

norme européenne

NF EN 60076-5

Septembre 2006

norme française

Indice de classement : C 52-176-5

ICS : 29.180

Transformateurs de puissance

Partie 5 : Tenue au court-circuit

E : Power transformers - Part 5: Ability to withstand short-circuit

D : Leistungstransformatoren - Teil 5: Kurzschlussfestigkeit

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 août 2006 pour prendre effet à compter du 5 septembre 2006.

Est destinée à remplacer la norme homologuée NF EN 60076-5 de janvier 2002.

Correspondance

La norme européenne EN 60076-5:2006 a le statut d'une norme française. Elle reproduit intégralement la publication CEI 60076-5:2006.

Analyse

Le présent document identifie les exigences pour les transformateurs de puissance pour résister sans dommage aux effets des surcharges occasionnées par des courts-circuits externes. Il décrit les procédés de calcul utilisés pour démontrer l'aptitude thermique d'un transformateur de puissance à supporter de telles surcharges ainsi que l'essai spécial et la méthode de calcul utilisée pour démontrer son aptitude à résister aux effets mécaniques afférents. Les exigences s'appliquent aux transformateurs définis dans le domaine d'application de la NF EN 60076-1.

dow : 2009-04-01

Descripteurs

Transformateur de puissance, protection contre les surintensités, tenue au court-circuit, caractéristique, calcul, essai.

Modifications

Par rapport au document destiné à être remplacé, adoption de la nouvelle norme européenne.

Corrections

AVANT-PROPOS NATIONAL

Ce document constitue la version française complète de la norme européenne EN 60076-5:2006 en reprenant le texte de la publication CEI 60076-5:2006.

Les modifications du CENELEC (dans le présent document l'annexe ZA uniquement) sont signalées par un trait vertical dans la marge gauche du texte.

L'Union Technique de l'Électricité a voté favorablement au CENELEC sur le projet de EN, le 13 décembre 2005.

**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 60076-1 mod (1993) + corr juin 1997 + A1 (1999)	EN 60076-1 (1997) + A1 (2000) + A11 (1997) + A 12 (2002)	NF EN 60076-1+A11 (2000) (C 52-176-1) A 12 (2002)
CEI 60076-3 (2000) + corr décembre 2000	EN 60076-3 (2001)	NF EN 60076-3 (2002) (C 52-176-3)
CEI 60076-11 (2004)	EN 60076-11 (2004)	NF EN 60076-11 (2004) (C 52-176-11)
<p><i>Note : Les documents de la classe C sont en vente à l'Union Technique de l'Électricité et de la Communication – Tour Chantecoq – 5, rue Chantecoq – 92808 Puteaux Cedex – Tél. : 01 49 07 62 00 – ainsi qu'au service diffusion de l'Association française de normalisation – 11, avenue Francis de Pressensé – 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex – Tél. : 01 41 62 80 00.</i></p> <p><i>Les documents CEI sont en vente à l'UTE.</i></p>		

NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD

EN 60076-5

Juin 2006

ICS 29.180

Remplace EN 60076-5:2000

Version française

Transformateurs de puissance
Partie 5: Tenue au court-circuit
(CEI 60076-5:2006)

Leistungstransformatoren
Teil 5: Kurzschlussfestigkeit
(CEI 60076-5:2006)

Power transformers
Part 5: Ability to withstand short-circuit
(CEI 60076-5:2006)

La présente Norme Européenne a été adoptée par le CENELEC le 2006-04-01. 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, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, 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 14/518/FDIS, future édition 3 de la CEI 60076-5, 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 60076-5 le 2006-04-01.

Cette Norme Européenne remplace la EN 60076-5:2000.

Cette Norme Européenne comprend les modifications techniques majeures suivantes par rapport à la EN 60076-5:2000:

- a) introduction de l'Annexe A (informative) "Evaluation théorique de la capacité de résister aux effets dynamiques de court-circuit", au lieu de l'Annexe B (normative) précédente "Méthode de calcul pour la démonstration de la tenue au court-circuit" (à blanc);
- b) introduction de l'Annexe B (informative) "Définition de transformateur similaire", au lieu de l'Annexe A (informative) précédente "Guide pour l'identification d'un transformateur similaire".

Les dates suivantes ont été fixées:

- 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) 2007-01-01
- date limite à laquelle les normes nationales
conflictuelles doivent être annulées (dow) 2009-04-01

L'annexe ZA a été ajoutée par le CENELEC.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	2
1 Domaine d'application.....	4
2 Références normatives	4
3 Exigences relatives à la tenue au court-circuit.....	4
3.1 Généralités.....	4
3.2 Conditions de surintensités	5
4 Démonstration de la tenue au court-circuit	8
4.1 Tenue thermique au court-circuit.....	8
4.2 Tenue aux effets dynamiques de court-circuit.....	11
Annexe A (informative) Evaluation théorique de la capacité de résister aux effets dynamiques de court-circuit	20
Annexe B (informative) Définition de transformateur similaire	35
Annexe ZA (normative) Références normatives à d'autres publications internationales avec les publications européennes correspondantes	36
Figure 1 – Transformateur connecté en étoile-triangle	14
Figure 2 – Autotransformateur étoile-étoile	15
Tableau 1 – Valeurs minimales de l'impédance de court-circuit reconnues pour transformateurs à deux enroulements séparés	6
Tableau 2 – Puissance apparente de court-circuit du réseau.....	6
Tableau 3 – Valeurs maximales admissibles de la température moyenne de chaque enroulement après court-circuit.....	10
Tableau 4 – Valeurs du facteur $k \sqrt{2}$	12
Tableau A.1 – Comparaison des forces et les contraintes dans les transformateurs colonnes.....	30
Tableau A.2 – Comparaison des forces et des contraintes dans les transformateurs cuirassés.....	32
Tableau A.3 — Valeurs pour le facteur K_3	34
Tableau A.4 — Valeurs pour le facteur K_4	34

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Partie 5: Tenue au court-circuit

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 identifie les exigences pour les transformateurs de puissance pour résister sans dommage aux effets des surcharges occasionnées par des courts-circuits externes. Elle décrit les procédés de calcul utilisés pour démontrer l'aptitude thermique d'un transformateur de puissance à supporter de telles surcharges ainsi que l'essai spécial et la méthode de calcul utilisée pour démontrer son aptitude à résister aux effets mécaniques afférents. Les exigences s'appliquent aux transformateurs définis dans le domaine d'application de la CEI 60076-1.

2 Références normatives

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

CEI 60076-1:1993, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*
Amendement 1 (1999) ¹

CEI 60076-3:2000, *Transformateurs de puissance – Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

CEI 60076-8:1997, *Transformateurs de puissance – Partie 8: Guide d'application*

CEI 60076-11:2004, *Transformateurs de puissance – Partie 11: Transformateurs de type sec*

3 Exigences relatives à la tenue au court-circuit

3.1 Généralités

Les transformateurs ainsi que tout l'équipement et les accessoires doivent être conçus et construits pour résister sans dommage aux effets thermiques et mécaniques des courts-circuits extérieurs dans les conditions spécifiées en 3.2.

Les courts-circuits extérieurs ne sont pas limités aux courts-circuits triphasés; ils comprennent les défauts entre phases, entre deux phases et la terre et entre phase et terre. Les courants issus de ces conditions dans les enroulements sont désignés comme surintensités dans la présente partie de la CEI 60076.

¹ Parue également la version 2.1 (2000) regroupant l'édition 2 de 1993 et son amendement de 1999.

3.2 Conditions de surintensités

3.2.1 Considérations générales

3.2.1.1 Conditions d'application nécessitant une considération particulière

Les situations suivantes qui affectent l'amplitude, la durée ou la fréquence d'apparition de surintensité, nécessitent une considération particulière et doivent être clairement indiquées dans les spécifications:

- les transformateurs de régulation à très basse impédance, qui dépendent de l'impédance des appareils directement connectés pour limiter les surintensités;
- les transformateurs élévateurs sensibles aux fortes surintensités produites par la connexion du générateur au réseau hors synchronisme;
- les transformateurs directement connectés à des machines tournantes telles que les moteurs ou les condensateurs synchrones qui peuvent se comporter comme des générateurs pour fournir du courant au transformateur dans les conditions de défaut du réseau;
- les transformateurs spéciaux et les transformateurs installés dans les réseaux caractérisés par des taux de défaut élevés (voir 3.2.6);
- la tension de fonctionnement supérieure à la tension assignée maintenue à la borne ou aux bornes non défectueuses durant une condition de défaut.

3.2.1.2 Limitations en courant relatives aux transformateurs survolteurs-dévolteurs

Quand l'impédance combinée du transformateur survolteur-dévolteur et du réseau conduit à un niveau de courant de court-circuit tel que le transformateur ne peut pas, soit physiquement, soit économiquement, être conçu pour résister, le constructeur et l'acheteur doivent se mettre d'accord sur la surintensité maximale admise. Dans ce cas, il convient que l'acheteur prenne des dispositions pour limiter la surintensité à la valeur maximale déterminée par le constructeur et indiquée sur la plaque signalétique.

