (CFC)	30
14.1 Généralités	30
14.2 Eclateur de coupure et caractéristiques de la coupure	31
14.3 Conduite et sanction de l'essai	31

Articles	Pages
15 Essai au choc de manœuvre (CM)	31
15.1 Généralités	31
15.2 Séquence d'essais et enregistrements	32
15.3 Connexions d'essai	32
15.4 Sanction de l'essai	33
16 Distances d'isolement dans l'air	33
16.1 Généralités	33
16.2 Distances d'isolement dans l'air des traversées spécifiées à partir des tensions de tenue de l'isolation du transformateur	34
Annexe A (informative) Guide d'application pour la mesure des décharges partielles sur un transformateur lors d'un essai par tension induite suivant 12.2, 12.3 et 12.4	41
Annexe B (informative) Surtension transmise de l'enroulement haute tension à un enroulement basse tension	48
Annexe C (informative) Renseignements concernant l'isolation du transformateur et les essais diélectriques à fournir avec un appel d'offre et avec une commande	50
Annexe D (normative) FI CD	51
Annexe ZA (normative) Références normatives à d'autres publications internationales avec les publications européennes correspondantes	53
Annexe ZB (normative) Conditions nationales particulières	55

INTRODUCTION

La présente partie de la CEI 60076 prescrit les exigences d'isolement et d'essais diélectriques correspondants en faisant référence aux enroulements spécifiques et à leurs bornes. Elle recommande aussi les distances d'isolement dans l'air, entre parties sous tension des traversées des transformateurs de puissance immergés dans l'huile, et par rapport aux objets au potentiel de la terre (article 16). On trouve des indications dans la CEI 60071.

Les niveaux d'isolement et les essais diélectriques qui sont spécifiés dans les articles 4, 5, 6 et 7 de la présente norme s'appliquent seulement à l'isolation interne. Il est raisonnable que les valeurs de tension de tenue assignées prescrites pour l'isolation interne du transformateur soient aussi choisies comme référence pour son isolation externe, mais ceci peut ne pas être vrai dans tous les cas. Un défaut de l'isolation interne non autorégénératrice est catastrophique et conduit normalement à une mise hors service du transformateur pour une longue période, tandis qu'un claquage externe peut entraîner seulement une courte interruption de service sans causer de dommage durable. Voilà pourquoi il se peut que pour accroître la sûreté de fonctionnement, des tensions de tenue plus élevées soient spécifiées par l'acheteur pour l'isolation interne, sans que cela le soit pour l'isolation externe des autres composants du réseau. Quand une telle précaution est prise, il faut que les distances d'isolement extérieures soient ajustées en conséquence, pour satisfaire pleinement aux prescriptions d'essai de l'isolation interne.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Partie 3 : Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux transformateurs de puissance immergés dans l'huile triphasés et monophasés (comprenant les autotransformateurs), à l'exception de certaines catégories de petits transformateurs et de transformateurs spéciaux telles que définies par le domaine d'application de la CEI 60076-1. La présente norme identifie les enroulements des transformateurs suivant leur tension la plus élevée pour le matériel U_m associée à leurs niveaux d'isolement assignés correspondants et présente en détail les essais diélectriques appropriés applicables et les distances minimales d'isolement dans l'air entre parties sous tension des traversées et les objets au potentiel de la terre.

Pour les catégories de transformateurs de puissance et de bobines d'inductance qui disposent d'une norme CEI qui leur est propre, la présente norme est applicable uniquement dans la mesure où il y est fait explicitement référence dans l'autre norme.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 60076. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 60076 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(421), *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 421 : Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

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

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

CEI 60071-1:1993, *Coordination de l'isolement – Partie 1 : Définitions, principes et règles*

CEI 60071-2:1976, *Coordination de l'isolement – Partie 2 : Guide d'application*

CEI 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1 : Généralités*

CEI 60137:1995, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

CEI 60270, *Mesure des décharges partielles*

CEI 60722, *Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

CEI 60790, *Oscillographes et voltmètres de crête pour essais de choc*

CEI 61083-1, *Enregistreurs numériques pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 1 : Prescriptions pour des enregistreurs numériques*

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 à onde de choc*

CISPR 16-1:1993, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1 : Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 60076, les définitions suivantes s'appliquent. Les autres termes employés ont la signification qui leur est attribuée dans la CEI 60076-1 ou dans la CEI 60050(421).

3.1

tension la plus élevée pour le matériel U_m applicable à un enroulement de transformateur

tension efficace la plus élevée entre phases, dans un réseau triphasé, pour laquelle est conçue l'isolation de l'enroulement du transformateur

3.2

niveau d'isolement assigné

un ensemble de tensions de tenue normalisées qui caractérisent la rigidité diélectrique de l'isolation

3.3

niveau d'isolement normalisé

un niveau d'isolement assigné dont les tensions de tenue normalisées sont associées à U_m comme recommandé dans les tableaux 2 et 3 de la CEI 60071-1

3.4

isolation uniforme d'un enroulement de transformateur

isolation d'un enroulement de transformateur dont toutes les extrémités reliées aux bornes ont le même niveau d'isolement assigné

3.5

isolation non uniforme d'un enroulement de transformateur

isolation d'un transformateur dont l'extrémité neutre est prévue pour être connectée directement ou indirectement à la terre, et qui est conçue avec un niveau d'isolement inférieur à celui affecté à l'extrémité ligne

4 Généralités

Les prescriptions concernant l'isolement des transformateurs de puissance et les essais correspondants de l'isolation sont indiqués en référence à chaque enroulement et à ses bornes.

Pour les transformateurs immergés dans l'huile, les prescriptions s'appliquent seulement à l'isolation interne. Toutes prescriptions additionnelles ou essais concernant l'isolation externe qui sont jugés nécessaires doivent faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'acheteur, comportant des essais de type sur un modèle approprié de la configuration.

Si l'acheteur a l'intention de réaliser le branchement du transformateur d'une manière qui peut réduire les distances d'isolement dans l'air du transformateur seul, il convient que cela soit indiqué dans l'appel d'offre.

Lorsqu'un transformateur immergé dans l'huile est spécifié pour être mis en service à une altitude supérieure à 1 000 m, les distances d'isolement dans l'air doivent être conçues en conséquence. Il peut être alors nécessaire de choisir des traversées conçues pour des niveaux d'isolement plus élevés que ceux spécifiés pour l'isolation interne des enroulements du transformateur, voir article 16 de cette norme et 4.2 de la CEI 60137.

Les traversées sont soumises à des essais de type et à des essais individuels selon la CEI 60137, qui sont destinés à vérifier leur isolation phase-terre, tant externe qu'interne.

Il est préalablement admis que les traversées et les changeurs de prises en charge sont spécifiés, conçus et essayés conformément aux normes CEI qui leur sont applicables. Les essais d'isolement sur le transformateur complet, constituent cependant une vérification que le choix et l'installation de ces composants sont corrects.

Les essais d'isolement doivent généralement être effectués dans les ateliers du fournisseur avec le transformateur approximativement à température ambiante, mais au moins à 10 °C.

Les transformateurs doivent être complètement équipés comme dans les conditions de service avec les équipements de supervision. Cependant, il n'est pas nécessaire de monter les éléments qui n'ont aucune influence sur la rigidité diélectrique de l'isolation interne, comme par exemple l'équipement externe de réfrigération.

Si un transformateur ne satisfait pas à ces exigences d'essais et si le défaut est situé dans une traversée, il est admis de remplacer temporairement la traversée défectueuse par une autre traversée similaire et de poursuivre, sans retard, les essais sur le transformateur jusqu'à leur terme. Un cas particulier est celui des essais avec mesure des décharges partielles, qui, pour certains types de traversées à haute tension communément utilisées, peuvent créer des difficultés à cause du niveau relativement élevé des décharges partielles qui se reproduisent dans leur milieu diélectrique. Lorsque de telles traversées sont prescrites par l'acheteur, il est permis de les remplacer par des traversées d'un type exempt de décharges partielles pendant les essais du transformateur (voir annexe A).

Il convient de concevoir les transformateurs raccordés par boîtes à câbles ou par connexion directe à des installations blindées SF₆ de telle sorte que des connexions temporaires puissent être utilisées pour les essais d'isolation. Sous réserve d'un accord, les traversées huile/SF₆ peuvent, pour cette raison, être remplacées par des traversées huile/air appropriées.

Lorsque le fournisseur a l'intention d'utiliser des éléments non linéaires ou des parafoudres disposés intérieurement ou extérieurement – en vue de limiter les surtensions transitoires transmises – cela doit être porté à la connaissance de l'acheteur au moment de l'appel d'offre et de la commande, et il est recommandé que cela soit indiqué sur le schéma de couplage de la plaque signalétique du transformateur.

5 Tension la plus élevée pour le matériel et niveau d'isolement

A chaque enroulement d'un transformateur, pour le côté ligne et le côté neutre, une valeur de la tension la plus élevée pour le matériel U_m est attribuée, voir 3.1.

Les règles de coordination de l'isolement du transformateur au regard des surtensions transitoires sont formulées différemment en fonction de la valeur de U_m .

Lorsque les règles concernant les essais pour les différents enroulements d'un transformateur sont en contradiction, les règles relatives à l'enroulement disposant de la valeur de U_m la plus élevée doivent s'appliquer pour tout le transformateur.

Les règles relatives à un certain nombre de cas particuliers sont données à l'article 6.

Les valeurs normalisées de U_m sont indiquées dans les tableaux 2 à 4. La valeur à utiliser pour un enroulement de transformateur est celle qui est égale, ou immédiatement supérieure, à la valeur assignée de l'enroulement.

NOTE 1 Les transformateurs monophasés destinés au couplage étoile pour former un banc triphasé sont conçus pour leur tension assignée phase-terre, par exemple $400/\sqrt{3}$ kV. La valeur de la tension entre phases déterminera le choix de U_m dans ce cas, en conséquence $U_m = 420$ kV.

NOTE 2 Il peut arriver que certaines tensions de prise soient choisies légèrement supérieures à une valeur normalisée de U_m mais que le réseau auquel l'enroulement sera connecté a une tension la plus élevée qui reste au voisinage de la valeur normalisée. Il faut coordonner les prescriptions d'isolement avec les conditions réelles, et il convient, en conséquence, d'accepter cette valeur normalisée comme valeur de U_m pour le transformateur et non pas la valeur immédiatement supérieure.

NOTE 3 Pour certaines applications avec des conditions très spéciales, la spécification d'autres combinaisons de tensions de tenue peut être justifiée. Pour de tels cas, il convient de suivre les indications de la CEI 60071-1.

NOTE 4 Dans certaines applications, les enroulements à couplage triangle sont mis à la terre sur une de leurs traversées extérieures. Dans ces applications, une tension de tenue plus élevée respectant la tension la plus élevée pour le matériel U_m peut être requise pour cet enroulement, et il convient qu'elle fasse l'objet d'un accord entre fournisseur et acheteur.

La tension la plus élevée pour le matériel U_m et ses tensions de tenue assignées, soit leur niveau d'isolement, déterminent les caractéristiques diélectriques du transformateur. Elles sont vérifiées par un ensemble d'essais diélectriques fonction de U_m , voir article 7.

Les valeurs de U_m et les niveaux d'isolement qui sont assignés à chaque enroulement du transformateur font partie des informations qui doivent être fournies avec un appel d'offre et avec une commande. S'il existe un enroulement à isolation non uniforme, la valeur de U_m et le niveau d'isolement pour l'extrémité neutre doivent aussi être spécifiés par l'acheteur, voir 7.4.3.

Les tensions de tenue assignées pour tous les enroulements doivent apparaître sur la plaque signalétique. Les principes des notations abrégées normalisées sont indiqués dans les exemples ci-dessous.

Les classifications et la conception de l'isolement doivent, indépendamment de la méthode d'essais, être tirées des valeurs des tableaux 2, 3 et 4 ou de la CEI 60071-1. Comme dans la plupart des cas, les essais induits en FI de longue durée sont des essais de contrôle de la qualité au regard des conditions de service, et non des essais destinés à éprouver la conception, les niveaux d'isolement doivent être caractérisés comme ci-dessous.

U_m : tension la plus élevée pour le matériel
CM/CF/FI,

ou si applicable -/CF/FI.

Les abréviations ci-dessus et dans les exemples ci-dessous ont les significations suivantes :

- CM est la tension de tenue au choc de manœuvre pour les bornes de ligne de l'enroulement avec la valeur de U_m la plus élevée ;
- CF est la tension de tenue au choc de foudre pour les bornes de ligne et de neutre de chacun des enroulements individuels ;
- FI est la tension de tenue à fréquence industrielle induite de courte durée et en tension appliquée (source séparée) pour les traversées ligne et neutre de chacun des enroulements individuels ;
- h.t. haute tension ;
- b.t. basse tension ;
- m.t. moyenne tension.

Exemple 1 :

U_m (h.t.) = 72,5 kV et U_m (b.t.) = 12 kV, tous les deux à isolation uniforme et à couplage Y (étoile)

Niveaux d'isolement : borne de ligne h.t. et borne de neutre CF/FI 325/140 kV
borne de ligne b.t. et borne de neutre CF/FI 60/28 kV

Exemple 2 :

U_m (h.t.) ligne = 245 kV, couplage Y (étoile) ;

U_m (h.t.) neutre = 52 kV

U_m (m.t. ligne = 72,5 kV, isolement uniforme couplage Y (étoile) ;

U_m (b.t.) ligne = 24 kV couplage Δ (triangle)

Niveaux d'isolement : borne de ligne h.t.	CM/CF	650/850 kV
borne neutre h.t.	CF/FI	250/95 kV
borne de ligne m.t. et neutre	CF/FI	325/140 kV
borne de ligne b.t.	CF/FI	125/50 kV

Exemple 3 :

Autotransformateur avec U_m = 420 kV et 145 kV avec U_m = 17,5 kV attribué pour le neutre pour connexion directe à la terre couplage Y (étoile). U_m (b.t.) borne = 24 kV à couplage Δ (triangle).

Niveaux d'isolement : borne de ligne h.t.	CM/CF	1 050/1 300 kV
borne de ligne m.t.	CF/FI	550/230 kV
borne de neutre h.t./m.t.	CF/FI	-/38 kV
borne de ligne b.t.	CF/FI	125/50 kV

ou si un essai induit de courte durée est imposé :

Niveaux d'isolement : borne de ligne h.t.	CM/CF/FI	1 050/1 300/570 kV
borne de ligne m.t.	CF/FI	550/230 kV
borne de neutre h.t./m.t.	CF/FI	-/38 kV
borne de ligne b.t.	CF/FI	125/50 kV

6 Règles pour certains types particuliers de transformateurs

Dans les transformateurs où des enroulements à isolation uniforme dont les valeurs de U_m sont différentes sont reliés ensemble à l'intérieur du transformateur (habituellement des autotransformateurs), les tensions de l'essai de tenue par tension appliquée en FI doivent être déterminées par l'isolement du neutre commun et sa valeur U_m attribuée.

Dans les transformateurs ayant un ou plusieurs enroulements à isolation non uniforme, les tensions d'essai pour l'essai de tenue de tension induite, et pour l'essai au choc de manœuvre lorsqu'il est utilisé, sont déterminées par l'enroulement dont la valeur de U_m est la plus élevée, et il est possible que les enroulements dont les valeurs de U_m sont les plus basses ne soient pas soumis à leurs tensions d'essais appropriées. Il convient normalement d'accepter cet écart. Si le rapport de transformation est modifiable à l'aide de prises, il convient de mettre à profit cette possibilité pour porter la tension d'essai de l'enroulement à plus faible valeur de U_m à une valeur aussi proche que possible de la valeur appropriée.

Pendant les essais au choc de manœuvre, les tensions développées le long des différents enroulements sont approximativement proportionnelles au rapport des nombres des spires. Les tensions de tenue assignées au choc de manœuvre doivent seulement être attribuées à l'enroulement disposant de la plus forte valeur de U_m . Les contraintes d'essai dans les autres enroulements sont aussi proportionnelles au rapport des nombres des spires et sont ajustées par sélection de prises appropriées pour parvenir aussi près que possible de la valeur attribuée par le tableau 4. Les contraintes d'essai au choc de manœuvre dans les autres enroulements doivent être limitées à approximativement 80 % des valeurs attribuées des tensions d'essai au choc de foudre pour ces bornes.

Les enroulements série des transformateurs survolteurs-dévolteurs de réglage, des transformateurs déphaseurs, etc., dans lesquels la tension assignée de l'enroulement n'est qu'une petite fraction de la tension du réseau, doivent avoir une valeur de U_m correspondant à la tension du réseau. Il est souvent irréalisable d'essayer de tels transformateurs en stricte conformité avec la présente norme, et il convient que le fournisseur et l'acheteur se mettent d'accord sur les essais à omettre ou à modifier.

Pour les transformateurs monophasés destinés à être connectés entre phases, comme dans le cas des réseaux d'alimentation des systèmes ferroviaires de traction, des valeurs d'essais plus importantes que celles indiquées dans cette norme peuvent être nécessaires.

Des considérations spéciales au regard des connexions d'essais et du nombre des essais à réaliser sur les transformateurs embrochables/débrochables doivent faire l'objet d'un accord au moment de la commande.

7 Prescriptions pour l'isolement et les essais diélectriques – Règles de base

Les enroulements des transformateurs sont identifiés chacun par leur tension la plus élevée pour le matériel U_m associée à leurs niveaux d'isolement respectifs. Cet article traite des exigences d'isolement en rapport et des essais diélectriques applicables. Pour les catégories de transformateurs et de bobines d'inductance qui disposent de leur propre norme CEI, les exigences qui sont applicables sont celles auxquelles il est fait directement référence dans l'autre norme.

7.1 Généralités

Les règles de base qui définissent les exigences relatives à l'isolement et les essais diélectriques sont résumées dans le tableau 1.

Les niveaux des tensions de tenue normalisées, identifiées par la tension la plus élevée pour le matériel U_m d'un enroulement sont donnés dans les tableaux 2, 3 et 4. Le choix entre les différents niveaux de tensions de tenue normalisées dans ces tableaux dépend de la sévérité des conditions de surtension prévisibles dans le réseau et de l'importance de l'installation particulière. On trouve des indications dans la CEI 60071-1.

NOTE 1 Les transformateurs de distribution pour installation suburbaine ou rurale sont, dans certains pays, sévèrement exposés aux surtensions. Dans de tels cas, des tensions d'essais plus élevées, des essais de choc de foudre et d'autres essais sur des unités individuelles peuvent faire l'objet d'un accord entre fournisseur et acheteur. Il convient qu'ils soient clairement prescrits dans l'appel d'offre.

NOTE 2 D'autres combinaisons de U_m peuvent exister dans certains pays.

Les informations concernant les exigences choisies d'isolement du transformateur et d'essais diélectriques doivent être fournies avec l'appel d'offre et avec la commande, voir annexe C.

Les exigences d'isolement sont définies en 7.2. La vérification des tensions de tenue par des essais diélectriques est donnée en 7.3. Les exigences d'isolement et d'essais pour la borne de neutre d'un enroulement sont données en 7.4.

Lorsque l'essai au choc de foudre comprend un essai au choc de foudre coupé sur la queue, c'est un essai spécial recommandé pour les cas où le transformateur est directement connecté à un poste blindé SF₆ par l'intermédiaire de traversées huile/SF₆ ou quand le transformateur est protégé par des éclateurs. La valeur de crête de l'onde coupée doit être de 10 % supérieure à celle de l'onde pleine.

Pour les transformateurs avec un enroulement haute tension avec $U_m > 72,5$ kV, les essais au choc de foudre sont des essais individuels pour tous les enroulements du transformateur.

Tableau 1 – Exigences et essais pour différentes catégories d'enroulements

Catégorie d'enroulement	Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV	Essais				
		Choc de foudre (CF) (voir articles 13 et 14)	Choc de manœuvre (CM) (voir article 15)	Longue durée FI (FI LD) (voir 12.4)	Courte durée FI (FI CD) (voir 12.2 ou 12.3)	Tension appliquée FI (voir article 11)
Isolation uniforme	$U_m \leq 72,5$	Type (note 1)	Non applicable	Non applicable (note 1)	Série	Série
Isolation uniforme et non uniforme	$72,5 < U_m \leq 170$	Série	Non applicable	Spécial	Série	Série
	$170 < U_m < 300$	Série	Série (note 2)	Série	Spécial (note 2)	Série
	$U_m \geq 300$	Série	Série	Série	Spécial	Série
NOTE 1 Dans certains pays, pour les transformateurs dont $U_m \leq 72,5$ kV, les essais CF sont prescrits comme des essais de série et les essais FI LD sont prescrits comme des essais de série ou des essais de type.						
NOTE 2 Si l'essai FI CD est spécifié, l'essai au CM n'est pas nécessaire. Il convient que ceci soit clairement notifié dans le document de l'appel d'offre.						

7.2 Exigences concernant l'isolement

Les exigences diélectriques normalisées sont :

- si applicable selon le tableau 1, une tension d'essai de tenue au choc de manœuvre normalisée (CM) pour la borne de ligne selon le tableau 4 ;
- une tension d'essai de tenue au choc de foudre normalisée (CF) pour les bornes de ligne selon les tableaux 2, 3 ou 4 ;
- si spécifié, une tension de tenue au choc de foudre normalisée (CF) pour la borne de neutre; pour l'isolation uniforme, la valeur de crête de la tension de choc étant la même que celle des bornes de ligne; pour l'isolation non uniforme, la valeur crête de la tension de choc comme étant spécifié en 7.4.3 ;
- une tension de tenue normalisée en FI appliquée par source séparée selon les tableaux 2, 3 ou 4 ;
- si applicable selon le tableau 1, une tension de tenue normalisée induite en FI de courte durée (FI CD) pour les bornes de ligne selon les tableaux 2, 3 ou 4, ainsi que 12.2 ou 12.3 ;
- si applicable selon le tableau 1, une tension de tenue induite en FI de longue durée (FI LD) avec mesure du niveau des décharges partielles selon 12.4.

**Tableau 2 – Tensions de tenue normalisées pour les enroulements des transformateurs
avec tension la plus élevée pour le matériel $U_m \leq 170$ kV –
Série I fondée sur la pratique européenne**

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV efficaces	Tension de tenue assignée au choc de foudre kV crête	Tension de tenue assignée de courte durée induite ou par tension appliquée en FI kV efficaces
3,6	20	10
7,2	40	20
12	60	28
17,5	75	38
24	95	50
	125	
36	145	70
	170	
52	250	95
60	280	115
72,5	325	140
100	380	150
123	450	185
145	550	230
170	650	275
	750	325

NOTE Les lignes en pointillés peuvent nécessiter des essais supplémentaires entre phases pour prouver que les tensions de tenue entre phases sont bien satisfaites.

Les enroulements à basse tension avec $U_m \leq 1,1$ kV doivent être essayés avec une tension de tenue en FI par source séparée de 3 kV.

7.3 Essais diélectriques

Les exigences diélectriques normalisées sont vérifiées par des essais diélectriques. Ils doivent, lorsqu'ils sont applicables et lorsqu'aucune autre disposition n'a fait l'objet d'un accord, être exécutés dans l'ordre donné ci-dessous.

– **Choc de manœuvre (CM) pour la borne de ligne**, voir article 15

L'essai est destiné à vérifier la tenue au choc de manœuvre des bornes de ligne et du ou des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements, ainsi que la tenue entre phases et le long des enroulements en essai.

L'essai représente une exigence essentielle pour les transformateurs sujets à un essai de tension de tenue induite en FI de longue durée (FI LD).

– **Essai de choc de foudre (CF) pour les bornes de ligne**, voir article 13

L'essai est destiné à vérifier la tenue au choc de foudre du transformateur en essai, quand l'onde est appliquée sur ses bornes de ligne. Lorsque l'essai au choc de foudre comporte des ondes de choc coupées sur la queue (CFC), la procédure d'essai de choc est modifiée conformément à l'article 14.

– **Essai de choc de foudre (CF) pour la borne neutre**, voir 13.3.2

L'essai est destiné à vérifier la tenue au choc de la borne neutre et des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements et le long du ou des enroulements soumis à l'essai.

Cet essai est exigé si une tension de tenue normalisée au choc de foudre pour le neutre est spécifiée.

– **Essai de tension de tenue par source séparée en FI (essai par tension appliquée)**, voir article 11

L'essai est destiné à vérifier la tenue en tension appliquée en FI des bornes de ligne et de neutre et des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements.

– **Essai de tension de tenue de courte durée par tension induite en FI (FI CD)**, voir 12.2 et 12.3

L'essai est destiné à vérifier la tenue en FI de chaque borne de ligne et des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements et la tenue entre phases et le long des enroulements soumis à l'essai.

L'essai doit être conduit selon 12.2 pour l'isolation uniforme et selon 12.3 pour l'isolation non uniforme.

Pour $U_m > 72,5$ kV, l'essai est normalement conduit avec des mesures du niveau des décharges partielles pour vérifier l'absence de décharges partielles dans les conditions du transformateur en service.

Par accord entre fournisseur et acheteur, les mesures du niveau des décharges partielles peuvent aussi être exécutées pour $U_m \leq 72,5$ kV.

– **Essai de tenue de tension induite en FI de longue durée (FI LD)**, voir 12.4

Cet essai n'est pas un essai destiné à éprouver la conception mais un essai de contrôle de la qualité pour couvrir les surtensions temporaires et les contraintes pouvant apparaître en service. Il est destiné à vérifier l'absence de décharges partielles dans le transformateur dans les conditions de service.

**Tableau 3 – Tensions de tenue normalisées pour les enroulements de transformateur
avec tension la plus élevée pour le matériel $U_m \leq 169$ kV –
Série II fondée sur la pratique nord-américaine**

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV efficaces	Tension de tenue assignée au choc de foudre kV crête		Tension de tenue assignée de courte durée induite ou par tension appliquée en FI kV efficaces	
	Transformateurs de distribution (note 1) et transformateurs de classe I (note 2)	Transformateurs de classe II (note 3)	Transformateurs de distribution et de classe I	Transformateurs de classe II
15	95	110	34	34
	125	–	40	–
26,4	150	150	50	50
36,5	200	200	70	70
48,3	250	250	95	95
72,5	350	350	140	140
121		350		140
		450		185
145		550		230
		650		275
169		750		325

NOTE 1 Les transformateurs de distribution transmettent l'énergie électrique à partir d'un circuit primaire de distribution à un circuit secondaire de distribution.

NOTE 2 Les transformateurs de puissance de la classe I sont tels que $U_m \leq 72,5$ kV.

NOTE 3 Les transformateurs de puissance de la classe II sont tels que $U_m \geq 121$ kV.

Tableau 4 – Tensions de tenue normalisées pour les enroulements de transformateur avec $U_m > 170$ kV

Tension la plus élevée pour le matériel U_m	Tension de tenue assignée au choc de manoeuvre phase-terre	Tension de tenue assignée au choc de foudre	Tension de tenue assignée de courte durée déduite ou par source séparée en FI
kV efficaces	kV crête	kV crête	kV efficaces
245	550	650	325
	650	750	360
300	750	850	395
362	850	950	460
	950	1050	510
		1175	
	850	1050	460
420	950	1175	510
	1050	1300	570
550	1175	1425	630
	1300	1550	680
		1675	
800	1300	1800	note 3
	1425	1950	note 3
	1550	2100	note 3

NOTE 1 Les lignes en pointillés ne sont pas conformes à la CEI 60071-1 mais sont de pratique courante dans certains pays.

NOTE 2 Pour les transformateurs à isolation uniforme avec des valeurs très basses pour les niveaux d'isolement assignés en FI, des mesures spéciales peuvent devoir être prises pour l'exécution de l'essai réduit en FI de courte durée, voir 12.2.

NOTE 3 Non applicable, sauf convention contraire entre les parties prenantes.

NOTE 4 Pour les tensions indiquées dans la dernière colonne, on peut exiger, pour démontrer que l'on obtient bien les tensions phase-à-phase exigées, des tensions d'essai plus élevées. Ceci s'applique aux plus bas niveaux d'isolement affectés aux différentes valeurs de U_m dans le tableau.

7.4 Exigences d'isolement et d'essais pour la borne neutre d'un enroulement

7.4.1 Généralités

Le niveau d'isolement nécessaire dépend du fait que la borne neutre est mise ou non directement à la terre en service, laissée ouverte ou reliée à la terre via une impédance. Lorsque la borne de neutre n'est pas directement reliée à la terre, il convient d'installer un dispositif de protection contre les surtensions entre la borne neutre et la terre pour limiter les surtensions transitoires.

NOTE Les recommandations qui suivent traitent de la détermination de la tension de tenue minimum nécessaire pour la borne neutre. Une augmentation de la valeur peut souvent être envisagée et peut améliorer l'interchangeabilité du transformateur dans le réseau. Pour l'isolation non uniforme, il peut être nécessaire de concevoir l'enroulement avec un niveau d'isolement élevé du neutre, par suite des connexions d'essais mises en œuvre lors de l'essai de tension de tenue en FI du transformateur, voir 12.3.

7.4.2 Borne neutre directement mise à la terre

La borne neutre doit être connectée en permanence directement à la terre ou à travers un transformateur de courant, mais sans aucune addition intentionnelle d'une impédance dans la connexion.

Dans ce cas, la valeur de la tension de tenue appliquée en FI (par source séparée) doit être au moins soit de 38 kV (pratique européenne), soit de 34 kV, (pratique nord-américaine).

Aucun essai de choc sur la borne de neutre n'est recommandé. Pendant les essais de choc sur une borne de ligne, la borne de neutre doit être connectée directement à la terre.

7.4.3 Borne de neutre non directement mise à la terre

La borne de neutre n'est pas en permanence directement mise à la terre. Elle peut être reliée à la terre à travers une impédance importante (par exemple bobine d'extinction d'arc). Les bornes neutres propres à chaque enroulement peuvent être reliées à un transformateur de réglage.

Il est de la responsabilité de l'acheteur de définir le dispositif de protection contre les surtensions, de déterminer son niveau de protection au choc, et de spécifier le niveau correspondant de tension de tenue au choc pour la borne neutre du transformateur. Une valeur de U_m appropriée est à sélectionner à partir des tableaux 2, 3 ou 4 et la tension de tenue appliquée en FI (par source séparée) tirée du tableau doit s'appliquer. Il convient que la tension de tenue en FI soit plus élevée que la surtension maximale apparaissant lors des conditions de défaut du réseau.

La tension de tenue assignée au choc de la borne neutre doit être vérifiée par l'un ou l'autre des deux essais définis en 13.3.2. Un essai de choc en onde coupée sur le neutre n'est pas applicable. Pour les transformateurs ayant un enroulement à prises disposé physiquement près de l'extrémité neutre de l'enroulement, la connexion de prises correspondant au rapport maximal des spires doit être choisie pour l'essai de choc en l'absence d'une convention contraire entre l'acheteur et le fournisseur.

8 Essais sur un transformateur comportant un enroulement à prises

Si la plage de réglage est ± 5 % ou moins, les essais diélectriques doivent être exécutés avec le transformateur connecté sur la prise principale.

Si la plage de réglage est plus grande que ± 5 %, le choix de la prise ne peut pas être prescrit de manière universelle et les dispositions suivantes s'appliquent.

Les conditions d'essais déterminent le choix de la prise requise pour l'essai induit en FI et pour l'essai au choc de manœuvre (CM), voir article 6.

Pour l'essai aux ondes de choc de foudre (CF), les contraintes diélectriques sont distribuées de manière différente en fonction de la prise retenue et de la conception générale du transformateur. A moins que l'essai de choc sur une prise particulière n'ait fait l'objet d'un accord, les deux prises extrêmes et la prise principale d'un transformateur triphasé doivent être utilisées, une prise pour chacune des trois phases individuelles d'un transformateur triphasé ou pour chacun des trois transformateurs monophasés constitutifs d'un banc triphasé. Pour un essai de choc sur la borne neutre, voir 7.4.3.

9 Renouvellement des essais diélectriques

Pour les transformateurs qui ont déjà été mis en service et ont été remis à neuf ou réparés, les essais diélectriques suivant 7.2, 7.3 et 7.4 doivent être renouvelés à des niveaux d'essais de 80 % des valeurs d'origine, sauf convention contraire et sous réserve que l'isolation interne n'ait pas fait l'objet de modification. Les essais de tension de tenue induite en FI de longue durée (FI LD) selon 12.4 doivent toujours être répétés à 100 % du niveau d'essai.

NOTE Il convient qu'acheteur et fournisseur discutent le critère de décharge partielle selon l'étendue de la réparation.

La répétition des essais, exigée pour apporter la preuve que des transformateurs neufs ont bien été essayés en usine suivant 7.2, 7.3 et 7.4 et continuent à remplir les exigences de la présente norme, doit toujours être exécutée à 100 % du niveau d'essai.

10 Isolement des circuits auxiliaires

Sauf spécification contraire, les circuits auxiliaires d'alimentation et de commande doivent être soumis à un essai de tenue à fréquence industrielle, par source séparée en FI, sous une tension de valeur efficace à la terre de 2 kV pendant 1 min. Les moteurs et autres appareils des équipements auxiliaires doivent remplir les conditions d'isolement indiquées dans les normes CEI les concernant (qui sont généralement des valeurs plus faibles que pour les seuls circuits et ce qui peut obliger quelquefois à les débrancher pour l'essai des circuits).