3.2.2 Transformateurs à deux enroulements séparés

3.2.2.1 Pour les besoins de la présente norme, on distingue, pour les transformateurs triphasés ou les bancs de transformateur en triphasé, trois catégories selon la puissance assignée:

- catégorie I: 25 kVA à 2 500 kVA;
- catégorie II: 2 501 kVA à 100 000 kVA;
- catégorie III: au-delà de 100 000 kVA.

3.2.2.2 En l'absence d'autres spécifications, le courant de court-circuit symétrique (en valeur efficace, voir 4.1.2) doit être calculé en tenant compte de l'impédance de court-circuit du transformateur et de l'impédance du réseau.

Pour les transformateurs de la catégorie I, on doit négliger dans le calcul du courant de court-circuit, l'impédance du réseau si celle-ci est égale ou inférieure à 5 % de l'impédance de court-circuit du transformateur.

La valeur de crête du courant de court-circuit doit être calculée selon les indications de 4.2.3.

3.2.2.3 Le Tableau 1 donne les valeurs minimales communément reconnues pour l'impédance de court-circuit des transformateurs pour le courant assigné (pour la prise principale). Si des valeurs plus faibles sont spécifiées, la tenue au court-circuit du transformateur doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Tableau 1 – Valeurs minimales de l'impédance de court-circuit reconnues pour transformateurs à deux enroulements séparés

Impédance de court-circuit au courant assigné	
Puissance assignée kVA	Impédance minimale de court-circuit %
de 25 à 630	4,0
631 à 1 250	5,0
1 251 à 2 500	6,0
2 501 à 6 300	7,0
6 301 à 25 000	8,0
25 001 à 40 000	10,0
40 001 à 63 000	11,0
63 001 à 100 000	12,5
supérieur à 100 000	>12,5

NOTE 1 Pour les puissances nominales supérieures à 100 000 kVA, les valeurs font généralement l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

NOTE 2 Dans le cas d'éléments monophasés destinés à constituer un groupe triphasé, les valeurs de puissance nominale s'entendent comme étant celles du banc de transformateur en triphasé.

3.2.2.4 Il appartient à l'acheteur de spécifier dans son appel d'offres la puissance apparente de court-circuit du réseau à l'endroit où est installé le transformateur afin d'obtenir la valeur du courant de court-circuit symétrique à utiliser dans le calcul et dans les essais.

Si le niveau de la puissance apparente de court-circuit du réseau n'est pas spécifié, on doit utiliser les valeurs données au Tableau 2.

Tableau 2 – Puissance apparente de court-circuit du réseau

Tension la plus élevée pour le matériel (U_m) kV	Puissance apparente de court-circuit MVA	
	Pratique européenne courante	Pratique nord-américaine courante
7,2; 12; 17,5 et 24	500	500
36	1 000	1 500
52 et 72,5	3 000	5 000
100 et 123	6 000	15 000
145 et 170	10 000	15 000
245	20 000	25 000
300	30 000	30 000
362	35 000	35 000
420	40 000	40 000
525	60 000	60 000
765	83 500	83 500

NOTE Si ce n'est pas spécifié, il convient de considérer une valeur comprise entre 1 et 3 pour le rapport des impédances homopolaire et directe du réseau.

3.2.2.5 Pour les transformateurs à deux enroulements séparés, seul le court-circuit triphasé est normalement pris en compte car il est considéré comme couvrant de manière adéquate tous les autres types de défauts possibles (exception faite du cas spécial traité dans la note de 3.2.5).

NOTE Dans le cas d'enroulement connectés en zig-zag, le courant de défaut entre phase et terre peut atteindre des valeurs supérieures à celles d'un courant de court-circuit triphasé. Cependant, ces fortes valeurs sont limitées dans les deux phases concernées, à un demi enroulement et, de plus, les courants dans les autres enroulements connectés en étoile sont inférieurs à ceux du courant de court-circuit triphasé. Les risques électrodynamiques de l'ensemble des enroulements peuvent être supérieurs soit en court-circuit triphasé, soit en court-circuit monophasé ceci dépendant de la technologie des enroulements. Il est recommandé que le constructeur et l'acheteur se mettent d'accord sur le type de court-circuit à prendre en considération.

3.2.3 Transformateurs à plus de deux enroulements et autotransformateurs

Les surintensités dans les enroulements, y compris les enroulements de stabilisation et les enroulements auxiliaires, doivent être déterminées à partir des impédances du transformateur et de celles du ou des réseaux. Il doit être tenu compte des différents types de défauts pouvant intervenir en service sur le réseau, par exemple les défauts entre phase et terre et les défauts entre phases, associés aux conditions de mise à la terre du réseau et du transformateur en question; voir la CEI 60076-8. Les caractéristiques de chaque réseau (au moins le niveau de la puissance apparente de court-circuit et la gamme dans laquelle est compris le rapport entre l'impédance homopolaire et l'impédance directe) doivent être spécifiées par l'acheteur dans son appel d'offre.

Les enroulements de stabilisation montés en triangle des transformateurs triphasés doivent pouvoir résister aux surintensités résultant des différentes possibilités de défauts du réseau qui peuvent survenir en fonctionnement avec les conditions de mise à la terre du réseau concerné.

Dans le cas de transformateurs monophasés raccordés de manière à constituer un groupe triphasé, les enroulements de stabilisation doivent pouvoir supporter un court-circuit à leurs bornes, à moins que l'acheteur n'ait spécifié que des précautions spéciales seront prises pour éviter tout risque de court-circuit entre phases.

NOTE Il peut ne pas être économique de dimensionner les enroulements auxiliaires pour résister aux courts-circuits sur leurs bornes. Dans de tels cas, il faut que le niveau des surintensités soit limité par des moyens appropriés tels des bobines d'inductances séries ou, dans certains cas, des fusibles. Des précautions doivent être prises pour se prémunir contre les défauts dans la zone comprise entre le transformateur et l'appareillage de protection.

3.2.4 Transformateurs survolteurs-dévolteurs

L'impédance des transformateurs survolteurs-dévolteurs peut être très faible et, par conséquent, les surintensités dans les enroulements sont déterminées principalement par les caractéristiques du réseau à l'endroit où est installé le transformateur. Ces caractéristiques doivent être spécifiées par l'acheteur dans son appel d'offre.

Si un transformateur survolteur-dévolteur est directement associé à un transformateur pour les besoins de variation de la tension et ou de déphasage, il doit être capable de résister aux surintensités résultant de l'impédance combinée des deux appareils.

3.2.5 Transformateurs directement associés à d'autres appareils

Lorsqu'un transformateur est directement associé à d'autres appareils dont l'impédance limiterait le courant de court-circuit, on peut prendre en compte, après accord entre le constructeur et l'acheteur, la somme des impédances du transformateur, du réseau et des appareils directement associés.

Cela s'applique, par exemple, aux transformateurs élévateurs si la connexion entre le générateur et le transformateur est faite de telle sorte que la possibilité d'un défaut entre phases ou entre deux phases et la terre se produisant à cet endroit soit négligeable.

NOTE Si la connexion entre le générateur et le transformateur est faite de cette façon, les conditions de court-circuit les plus sévères peuvent se produire, dans le cas d'un transformateur élévateur connecté en étoile-triangle avec neutre à la terre, lorsqu'un défaut entre phase et terre se produit sur le réseau raccordé à l'enroulement connecté en étoile ou dans le cas d'une non-synchronisation des phases.

3.2.6 Transformateurs spéciaux et transformateurs installés dans des réseaux caractérisés par un fort taux de défaut

La tenue d'un transformateur aux surintensités fréquentes provenant d'applications particulières (par exemple les transformateurs de four à arc ou les transformateurs fixes alimentant des appareils de traction) ou de conditions d'exploitation particulières (par exemple, un grand nombre de défauts se produit dans les réseaux connectés) doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur. L'acheteur doit informer à l'avance le constructeur des conditions anormales de fonctionnement prévues.

3.2.7 Dispositif de changement de prise

Lorsque le transformateur en est muni, le dispositif de changement de prise doit être capable de supporter les mêmes surintensités dues aux courts-circuits que les enroulements. Cependant, le changeur de prise en charge n'est pas prévu pour commuter le courant de court-circuit.

3.2.8 Borne neutre

La borne neutre des enroulements connectés en étoile ou en zigzag doit être conçue pour la surintensité la plus élevée qui peut traverser cette borne.

4 Démonstration de la tenue au court-circuit

Les exigences de cet article s'appliquent à la fois aux transformateurs immergés dans l'huile et aux transformateurs de type sec, tels qu'ils sont spécifiés respectivement dans la CEI 60076-1 et la CEI 60076-11.

4.1 Tenue thermique au court-circuit

4.1.1 Généralités

Selon la présente norme, la tenue thermique au court-circuit doit être démontrée par le calcul. Ce calcul doit être réalisé conformément aux exigences de 4.1.2 à 4.1.5.