NOTE Les équipements auxiliaires des grands transformateurs sont habituellement démontés pour le transport. Après montage complet sur le site, il est recommandé d'effectuer un essai à 1 000 V avec un mégohmmètre. Préalablement à l'essai, il convient d'enlever tous les équipements électroniques éventuels avec une tension de tenue < 1 000 V.

11 Essai par tension appliquée à fréquence industrielle par source séparée

L'essai de tension de tenue appliquée en FI doit être effectué avec une tension alternative monophasée de forme aussi proche que possible de la forme sinusoïdale et à toute fréquence convenable ≥ 80 % de la fréquence assignée.

La valeur de crête de la tension doit être mesurée. Cette valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ doit être égale à la valeur d'essai.

L'essai doit commencer à une tension inférieure ou égale au tiers de la valeur d'essai spécifiée et la tension est portée à la valeur d'essai aussi rapidement que le permet la mesure. A la fin de l'essai, on réduit rapidement la tension à une valeur inférieure au tiers de la valeur d'essai avant de la couper. Sur les enroulements à isolation non uniforme, l'essai est réalisé avec la tension d'essai prescrite pour la borne neutre. Les bornes de ligne sont ensuite soumises à un essai de tension de tenue induite en FI selon 12.3 ou 12.4.

La pleine tension d'essai doit être appliquée pendant 60 s entre toutes les bornes de l'enroulement en essai reliées entre elles et toutes les bornes des autres enroulements, le circuit magnétique, l'habillage de celui-ci et la cuve ou l'enveloppe du transformateur, reliés ensemble à la terre.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

12 Essai par tension induite en FI (FI CD, FI LD)

12.1 Généralités

Les paragraphes 12.2 et 12.3 traitent de l'essai de tenue en tension induite de courte durée en FI (FI CD) pour l'isolation uniforme et l'isolation non uniforme. Pour $U_m > 72,5$ kV l'essai FI CD est normalement conduit avec mesure du niveau des décharges partielles. Les mesures des niveaux des décharges partielles pendant toute la durée de l'essai sont un outil valable pour le fournisseur aussi bien que pour l'acheteur. Elles peuvent indiquer, pendant la durée de l'essai, une déficience de l'isolation avant le claquage. L'essai vérifie l'absence de décharges partielles du transformateur dans les conditions de service.

Les exigences de mesure du niveau des décharges partielles pendant l'essai FI CD peuvent être omises. Ceci doit faire l'objet d'un accord lors de l'appel d'offre et de la commande.

Le paragraphe 12.4. se rapporte à l'essai de tension de tenue induite en FI de longue durée (FI LD) pour l'isolation uniforme et l'isolation non uniforme. Cet essai est toujours effectué avec la mesure du niveau des décharges partielles pendant toute la durée de l'essai.

Une tension alternative doit être appliquée aux bornes d'un enroulement du transformateur. La forme de la tension doit être aussi proche que possible de la forme sinusoïdale et sa fréquence suffisamment élevée par rapport à la fréquence assignée pour éviter un courant magnétisant excessif pendant l'essai.

La valeur de crête de la tension d'essai induite doit être mesurée. La valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ doit être égale à la valeur d'essai.

La durée de l'essai à la pleine tension d'essai doit être de 60 s pour toute fréquence d'essai ≤ 2 fois la fréquence assignée en l'absence de spécification différente. Lorsque la fréquence d'essai est supérieure à 2 fois la fréquence assignée, la durée de l'essai exprimée en secondes doit être de :

$$120 \times \frac{\text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}} \text{ et non inférieure à 15 s}$$

12.2 Essai de tenue par tension induite en FI de courte durée (FI CD) pour transformateurs avec enroulements haute tension à isolation uniforme

Tous les transformateurs triphasés doivent être soumis à l'essai avec une alimentation triphasée symétrique. Lorsqu'un transformateur possède un neutre, il convient de le mettre à la terre pendant l'essai. Pour les transformateurs à enroulements à isolation uniforme, seuls des essais entre phases doivent être conduits. Les essais phase-terre sont traités par les essais par tension appliquée en FI suivant l'article 11.

En fonction de la valeur de la tension la plus élevée pour le matériel U_m , l'essai doit être conduit suivant les prescriptions de 12.2.1 ou de 12.2.2.

12.2.1 Transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV

La tension d'essai entre phases ne doit pas excéder les tensions de tenue assignées induites en FI des tableaux 2 ou 3. Comme règle, la valeur de la tension d'essai le long d'un enroulement sans prise du transformateur doit être aussi proche que possible de 2 fois la tension assignée. Normalement, aucune mesure du niveau des décharges partielles n'est exécutée pendant cet essai.

L'essai doit commencer à une tension inférieure ou égale au tiers de la valeur de la tension d'essai, et la tension doit être augmentée aussi rapidement que possible eu égard à la mesure. A la fin de l'essai, la tension doit être réduite rapidement à une tension inférieure au tiers de la valeur d'essai avant coupure.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

12.2.2 Transformateurs avec $U_m > 72,5 \text{ kV}$

Ces transformateurs doivent tous, sauf spécification contraire ayant fait l'objet d'un accord, être essayés avec mesure du niveau des décharges partielles. Les tensions d'essais entre phases ne doivent pas excéder les tensions de tenue en FI assignées des tableaux 2, 3 ou 4. Comme règle, la tension d'essai développée le long d'un enroulement sans prise doit être aussi proche que possible de deux fois la tension assignée.

La performance en matière de décharges partielles doit être contrôlée en fonction de la séquence d'application de la tension comme indiquée à la figure 1.

Pour ne pas excéder les tensions de tenue assignée en FI des tableaux 2, 3 et 4, au regard des contraintes entre phases, l'évaluation des niveaux de décharges partielles pour le niveau de tension U_2 doit être :

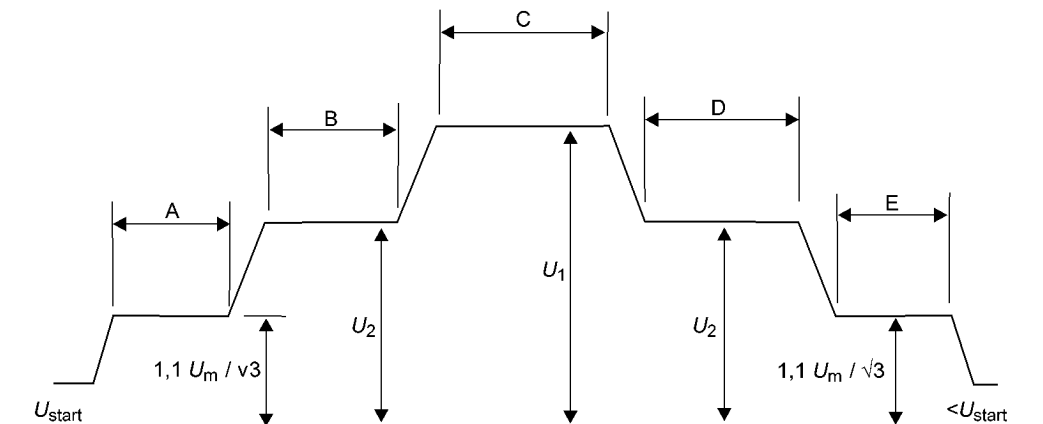
1,3 $U_m / \sqrt{3}$ phase terre et

1,3 U_m entre phases

L'annexe D, tableau D.1 montre les deux valeurs des tensions d'essais U_1 tirées des tableaux 2 ou 4 et les valeurs appropriées de U_2

La tension doit être selon le raccordement à la terre :

- appliquée à un niveau $\leq 1/3 U_2$;
- augmentée jusqu'à $1,1 U_m / \sqrt{3}$ puis maintenue pendant une durée de 5 min ;
- augmentée jusqu'à U_2 et maintenue pendant une durée de 5 min ;
- augmentée jusqu'à U_1 et maintenue pendant une durée d'essai prescrite en 12.1 ;
- immédiatement après le temps d'essai, réduite sans interruption jusqu'à U_2 et maintenue pour une durée d'au moins 5 min pour mesure du niveau des décharges partielles ;
- réduite à $1,1 U_m / \sqrt{3}$ et maintenue pour une durée de 5 min ;
- la tension est ensuite réduite jusqu'à une valeur inférieure au tiers de U_2 , puis coupée.



- A = 5 min
- B = 5 min
- C = durée d'essai
- D ≥ 5 min
- E = 5 min

Figure 1 – Séquence d'application de la tension d'essai selon le raccordement à la terre

Pendant l'augmentation de la tension jusqu'à U_2 et sa diminution à partir de U_2 , les valeurs des éventuelles tensions d'apparition et d'extinction des décharges doivent être notées.

Le niveau de bruit de fond doit être inférieur à 100 pC.

NOTE Il est recommandé que le niveau de bruit de fond soit très inférieur à 100 pC pour permettre la détection et l'enregistrement d'éventuelles apparitions et extinction des décharges partielles. La valeur ci-dessus mentionnée de 100 pC à $1,1 U_m / \sqrt{3}$ est un compromis pour l'acceptation de l'essai.

L'essai est satisfaisant si :

- il n'y a pas d'effondrement de la tension d'essai ;
- le niveau permanent de la charge apparente à U_2 pendant la deuxième période de 5 min est ≤ 300 pC pour toutes les voies de mesures ;
- le niveau des décharges partielles ne montre pas une tendance croissante continue ;
- le niveau permanent de la charge apparente n'excède pas 100 pC à $1,1 U_m / \sqrt{3}$.

Le non respect des critères d'acceptation en matière de décharges partielles doit conduire à une concertation entre acheteur et fournisseur pour d'autres investigations (annexe A). Dans de tels cas, un essai par tension induite de longue durée en FI (voir 12.4) peut être conduit. Si le transformateur satisfait alors aux prescriptions de 12.4, l'essai doit être considéré comme satisfaisant.

12.3 Essai de tenue de tension induite en FI de courte durée phase-terre (FI CD) avec enroulements haute tension à isolation non uniforme

Deux séries d'essais sont exigées pour les transformateurs triphasés, respectivement :

- a) Un essai phase-terre avec des tensions assignées de tenue entre phase et terre conformes aux tableaux 2, 3 ou 4 avec mesure de décharges partielles.
- b) Un essai entre phases avec neutre à la terre et avec des tensions assignées de tenue entre phases conformes aux tableaux 2, 3 ou 4 avec mesure de décharges partielles. L'essai doit être réalisé conformément à 12.2.2.

Un essai phase-terre est exigé sur les transformateurs monophasés uniquement. En principe cet essai est réalisé avec la borne neutre mise à la terre. Si le rapport de transformation entre enroulements est variable par l'intermédiaire de prises, il convient de le mettre à profit pour satisfaire autant que possible aux conditions des tensions d'essai sur les différents enroulements simultanément. Dans des cas exceptionnels, voir article 6, la tension sur la borne neutre peut être augmentée par connexion à un transformateur survolteur auxiliaire. Il convient d'isoler le neutre en conséquence dans de tels cas.

La séquence d'essai pour un transformateur triphasé consiste en trois applications monophasées de la tension d'essai avec différents points de l'enroulement reliés à la terre à chaque fois. Les connexions d'essais recommandées qui évitent des surtensions excessives entre les bornes de ligne sont indiquées à la figure 2. Il y a aussi d'autres méthodes possibles.

Les autres enroulements séparés doivent généralement être mis à la terre à leur point neutre s'ils sont à couplage étoile, et à une de leurs bornes s'ils sont à couplage triangle.

La tension par spire pendant l'essai atteint différentes valeurs dépendant des connexions d'essais. Le choix de la connexion d'essai appropriée est déterminé par les caractéristiques du transformateur, en respectant les conditions de service ou les limitations des moyens d'essais en usine. La durée de l'essai et la séquence d'essai pour l'application de la tension d'essai doivent être celles décrites en 12.1 et 12.2.2.

Pour l'évaluation de la performance en matière de décharges partielles, pendant l'essai entre phases il convient de faire les mesures pour $U_2 = 1,3 U_m$.

NOTE La valeur $U_2 = 1,3 U_m$ est valable jusqu'à $U_m = 550$ kV avec un niveau de tension d'essai en FI plus grand que 510 kV. Pour $U_m = 420$ kV et 550 kV avec des valeurs d'essais en FI de 460 kV ou 510 kV, il convient, pour l'évaluation des décharges partielles de réduire le niveau à $U_2 = 1,2 U_m$ pour ne pas excéder les tensions de tenue d'essais en FI du tableau 4.

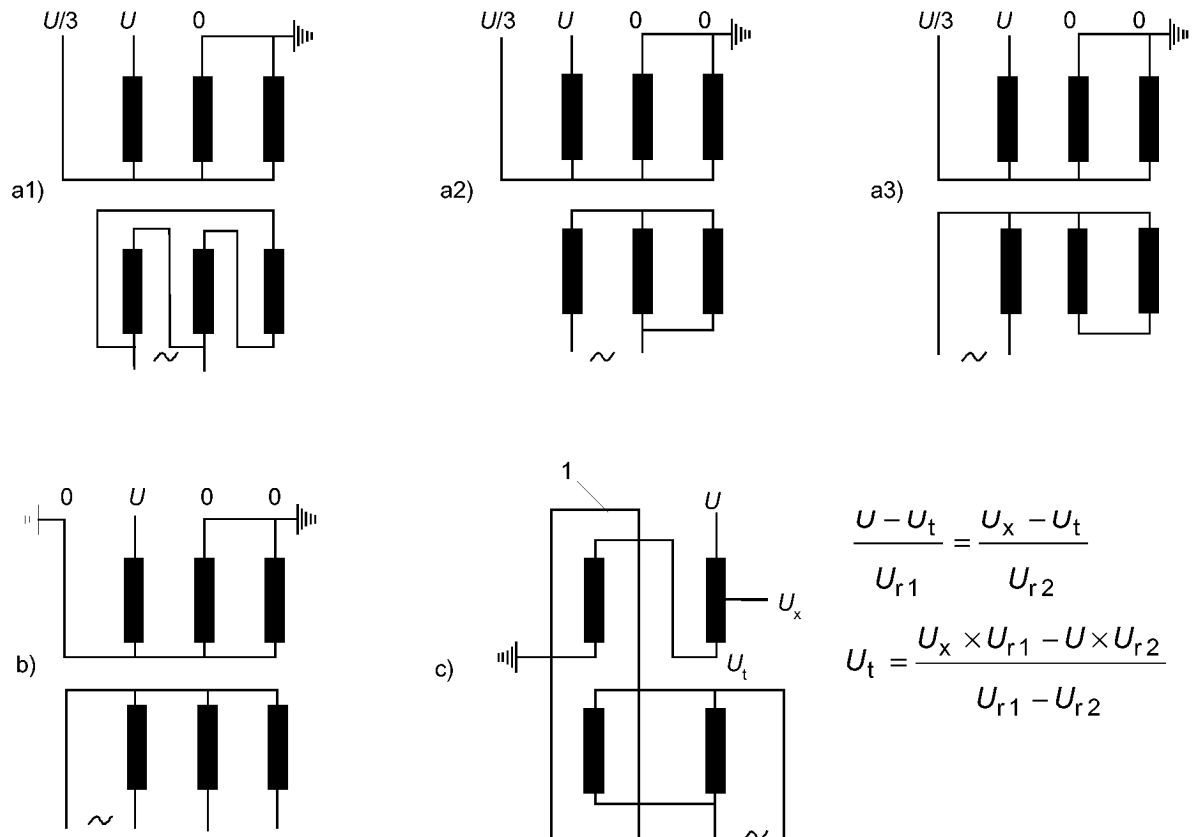
Pour les trois essais monophasés pour l'isolement phase-terre, U_1 est la tension d'essai prescrite par les tableaux 2, 3 ou 4 et $U_2 = 1,5 U_m / \sqrt{3}$. Des exemples sont donnés dans le tableau D.2.

NOTE 1 Dans le cas de transformateurs comportant des arrangements compliqués d'enroulement, il est recommandé que les connexions de tous les enroulements pendant l'essai soient revues entre fournisseur et acheteur au moment de la commande, pour que l'essai représente une combinaison réaliste des contraintes en service autant que possible.

NOTE 2 Un essai additionnel de tenue en tension induite en FI avec des tensions triphasées symétriques produit des contraintes plus élevées entre phases. Si l'essai est prescrit, il convient d'ajuster en conséquence les distances dans l'air entre phases et de les spécifier au moment de la commande.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'alimentation et si les mesures des niveaux de décharges partielles remplissent les exigences prescrites en 12.2.2, avec la modification suivante:

Le niveau continu de la charge apparente à U_2 pendant la seconde période de 5 min n'excède pas 500 pC sur toutes les voies de mesure pour les essais monophasés à $U_2 = 1,5 U_m / \sqrt{3}$ ligne-terre, ou 300 pC pour les essais entre phases à $U_2 = 1,3 U_m$ ou comme cela peut être exigé à $1,2 U_m$ pour les valeurs de coordination à très basse tension alternative.



Légende

1 Transformateur survolteur-dévolteur auxiliaire

U est la tension d'essai FI phase-terre comme indiqué dans les tableaux 2, 3 ou 4

Figure 2 – Schémas d'essais monophasés par tension induite (FI CD) applicables pour transformateurs à isolation non uniforme

Le schéma a) peut être utilisé lorsque le neutre est prévu pour supporter au moins un tiers de la tension d'essai U . Trois schémas différents d'alimentation de l'enroulement basse tension sont représentés. Le schéma a1) seul est applicable lorsque le transformateur comporte des culasses magnétiques de retour non bobinées (transformateur cuirassé ou à cinq colonnes).

Le schéma b) est applicable et recommandé dans le cas des transformateurs triphasés comportant des culasses magnétiques non bobinées pour le retour du flux traversant le noyau de la phase essayée. S'il existe un enroulement en triangle, il doit être ouvert pendant l'essai.

Le schéma c) montre un transformateur auxiliaire qui produit une tension de polarisation U_t à la borne neutre d'un autotransformateur en essai. Les tensions assignées des enroulements de l'autotransformateur sont U_{r1} et U_{r2} et les tensions d'essai correspondantes U et U_x . Ce schéma peut aussi être utilisé pour un transformateur triphasé sans culasses magnétiques non bobinées dont l'isolation du neutre est conçue pour moins d'un tiers de la tension U .

12.4 Essai de tension induite en FI de longue durée avec enroulement haute tension à isolation non uniforme et/ou à isolation uniforme (FI LD), conformément au tableau 1

Un transformateur triphasé doit être essayé soit phase par phase dans un système de connexion monophasée qui permet d'obtenir des tensions sur les bornes de ligne suivant la figure 3, soit dans un ensemble de connexions triphasées symétriques. Ce dernier cas exige des précautions particulières, voir note 1 ci-dessous.

Un transformateur triphasé alimenté côté enroulement basse tension avec un enroulement haute tension à couplage triangle peut recevoir les tensions d'essais convenables comme décrit ci-dessous seulement dans un système triphasé avec un enroulement haute tension flottant. Comme les tensions par rapport à la terre dépendent pleinement, dans un tel essai, des capacités par rapport à la terre et aux autres enroulements, cet essai n'est pas recommandé pour les valeurs élevées de $U_m \geq 245$ kV du tableau 1. N'importe quel claquage d'une des bornes de ligne à la terre peut entraîner des dommages majeurs des deux autres phases par suite des hautes tensions apparaissant de manière soudaine. Pour ces types de transformateurs, des connexions monophasées suivant la figure 3 sont préférables, successivement appliquées à toutes les phases d'un transformateur triphasé.

L'essai entre phases des enroulements à couplage triangle implique un double essai de chaque borne de ligne et des enroulements qui y sont connectés. Comme l'essai est un essai de qualité et non un essai destiné à éprouver la conception, l'essai peut être répété pour la borne de ligne concernée sans endommager l'isolement.

La borne de neutre de l'enroulement en essai, si elle existe, doit être mise à la terre. Pour les autres enroulements séparés, s'ils sont à couplage étoile, ils doivent être mis à la terre au point neutre et s'ils sont à couplage triangle ils doivent être mis à la terre à une de leurs traversées de ligne ou mis à la terre à travers le point neutre de la source d'alimentation de tension. Les enroulements à prises doivent être connectés sur la prise principale, à moins qu'une autre prescription n'ait fait l'objet d'un accord.

Le schéma de l'essai (triphasé ou monophasé) doit faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'acheteur au moment de la commande.

NOTE 1 Lorsqu'un transformateur triphasé à couplage étoile est à essayer en couplage triphasé, la tension d'essai entre phases est plus élevée que dans un système de connexion monophasé. Ceci peut avoir une influence sur la conception de l'isolation entre phases et exigera des distances dans l'air plus grandes.

NOTE 2 Si un transformateur triphasé à couplage triangle doit être essayé dans un système de connexions monophasées, la tension d'essai entre phases est plus grande que celle existante dans un système de connexions triphasées. Ceci peut avoir une influence sur la conception de l'isolation entre phases.

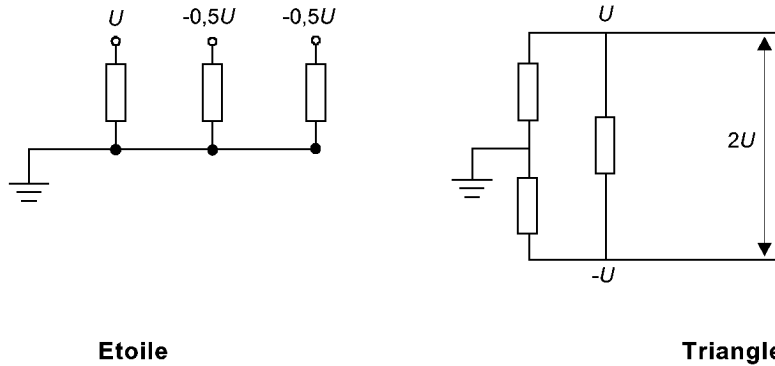
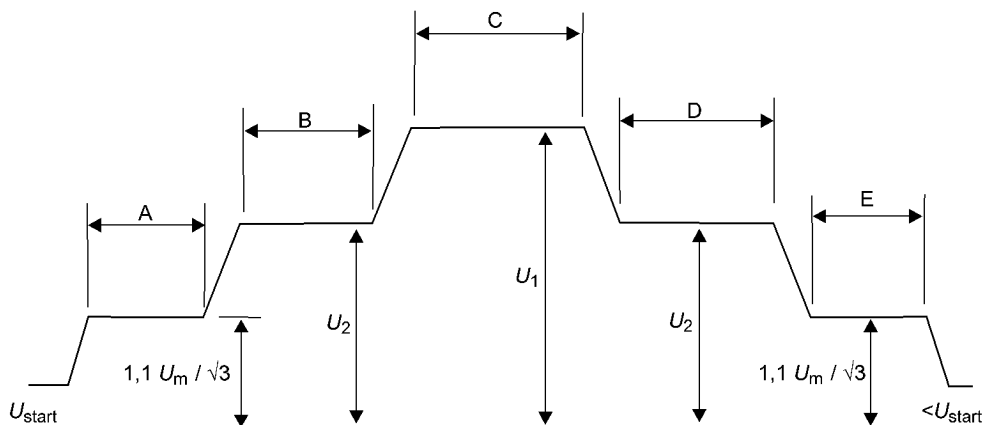


Figure 3 – Essai phase par phase d'un transformateur triphasé étoile ou triangle

La tension doit être :

- appliquée avec un niveau inférieur ou égal au tiers de U_2 ;
- augmentée jusqu'à $1,1 U_m / \sqrt{3}$ et maintenue pendant une durée de 5 min ;
- augmentée, jusqu'à U_2 et maintenue pendant une durée de 5 min ;
- augmentée jusqu'à U_1 et maintenue pour une durée d'essai spécifiée en 12.1 ;
- immédiatement après réduite jusqu'à U_2 et maintenue à cette valeur pour une durée d'au moins 60 min lorsque $U_m \geq 300$ kV ou pour une durée de 30 min lorsque $U_m < 300$ kV pour mesurer le niveau des décharges partielles ;
- réduite à $1,1 U_m / \sqrt{3}$ et maintenue pour une durée de cinq min ;
- ensuite réduite à une valeur inférieure au tiers de U_2 puis coupée.

La durée de l'essai, mis à part pour le niveau majoré U_1 , doit être indépendante de la fréquence d'essai.



- A = 5 min
- B = 5 min
- C = durée d'essai
- D = 60 min pour $U_m \geq 300$ kV ou 30 min pour $U_m < 300$ kV
- E = 5 min

Figure 4 – Séquence d'application de la tension d'essai pour les essais de tension induite en FI de longue durée (FI LD)

Pendant toute la durée d'application de la tension, les décharges partielles doivent être observées.

Les tensions par rapport à la terre doivent être :

$$U_1 = 1,7 U_m / \sqrt{3}$$

$$U_2 = 1,5 U_m / \sqrt{3}$$

NOTE Pour des conditions de réseau où les transformateurs sont sévèrement exposés aux surtensions, les valeurs de U_1 et U_2 peuvent être par exemple $1,8 U_m / \sqrt{3}$ et $1,6 U_m / \sqrt{3}$ respectivement. Cette exigence doit être clairement prescrite dans l'appel d'offre.

Le niveau de bruit de fond ne doit pas excéder 100 pC.

NOTE Il est recommandé que le niveau de bruit de fond soit très inférieur à 100 pC pour permettre la détection et l'enregistrement d'éventuelles apparitions et extinction des décharges partielles. La valeur mentionnée ci-dessus de 100 pC à $1,1 U_m / \sqrt{3}$ est un compromis pour l'acceptation de l'essai.

Les décharges partielles doivent être observées et mesurées comme indiqué ci-dessous. Des renseignements complémentaires sont donnés dans l'annexe A, qui se réfère elle-même à la CEI 60270.

- Les mesures doivent être effectuées aux bornes de ligne de tous les enroulements à isolation non uniforme, ce qui signifie que les bornes des lignes haute et basse tension d'un autotransformateur à deux enroulements auto-connectés sont mesurées simultanément.
- La voie de mesure reliée à chaque borne utilisée doit être étalonnée avec des impulsions répétitives injectées entre cette borne et la terre. Cet étalonnage est utilisé pour l'évaluation des lectures pendant l'essai. La charge apparente mesurée à une borne spécifique du transformateur, à l'aide de l'étalonnage approprié, doit faire référence à la plus grande valeur stable des impulsions répétitives. Il convient de négliger les pointes élevées de décharges partielles se produisant occasionnellement. Les décharges continues pour n'importe quelle durée apparaissant à intervalle irrégulier peuvent être acceptées jusqu'à 500 pC sous réserve qu'il n'y ait pas une tendance régulière à la croissance continue.
- Avant et après chaque application de la tension d'essai, le niveau de bruit de fond doit être noté pour chaque voie de mesure.
- Pendant l'augmentation de la tension jusqu'à U_2 et sa diminution à partir de U_2 il convient de noter les éventuelles tensions d'apparition et d'extinction des décharges partielles. Une mesure de la charge apparente doit être faite à $1,1 U_m / \sqrt{3}$.
- Une lecture doit être faite et notée pendant la première période à la tension U_2 . Aucune valeur de charge apparente n'est spécifiée pour cette période.
- Aucune valeur de charge apparente n'est attribuée pour l'application de U_1 .
- Pendant toute la durée de la deuxième période à la tension U_2 , le niveau des décharges partielles doit être observé en permanence, et des mesures doivent être effectuées et enregistrées toutes les 5 min.

L'essai est satisfaisant si :

- il n'y a pas effondrement de la tension d'essai ;
- le niveau permanent des décharges partielles reste inférieur à 500 pC pendant l'essai de longue durée à U_2 ;
- l'évolution des décharges partielles ne montre pas une tendance à la croissance continue à la tension U_2 . Il convient de négliger les pointes élevées de décharges partielles se produisant occasionnellement ;

NOTE La pratique nord-américaine limite la variation permise pendant l'essai à 150 pC pour signaler de possibles problèmes internes.

- le niveau continu des décharges partielles reste inférieure à 100 pC à $1,1 U_m / \sqrt{3}$.

Pour autant qu'il ne se produise pas de claquage ou que de très grandes décharges partielles ne soient pas maintenues pendant une longue durée, l'essai est considéré comme non destructif. Le non respect du critère d'acceptation relatif au niveau des décharges partielles ne doit donc pas autoriser un refus immédiat mais doit conduire à une concertation entre acheteur et fournisseur à propos d'investigations complémentaires. Des suggestions pour de telles investigations sont données dans l'annexe A.

En ce qui concerne les difficultés qui peuvent être provoquées par les traversées pendant l'essai, voir également l'article 4.

13 Essai au choc de foudre (CF)

13.1 Généralités

Lorsqu'ils sont spécifiés, les essais aux chocs de foudre (CF) doivent être seulement exécutés sur des enroulements dont toutes les extrémités sont sorties à travers la cuve ou le couvercle du transformateur.

Les définitions générales relatives aux essais de choc, les prescriptions relatives aux circuits d'essai, la détermination des performances d'essai et des contrôles périodiques sur les dispositifs de mesure approuvés peuvent être trouvés dans la CEI 60060-1. De plus amples informations sont données dans la CEI 60722.

Pour les transformateurs immergés dans l'huile, la tension d'essai est normalement de polarité négative, parce que cela réduit le risque de claquage extérieur aléatoire dans le circuit d'essai.

Les éclateurs de traversée peuvent être enlevés ou leur écartement augmenté pour éviter un amorçage pendant l'essai.

Lorsque des éléments non linéaires ou des parafoudres – placés à l'intérieur ou à l'extérieur du transformateur – sont utilisés pour limiter les surtensions transmises, la procédure d'essai au choc doit être discutée à l'avance pour chaque cas particulier. Si de tels éléments sont en place pendant l'essai, l'évaluation des enregistrements d'essai (voir 13.5) peut être différente par comparaison avec l'essai au choc de foudre normal. Par leur nature, les dispositifs de protection non linéaires connectés le long des enroulements peuvent entraîner des différences entre les oscillogrammes de l'onde de choc réduite et de l'onde de choc pleine. Pour apporter la preuve que ces différences sont en fait provoquées par le fonctionnement de ces dispositifs, il convient de le démontrer par l'exécution de plusieurs essais de choc réduits à différents niveaux d'essai pour montrer l'évolution dans leur fonctionnement. Pour montrer la réversibilité des effets de ces dispositifs non linéaires, les mêmes ondes de choc réduites doivent suivre l'onde de choc pleine en sens inverse.

EXEMPLE 60 %, 80 %, 100 %, 80 %, 60 %.

Le choc appliqué lors de l'essai doit être un choc de foudre plein normalisé: $1,2 \mu s \pm 30 \%$ / $50 \mu s \pm 20 \%$.

Il y a des cas cependant, où cette forme de choc normalisée ne peut raisonnablement pas être obtenue, à cause de la faible inductance des enroulements ou d'une forte capacité par rapport à la terre. La forme du choc qui en résulte est alors souvent oscillante. De plus larges tolérances peuvent, dans de tels cas, être autorisées par accord entre les parties. Voir la CEI 60722.

Le problème de la forme du choc peut aussi être résolu en utilisant certaines variantes dans les modalités de mise à la terre, voir 13.3.

Le circuit de choc et les connexions de mesure doivent rester inchangés pendant l'étalonnage et les essais à pleine tension.

NOTE Les informations données dans la CEI 60722 en référence à l'évaluation de la forme d'onde sont fondées sur des enregistrements oscillographiques, des règles de conception et des évaluations visuelles des paramètres de forme d'onde. Avec l'emploi des enregistrements digitaux suivant la CEI 61083-1 et la CEI 61083-2 lors des essais de choc haute tension des transformateurs de puissance, il convient de porter une attention particulière à l'évaluation des paramètres temporels et d'amplitude des formes d'ondes non standards.

En particulier pendant l'essai des enroulements de grande puissance assignée et de basse tension, avec des ondes de choc monopolaires résultantes comportant des fréquences inférieures à 0,5 MHz, la CEI 61083-2 n'est pas applicable pour l'évaluation de l'amplitude de telles ondes anormales. Des erreurs supérieures à 10 % ont été observées, dues aux algorithmes de lissage des courbes intégrés dans les digitaliseurs.

Dans de tels cas, une évaluation soigneuse, par un spécialiste, des données brutes mesurées est requise. En parallèle, une mesure par un voltmètre de crête suivant la CEI 60790 de la tension de crête est hautement recommandée.

13.2 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit comporter un choc d'une tension comprise entre 50 % et 75 % de la pleine tension d'essai, puis trois chocs à la pleine tension. Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si le dispositif d'enregistrement oscillographique est déficient sur l'une des voies de mesure spécifiées, on ne doit pas considérer cette application et on doit faire une nouvelle application.

NOTE Des chocs supplémentaires ≤ 50 % peuvent être effectués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le compte-rendu des essais.

13.3 Connexions d'essais

13.3.1 Connexions d'essais pendant les essais sur les bornes de ligne

La séquence d'essais au choc est appliquée successivement à chacune des bornes de ligne de l'enroulement essayé. Dans le cas d'un transformateur triphasé, les autres bornes de ligne de l'enroulement doivent être reliées directement à la terre ou à travers une faible impédance n'excédant pas l'impédance d'onde de la ligne connectée.

Si l'enroulement dispose d'une borne de neutre, le neutre doit être relié à la terre directement ou à travers une faible impédance telle qu'un shunt de mesure du courant. La cuve doit être reliée à la terre.

Pour les transformateurs à enroulements séparés, les bornes des enroulements non soumis à l'essai sont également reliées à la terre directement ou à travers des impédances telles que dans tous les cas la tension apparaissant à ces bornes reste inférieure à 75 % de leur tension de tenue assignée au choc pour les enroulements à couplage étoile et à 50 % pour les enroulements à couplage triangle.