4.1.2 Valeur du courant de court-circuit symétrique I

Pour les transformateurs triphasés avec deux enroulements séparés, la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique I doit être calculée comme suit:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_t + Z_s} \quad [\text{kA}] \quad (1)$$

où

Z_s est l'impédance de court-circuit du réseau.

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}, \text{ en ohms (:) par phase (équivalent au montage étoile);} \quad (2)$$

où

U_s est la tension assignée du réseau, en kilovolts (kV);

S est la puissance apparente de court-circuit du réseau, en mégavoltampères (MVA).

U et Z_t sont définies comme suit:

a) pour la prise principale:

U est la tension assignée U_r de l'enroulement considéré, en kilovolts (kV);

Z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur assimilée à l'enroulement à l'étude; elle est calculée comme suit:

$$Z_t = \frac{z_t}{100} \frac{U_r^2}{S_r}, \text{ en ohms (:) par phase (équivalent au montage étoile)}^2 \quad (3)$$

où

z_t est l'impédance de court-circuit mesurée à courant et fréquence assignés pour la prise principale et pour la température de référence, exprimée en pourcentage;

S_r est la puissance assignée du transformateur, en mégavoltampères (MVA);

b) pour les prises autres que la prise principale:

U est, sauf spécification contraire, la tension de prise³ de l'enroulement à l'étude, en kilovolts (kV);

Z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur assimilée à l'enroulement et à la prise considérée, en ohms (:) par phase.

Pour les transformateurs ayant plus de deux enroulements, les autotransformateurs, les transformateurs survolteurs-dévolteurs et les transformateurs directement associés à d'autres appareils, les surintensités sont calculées suivant 3.2.3, 3.2.4 ou 3.2.5, selon le cas.

Pour tous les transformateurs, excepté les cas donnés en 3.2.2.2, l'effet de l'impédance de court-circuit du ou des réseaux doit être pris en compte.

NOTE Dans le cas des enroulements connectés en zigzag, le courant de court-circuit pour un défaut entre phase et terre peut atteindre des valeurs considérablement plus élevées que pour un défaut triphasé. Il est recommandé de prendre en compte l'accroissement de ce courant dans le calcul de l'élévation de température de l'enroulement zigzag.

4.1.3 Durée du courant de court-circuit symétrique

Sauf spécification contraire, la durée du courant I à utiliser dans le calcul concernant la tenue thermique au court-circuit doit être de 2 s.

NOTE Pour les autotransformateurs et pour les transformateurs avec un courant de court-circuit dépassant 25 fois le courant nominal, on peut adopter, après accord entre le constructeur et l'acheteur, une durée du courant de court-circuit inférieure à 2 s.

4.1.4 Valeur maximale moyenne autorisée de la température de chaque enroulement

La température moyenne T de chaque enroulement, après le passage du courant de court-circuit symétrique I de valeur et de durée spécifiées respectivement en 4.1.2 et 4.1.3, ne doit pas dépasser la valeur maximale indiquée au Tableau 3, quelle que soit la prise de réglage .

² Pour plus de compréhension du contenu de 4.2.3, les symboles Z_t et z_t sont ici utilisés respectivement pour Z et z et pour les mêmes données que dans la CEI 60076-1.

³ Pour la définition de «tension de prise», voir 5.2 de la CEI 60076-1.

La température initiale d'enroulement θ_i à utiliser dans les équations (4) et (5) doit correspondre à la somme de la température ambiante maximale admissible et de l'échauffement correspondant de l'enroulement au régime assigné mesuré par variation de résistance. Si l'échauffement mesuré de l'enroulement n'est pas disponible, alors la température initiale θ_i doit correspondre à la somme de la température ambiante maximale autorisée, et de l'échauffement autorisé pour le système d'isolation de l'enroulement.

Tableau 3 – Valeurs maximales admissibles de la température moyenne de chaque enroulement après court-circuit

Type de transformateur	Température du système d'isolation °C (classe thermique entre parenthèses)	Valeur maximale de température °C	
		Cuivre	Aluminium
Immergé dans l'huile	105 (A)	250	200
Sec	105 (A)	180	180
	120 (E)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	180 (H)	350	200
	200	350	200
	220	350	200
NOTE 1 Dans le cas d'enroulements faits avec des alliages d'aluminium haute résistance à la traction, des valeurs maximales de température plus élevées peuvent être autorisées après accord entre fabricant et acheteur, mais sans jamais excéder celles du cuivre.			
NOTE 2 Si des systèmes d'isolation utilisés dans les transformateurs immergés dans l'huile sont autres que de classe A, des valeurs maximales différentes de température peuvent être permises après accord entre constructeur et acheteur.			

4.1.5 Calcul de la température θ_f

La température moyenne θ_f atteinte par l'enroulement après court-circuit doit être calculée d'après la formule:

$$\theta_f = \theta_i + \frac{2 \cdot \theta_i \cdot 235}{\frac{106\,000}{J^2 \cdot t} + 1} \text{ pour le cuivre (4)} \quad \theta_f = \theta_i + \frac{2 \cdot \theta_i \cdot 225}{\frac{45\,700}{J^2 \cdot t} + 1} \text{ pour l'aluminium (5)}$$

où

- θ_i est la température d'enroulement initiale, en degrés Celsius (°C);
- J est la densité de courant de court-circuit, en ampères par millimètre carré (A/mm²), basée sur la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique;
- t est la durée, en secondes (s).

NOTE Les équations (4) et (5) sont basées sur des conditions adiabatiques et sont valables seulement pour une courte durée, n'excédant pas 10 s. Les coefficients sont basés sur les propriétés suivantes des matériaux:

	Cuivre	Aluminium
Chaleur spécifique à 100 °C (J/kg °C)	398,4	928
Densité à 100 °C (kg/m ³)	8 894	2 685
Résistivité à 100 °C (Ω m)	0,0224	0,0355

4.2 Tenue aux effets dynamiques de court-circuit

4.2.1 Généralités

Si cela est prescrit par l'acheteur, la tenue aux effets dynamiques de court-circuit doit être démontrée:

- par essais, ou
- par calcul et considérations de conception et de fabrication .

Le choix de la méthode de démonstration à utiliser doit faire l'objet d'un accord entre acheteur et constructeur avant de passer commande.

Quand l'essai de court-circuit a été choisi, il doit être considéré comme un essai spécial (voir 3.11.3 de la CEI 60076-1) et doit être spécifié avant de passer commande. L'essai doit être réalisé conformément aux exigences de 4.2.2 à 4.2.7.

Parfois, des transformateurs de forte puissance ne peuvent pas être testés suivant la présente norme, par exemple pour des limitations d'essai. Dans ces cas, les conditions d'essai doivent faire l'objet d'un accord entre acheteur et constructeur.

Lorsqu'une démonstration basée sur le calcul et des considérations de conception et de fabrication est choisie, les lignes directrices données dans l'Annexe A doivent être suivies.

4.2.2 Conditions du transformateur avant les essais de court-circuit

4.2.2.1 Sauf convention contraire, les essais doivent être réalisés sur un transformateur neuf prêt à être mis en service. Des accessoires de protection tels qu'un relais actionné gaz et huile et une soupape de pression doivent être montés sur le transformateur durant l'essai.

NOTE Le montage d'accessoires n'ayant aucune influence sur le comportement durant l'essai de court-circuit n'est pas exigé (par exemple équipement de refroidissement démontables).

4.2.2.2 Préalablement aux essais de court-circuit, le transformateur doit être soumis aux essais de routine spécifiés dans la CEI 60076-1. Cependant, l'essai au choc de foudre n'est pas exigé à ce stade.

Si les enroulements sont munis de prises, la réactance et si nécessaire la résistance doivent être mesurées sur les positions de réglage pour lesquelles les essais de court-circuit seront effectués.

Toutes les mesures de réactances doivent être reproductibles avec un écart inférieur à $\pm 0,2\%$.

Un compte rendu contenant les résultats des essais de routine doit être disponible dès le début des essais de court-circuit.

4.2.2.3 Au début des essais de court-circuit, la température moyenne des enroulements doit être de préférence entre 10 °C et 40 °C (voir 10.1 de la CEI 60076-1).

Pendant les essais, la température d'enroulement peut augmenter du fait de la circulation du courant de court-circuit. Cet aspect doit être pris en considération lors de la mise au point du circuit d'essai pour les transformateurs de catégorie I.

4.2.3 Valeur de crête du courant d'essai \hat{i} pour les transformateurs à deux enroulements

L'essai doit être réalisé avec l'asymétrie du courant maintenue maximale en ce qui concerne la phase en essai.

L'amplitude \hat{i} de la première crête du courant d'essai asymétrique est calculée comme suit:

$$\hat{i} = I \sqrt{2} k \sqrt{2} \quad (6)$$

où le courant de court-circuit symétrique I est déterminé conformément à 4.1.2.

Le facteur k prend en compte le décalage initial du courant d'essai et $\sqrt{2}$ prend en compte la valeur de crête par rapport à la valeur efficace d'une onde sinusoïdale.