Lors des essais sur les bornes de ligne de l'enroulement haute tension d'un autotransformateur, il peut arriver qu'il ne soit pas possible d'obtenir raisonnablement la forme normalisée du choc lorsque les bornes de ligne de l'enroulement commun sont reliées à la terre directement ou à travers un shunt de mesure de courant. Il en est de même pour l'essai des bornes de ligne de l'enroulement commun si les bornes de ligne de l'enroulement haute tension sont reliées à la terre. Il est alors permis de relier les bornes de ligne non essayées à la terre à travers des résistances $\leq 400 \Omega$. Il convient de plus que les tensions apparaissant sur les bornes de ligne non soumises à l'essai ne dépassent pas 75 % de leur niveau de tension assignée de tenue au choc de foudre pour les enroulements à couplage étoile et 50 % pour les enroulements à couplage triangle.

Lors de l'essai au choc d'enroulements ayant une faible impédance, il peut être difficile d'obtenir une forme d'onde correcte sur les bornes essayées. Dans ce cas, des tolérances plus larges doivent être acceptées, voir 13.1. Il est aussi possible de simplifier le problème par mise à la terre des bornes non essayées de la phase en essai à travers des résistances. La valeur de la résistance doit être choisie pour que la tension apparaissant aux bornes soit limitée à une valeur ≤ 75 % de la tension de tenue assignée au choc de foudre pour des enroulements à couplage étoile et à une valeur ≤ 50 % pour des enroulements à couplage triangle. En variante, on peut aussi, après accord au moment de la commande, employer la méthode de la surtension transmise, voir 13.3.3.

Des exceptions à cette procédure générale sont indiquées en 13.3.2 et en 13.3.3.

13.3.2 Essai au choc sur la borne neutre

Quand la borne neutre d'un enroulement a une tension de tenue assignée au choc, cela peut être contrôlé par un essai au choc tel que ci-dessous.

a) par application indirecte :

Les essais au choc sont appliqués sur n'importe laquelle des bornes de ligne ou sur toutes les bornes de ligne d'un enroulement triphasé reliées ensemble. La borne neutre est mise à la terre à travers une impédance ou est laissée ouverte, et l'amplitude de la tension développée le long de cette impédance ou vers la terre, lorsqu'un choc de foudre normal est appliqué à la borne de ligne, doit être égale à la tension de tenue assignée au choc de la borne de neutre. Aucune prescription n'est donnée pour la forme de l'onde résultante le long de cette impédance. L'amplitude de l'onde appliquée à la borne de ligne n'est pas prescrite, mais elle doit être ≤ 75 % de la tension de tenue assignée au choc de foudre de la borne de ligne.

b) par application directe :

Les ondes d'essai correspondant à la tension de tenue assignée au choc du neutre sont appliquées directement sur le neutre avec toutes les bornes de ligne reliées à la terre. Dans ce cas, cependant, une plus longue durée de front est permise, jusqu'à 13 μ s.

13.3.3 Méthode de la surtension transmise aux enroulements basse tension

Lorsque l'enroulement basse tension ne peut pas être soumis en service à des surtensions dues à la foudre à partir du réseau basse tension, par convention entre fournisseur et acheteur, cet enroulement peut être essayé au choc de foudre à partir des surtensions transmises par l'enroulement haute tension.

Cette méthode est aussi justifiée lorsque la conception du transformateur est telle qu'un choc appliqué directement à l'enroulement basse tension pourrait conduire à des contraintes qui ne se rencontrent pas dans la pratique sur les enroulements de tension plus élevée, en particulier lorsqu'il y a un enroulement à prises physiquement adjacent à l'enroulement basse tension.

Avec la méthode de la surtension transmise, les essais sur l'enroulement basse tension sont effectués en même temps que les essais de choc de l'enroulement adjacent à plus haute tension. Les bornes de ligne de l'enroulement basse tension sont reliées à la terre à travers des résistances dont la valeur est telle que l'amplitude de la tension de choc transmise entre une borne de ligne et la terre, ou entre les différentes bornes de ligne ou le long d'un enroulement de phase, soit la plus élevée possible sans excéder cependant la tension assignée de tenue au choc. L'amplitude des chocs appliqués ne doit pas être supérieure au niveau d'essai au choc de l'enroulement sur lequel les chocs sont appliqués.

Les détails de la procédure d'essai doivent faire l'objet d'un accord préalable.

13.4 Enregistrements de l'essai

Les enregistrements oscillographiques ou digitaux obtenus pendant les étalonnages et pendant les essais doivent indiquer clairement la forme de la tension de choc appliquée (durée du front, durée jusqu'à la mi-valeur et amplitude).

L'enregistrement doit comporter au moins une voie supplémentaire de mesure. Dans la plupart des cas, un oscillogramme du courant s'écoulant de l'enroulement essayé vers la terre, (courant de neutre) ou le courant capacitif de preuve, c'est-à-dire le courant transféré à l'enroulement non essayé et en court-circuit, représenteront la meilleure sensibilité pour la détection des défauts. Le courant circulant de la cuve vers la terre ou la tension transmise à un enroulement non soumis à l'essai, sont des exemples d'autres grandeurs mesurables appropriées. La méthode de détection adoptée doit faire l'objet d'un accord entre fournisseur et acheteur.

Des recommandations supplémentaires concernant la détection des défauts, les vitesses de balayage convenables, etc. sont données dans la CEI 60722.

13.5 Sanction de l'essai

L'absence de différences significatives entre les tensions et les courants transitoires enregistrés à tension réduite et à pleine tension d'essai constitue une preuve que l'isolation a résisté à l'essai.

L'interprétation détaillée des enregistrements oscillographiques ou digitaux des essais et la discrimination entre les perturbations marginales et les véritables enregistrements de défaut requièrent une grande compétence et une grande expérience. Des renseignements complémentaires sont donnés dans la CEI 60722.

S'il y a un doute quant à l'interprétation de divergences éventuelles entre les enregistrements oscillographiques ou digitaux, trois chocs à pleine tension doivent à nouveau être appliqués, ou tout l'essai aux ondes de choc sur la borne doit être répété. L'essai doit être considéré comme satisfaisant si aucune autre déviation même à caractère progressif n'a été observée.

Des observations additionnelles pendant l'essai (phénomènes sonores anormaux, etc.) peuvent être utilisées pour confirmer l'interprétation des enregistrements oscillographiques ou digitaux, mais elles ne constituent pas une démonstration en elles-mêmes.

Une différence dans les formes d'onde entre l'onde pleine réduite et l'onde pleine finale détectée par comparaison entre les deux oscillogrammes de courant peut être l'indication d'un défaut ou de déviations dues à des causes non destructrices. Il convient que cela fasse l'objet d'une investigation complète et soit expliqué au moyen de l'application d'une nouvelle onde réduite et d'une nouvelle onde pleine. Des exemples de causes possibles de formes d'ondes différentes sont le fonctionnement de dispositifs de protection, la saturation du circuit magnétique, ou certaines conditions dans le circuit d'essai extérieur au transformateur.

14 Essai au choc de foudre coupé sur la queue (CFC)

14.1 Généralités

Cet essai est un essai spécial et il convient de l'utiliser pour des applications spéciales sur les bornes de ligne d'un enroulement. Lorsqu'il a été décidé d'effectuer cet essai, celui-ci doit être combiné avec l'essai au choc de foudre en onde pleine suivant la procédure décrite ci-dessous. La valeur de crête de l'onde coupée doit être 1,1 fois celle de l'onde pleine.

Habituellement, les mêmes réglages du générateur de choc et le même dispositif de mesure sont utilisés en ajoutant seulement le dispositif éclateur. Le choc de foudre normal doit avoir une durée jusqu'à la coupure comprise entre 2 μ s et 6 μ s.

Des bases de temps différentes peuvent être mises en œuvre pour enregistrer les ondes de choc coupées sur la queue.

14.2 Eclateur de coupure et caractéristiques de la coupure

Il est recommandé d'utiliser un éclateur multiple à temps réglable, mais il est également permis d'utiliser un simple éclateur tige-tige. Le circuit de coupure doit être disposé de telle façon que l'amplitude de polarité opposée soit inférieure à 30 % de l'amplitude du choc coupé; l'insertion d'une impédance Z dans le circuit coupé est habituellement nécessaire pour maintenir cette limite.

14.3 Conduite et sanction de l'essai

Comme indiqué ci-dessus, l'essai est combiné avec l'essai au choc en onde pleine en une séquence unique. Il est recommandé de réaliser les différentes applications de choc de la manière suivante :

- un choc en onde pleine à niveau réduit ;
- un choc en onde pleine à plein niveau ;
- un ou plusieurs chocs en ondes coupées à niveau réduit ;
- deux chocs en ondes coupées à plein niveau ;
- deux chocs en onde pleine à plein niveau.

Les voies de mesure et les enregistrements oscillographiques ou digitaux sont du même type que ceux spécifiés pour l'essai de choc en onde pleine.

En principe, la détection des défauts au cours d'un essai de choc en onde coupée est essentiellement fondée sur la comparaison des enregistrements oscillographiques ou digitaux correspondant aux chocs en ondes coupées à 100 % et à niveau réduit. L'enregistrement du courant de neutre (ou tout autre enregistrement supplémentaire) présente une superposition de phénomènes transitoires dus au front du choc de l'onde initiale et à la coupure. Il convient alors de tenir compte des variations possibles, même légères, qui peuvent survenir jusqu'à la coupure. La deuxième partie du tracé oscillant est alors modifiée et cet effet est difficile à distinguer dans l'enregistrement d'un défaut. Les changements de fréquence après la coupure, cependant, nécessitent d'être clarifiés.

Les enregistrements des chocs successifs en onde pleine à 100 %, apportent une possibilité supplémentaire de détection d'un défaut, mais ils ne constituent pas en eux-mêmes un critère de qualité pour l'essai de choc en onde coupée.

15 Essai au choc de manœuvre (CM)

15.1 Généralités

Les définitions générales des termes relatifs aux essais au choc de manœuvre, les prescriptions relatives aux circuits d'essais, les performances d'essais et les contrôles périodiques concernant les dispositifs de mesure approuvés peuvent être trouvés dans la CEI 60060-1. D'autres informations sont données dans la CEI 60722.

Les chocs doivent être appliqués soit directement à partir de la source de tension de choc à une borne de ligne de l'enroulement en essai, soit par l'intermédiaire d'un enroulement à plus basse tension, pour que la tension d'essai soit transmise inductivement à l'enroulement en essai. La tension d'essai spécifiée doit apparaître entre les bornes ligne et neutre. Les bornes de neutres doivent être rigidement reliées à la terre. Dans un transformateur triphasé, la tension développée pendant l'essai entre les bornes de ligne doit être environ 1,5 fois la tension entre borne de ligne et borne de neutre, voir 15.3.

La tension d'essai doit être normalement de polarité négative pour réduire le risque d'un claquage extérieur aléatoire dans le circuit d'essai.

Les tensions développées le long des différents enroulements du transformateur sont approximativement proportionnelles au rapport des nombres de spires et la tension d'essai doit être déterminée par l'enroulement ayant la plus grande valeur de U_m , voir article 6.

La tension de choc doit avoir un temps de front virtuel d'au moins 100 μ s, une durée de la tension au-dessus de 90 % de l'amplitude spécifiée d'au moins 200 μ s, et une durée totale depuis l'origine virtuelle jusqu'au premier passage par zéro d'au moins 500 μ s, la valeur de 1 000 μ s est jugée préférable.

NOTE La forme du choc diffère à dessein de la forme de l'onde normalisée 250/2 500 μ s recommandée dans la CEI 60060-1, norme valable pour les équipements comportant des circuits magnétiques non saturables.

Le temps de front doit être choisi par le fournisseur pour que la répartition de tension le long de l'enroulement en essai soit essentiellement linéaire. Sa valeur est usuellement plus grande que 100 μ s mais inférieure à 250 μ s. Pendant l'essai, un flux important est développé dans le circuit magnétique. La tension de choc peut être maintenue jusqu'à ce que le circuit magnétique atteigne la saturation et que l'impédance magnétisante du transformateur soit considérablement réduite.

La durée maximum possible du choc peut être augmentée par l'introduction d'une polarité rémanente opposée avec chaque essai de choc à la pleine tension. Cela est obtenu par des chocs à tension réduite de forme identique mais de polarité opposée. Voir la CEI 60722.

Un avis est donné dans l'article 8 pour le choix de la prise.

15.2 Séquence d'essais et enregistrements

La séquence d'essai doit être composée d'un choc (d'étalonnage) à une tension comprise entre 50 % et 75 % de la pleine tension d'essai, puis de trois chocs à la pleine tension. Si le dispositif d'enregistrement oscillographique ou digital est déficient, on ne tient pas compte de l'essai correspondant et un nouveau choc est appliqué. On doit obtenir des enregistrements oscillographiques ou digitaux au moins en ce qui concerne la forme de la tension de choc sur la borne de la ligne en essai et de préférence du courant de neutre.

NOTE Par suite de l'influence de la saturation du circuit magnétique sur la durée du choc, les oscillogrammes successifs sont différents et les enregistrements des essais à plein niveau et à niveau réduit ne sont pas identiques. Pour limiter cette influence, après chaque essai de choc à des niveaux identiques, des chocs démagnétisants à niveau réduit de polarité opposée sont nécessaires.

15.3 Connexions d'essai

Pendant l'essai le transformateur doit être à vide. Les enroulements non utilisés pour l'essai doivent être rigidement mis à la terre en un point mais non court-circuités. Dans le cas d'un transformateur monophasé, la borne neutre de l'enroulement essayé doit être rigidement mise à la terre.

Un enroulement triphasé doit être essayé phase par phase avec la borne neutre rigidement mise à la terre et avec le transformateur connecté de telle manière qu'une tension de polarité opposée et d'amplitude environ moitié apparaisse sur les deux autres bornes qui peuvent être reliées ensemble.

Pour limiter la tension de polarité opposée à environ 50 % du niveau appliqué, il est recommandé de connecter des résistances d'amortissement de forte valeur ohmique (10 k Ω à 20 k Ω) entre la terre et les bornes de phase non soumises à l'essai.

Les éclateurs de traversée et les moyens supplémentaires pour la limitation des surtensions doivent être traités comme spécifié pour l'essai aux ondes de choc, voir 13.1.

15.4 Sanction de l'essai

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit pas d'effondrement brusque de la tension ou de discontinuité du courant de neutre indiquée sur les enregistrements oscillographiques ou digitaux.

D'autres observations réalisées pendant l'essai (phénomènes sonores anormaux, etc.) peuvent être utilisées pour confirmer les enregistrements oscillographiques, mais elles ne constituent pas des preuves en elles-mêmes.

16 Distances d'isolement dans l'air

16.1 Généralités

On entend par distances d'isolement dans l'air les distances où le champ électrostatique n'est pas perturbé par les isolateurs des traversées. Cette norme ne traite pas des exigences relatives à la ligne de fuite ou à la distance d'amorçage le long des isolateurs de traversée. Elle ne prend pas non plus en compte le risque de pénétration d'oiseaux ou d'autres animaux.

Pour l'établissement des exigences de la présente norme relatives aux niveaux de tension les plus élevés, on a considéré que les extrémités des traversées avaient normalement une forme d'électrode arrondie.

Les distances d'isolement spécifiées sont valables pour de telles électrodes arrondies. On suppose également que les pièces de fixation des conducteurs et les écrans de répartition de tension associés ont une forme telle qu'ils ne réduisent pas la tension d'amorçage. On suppose également que la disposition des arrivées de conducteurs ne réduit pas les distances d'isolement même au niveau du transformateur.

NOTE Lorsque l'acheteur envisage de réaliser son raccordement de telle sorte que la distance d'isolement effective risque d'être réduite, il convient d'en faire mention dans l'appel d'offre.

En général, la disposition de distances d'isolement dans l'air adéquates devient techniquement difficile pour les réseaux à haute tension, en particulier pour les unités relativement petites, ou quand l'espace disponible est restreint. Le principe suivi dans la présente norme est de proposer les distances minimales non critiques qui sont suffisantes, sans autre discussion ni justification, dans des conditions différentes de réseau et de climat. D'autres distances basées sur une pratique passée ou présente doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

Les distances d'isolement recommandées se réfèrent aux niveaux de tension de tenue assignée de l'isolation interne du transformateur sauf convention différente spécifiée lors de l'appel d'offre et lors de la commande. Lorsque les distances d'isolement du transformateur sont égales ou supérieures aux valeurs spécifiées dans la présente norme et que les grandeurs assignées associées aux traversées ont été correctement choisies suivant la CEI 60137, l'isolation externe du transformateur doit être considérée comme satisfaisante sans essai complémentaire.