Le facteur $k \sqrt{2}$, ou facteur de crête, dépend du rapport X/R ,

où

X est la somme des réactances du transformateur et du réseau ($X_t + X_s$), en ohms (:);

R est la somme des résistances du transformateur et du réseau ($R_t + R_s$), en ohms (:), où R_t est à la température de référence (voir 10.1 de la CEI 60076-1).

Si l'impédance de court-circuit du réseau est incluse dans le calcul du courant de court-circuit, le rapport X/R du réseau, s'il n'est pas spécifié, doit être supposé comme égal à celui du transformateur. Le Tableau 4 spécifie la valeur du facteur de crête en fonction du rapport X/R à utiliser à des fins pratiques⁴.

Tableau 4 – Valeurs du facteur $k \sqrt{2}$

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55
NOTE Pour les autres valeurs du rapport X/R comprises entre 1 et 14, le facteur $k \sqrt{2}$ peut être déterminé par interpolation linéaire.										

NOTE Lorsque $Z_s < 0,05 Z_t$, on peut utiliser pour la prise principale x_t et r_t au lieu de X_t et R_t (en ohms), où

x_t est la composante réactive de z_t , en pourcentage (%);

r_t est la composante résistive, à température de référence, de z_t , en pourcentage (%);

z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur, à la température de référence, en pourcentage (%).

Sauf spécification contraire, dans le cas $X/R > 14$, le facteur $k \sqrt{2}$ est supposé être égal à:

$1,8 \sqrt{2} = 2,55$ pour les transformateurs de catégorie II,

$1,9 \sqrt{2} = 2,69$ pour les transformateurs de catégorie III.

⁴ Le Tableau 4 est basé sur l'expression suivante pour le facteur de crête:

$$k \sqrt{2} = (1 + (e^{-(\pi/2)R/X} - 1) \sin \theta) \sqrt{2}$$

où

e est la base du logarithme naturel;

θ est l'angle de phase qui est égal à $\arctan X/R$, en radians.

4.2.4 Tolérance sur la valeur de crête asymétrique et la valeur efficace symétrique du courant d'essai de court-circuit

Si la durée de l'essai de court-circuit est suffisamment longue, le courant asymétrique dont la première amplitude de crête \hat{i} se transformera en courant symétrique de valeur efficace I (voir 4.1.2).

La valeur de crête du courant obtenu dans les essais ne doit pas s'écarter de plus de 5 % et le courant symétrique ne doit pas s'écarter de plus de 10 % de la valeur spécifiée respective.

4.2.5 Procédure d'essai de court-circuit pour les transformateurs à deux enroulements

4.2.5.1 Pour obtenir le courant d'essai conformément à 4.2.4, la tension à vide de la source peut être plus élevée que la tension nominale de l'enroulement alimenté. La mise en court-circuit de l'enroulement peut soit suivre (court-circuit post-établi), soit précéder (court-circuit préétabli) la mise sous tension de l'autre enroulement du transformateur⁵.

Dans le cas d'un court-circuit post-établi, la tension ne doit pas dépasser 1,15 fois la tension nominale de l'enroulement, sauf accord contraire entre le constructeur et l'acheteur.

Si le court-circuit préétabli est utilisé pour un transformateur à enroulements concentriques simples, il convient que l'alimentation se fasse de préférence par l'enroulement le plus éloigné du noyau. L'enroulement le plus proche du noyau doit être court-circuité de façon à éviter la saturation du noyau magnétique, qui pourrait entraîner un appel de courant magnétisant excessif superposé au courant de court-circuit pendant les premières périodes.

Si des facilités d'essai nécessitent que l'alimentation soit connectée à l'enroulement intérieur, des précautions spéciales doivent être prises, par exemple la prémagnétisation du noyau pour éviter l'enclenchement du courant magnétisant.

Pour les transformateurs à enroulements alternés ou les transformateurs à enroulements concentriques doubles, la méthode du court-circuit préétabli ne doit être utilisée qu'après accord entre le constructeur et l'acheteur.

Pour éviter un suréchauffement préjudiciable, un intervalle de temps approprié doit intervenir entre les applications successives de surintensités. Cette durée doit être définie par accord entre l'acheteur et le constructeur.

NOTE Lors des essais de transformateurs de catégorie I, il peut être nécessaire de considérer le changement du facteur X/R causé par l'augmentation de température durant l'essai et d'y fournir une compensation dans le circuit d'essai.

4.2.5.2 Pour obtenir la valeur de crête initiale du courant (voir 4.2.3) dans l'enroulement de phase en essai, l'instant d'enclenchement doit être réglé au moyen d'un interrupteur synchrone.

Pour vérifier les valeurs des courants d'essai \hat{i} et I , des enregistrements avec oscilloscope doivent toujours être faits.

⁵ Une autre procédure d'essai consiste à appliquer simultanément deux tensions en opposition de phase aux deux enroulements en essai. Les deux enroulements peuvent être alimentés soit par la même source de puissance ou par deux sources de puissance séparées et synchronisées. Cette méthode est avantageuse dans la prévention de toute saturation du noyau et réduira l'exigence de puissance requise de l'alimentation.

Pour obtenir l'asymétrie maximale du courant dans un des enroulements de phase, il faut que l'enclenchement se produise au moment du passage à zéro de la tension appliquée à cet enroulement.

NOTE 1 Pour les enroulements connectés en étoile, l'asymétrie maximale est obtenue en enclenchant lorsque la tension de phase passe par zéro. Le facteur k de la valeur de crête \hat{i} peut être déterminé à partir des oscillogrammes des courants de phase. Pour les essais triphasés sur des enroulements connectés en triangle, cette condition est réalisée en enclenchant lorsque la tension entre phases passe par zéro. Une des méthodes de détermination du facteur k consiste à enclencher pendant les essais de réglage préliminaires lorsque la tension entre phases passe par un maximum. Dans ce cas, on détermine le facteur k à partir des oscillogrammes des courants de phase.

Une autre méthode pour déterminer les courants de phase d'un enroulement connecté en triangle consiste à interconnecter de façon convenable, les enroulements secondaires des transformateurs de courant, mesurant les courants de phase. L'oscillographe peut être réglé pour enregistrer les courants de phase.

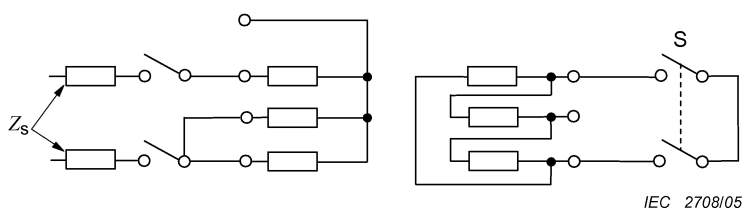
NOTE 2 Pour les transformateurs à connexion en étoile-zigzag appartenant à la catégorie I et avec une variation de tension à flux constant, ayant une valeur $x_l/r_l \geq 3$ (voir 4.2.3), les trois phases sont enclenchées simultanément sans utiliser d'interrupteur synchrone. Pour les autres transformateurs à connexion en étoile-zigzag, les modalités d'enclenchement font l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

4.2.5.3 La fréquence de l'alimentation d'essai doit être, en principe, la fréquence assignée du transformateur. Toutefois, après accord entre l'acheteur et le constructeur, il est permis de tester des transformateurs 60 Hz avec une alimentation 50 Hz et des transformateurs 50 Hz avec une alimentation 60 Hz, à condition que l'on obtienne les valeurs des courants d'essai prescrites comme spécifié en 4.2.3 et 4.2.4.

Cette procédure nécessite que la tension de l'alimentation d'essai soit convenablement ajustée par rapport à la tension assignée du transformateur.

4.2.5.4 Pour les transformateurs triphasés, il convient d'utiliser une source d'alimentation triphasée, tant que les exigences de 4.2.4 peuvent être respectées. Si ce n'est pas le cas, on peut utiliser une source monophasée, comme indiqué ci-dessous. Pour les enroulements connectés en triangle, la source monophasée est branchée entre deux points du triangle et la tension durant l'essai doit être la même que la tension entre phases lors d'un essai triphasé. Pour les enroulements connectés en étoile, la source monophasée est branchée entre une borne de ligne et les deux autres bornes réunies. La tension monophasée durant l'essai doit être égale à $\sqrt{3}/2$ fois la tension entre phases lors d'un essai triphasé.

Des exemples de deux schémas d'essai monophasés possibles simulant un essai triphasé sont donnés aux Figures 1 et 2.

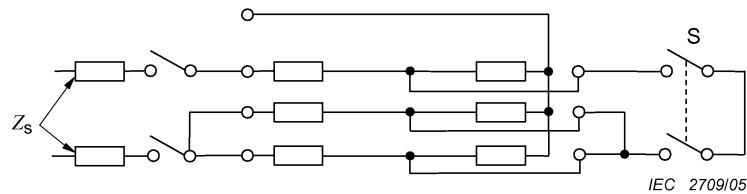


Composants

Z_s impédance du réseau d'essai

S interrupteur synchrone pour un court-circuit post-établi ou barre de connexion rigide pour un court-circuit pré-établi.