NOTE 1 La tenue aux ondes de choc de l'isolation externe dépend de la polarité, contrairement à ce qui est admis pour l'isolation interne. Les essais prescrits pour l'isolation interne du transformateur ne permettent pas de vérifier automatiquement que l'isolation externe est satisfaisante. Les distances d'isolement recommandées sont dimensionnées pour la polarité la plus contraignante (positive).

NOTE 2 Il est admis que dans certains pays, les distances d'isolement peuvent être différentes si elles sont fondées sur les valeurs de tenue en CF et en FI seulement.

NOTE 3 si une distance d'isolement plus faible que celle conforme à l'alinéa ci-dessus a été utilisée pour un contrat, un essai de type peut être nécessaire sur un arrangement simulant la distance réelle, ou sur le transformateur lui-même. Des procédures d'essai sont données pour de tels cas.

Si le transformateur est spécifié pour être mis en service à une altitude supérieure à 1 000 m, les distances d'isolement requises doivent être augmentées de 1 % tous les 100 m au-delà de 1 000 m.

Les prescriptions s'appliquent pour les distances d'isolement suivantes :

- distance d'isolement phase-terre et phase-neutre,
- distance d'isolement entre phases d'un même enroulement,
- distance d'isolement entre une borne de ligne de l'enroulement haute tension et une borne de ligne d'un enroulement à tension inférieure.

De ce qui précède, il s'ensuit que les valeurs recommandées sont en fait des valeurs minimales. Les distances d'isolement définies lors de la conception doivent être précisées sur le plan d'encombrement. Ce sont des valeurs assignées auxquelles s'appliquent les tolérances normales de fabrication et elles doivent être choisies pour que les distances d'isolement réelles soient au moins égales à celles spécifiées.

Ces spécifications serviront à prouver que le transformateur est bien conforme aux recommandations de la présente norme, ou à d'autres valeurs modifiées qui peuvent avoir fait l'objet d'un accord pour un contrat particulier.

16.2 Distances d'isolement dans l'air des traversées spécifiées à partir des tensions de tenue de l'isolation du transformateur

Les exigences précisées ci-dessous sont fonction de la valeur de la tension U_m de l'enroulement.

16.2.1 $U_m \leq 170$ kV

La même distance doit s'appliquer aux distances d'isolement phase-terre, phase-neutre, entre phases et par rapport aux bornes d'un enroulement à tension inférieure.

Les distances d'isolement minimum recommandées sont données par les tableaux 5 et 6 à partir des valeurs des tensions de tenue assignées qui apparaissent dans les tableaux 2 et 3.

Si un essai de type pour une distance réduite est nécessaire, il doit s'agir d'un essai de choc de foudre, à sec, avec onde de polarité positive, trois choix de tension d'essai définie par les tableaux 5 ou 6 respectivement.

NOTE Comme indiqué par le tableau 2, plusieurs valeurs réduites de tension de tenue au choc de foudre peuvent être spécifiées suivant la CEI 60071-1. Il convient d'effectuer un contrôle montrant si cette condition nécessite une distance d'isolement entre phases.

16.2.2 $U_m > 170$ kV

Pour le matériel avec $U_m > 170$ kV où l'essai au choc de manœuvre est spécifié, les distances recommandées sont données par le tableau 7.

Il est admis que les exigences concernant l'isolation externe sont les mêmes quelles que soient les modalités de l'essai de tension de tenue en FI de courte durée (FI CD) suivant les valeurs données par le tableau 4.

L'isolation interne est vérifiée par un essai au choc de manœuvre de polarité négative sur la phase en essai et avec environ 1,5 fois la tension d'essai entre phases pour les transformateurs triphasés, voir la CEI 60071-1.

Pour l'isolation externe, la tension de tenue entre phases est définie de manière différente. La procédure d'essai appropriée implique des ondes de polarité positive pour une configuration phase-terre, et des chocs de polarité opposée pour les distances d'isolement entre phases, voir 16.2.2.3. C'est sur cette base qu'ont été définies les valeurs des distances d'isolement données au tableau 7.

16.2.2.1 Distances d'isolement phase-terre, phase-neutre et entre phases d'un même enroulement

La distance d'isolement de la tête de la traversée haute tension à la terre (cuve, conservateur, installation de réfrigération, structures métalliques d'environnement, etc.) ou à la borne de neutre est déterminée à la colonne 4 du tableau 7.

La distance d'isolement entre les têtes de traversées des différentes phases est déterminée à la colonne 5 du tableau 7.

16.2.2.2 Distance d'isolement entre bornes d'enroulements différents

La distance d'isolement entre bornes d'enroulements différents du transformateur doit être contrôlée à la fois par les conditions au choc de manœuvre et par les conditions au choc de foudre.

Les exigences de tenue au choc de manœuvre sont fondées à partir du calcul de la différence de tension qui apparaît entre les deux bornes, voir article 15. Cette différence de tension détermine la distance d'isolement exigée par rapport au choc de manœuvre. La figure 6 est utilisée pour trouver la distance d'isolement recommandée si les bornes reçoivent des tensions de polarité opposée, le rapport entre les tensions qui apparaissent étant ≤ 2 . Dans les autres cas, la figure 5 est applicable.

NOTE En comparant les figures 5 et 6, on constate qu'une distance d'isolement entre phases supporte une différence de tension supérieure à la même distance en configuration phase-terre. La raison en est que dans la configuration entre phases les deux bornes sont supposées avoir une polarité opposée et le champ électrique maximal au voisinage de chacune d'elles (qui dépend en grande partie de la tension par rapport à la terre) est relativement faible. On suppose que les deux électrodes sont de forme arrondie.

La distance d'isolement doit, cependant, aussi satisfaire aux exigences de tenue au choc de foudre, ce qui implique que la borne de l'enroulement à tension plus basse est au potentiel de la terre lorsque la tension de tenue au choc est appliquée à la borne de ligne haute tension. Les prescriptions de distance d'isolement de la colonne 6 du tableau 7 et de la figure 7, relatives à cette tension assignée de tenue au choc de foudre, doivent donc être satisfaites entre les deux bornes. La plus grande des deux distances doit s'appliquer.

L'essai au choc de manœuvre des transformateurs triphasés induira des tensions entre phases d'autres enroulements à couplage étoile. Cette condition doit être contrôlée pour voir si elle n'exige pas une distance d'isolement entre phases supérieure à celle spécifiée pour l'enroulement seul tel qu'en 16.2.1.

16.2.2.3 Procédure de l'essai de type

Si un essai de type pour une distance d'isolement inférieure doit être réalisé, la procédure d'essai doit être la suivante:

Un essai pour une configuration phase-terre (ou phase-neutre, ou vis-à-vis d'une borne d'un enroulement de tension inférieure) doit consister en un essai au choc de manœuvre à sec, la tension appliquée à la borne de ligne de l'enroulement (enroulement de tension la plus élevée) étant de polarité positive. L'autre électrode doit être mise à la terre. Si la borne essayée appartient à un enroulement triphasé, les autres bornes de ligne doivent aussi être mises à la terre.

NOTE Cet essai n'est pas, en général, réalisable sur un transformateur triphasé complet et peut donc être fait sur un modèle simulant la configuration réelle du transformateur.

Les essais des distances entre phases d'un transformateur triphasé doivent consister en essais au choc de manœuvre à sec, la moitié de la tension d'essai spécifiée étant appliquée en polarité positive sur une borne de ligne, l'autre moitié, en polarité négative, sur une autre borne de ligne et la troisième borne de ligne mise à la terre.

Les combinaisons des tensions d'essai phase-terre et entre phases sont reproduites au tableau 7.

Quand les phases externes sont disposées symétriquement par rapport à la phase milieu, il suffit de faire deux essais séparés, l'un de polarité positive sur la phase milieu, l'une des phases externes étant de polarité négative, et l'autre de polarité positive sur une phase externe, la phase milieu étant de polarité négative. Si la configuration des bornes de ligne n'est pas symétrique, il peut être nécessaire de réaliser plus de deux essais.

Chaque essai doit consister en l'application de 15 ondes de choc de tension de forme 250/2 500 µs conformément à la CEI 60060-2.

NOTE La procédure d'essais ci-dessus, pour les distances d'isolement externes entre phases, diffère en plusieurs points de la procédure d'essais au choc de manœuvre spécifiée pour l'isolation interne du transformateur par l'article 14. Ces deux procédures d'essais ne sont pas substituables l'une à l'autre.

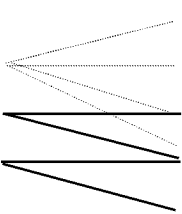
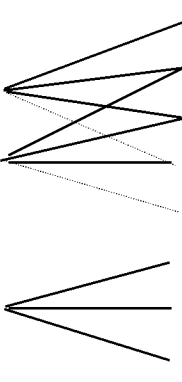
Tableau 5 – Distances d'isolement dans l'air minimales recommandées – phase-terre, entre phases, phase-neutre et par rapport aux enroulements de tension inférieure – pour les parties sous tension des traversées des transformateurs de puissance dont la tension la plus élevée pour le matériel est telle que $U_m \leq 170$ kV – Série I d'après la pratique européenne

Highest voltage for equipment U_m	Rated lightning impulse withstand voltage	Minimum clearance
kV r.m.s.	kV peak	mm
	20	-
3,6	40	60
7,2	60	90
12	75	110
17,5	95	170
24	125	210
36	145	275
52	170	280
72,5	250	450
100	325	630
123	450	830
145	550	900
170	650	1250
	750	1450

Tableau 6 – Distances d’isolement dans l’air minimales recommandées – phase-neutre, phase-terre, entre phases et par rapport aux enroulements de tension inférieure – pour les parties sous tension des traversées des transformateurs de puissance dont la tension la plus élevée pour le matériel est telle que $U_m \leq 169$ kV –
Série II d’après la pratique nord-américaine

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV efficaces	Tension de tenue assignée au choc de foudre kV crête	Distance minimale d'isolement dans l'air mm
<15	60 (voir note)	65 (voir note)
	75	100
	95 (voir note)	140 (voir note)
	110	165
26,4	150	225
36,5	200	330
48,3	250	450
72,5	350	630
121	450	830
145	550	1 050
169	650	1 250
	750	1 450
NOTE Ces valeurs sont spécifiées pour les transformateurs de distribution seulement.		

Tableau 7 – Distances d'isolement minimales recommandées – phase-terre, entre phases, phase neutre et par rapport aux enroulements de tension inférieure – pour les parties sous tension des traversées des transformateurs de puissance dont la tension la plus élevée pour le matériel est telle que $U_m > 170$ kV

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV efficaces	Tension de tenue assignée au choc de manœuvre kV crête	Tension de tenue assignée au choc de foudre kV crête	Distances minimales d'isolement dans l'air		
			Phase-terre mm (note 1)	Entre phases mm (note 1)	Aux autres enroulements mm (note 2)
	550	650	1 250	1 450	1 250
	650	750	1 500	1 800	1 450
	750	850	1 900	2 250	1 600
	850	950	2 300	2 650	1 750
	950	1 050	2 700	3 100	1 950
		1 175			2 200
	850	1 050	2 300	2 650	1 950
	950	1 175	2 700	3 100	2 200
	1 050	1 300	3 100	3 500	2 400
	1 175	1 425	3 700	4 200	2 650
	1 300	1 550	4 400	5 000	2 850
	1 300	1 675	4 400	5 000	3 100
	1 425	1 800	5 000	5 800	3 300
	1 550	1 950	5 800	6 700	3 600
		2 100			3 800
NOTE 1 Fondées sur la tension de tenue au choc de manœuvre.					
NOTE 2 Fondées sur la tension de tenue au choc de foudre, voir aussi 16.2.2.					
NOTE 3 Ces distances d'isolement dans l'air peuvent être différentes si elles sont fondées sur les tensions de tenue CF et FI seulement.					
NOTE 4 Les traits pointillés ne sont pas conformes à la CEI 60071-1 mais ils sont pratique courante dans certains pays.					

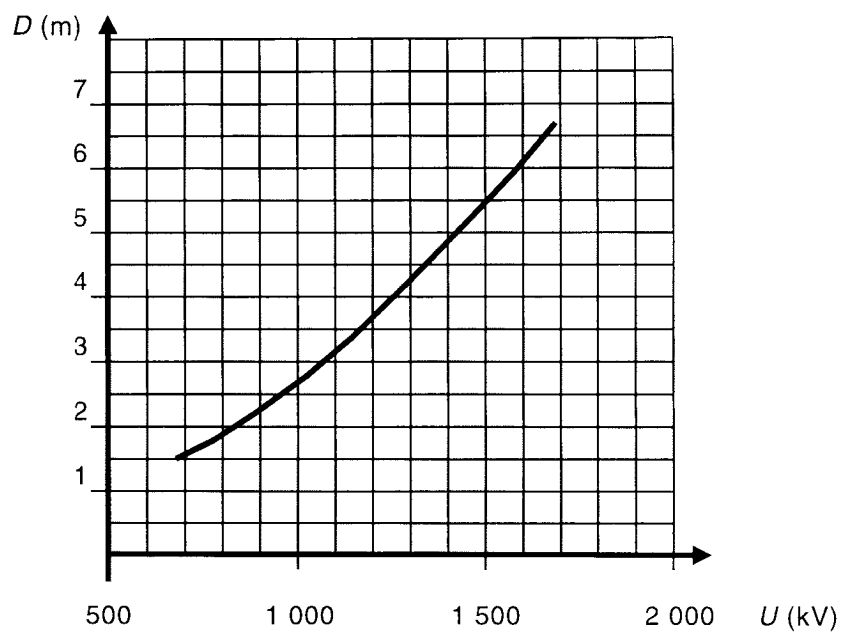


Figure 5 – Distance d'isolement dans l'air phase-terre d'après la tension de tenue assignée au choc de manœuvre

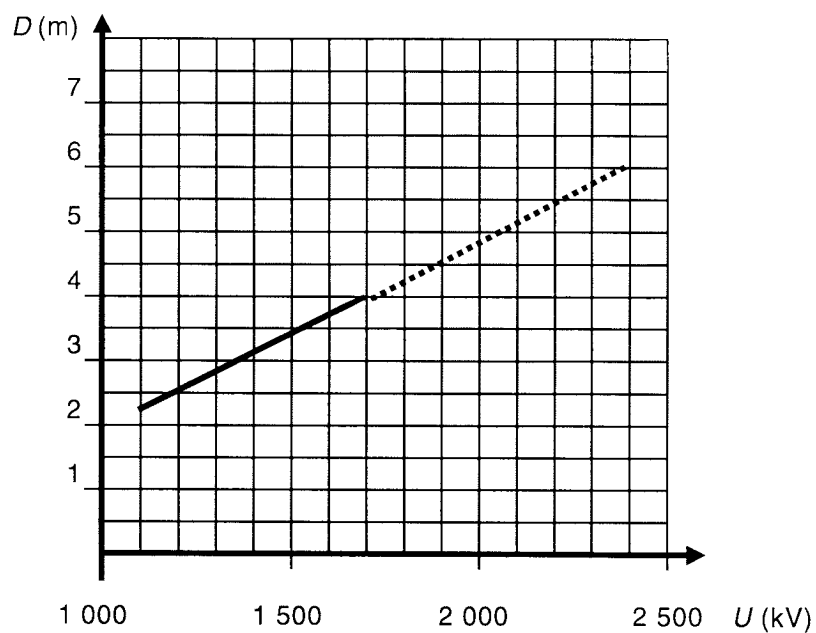


Figure 6 – Distance d'isolement dans l'air entre phases d'après la tension de tenue assignée au choc de manœuvre apparaissant entre phases

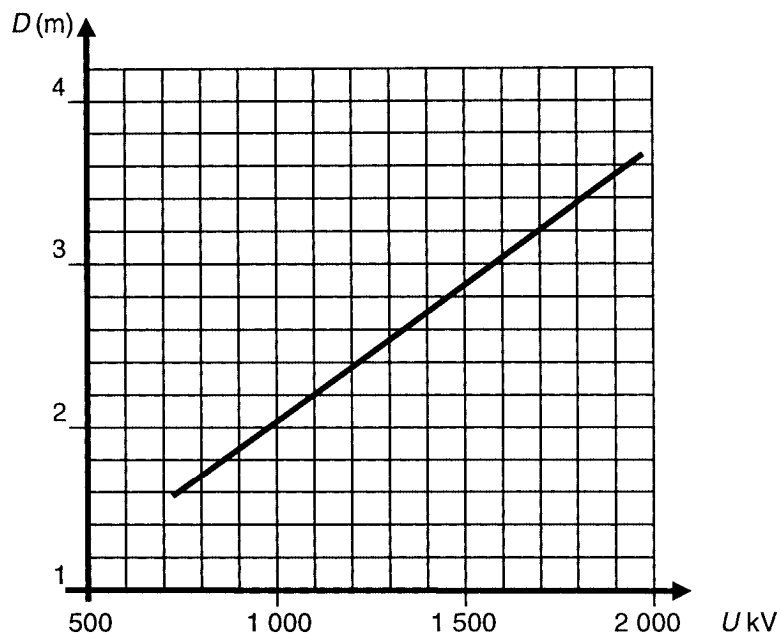


Figure 7 – Distance dans l'air d'après la tension au choc de foudre

Annexe A (informative)

Guide d'application pour la mesure des décharges partielles sur un transformateur lors d'un essai par tension induite suivant 12.2, 12.3 et 12.4

A.1 Introduction

Une décharge partielle (D.P.) est une décharge électrique qui ne court-circuite que partiellement l'isolation entre conducteurs. Dans un transformateur, une telle décharge partielle provoque une variation brusque de la tension par rapport à la terre à chaque borne d'enroulement accessible de l'extérieur.

Les impédances de mesure sont connectées effectivement entre la cuve mise à la terre et les bornes, ordinairement à travers la capacité d'une prise de traversée ou à travers un condensateur de liaison distinct, comme cela est précisé à l'article A.2.

La charge réellement mise en jeu à l'endroit d'une décharge partielle ne peut pas être mesurée directement. Le mesurage préférentiel de décharge partielle sur des transformateurs de puissance est la détermination de la charge apparente q telle que définie dans la CEI 60270.

La charge apparente q ramenée à une borne de mesure donnée est déterminée par un étalonnage approprié (voir article A.2).

Une décharge partielle particulière est caractérisée par différentes valeurs de la charge apparente à différentes bornes du transformateur. La comparaison des indications recueillies simultanément à différentes bornes peut donner des informations sur la localisation de la source de décharge partielle à l'intérieur du transformateur, voir article A.5.

Les procédures d'acceptation de l'essai spécifiées en 12.2, 12.3 et 12.4 imposent la mesure de la charge apparente aux bornes de ligne de l'enroulement.

A.2 Circuits de mesure et d'étalonnage – Méthode d'étalonnage

Le matériel de mesure est relié aux bornes par des câbles coaxiaux adaptés. L'impédance de mesure est, dans sa forme la plus simple, l'impédance d'adaptation du câble, qui peut lui-même constituer l'impédance d'entrée du mesureur.

Pour améliorer le rapport signal sur bruit de l'ensemble complet de mesure, il peut être utile d'utiliser des circuits accordés, des transformateurs d'impulsion et des amplificateurs entre les bornes de l'objet essayé et le câble.

Il convient que le circuit présente une résistance raisonnablement constante, vue des bornes de l'objet essayé, sur toute la gamme de fréquences utilisée pour les mesures de décharges partielles.

Pour la mesure des décharges partielles entre une borne de ligne d'un enroulement et la cuve mise à la terre, la disposition préférée consiste à connecter l'impédance de mesure Z_m directement entre la prise de mesure de capacitance de la traversée-condensateur et la collerette reliée à la terre, voir figure A.1. S'il n'y a pas de prise de mesure, il est possible d'isoler de la cuve la collerette de la traversée et de l'utiliser comme borne de mesure. Les capacités équivalentes situées entre le conducteur central, la borne de mesure et la terre agissent comme un atténuateur sur le signal dû aux décharges partielles. Cela est cependant pris en compte par l'étalonnage obtenu par injection entre la tête de la traversée et la terre.

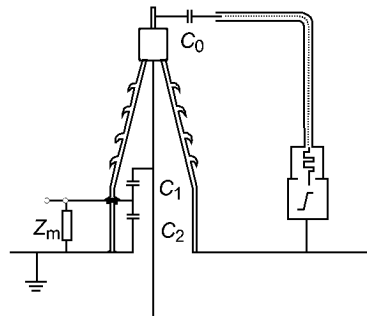


Figure A.1 – Circuit de calibration pour mesure des décharges partielles quand une prise de mesure de traversée-condensateur est disponible

Si des mesures sont à effectuer à une borne sous tension sans que l'on dispose d'une prise valable de mesure sur la traversée-condensateur (ou d'une collerette isolée), on utilise la méthode avec un condensateur de liaison à haute tension. Un condensateur exempt de décharges partielles est exigé et il convient que la valeur de sa capacité C soit grande comparée à la capacité d'injection C_0 du générateur d'étalonnage. L'impédance de mesure (avec un éclateur de protection) est connectée entre la borne basse tension du condensateur et la terre, voir figure A.2.

L'étalonnage du dispositif de mesure complet est effectué par injection de charges connues entre les bornes d'étalonnage. Suivant la CEI 60270, un générateur d'étalonnage est constitué d'un générateur d'échelon de tension à faible temps de montée et d'un petit condensateur série de capacité connue C_0 . Il convient que le temps de montée ne dépasse pas $0,1 \mu s$ et que C_0 soit compris entre $50 pF$ et $100 pF$. Lorsque ce générateur est branché entre deux bornes d'étalonnage présentant une capacité très supérieure à C_0 , la charge injectée par le générateur sera :

$$q_0 = U_0 \times C_0$$

où U_0 est la valeur de l'échelon de tension (habituellement comprise entre $2 V$ et $50 V$).

Pour le générateur d'étalonnage, il convient d'utiliser pour l'essai une fréquence de répétition d'environ une impulsion par demi-période de la tension à fréquence industrielle.

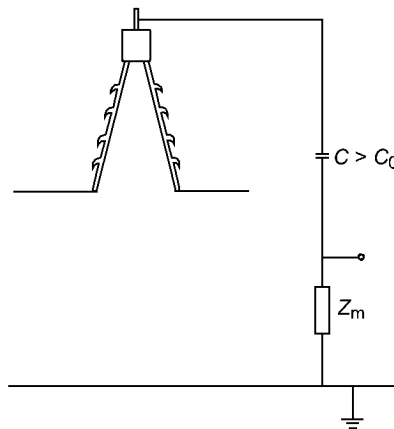


Figure A.2 – Circuit pour mesure des décharges partielles utilisant un condensateur de liaison haute tension

Si les bornes d'étalonnage sont très distantes l'une de l'autre, il y a un risque d'erreur par suite de la présence de capacités parasites au niveau des connexions. La figure A.1 indique une méthode applicable pour l'étalonnage entre la terre et une autre borne.

Un condensateur C_0 est connecté à la borne haute tension et est relié au générateur d'échelons de tension par un câble coaxial muni d'une résistance d'adaptation.

Si aucune des bornes d'étalonnage n'est mise à la terre, la capacité du générateur d'impulsions lui-même sera également une source d'erreur. Il convient de préférence que le générateur ait une alimentation autonome et soit de petites dimensions.

A.3 Appareils de mesure, gamme de fréquences

Il convient que les caractéristiques des appareils de mesure soient conformes à la CEI 60270.

L'observation oscillographique pendant l'essai est généralement utile, en particulier parce qu'elle apporte la possibilité de faire la distinction entre les décharges partielles réelles dans le transformateur et certaines formes de perturbations extérieures. Ceci dépend de la fréquence de répétition, de la position sur l'onde de tension, des différences de polarité, etc.

Il convient d'effectuer les mesures de façon continue ou à des instants rapprochés pendant toute la durée de l'essai. Un enregistrement continu par oscillographe ou enregistreur magnétique n'est pas obligatoire.

Les systèmes de mesure des décharges partielles sont classés en systèmes à bande étroite ou à bande large. Un système à bande étroite possède une bande passante d'environ 10 kHz ou moins, avec une fréquence centrale ajustable (par exemple les mesureurs de perturbations radiophoniques). Un système à bande large utilise un assez grand rapport entre les limites supérieure et inférieure de la bande de fréquences, par exemple 50 kHz à 150 kHz ou même 50 kHz à 400 kHz.

Avec un système à bande étroite, il est possible d'éviter, par réglage de la fréquence d'accord, les signaux parasites provenant d'un émetteur radio, mais on doit s'assurer que les résonances d'enroulement dans le transformateur pour des fréquences voisines de la fréquence de mesure ne modifient pas trop sensiblement la mesure. Il convient que la fréquence utilisée pour une mesure en bande étroite ne dépasse pas 500 kHz et soit de préférence inférieure à 300 kHz. Il y a deux raisons pour cela. La première est que la transmission des impulsions dues aux décharges se fait avec une atténuation importante des fréquences les plus élevées; la deuxième est que, lorsqu'on applique une impulsion d'étalonnage à une borne de ligne, cette impulsion peut provoquer des oscillations à cette borne et au voisinage, ce qui complique l'étalonnage pour une fréquence d'accord supérieure à 500 kHz.

Un système de mesure à large bande est moins critique en ce qui concerne l'atténuation et la réponse aux différentes formes d'impulsions mais il est plus sensible aux perturbations dans des aires d'essai dépourvues d'écran électromagnétique. Des filtres coupe-bande peuvent être utilisés contre les émetteurs radio. Il arrive que l'on puisse identifier les sources de décharges partielles par comparaison de la forme et de la polarité des impulsions.

NOTE De nos jours, les appareils de mesure à très large bande diffèrent considérablement dans leurs méthodes d'évaluation et dans les caractéristiques des filtres qui y sont incorporés. Simultanément le mode de transmission des impulsions complexes en provenance des enroulements et le spectre des fréquences affaiblies entraînent une lecture différente de la charge apparente en dépit des procédures d'étalonnage bien effectuées. La dernière révision de la CEI 60270 indique ce problème mais a échoué dans la normalisation des instruments de mesure à très large bande. Ce problème n'existe pas avec les appareils à bande étroite suivant le CISPR 16-1 pour l'évaluation de la répétition des impulsions.

A.4 Critères de l'essai – Procédure à utiliser en cas d'essai non satisfaisant

A la fin de 12.2, 12.3 et 12.4 sont indiqués les critères d'acceptation. Il convient que le niveau permanent des décharges partielles, exprimé en charge apparente mesurée aux bornes de mesure spécifiées, n'excède pas la limite spécifiée, et qu'on n'observe pas d'évolution significative par valeurs croissantes au voisinage de cette limite pendant toute la durée de l'essai.

S'il n'y a pas eu de claquage, mais si l'essai est non satisfaisant à cause d'une mesure de décharge partielle trop élevée mais toutefois modérée (de l'ordre de quelques milliers de picocoulombs ou moins), l'essai est considéré comme non destructif. Un autre critère d'importance est que les décharges partielles ne doivent pas subsister au voisinage du niveau de la tension de service, quand elles ont été initiées au niveau d'essai.

Il convient de ne pas rejeter immédiatement l'objet en essai au vu d'un tel résultat, mais il convient de mener des investigations complémentaires.

Il convient de commencer par des recherches relatives à l'environnement du circuit d'essai pour découvrir quelques preuves de l'existence éventuelle de sources de décharges parasites. Il convient ensuite qu'il y ait un échange de vues entre fournisseur et acheteur pour rechercher un accord sur des essais complémentaires ou sur toute autre procédure permettant de démontrer soit la présence de décharges partielles importantes, soit que le transformateur est capable d'assurer un service satisfaisant.

On trouvera ci-dessous quelques suggestions qui peuvent être utiles lors des différentes phases des opérations décrites ci-dessus.

Rechercher s'il y a des corrélations entre les mesures et la séquence d'essai, ou si ces mesures correspondent à des sources dont la coïncidence est fortuite. Ceci est souvent facilité par une surveillance oscillographique de l'essai; des perturbations peuvent, par exemple, être détectées si elles ne sont pas synchrones de la tension d'essai.

Rechercher si les décharges partielles proviennent de l'alimentation. Dans ce cas, il peut être utile de placer des filtres passe-bas sur les connexions d'alimentation du transformateur en essai.

Rechercher si les sources de décharges partielles sont à l'intérieur du transformateur ou à l'extérieur (crachotements dus à des objets placés à un potentiel flottant dans l'aire d'essai, ou provenant de pièces sous tension dans l'air ou d'angles vifs sur des parties du transformateur reliées à la terre). Etant donné que l'essai est destiné à contrôler l'isolation interne, il est permis et recommandé d'utiliser des écrans électrostatiques provisoires placés à l'extérieur.

Rechercher quelle peut être la localisation probable de la ou des sources en se référant au schéma électrique du transformateur. Il existe pour cela plusieurs méthodes connues et publiées. L'une d'elles est fondée sur une corrélation entre les mesures et les étalonnages à différentes paires de bornes (ces mesures étant effectuées en plus de celles qui sont obligatoires pour les bornes de référence «bornes de ligne-terre»). Cette méthode est décrite à l'article A.5. On peut également, si des enregistrements en bande large sont réalisés, comparer les formes des impulsions pendant l'essai et pendant les étalonnages. Un cas particulier de localisation est la détection de décharges dans l'isolant des traversées-condensateurs, voir fin de l'article A.5.

Rechercher la localisation «géographique» de la ou des sources à l'intérieur de la cuve par une détection acoustique ou ultrasonore.

Déterminer la nature physique probable de la source à partir de conclusions telles que la variation du niveau des décharges partielles avec la tension d'essai, l'hystérésis, la répartition des impulsions sur l'onde de tension, etc.

Les décharges partielles dans le système d'isolation peuvent être causées par un séchage ou une imprégnation d'huile insuffisants. On peut donc essayer de retraiter le transformateur ou de le laisser reposer quelque temps, puis recommencer les essais.

Il est également très connu qu'une exposition limitée à un niveau de décharges partielles assez élevé peut conduire à un craquage local de l'huile, ce qui réduit temporairement les tensions d'extinction et de réamorçage, mais que les qualités d'origine peuvent être spontanément restaurées en quelques heures.

Si les décharges mesurées sont au-dessus de la limite d'acceptation mais ne sont pas considérées comme très importantes, on peut se mettre d'accord pour répéter l'essai, éventuellement avec une durée plus longue et même avec un niveau de tension plus élevé. Une variation relativement limitée du niveau des décharges partielles lorsque la tension augmente et l'absence d'augmentation avec le temps peuvent être considérées comme une preuve que le transformateur est apte au service.

On ne trouve généralement au décufrage aucune trace visible de décharges partielles à moins que le transformateur n'ait été exposé pendant une durée considérable à des niveaux de décharges partielles très élevés par rapport à la limite d'acceptation. Une telle méthode peut être le dernier recours lorsque tous les autres moyens d'améliorer le comportement du transformateur ou d'identifier la source des décharges partielles ont échoué.

A.5 Localisation des sources de décharges partielles au moyen des «mesures multi-bornes» et de la «comparaison de profil»

Une source quelconque de décharges partielles produit un signal à toutes les *paires de bornes de mesure* accessibles du transformateur et la répartition de ces signaux constitue une «empreinte digitale» unique. Si des impulsions d'étalonnage sont injectées aux différentes *paires de bornes d'étalonnage*, ces impulsions fournissent également une répartition caractéristique des signaux aux *paires de mesure*.

S'il y a une corrélation évidente entre le profil des mesures réalisées pendant l'essai à différentes paires de bornes de mesures et le profil obtenu à ces mêmes bornes de mesure pour des impulsions injectées à une paire de bornes d'étalonnage donnée, on peut admettre que la source réelle des décharges partielles est très proche de cette paire d'étalonnage.

Cela signifie qu'il est possible de tirer des conclusions quant à la localisation de la source des décharges partielles dans le schéma électrique du transformateur. La localisation «physique» est un concept différent; une source de décharges partielles qui est située «électriquement» à proximité d'une borne donnée peut être située physiquement à n'importe quel endroit le long des connexions reliées à cette borne ou à l'extrémité correspondante de l'enroulement proprement dit. Habituellement, la localisation physique de la source de décharges partielles devrait être déterminée selon les techniques de localisation acoustique.

La procédure permettant d'obtenir la comparaison de «profil» est la suivante.

Le générateur d'étalonnage étant connecté à un couple particulier de bornes d'étalonnage, les mesures sont effectuées à tous les couples de bornes de mesure. Cette procédure est appliquée à tous les couples de bornes d'étalonnage. Des étalonnages sont effectués entre les bornes d'enroulements et la terre, mais il est aussi possible de les faire entre les têtes des traversées haute tension et leurs prises de mesure (ce qui simule des décharges partielles dans l'isolant de la traversée), entre bornes haute tension et neutre et entre bornes d'enroulements haute tension et basse tension.

La combinaison de tous les couples de bornes d'étalonnage et de mesure forme une «matrice d'étalonnage» servant de référence pour l'interprétation des mesures lors de l'essai proprement dit.

L'exemple, figure A.3, montre un autotransformateur monophasé à très haute tension comportant un enroulement tertiaire à basse tension. Les étalonnages et les essais sont effectués sur les bornes indiquées au tableau. La ligne donnant des résultats sous la tension d'essai de $1,5 U_m$ est comparée avec les différents étalonnages et on voit facilement, dans ce cas, qu'elle correspond le mieux avec l'étalonnage «2.1 – terre». Cela suggère l'existence de décharges partielles avec une charge apparente de l'ordre de 1 500 pC à proximité de la borne 2.1 et probablement entre les parties sous tension et la terre. La localisation physique peut être n'importe quel point le long des connexions entre l'enroulement série et l'enroulement commun ou aux extrémités d'enroulements adjacents.