Figure 1 – Transformateur connecté en étoile/triangle



Composants

Z_s impédance du réseau d'essai

S interrupteur synchrone pour un court-circuit post-établi ou barre de connexion rigide pour un court-circuit pré-établi.

Figure 2 – Autotransformateur étoile-étoile

NOTE 1 Les essais avec une alimentation monophasée s'appliquent principalement aux transformateurs des catégories II et III et présentent rarement un intérêt pour les transformateurs de la catégorie I.

NOTE 2 Pour les enroulements connectés en étoile à isolation non uniforme, il est nécessaire de vérifier que l'isolation du neutre est suffisante ou non pour les essais monophasés.

NOTE 3 Si, pour des enroulements connectés en étoile, l'alimentation électrique de puissance est insuffisante pour faire l'essai en monophasé décrit ci-dessus, et si le neutre est disponible, le constructeur et l'acheteur peuvent convenir de l'utilisation d'une alimentation électrique monophasée entre borne de ligne et le neutre, à condition que le neutre soit capable de supporter le courant correspondant. Avec ce schéma d'essai, il peut être utile de connecter entre elles les bornes correspondantes des phases non soumises à l'essai de manière à mieux contrôler leur tension, à condition que cela soit faisable et que le circuit soit correct.

4.2.5.5 En l'absence de spécification particulière, le nombre d'essai sur les transformateurs monophasés et triphasés est déterminé comme suit, sans tenir compte des essais préliminaires de réglage effectués à moins de 70 % du courant spécifié pour s'assurer du bon fonctionnement du montage d'essai en ce qui concerne l'instant de mise en marche, le courant de réglage, l'amortissement et la durée.

Pour les transformateurs monophasés de catégorie I et de catégorie II, le nombre d'essais doit être de trois. Sauf spécification contraire, pour les transformateurs monophasés munis de prises, chacun des trois essais est réalisé dans une position différente du changeur de prises, soit un essai sur la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé, un essai sur la prise principale et un essai sur la position correspondant au rapport de transformation le plus bas.

Pour les transformateurs triphasés de catégorie I et de catégorie II, le nombre total d'essais doit être de neuf, à raison de trois sur chaque phase. Sauf spécification contraire, les neuf essais sur chacun des transformateurs triphasés à prises sont réalisés dans des positions différentes du changeur de prises, c'est-à-dire trois essais dans la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé sur l'une des phases extérieures, trois essais sur la prise principale sur la phase du milieu et trois essais dans la position correspondant au rapport de transformation le plus bas sur l'autre phase extérieure.

Pour les transformateurs de catégorie III, il est nécessaire, à chaque fois, que le constructeur et l'acheteur conviennent du nombre d'essais, et des positions du changeur de prises. Toutefois, afin de simuler d'aussi près que possible les effets des événements de court-circuit répétitifs susceptibles d'apparaître en service, de permettre un meilleur contrôle du comportement de l'appareil en essai et de permettre une interprétation significative des éventuelles variations de l'impédance de court-circuit mesurée, il est recommandé que le nombre des essais soit comme suit:

- pour les transformateurs monophasés: trois;
- pour les transformateurs triphasés: neuf.

En ce qui concerne la position du changeur de prises et la séquence d'essai, la même procédure que celle décrite pour les transformateurs de catégories I et II est recommandée.

La durée de chaque essai doit être la suivante:

- 0,5 s pour les transformateurs de catégorie I,
- 0,25 s pour les transformateurs des catégories II et III,

avec une tolérance de ± 10 %.

4.2.6 Procédure d'essai de court-circuit pour les transformateurs avec plus de deux enroulements et pour les autotransformateurs

Diverses conditions de défaut peuvent se produire dans le cas des transformateurs avec plus de deux enroulements et les autotransformateurs (voir 3.2.3). En général, de telles situations sont plus complexes que celles qui concernent les courts-circuits triphasés qui peuvent être considérés comme la situation de référence pour les transformateurs à deux enroulements (voir 3.2.2.5).

Des schémas d'essai spéciaux sont souvent nécessaires pour reproduire certaines conditions de défaut au moyen d'essais. Il convient que le choix des moyens d'essai soit fait, par principe, sur la base de l'analyse des résultats de calcul des forces électrodynamiques qui peuvent apparaître dans tous les cas de défaut possibles.

Le schéma d'essai, les valeurs de courant, la séquence et le nombre d'essais sont toujours soumis à un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Il est recommandé que la tolérance concernant les valeurs de courant définies après accord et la durée des essais soient cohérentes avec celles prescrites pour les transformateurs à deux enroulements et que la séquence d'essai soit choisie en prenant comme critère l'augmentation prévisible des forces électrodynamiques.

4.2.7 Détection des défauts et évaluation des résultats d'essai

4.2.7.1 Avant les essais de court-circuit, on doit effectuer les essais et les mesures conformément à 4.2.2 et inspecter le dispositif de protection par détection de gaz (si le transformateur en est muni). Ces essais et mesures sont destinés à servir de référence pour la détection des défauts.

4.2.7.2 Pendant chaque essai (y compris les essais préliminaires), on doit enregistrer à l'oscillographe:

- les tensions appliquées;
- les courants (voir 4.2.5.2).

De plus, on doit procéder à un examen visuel de l'extérieur du transformateur en essai et à un enregistrement en continu par caméra vidéo.

NOTE 1 Des moyens supplémentaires de détection peuvent être utilisés pour obtenir des informations et améliorer l'évaluation de l'essai, comme enregistrer le courant entre la cuve (isolée) et la terre, enregistrer le bruit et les vibrations, enregistrer les variations de pressions d'huile à différents endroits dans la cuve pendant le passage du courant de court-circuit, etc.

NOTE 2 Des déclenchements aléatoires des relais de détection d'émission de gaz et de mouvement d'huile peuvent se produire durant l'essai du fait des vibrations. Cette circonstance n'est pas significative pour l'aptitude du transformateur à supporter le court-circuit, à moins que du gaz combustible ne soit trouvé dans le relais.

NOTE 3 Des étincelles électriques temporaires peuvent apparaître à travers les joints de réservoir au moment de la mise sous tension et des étincelles internes sur les joints de châssis aux moments de la mise sous tension et du court-circuit.

4.2.7.3 Après chaque essai, les oscillogrammes pris durant les essais doivent être vérifiés, le relais actionné au gaz et à l'huile doit être inspecté et la réactance de court-circuit mesurée. Pour les transformateurs triphasés, la réactance mesurée doit être évaluée sur la base d'une phase, soit par une mesure directe phase-neutre de la réactance dans le cas d'un enroulement en étoile soit déduite d'une configuration en triangle par une méthode appropriée.

NOTE 1 On peut utiliser des moyens d'évaluation supplémentaires pour juger du résultat de l'essai tels que les mesures de résistance d'enroulement, les techniques d'essai en impulsions à basse tension (pour la comparaison entre les oscillogrammes obtenus à l'état initial et après l'essai), l'analyse du spectre de réponse en fréquence, l'analyse de la fonction de transfert, les mesures à vide et la comparaison des résultats d'analyse des gaz dissous avant et après essai.

NOTE 2 Toute différence entre les résultats de mesures effectuées avant et après l'essai peut être l'indice d'un défaut possible. Il est particulièrement important de suivre tout au long des essais successifs, les variations possibles de la réactance de court-circuit mesurée après chaque essai, variations qui peuvent être progressives ou qui peuvent tendre à disparaître.

NOTE 3 Dans l'idée de détecter des défauts entre spires, il est recommandé de réaliser les mesures d'impédance de court-circuit aussi bien du côté haute tension que du côté basse tension.

4.2.7.4 A l'issue des essais, les parties extérieures du transformateur et le relais actionné au gaz et à l'huile (s'il y en a un) doivent être examinés. Les résultats des mesures de réactance de court-circuit ainsi que les oscillogrammes pris aux différents stades des essais doivent être examinés afin d'indiquer les anomalies possibles durant les essais, plus particulièrement tout signe de modification de la réactance de court-circuit.

NOTE 1 A la fin des essais, si les enroulements sont munis de prises, il convient de mesurer la réactance pour toutes les positions de prises pour lesquelles les essais de court-circuit ont été effectués.

NOTE 2 Généralement, il convient que la variation de la réactance de court-circuit montre une tendance à la diminution au cours des essais. Il peut y avoir également une variation notable de la réactance dans le temps après les essais. C'est pourquoi, s'il y a une importante variation de la réactance dépassant les limites autorisées constatée sur les mesures effectuées immédiatement après les essais, il peut être prudent de refaire les mesures après un laps de temps afin de vérifier si la variation de réactance est confirmée. Cette dernière valeur de réactance est retenue comme valeur finale pour déterminer la conformité avec les exigences de la norme.

Différentes procédures sont à appliquer à ce stade des essais pour les transformateurs des catégories I, II et III. Ces procédures et les limites de réactance sont décrites aux points a) et b) suivants.

a) Transformateurs de catégories I et II

Sauf accord contraire, la partie active doit être extraite de la cuve afin de permettre l'inspection du circuit magnétique et des enroulements, et son état doit être comparé à l'état avant essai afin de mettre en évidence d'éventuels défauts apparents tels que le changement de la position des conducteurs, déplacements, etc. qui, en dépit de la réussite aux essais individuels, peuvent altérer le fonctionnement sans risque du transformateur.

Tous les essais individuels, y compris les essais diélectriques à 100 % de la valeur d'essai prescrite (voir la CEI 60076-3), doivent être répétés. Si un essai de choc de foudre est spécifié, il doit être effectué à ce stade. Toutefois, pour les transformateurs de catégorie I, la répétition des essais individuels, à l'exception des essais diélectriques, peut être omise.

Pour considérer le transformateur comme ayant satisfait à l'essai de court-circuit, les conditions ci-après doivent être remplies:

- 1) Les résultats des essais de court-circuit et les mesures et les vérifications effectuées pendant les essais ne révèlent aucune condition de défaut.
- 2) Les essais diélectriques et autres essais individuels, lorsqu'ils s'appliquent, ont été répétés avec succès ainsi que l'essai de choc de foudre, s'il est spécifié.
- 3) L'inspection hors de la cuve ne révèle aucun défaut tel que le déplacement de tôles, les déformations d'enroulements, de connexions ou des structures d'appui susceptibles de mettre en danger la sécurité de fonctionnement du transformateur.
- 4) Aucune trace de décharge électrique interne.

- 5) les valeurs de réactance de court-circuit, en ohms, évaluées pour chaque phase à la fin des essais ne diffèrent pas des valeurs d'origine de plus de:
 - 2 % pour les transformateurs à bobines concentriques circulaires⁶ et bobines non circulaires de type alterné. Toutefois, pour les transformateurs utilisant le feuillard métallique comme conducteur dans les enroulements basse tension et dont la puissance nominale ne dépasse pas 10 000 kVA, des valeurs plus élevées ne dépassant pas 4 % sont acceptables pour les transformateurs ayant une impédance de court-circuit de 3 % ou plus. Si l'impédance de court-circuit est inférieure à 3 %, la limite supérieure de 4 % est soumise à un accord entre le constructeur et l'acheteur;
 - 7,5 % pour les transformateurs avec des bobines concentriques non circulaires ayant une impédance de court-circuit de 3 % ou plus. La valeur de 7,5 % peut être réduite par accord entre le fabricant et l'acheteur, mais elle ne doit pas être inférieure à 4 %.

NOTE 3 Pour les transformateurs munis de bobines concentriques non circulaires ayant une impédance de court-circuit inférieure à 3 %, la variation maximale de réactance ne peut pas être spécifiée de façon générale. La connaissance pratique de certains types de construction peut conduire à accepter pour de tels transformateurs une variation de $(22,5 - 5,0 \cdot Z_t) \%$, Z_t étant l'impédance de court-circuit exprimée en pourcentage.

NOTE 4 Les transformateurs appartenant à la partie supérieure de la catégorie II et ayant des tensions les plus élevées pour le matériel U_m ne dépassant pas 52 kV demandent une attention particulière et peuvent nécessiter un ajustement de la limite de variation de la réactance ci-dessus.

Si l'une des conditions ci-dessus n'est pas remplie, le transformateur doit être démonté, autant que nécessaire, pour établir la cause de l'écart.

b) Transformateurs de catégorie III

La partie active doit être rendue visible pour permettre l'inspection du circuit magnétique et des enroulements, et son état doit être comparé à l'état avant essai afin de mettre en évidence d'éventuels défauts apparents tels que le changement de la position des conducteurs, déplacements, etc. qui, en dépit de la réussite aux essais individuels, peuvent altérer le fonctionnement sans risque du transformateur.

Tous les essais individuels, y compris les essais diélectriques à 100 % de la valeur d'essai prescrite (voir la CEI 60076-3), doivent être répétés. Si un essai de choc de foudre est spécifié, il doit être effectué à ce stade.

Pour considérer le transformateur comme ayant satisfait aux essais de court-circuit, les conditions ci-après doivent être remplies:

- 1) Les résultats des essais de court-circuit et les mesures et les vérifications effectuées pendant les essais ne révèlent aucune condition de défaut.
- 2) Les essais individuels ont été répétés avec succès ainsi que l'essai de choc de foudre, s'il est spécifié.
- 3) L'inspection hors de la cuve ne révèle aucun défaut tel que le déplacement de tôles, les déformations d'enroulements, de connexions ou des structures d'appui susceptibles de mettre en danger la sécurité de fonctionnement du transformateur.
- 4) Aucune trace de décharge électrique interne.
- 5) Les valeurs de réactance de court-circuit, en ohms, évaluées pour chaque phase à la fin des essais ne diffèrent pas des valeurs d'origine de plus de 1 %.

Si la variation de la réactance est comprise entre 1 % et 2 %, l'acceptation est sujette à accord entre l'acheteur et le constructeur. Dans ce cas, un examen plus détaillé peut être demandé, comprenant un démontage de la partie active si nécessaire pour établir la cause de l'écart. Cependant, avant le démontage, il est suggéré que des moyens de diagnostic supplémentaires soient utilisés (voir note 1 de 4.2.7.3).

⁶ Les bobines circulaires comprennent toutes les bobines enroulées sur une forme cylindrique, même si, par exemple, du fait de la présence des conducteurs de sortie dans les enroulements de feuille métallique, il se peut qu'il y ait des variations locales à la forme cylindrique.

NOTE 5 En relation avec l'impact économique du coût d'un transformateur de catégorie III et l'implication du coût de tout contrôle visuel approfondi étendu aux parties internes de celui-ci, il est recommandé qu'une série de photographies soit prise de la position des câbles d'enroulement, des prises, de l'alignement des entretoises et de la configuration des composants de l'isolation d'extrémité, etc., pour permettre une comparaison précise des parties avant et après les essais. Dans ce contexte, une vérification de la compression axiale des enroulements peut être utile. Par nécessité, il est laissé à l'accord mutuel entre les parties d'accepter l'existence de déplacements et changements mineurs, pourvu que la fiabilité du transformateur en service n'en soit pas affectée.

Annexe A (informative)

Evaluation théorique de la capacité de résister aux effets dynamiques de court-circuit

A.1 Domaine d'application

Cette annexe donne des lignes directrices pour l'évaluation théorique de l'aptitude d'un transformateur de puissance à résister aux effets dynamiques de court-circuit, basée sur le calcul et la considération des caractéristiques de conception et des pratiques en matière de fabrication.

NOTE Des informations complémentaires concernant les aspects techniques de la capacité de court-circuit des transformateurs de puissance sont données dans la Brochure CIGRE 209: « Les performances au court-circuit des transformateurs de puissance » – Août 2002.

A.2 Généralités

L'évaluation théorique de l'aptitude d'un transformateur de puissance à résister aux effets dynamiques de court-circuit comprend une revue de conception couvrant les principaux aspects de résistance mécanique du transformateur. La documentation nécessaire pour les besoins englobe l'ensemble des données techniques, telles que les fiches des données relatives à la conception électromagnétique, les calculs des courants de court-circuit, les forces électromagnétiques et les contraintes mécaniques, complétés par des schémas, des spécifications de matériaux, des pratiques en matière de fabrication et les procédures d'élaboration, etc., documents qui sont produits soit pour décrire la conception électromagnétique et mécanique spécifique du transformateur, soit en tant que partie de la documentation de la technologie du fabricant.

Il convient que la revue de conception vérifie les valeurs les plus critiques des forces mécaniques et des contraintes apparaissant lors de la conception résultant des conditions de défauts spécifiés. Il convient que ces valeurs soient comparées à celles relatives à un transformateur de référence testé avec succès au court-circuit, à condition que le transformateur à l'étude soit similaire⁷, ou soient contrôlées par rapport aux règles de conception du fabricant pour assurer la résistance au court-circuit. La structure de support des enroulements et le système de serrage global, ainsi que les pratiques en matière de fabrication sont également des sujets à considérer dans la revue de conception.

La revue de conception décrite dans la présente annexe s'applique principalement aux transformateurs des catégories II et III.

Pour les transformateurs de catégorie I, qui sont normalement classés comme des unités qui sont achetées en grand volume, il convient de préférer la procédure d'évaluation consistant à effectuer un essai de tenue de court-circuit sur une ou deux unités. L'essai de court-circuit d'une ou deux unités d'une commande d'une série est normalement considéré comme la manière la plus rapide et la moins chère pour vérifier la conformité. Néanmoins, pour ces transformateurs il est également possible d'adopter la procédure d'évaluation se composant d'une revue de conception.

⁷ Pour la définition du transformateur similaire, se reporter à l'Annexe B.

En ce qui concerne les transformateurs des catégories II et III, il est admis que parfois il s'avère être difficile pour le fabricant de trouver dans ses dossiers un transformateur de référence adapté pour les besoins de comparaison, par rapport à la similarité. Dans ce cas, pour les besoins de l'évaluation, le transformateur peut être comparé simultanément à un nombre limité de transformateurs testés avec succès au court-circuit à condition que chacune de ses caractéristiques, comme mentionnées en Annexe B, soit égale à l'essai correspondant sur au moins un des transformateurs choisis pour référence.