La méthode qui vient d'être décrite donne de bons résultats principalement lorsqu'une source de décharges partielles distinctes est prépondérante et lorsque le bruit de fond est faible. Tel n'est certainement pas toujours le cas.

Il est particulièrement intéressant de déterminer si les décharges partielles observées se produisent dans le diélectrique de la traversée haute tension. Ce renseignement est donné par un étalonnage entre la tête de traversée et la prise de mesure; cet étalonnage conduit à la corrélation la meilleure avec le profil des décharges partielles dans la traversée.

Voie de mesure Etalonnage	1.1	2.1	2.2	3.1
	Unités arbitraires			
1.1 – terre 2 000 pC	50	20	5	10
2.1 – terre 2 000 pC	5	50	30	8
2.2 – terre 2 000 pC	2	10	350	4
3.1 – terre 2 000 pC	3	2	35	25
Essai				
U = 0	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
U = U _m	<0,5	<0,5	0,5	0,5
U = 1,5 U _m	6	40	25	8

NOTE Afin d'améliorer l'efficacité, il convient également de traiter les bornes 2.2 et 3.2 comme des bornes de mesure et de calibration, en particulier quand une prise de mesure de traversée condensateur est fournie.

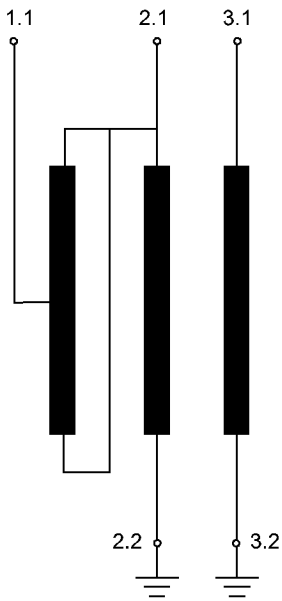


Figure A.3 – Localisation des sources de décharges partielles au moyen des «mesures multibornes» et de la «comparaison de profil»

Annexe B (informative)

Surtension transmise de l'enroulement haute tension à un enroulement basse tension

B.1 Généralités

Le problème des surtensions transmises est traité du point de vue du réseau dans l'annexe A de la CEI 60071-2. Les renseignements qui sont exposés ici concernent seulement les problèmes associés au transformateur lui-même dans certaines conditions de service. Les surtensions considérées sont soit des surtensions transitoires, soit des surtensions à fréquence industrielle.

NOTE Il est de la responsabilité de l'acheteur de définir la charge de l'enroulement basse tension. Si aucune information n'est donnée, le fournisseur peut proposer des informations concernant les tensions transmises prévues lorsque l'enroulement basse tension est en circuit ouvert et concernant les valeurs des résistances ohmiques ou des condensateurs qui seraient nécessaires pour maintenir les tensions dans des limites acceptables.

B.2 Transmission des surtensions transitoires

B.2.1 Généralités

L'étude de l'installation d'un transformateur du point de vue des surtensions transmises n'est en général justifiée que dans le cas des gros transformateurs de groupes qui ont un rapport de transformation élevé, et des transformateurs de grands réseaux à haute tension qui ont un enroulement tertiaire à basse tension.

Il est commode de faire la distinction entre deux mécanismes de transmission des surtensions qui sont la *transmission capacitive* et la *transmission inductive*.

B.2.2 Transmission capacitive

La transmission capacitive des surtensions à un enroulement à basse tension peut être décrite, en première approximation, comme une division de tension capacitive. Le circuit équivalent le plus simple, vu de l'enroulement basse tension, consiste en une source de force électromotrice (f.e.m.) en série avec une capacité de transmission C_t , voir figure B.1.

La f.e.m. équivalente est une fraction s de la surtension incidente sur le côté haute tension. C_t est de l'ordre de 10^{-9} F; s et C_t ne sont pas des grandeurs bien définies mais dépendent de la forme du front de la surtension. Ces grandeurs peuvent être déterminées globalement par des mesures oscillographiques. Leur prédétermination par le calcul est incertaine.

En chargeant les bornes secondaires avec des appareillages, des câbles courts ou des condensateurs additionnels (quelques nF), qui se comportent comme une capacité localisée C_s branchée directement aux bornes (même pendant la première microseconde), on réduit la crête de la surtension transmise. Des câbles plus longs ou des barres omnibus sont représentés par leur impédance caractéristique. La forme de la surtension au secondaire qui en résulte est normalement du type d'une impulsion brève (de l'ordre de la microseconde), correspondant au front de la surtension incidente.

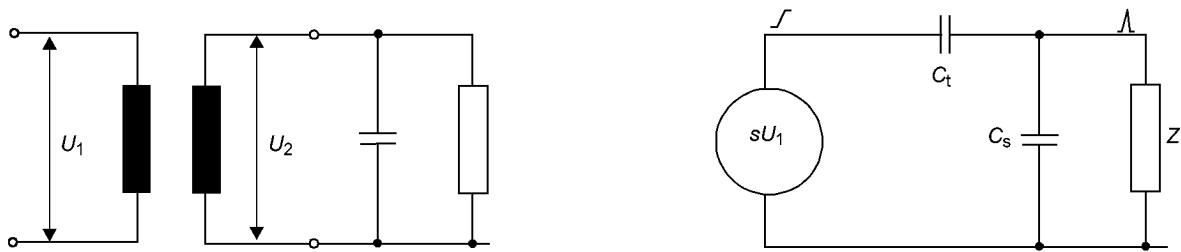


Figure B.1 – Circuit équivalent pour la transmission capacitive de surtension

B.2.3 Transmission inductive

La transmission inductive d'une surtension dépend du passage du courant de choc dans l'enroulement haute tension.

Si aucune charge extérieure n'est appliquée à l'enroulement secondaire, la tension transitoire présente généralement une oscillation amortie superposée dont la fréquence est déterminée par l'inductance de fuites et les capacités des enroulements.

Il est possible de réduire la composante inductive d'une surtension transmise, soit à l'aide d'une résistance d'amortissement au moyen d'un parafoudre, soit en modifiant l'oscillation grâce à une charge capacitive. Si on utilise des condensateurs, la valeur de leur capacité doit être généralement de l'ordre de quelques dixièmes de microfarads. (Ils élimineront alors automatiquement la composante transmise capacitivement, à condition que l'inductance du circuit soit faible.)

Les caractéristiques des transformateurs qui entrent en jeu dans la transmission inductive des surtensions sont mieux définies et dépendent moins du temps de montée (ou de la fréquence) que celles qui entrent en jeu dans la transmission capacitive. Pour plus de renseignements, se reporter à la littérature publiée à ce sujet.

B.3 Surtensions transmises à fréquence industrielle

Si un enroulement basse tension physiquement voisin de l'enroulement haute tension est laissé sans liaison à la terre ou est relié à la terre par une connexion de forte impédance, il y a, lorsque l'enroulement haute tension est alimenté, un risque de surtension à la fréquence industrielle par division capacitive.

Le risque est évident pour un enroulement monophasé, mais il peut également exister pour un enroulement triphasé si la tension de l'enroulement primaire devient dissymétrique, comme cela se produit lors de défauts à la terre. Dans certains cas particuliers, des résonances peuvent se produire.

Les enroulements tertiaires et de stabilisation des gros transformateurs sont soumis au même risque. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'empêcher qu'un enroulement tertiaire soit accidentellement relié à la terre par une impédance trop élevée. Il convient normalement de concevoir un enroulement de stabilisation de façon qu'il soit relié à la terre (cuve) de manière permanente, soit extérieurement, soit intérieurement.

La surtension est déterminée par les capacités entre enroulements et entre enroulements et terre. Celles-ci peuvent être mesurées à basse fréquence à partir des bornes du transformateur avec différents arrangements, et elles peuvent également être calculées avec une précision suffisante.

Annexe C (informative)

Renseignements concernant l'isolation du transformateur et les essais diélectriques à fournir avec un appel d'offre et avec une commande

Pour tous les enroulements :

- Valeur de U_m pour les bornes de ligne et valeurs assignées de U_m pour les bornes de neutre.
- Couplage des enroulements (Y, D ou zigzag).
- Tensions de tenue assignées constituant les niveaux d'isolement pour les bornes de ligne, voir tableau 1.
- Préciser si l'enroulement est à isolation uniforme ou non uniforme, et dans le cas d'isolation non uniforme, la tension de tenue induite en FI du neutre.
- Préciser si un niveau de tension de tenue au choc assigné est attribué au neutre et, dans un tel cas, la tension de tenue appropriée.
- Préciser l'essai de tenue au choc sur les bornes de ligne et si l'essai de choc en onde coupée est inclus.

Pour les transformateurs avec un enroulement haute tension tel que $U_m = 245 \text{ Kv}$:

- Préciser si l'essai de choc de manœuvre peut être omis (seulement si l'essai de tenue de tension induite en FI de courte durée est prescrit, voir tableau 1).

Pour les transformateurs avec un enroulement haute tension tel que $U_m \geq 245 \text{ kV}$:

- Si l'essai induit de courte durée est prescrit, au moment de la commande, il convient de prescrire la procédure pour réaliser l'essai pour isolation uniforme suivant 12.2 et pour isolation non uniforme suivant 12.3.

Il est, de plus, recommandé qu'une discussion ait lieu concernant les schémas d'essai et les méthodes d'essai, en particulier en ce qui concerne le schéma à utiliser lors des essais par tension induite sur les transformateurs complexes avec des enroulements à haute tension à isolation non uniforme (voir 12.3 note), et la méthode à utiliser pour les essais au choc des enroulements de forte puissance à basse tension et des bornes neutre (voir 13.3). Il faut que l'installation d'équipement de protection non linéaire dans le transformateur soit indiquée par le fournisseur dans l'appel d'offre et dans la commande, et il convient que mention en soit faite dans le schéma des connexions de la plaque signalétique.

Annexe D (normative)

FI CD

Tableau D.1 – Tensions d'essai pour l'essai de tenue de tension induite en FI de courte durée (FI CD) pour transformateurs à isolation uniforme avec $U_m > 72,5$ kV suivant les tableaux 2 et 4 et le paragraphe 12.2.2

Tension la plus élevée pour le matériel U_m	Tension de tenue induite de courte durée ou appliquée en FI suivant les tableaux 2, 3 ou 4	Tension d'essai U_1 entre phases	Niveau d'évaluation des décharges partielles phase-terre $U_2 = 1,3 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$	Niveau d'évaluation des décharges partielles entre phases $U_2 = 1,3 U_m$
kV efficaces	kV efficaces	kV efficaces	kV efficaces	kV efficaces
100	150	150	75	130
100	185	185	75	130
123	185	185	92	160
123	230	230	92	160
145	185	185	110	185
145	230	230	110	185
145	275	275	110	185
170	230	230	130	225
170	275	275	130	225
170	325	325	130	225
245	325	325	185	320
245	360	360	185	320
245	395	395	185	320
245	460	460	185	320
300	395	395	225	390
300	460	460	225	390
362	460	460	270	470
362	510	510	270	470
420	460	460	290	505
420	510	510	290	505
420	570	570	315	545
420	630	630	315	545
550	510	510	380	660
550	570	570	380	660
550	630	630	380	660
550	680	680	380	660

NOTE 1 Pour $U_m = 550$ kV et pour une partie de $U_m = 420$ kV, il convient de réduire le niveau d'évaluation des décharges partielles à $1,2 U_m / \sqrt{3}$ et $1,2 U_m$ respectivement.

NOTE 2 Lorsque la tension de tenue FI CD U_1 est inférieure au niveau d'évaluation U_2 des décharges partielles entre phases, il convient de prendre U_1 égal à U_2 . Il convient de concevoir en conséquence les distances d'isolement internes et externes.

Tableau D.2 – Tensions d'essai pour l'essai de tenue de tension induite en F1 de courte durée (FI CD) pour transformateurs à isolation non uniforme avec $U_m > 72,5$ kV suivant les tableaux 2 et 4 et le paragraphe 12.3

Tension la plus élevée sous le matériel U_m	Tension de tenue induite de courte durée ou FI appliquée suivant les tableaux 2, 3 ou 4	Tension d'essai U_1 phase-terre égale à la tension entre phases	Niveau d'évaluation des décharges partielles phase-terre $U_2 = 1,5 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$	Niveau d'évaluation des décharges partielles entre phases $U_2 = 1,3 U_m$
kV efficaces	kV efficaces	kV efficaces	kV efficaces	kV efficaces
100	150	150	87	130
100	185	185	87	130
123	185	185	107	160
123	230	230	107	160
145	185	185	125	185
145	230	230	125	185
145	275	275	125	185
170	230	230	145	225
170	275	275	145	225
170	325	325	145	225
245	325	325	215	320
245	360	360	215	320
245	395	395	215	320
245	460	460	215	320
300	395	395	260	390
300	460	460	260	390
362	460	460	315	460
362	510	510	315	460
420	460	460	365	504
420	510	510	365	504
420	570	570	365	545
420	630	630	365	545
550	510	510	475	660
550	570	570	475	660
550	630	630	475	660
550	680	680	475	660

NOTE 1 Pour $U_m = 550$ kV et pour une partie de $U_m = 420$ kV, il convient de réduire le niveau d'évaluation des décharges partielles à $1,2 U_m / \sqrt{3}$ et $1,2 U_m$ respectivement.

NOTE 2 Lorsque la tension de tenue FI CD U_1 est inférieure au niveau d'évaluation U_2 des décharges partielles entre phases, il convient de prendre U_1 égal à U_2 . Il convient de concevoir en conséquence les distances d'isolement internes et externes.

Annexe ZA (normative)

Références normatives à d'autres publications internationales avec les publications européennes correspondantes

Cette Norme européenne comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à cette Norme européenne que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique (y compris les amendements).

NOTE Dans le cas où une publication internationale est modifiée par des modifications communes, indiqué par (mod), il faut tenir compte de la EN / du HD approprié(e).

<u>Publication</u>	<u>Année</u>	<u>Titre</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Année</u>
CEI 60050-421	— ¹⁾	Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) Chapitre 412 : Transformateurs de puissance et bobines d'inductance	-	-
CEI 60060-1	— ¹⁾	Techniques des essais à haute tension Partie 1 : Définitions et prescriptions générales relatives aux essais	HD 588.1 S1	1991 ²⁾
CEI 60060-2	— ¹⁾	Partie 2 : Systèmes de mesure	EN 60060-2 + A11	1994 ²⁾ 1998
CEI 60071-1	1993	Coordination de l'isolement Partie 1 : Définitions, principes et règles	EN 60071-1	1995
CEI 60071-2	1976	Partie 2 : Guide d'application	HD 540.2 S1 ³⁾	1991
CEI 60076-1 (mod)	— ¹⁾	Transformateurs de puissance Partie 1 : Généralités	EN 60076-1	1997 ²⁾
CEI 60137	1995	Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 kV	EN 60137	1996
CEI 60270	— ¹⁾	Technique des essais à haute tension - Mesure des décharges partielles	EN 60270	2001 ²⁾
CEI 60722	— ¹⁾	Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manoeuvre des transformateurs de puissance et des bobines d'inductance	-	-
CEI 60790	— ¹⁾	Oscillographes et voltmètres de crête pour essais de choc	HD 479 S1	1986 ²⁾

¹⁾ Référence non datée

²⁾ Edition valide à ce jour

³⁾ Le HD 540.2 S1 a été remplacé par la EN 60076-2:1997, qui est basée sur la CEI 60076-2:1996.

<u>Publication</u>	<u>Année</u>	<u>Titre</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Année</u>
CEI 61083-1 (mod)	— ¹⁾	Enregistreurs numériques pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension Partie 1 : Prescriptions pour des enregistreurs numériques	EN 61083-1	1993 ²⁾
CEI 61083-2	— ¹⁾	Partie 2 : Evaluation du logiciel utilisé pour obtenir les paramètres des formes d'onde de choc	EN 61083-2	1997 ²⁾
CISPR 16-1	1993	Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques Partie 1 : Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques	-	-

1) Référence non datée

2) Edition valide à ce jour

Annexe ZB (normative)

Conditions nationales particulières

Condition nationale particulière: Caractéristique ou pratique nationale qu'il n'est pas possible de modifier même sur une longue période, telle que, par exemple, des conditions climatiques ou des conditions électriques de mise à la terre. Si elle affecte l'harmonisation, elle fait partie intégrante de la norme européenne ou du document d'harmonisation.

Pour les pays pour lesquels la condition nationale particulière est applicable, ces dispositions sont normatives, pour les autres pays, elles sont informatives.

<u>Article</u>	<u>Condition nationale particulière</u>
----------------	---

13.2	France
------	---------------

Les mesures de décharges partielles lors d'un essai de courte durée à courant alternatif sur des enroulements hautes tension non uniformément isolés ne sont pas acceptées.