Par exemple, l'évaluation de la conception d'un autotransformateur triphasé équipé d'un enroulement tertiaire connecté en triangle et à puissance réduite peut être divisée en deux parties, à savoir:

- pour les enroulements série et commun: par comparaison avec les données de conception concernant un autotransformateur triphasé sans enroulement tertiaire;
- pour l'enroulement tertiaire: par comparaison avec un transformateur triphasé avec un enroulement tertiaire à puissance réduite, sur lequel l'enroulement tertiaire a également été soumis aux essais.

A.3 Lignes directrices pour réaliser la revue de conception

A.3.1 Généralités

Il convient que la revue de conception comporte les étapes suivantes:

- ξ Examen du transformateur sur la base de documents techniques pertinents.
- ξ Évaluation du transformateur:
 - soit par comparaison avec un transformateur de référence qui a satisfait à l'essai de court-circuit,
 - ou par vérification par rapport aux règles de conception du fabricant pour la résistance au court-circuit.
- ξ Résultat de la revue de conception du transformateur et l'accusé de réception des réponses.

A.3.2 Informations concernant le transformateur à évaluer

Il convient que le dossier à présenter par le fabricant pour les besoins de la revue de conception contienne les éléments suivants:

- a) Les fiches des données relatives à la conception électromagnétiques, selon besoins pour le calcul.
- b) Les dessins ou graphiques de la disposition complète des enroulements et de l'isolation à l'intérieur de la fenêtre du circuit magnétique avec l'indication des types de matériaux.
- c) Le calcul des valeurs de courants de court-circuit (à la fois les valeurs crête et les valeurs efficaces symétriques) affectant chaque enroulement individuel à la suite des exigences spécifiées relatives à l'endurance et aux types de défaut pris en considération, en tenant bien compte des positions de prise dans le cas du ou des enroulements munis de prises.
- d) Le calcul des principales forces de court-circuit (les valeurs crête se produisant à la crête la plus élevée du courant respectif), en se référant aux cas de défaut, les positions de prises et les positions géométriques et relatives des enroulements considérés pour les besoins de conception. Les informations complètes doivent être fournies si des configurations géométriques simplifiées ont été adoptées pour les enroulements, le noyau magnétique et la cuve pour les besoins des calculs du flux de fuite magnétique et des forces électromagnétiques.

Les forces axiales de court-circuit des transformateurs colonnes, et respectivement les forces radiales de court-circuit des transformateurs cuirassés, sont très sensibles aux positions relatives des enroulements de f.m.m. en opposition. Le constructeur doit spécifier quels sont les déplacements maximaux dus aux tolérances de fabrication qu'il a considérés ainsi que les configurations des enroulements (plans de symétrie et conditions aux limites) qu'il a supposés pour les besoins des calculs des efforts de court-circuit.

Les forces électromagnétiques suivantes doivent être considérées:

ξ Pour les transformateurs colonnes:

- la force radiale vers l'intérieur ou vers l'extérieur sur chaque enroulement physique,
- la force de compression axiale maximale sur chaque enroulement physique (F_c^*),⁸
- la force de poussée en extrémité axiale maximale (vers le haut ou le bas) pour chaque enroulement physique,
- la force axiale maximale globale par colonne bobinée s'exerçant sur l'anneau commun de serrage (ou le plateau de serrage), s'il est utilisé, et sur le système de serrage du circuit magnétique,
- la force de poussée agissant sur les câbles de sortie de chaque enroulement basse tension (T_t^*)⁹.

ξ Pour les transformateurs cuirassés:

- les forces axiales qui agissent sur chaque bobine et sur les groupes de chacun des enroulements à l'intérieur et à l'extérieur de la fenêtre de circuit magnétique,
- les forces radiales agissant sur les groupes alternés de bobines,
- force totale sur les cales de coin entre phase et les cales de pression contre le circuit magnétique et contre les structures de renforcement de cuve,
- force totale sur les tôles du circuit magnétique,
- force totale sur les structures de renforcement de cuve.

Pour chaque enroulement physique, le système de forces le plus sévère résultant des cas de défaut et des positions de prise considérées dans la conception doit être identifié. En ce qui concerne la structure entière du transformateur, on doit considérer les forces résultant du cas de défaut impliquant la quantité la plus élevée de puissance réactive prélevée depuis le ou les systèmes électrique(s).

e) Le calcul des contraintes mécaniques de base sur les conducteurs d'enroulement et les structures adjacentes couplées mécaniquement ayant pour origine les forces de court-circuit. Les contraintes mécaniques suivantes doivent être considérées:

ι Pour les transformateurs colonnes:

- contrainte moyenne circonférentielle de traction sur les enroulements extérieurs (ζ_t^*)¹⁰,

⁸ Voir la Note 1 en fin de cette annexe.

⁹ Pour la définition et le calcul de la force de poussée agissant sur les câbles de sortie de l'enroulement basse tension, voir A.3.3.2.2.

¹⁰ Pour le calcul de la contrainte moyenne circonférentielle de traction, les enroulements de type disques et hélice comportant un ou plusieurs canaux dans leur épaisseur radiale peuvent être considérés comme des anneaux sans canaux.

- contrainte moyenne circonférentielle de compression sur les enroulements intérieurs de type disque, en hélice ou simple couche (ζ_c^*)¹¹,
 - contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression sur des enroulements de type multicouches intérieurs ($\zeta_{c,eq}^*$)¹²,
 - contrainte due à la flexion radiale des conducteurs entre les réglettes verticales et entre les entretoises utilisées pour construire tout canal de refroidissement axial dans la largeur radiale d'enroulement (ζ_{br}^*),
 - contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales radiales des enroulements de type hélicoïdaux ou de type disques (ζ_{ba}^*),
 - contraintes de compression sur les cales radiales des enroulements de type disques ou en hélice (ζ_{sp}^*)¹³,
 - contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs des enroulements de type couche (ζ_{pi}^*),
 - contraintes de compression sur les structures d'isolation empilées d'extrémité (ζ_{es}^*) et les anneaux d'extrémité (ζ_{er}^*),
 - contraintes de compression sur des anneaux de serrage commun (ou des plateaux) si utilisés (ζ_{pr}^*),
 - les contraintes de traction dans les tirants (plaques de renforcement) du système de serrage (ζ_{rod}^*).
- t Pour les transformateurs cuirassés:
- contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales entre bobine (ζ_{ba}^*),
 - contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs (ζ_{pi}^*) et sur les cales (ζ_{sp}^*) entre bobines,
 - contraintes de compression sur les cales de coin entre phases (ζ_{iw}^*) et sur les cales de pression contre le circuit magnétique et contre les structures de renforcement de cuve (ζ_{pb}^*),
 - contrainte de traction et de flexion sur les tôles du circuit magnétique (ζ_{cl}^*),
 - contrainte de traction et de flexion sur structures de renforcement de cuve (ζ_{tr}^*).

Pour chaque enroulement physique et ses constituants, la condition de contrainte la plus sévère qui a pour origine les forces de court-circuit doit être considérée.

- f) Les schémas, les croquis, ou les sorties d'ordinateur, en ce qui concerne la structure de support des enroulements et le système de serrage du circuit magnétique et des bobines, telles que:

¹¹ Pour le calcul de la contrainte moyenne circonférentielle de compression, les enroulements de type disques et hélice comportant un ou plusieurs canaux dans leur épaisseur radiale peuvent être considérés comme des anneaux sans canaux.

¹² Dans le cas de deux couches identiques, la contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression est égale à la moyenne arithmétique des contraintes respectives. Dans le cas de trois couches ou plus, la contrainte ci-dessus est supposée être égale à 1,1 fois la moyenne arithmétique des contraintes de compression calculées sur les diverses couches.

¹³ La contrainte de compression sur les cales radiales est calculée en considérant la zone couverte par les conducteurs nus et en négligeant tout effet relatif à leur rayon de courbure.

- 1 Pour les transformateurs colonnes:
 - disposition des supports radiaux contre les branches du circuit magnétique, configuration des structures d'isolation empilées d'extrémité, anneaux commun de serrage (ou des plateaux) si utilisés, agencement du serrage global du circuit magnétique et des bobinages, etc.
- 1 Pour les transformateurs cuirassés:
 - système de serrage axial, cales de serrage, empilage d'isolants, disposition de calage en tête de bobine et entre les phases, barrières isolantes entre les enroulements et le noyau magnétique, etc.;
 - structure de renfort de la base de la cuve pour supporter le circuit magnétique, disposition des ressorts assurant le serrage du circuit magnétique, structures de renforcement de cuve, autres dispositions de fixation de l'empilage des tôles magnétiques, etc.
- 1 En général:
 - moyens pour fixer de façon sûre les câbles de sorties des enroulements et les câbles de connexion ou les barres de connexion Basse Tension aux traversées, ainsi que le faisceau de câbles au changeur de prises, etc.;
 - moyens pour appliquer une précontrainte initiale axiale.
- g) Instructions pour l'assurance de la qualité et le contrôle de la qualité à la fois des matériaux et des procédures de fabrication, avec la référence spécifique aux étapes de fabrication comme par exemple:
 - bobinage des conducteurs sur le tour et le contrôle de la tension appliquée, mise à la cote et stabilisation axiale des enroulements et des bobines, assemblage dans les tolérances spécifiées, séchage et imprégnation avec l'huile, application de la précontrainte (force de serrage), le serrage/fixation des supports d'enroulement, des câbles d'extrémité et des dispositifs de serrage, etc.;
 - en particulier pour les transformateurs cuirassés: serrage et pressage des bobines à l'intérieur et à l'extérieur de la fenêtre du circuit magnétique au moyen de cales entre phases, les cales assurant le serrage contre le circuit magnétique et contre les structures de renforcement de cuve, etc.
- h) vérifications concernant les principaux composants externes du transformateur, en particulier les traversées haute tension, spécialement dans le cas où elles sont montées inclinées sur des buselures, etc.

A.3.3 Évaluation du transformateur

A.3.3.1 Généralités

Dans l'évaluation du transformateur, deux méthodes alternatives peuvent être étudiées, basées soit en comparant avec un transformateur de référence qui a passé avec succès l'essai de court-circuit (voir A.3.3.2) soit en contrôlant les règles de conception documentées vis à vis de la tenue au court-circuit qui ont été adoptées par le fabricant pour sa production normale (voir A.3.3.3).

Ces méthodes alternatives sont décrites ci-dessous.

A.3.3.2 Évaluation en comparant avec un transformateur de référence

A.3.3.2.1 Identification du transformateur de référence

Le transformateur de référence est considéré approprié pour les besoins de la comparaison à condition qu'il remplisse les exigences suivantes:

- ξ Ses caractéristiques sont telles que le transformateur en évaluation peut être considéré similaire.

- ξ En principe, il a été conçu par les mêmes méthodes de calcul et les mêmes critères de tenue mécanique que ceux utilisés pour le transformateur en évaluation.
- ξ Il a été fabriqué selon des pratiques fondamentalement identiques à celles utilisées pour le transformateur en évaluation, les mêmes instructions concernant l'assurance qualité et le contrôle de qualité.
- ξ La plage de validité des règles pour la tenue au court-circuit adoptée pour la conception couvre les caractéristiques des deux transformateurs.

Le transformateur de référence doit avoir passé avec succès l'essai de court-circuit.

L'identification du ou des transformateurs de référence comprend les étapes suivantes:

- ξ Vérifier qu'il est adapté pour les besoins de la comparaison comme décrit ci-dessus.
- ξ Examen du ou des rapports au sujet du ou des essais de court-circuit.
- ξ Connaissance des principales données relatives à la conception électromagnétique, aux calculs réalisés et aux critères de tenue mécaniques adoptés pour la conception.
- ξ Connaissance des pratiques adoptées pour la fabrication, l'assurance de la qualité et les instructions relatives au contrôle de la qualité.

A.3.3.2.2 Evaluation comparative

Il convient de débiter l'évaluation comparative par l'examen et la comparaison de l'enroulement et des principales structures d'isolation et du système de serrage des deux transformateurs, particulièrement à la lumière de leurs caractéristiques de tenue mécaniques apparentes respectives. À partir de cette évaluation comparative il devrait être possible de conclure que la robustesse du transformateur en évaluation est en principe égale à celle du transformateur de référence en ce qui concerne sa structure mécanique de base.

Les valeurs de force et de contraintes correspondantes (voir A.3.2) calculées sur les deux transformateurs doivent alors être comparées. Dans ce but, l'utilisation du Tableau A.1 ou A.2 est recommandée. Toute valeur de force ou de contrainte concernant le transformateur réel en évaluation et le transformateur de référence doit être intégrée dans la cellule correspondante dans les colonnes marquées «réelle» (réelle) et «réf» pour référence, respectivement. La valeur de force ou de contrainte la plus élevée résultant des conditions de court-circuit considérées dans la conception doit être utilisée pour chaque enroulement physique et composants associés et pour l'ensemble de la structure mécanique du transformateur.

A la suite de la comparaison, le transformateur est considéré capable de résister aux effets dynamiques du court-circuit à condition qu'aucune de ses valeurs de force ou de contrainte à compléter dans le Tableau A.1 ou A.2 ne dépasse 1,2 fois la valeur correspondante calculée sur le transformateur de référence, sauf pour les forces et les contraintes suivantes pour lesquelles des exigences plus rigoureuses à appliquer sont suggérées pour les transformateurs à colonnes:

- ξ contrainte moyenne circonférentielle de compression sur les enroulements intérieurs de type disque, en hélice ou simple couche

$$\zeta_{c, act}^* \delta_{1,1} \zeta_{c, ref}^*$$
- ξ contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression sur des enroulements de type multicouches intérieurs

$$\zeta_{c, eq, act}^* \delta_{1,1} \zeta_{c, eq, ref}^*$$

ξ force de poussée agissant sur les câbles de sortie de l'enroulement basse tension ¹⁴⁾

$$T_{f, act}^* \delta 1,1 T_{f, ref}^*$$

A.3.3.3 Evaluation par le contrôle des règles de conception du fabricant vis-à-vis de la tenue au court-circuit

A.3.3.3.1 Connaissance des informations de conception du fabricant pour la tenue au court-circuit

Il convient que les règles pour la tenue au court-circuit sur lesquelles le fabricant a basé la conception de l'unité à évaluer reposent sur une base expérimentale solide. Cela signifie qu'il convient que ces règles découlent de l'analyse soit des résultats d'un certain nombre d'essais de tenue au court-circuit réalisés sur des transformateurs réels soit du résultat d'essais réalisés sur des modèles de transformateur représentatifs combinés à tout retour d'expérience positif en matière de performances au court-circuit basée sur une exploitation prolongée sans incident d'un certain nombre de transformateurs, soit en s'appuyant simultanément sur ces deux types de démonstrations. Il convient pour le fabricant de présenter les informations suivantes:

- ξ La liste des transformateurs construits par le fabricant qui ont été sujets à l'essai de court-circuit, y compris les données principales du transformateur, telles que la puissance assignée, la tension assignée, la gamme de prise, l'impédance de court-circuit.
- ξ Les résultats des essais réalisés sur des modèles, le cas échéant, et leur impact sur les règles de conception.
- ξ Le contenu des normes techniques pour la tenue au court-circuit des transformateurs de puissance utilisées par le constructeur dans ses procédures habituelles de conception et de fabrication.
- ξ Le retour d'expérience et le taux de défaillance en service vis-à-vis des performances en court-circuit.
- ξ Le nombre d'unités produites et le nombre d'années de service des transformateurs fonctionnant sans incident.

A partir des informations ci-dessus, il convient de montrer que le fabricant a des règles de conception adaptées à la tenue aux courts-circuits.

A.3.3.3.2 Procédure de vérification

Il convient de débiter la procédure de vérification par un examen préliminaire de l'enroulement et des principales structures d'isolation et du système de serrage du transformateur. A partir de cet examen il devrait s'ensuivre que les dispositions et le système de serrage adoptés sont compatibles avec ceux adoptés par le fabricant dans sa production de transformateurs robustes au court-circuit.

L'étape suivante comprend la comparaison de toutes les valeurs de force et de contraintes (voir A.3.2) calculées sur le transformateur avec les valeurs admissibles ou critiques correspondantes que le fabricant a adoptées dans sa pratique en matière de conception¹⁵.

¹⁴ La force de poussée agissant sur les câbles de sortie de l'enroulement basse tension (kN) est supposée par convention être égale au produit de la contrainte circonférentielle moyenne de compression sur l'enroulement (kN/mm²) par la section des câbles de sortie (mm²). La force de poussée s'exerçant vers le haut pourrait déformer l'enroulement suivant un mode de ruine type vissage et serrage. Dans les rares cas où l'enroulement basse tension est extérieur, la contrainte est de type traction et l'enroulement pourrait présenter une tendance à se dérouler,

¹⁵ Une valeur admissible signifie toute valeur de force ou de contrainte à laquelle la structure peut résister sans altération de sa tenue et de sa fonction; une valeur critique signifie toute valeur de force ou de contrainte qui occasionne une déformation permanente, une perte de stabilité ou un effondrement de la structure.

De telles valeurs peuvent être différentes pour différents fabricants. Dans ce but, l'utilisation du Tableau A.1 ou A.2 est recommandée. Toute valeur de force ou de contrainte concernant le transformateur en évaluation doit être intégrée dans la cellule correspondante dans les colonnes marquées «réelles» (réel). Toute valeur de force ou de contrainte admissible ou critique que le fabricant a adoptée comme règle générale de conception doit être intégrée dans la cellule appropriée dans les colonnes marquées «admissible» (admissible) ou «critique» (critique). La valeur de force ou de contrainte la plus élevée résultant des conditions de court-circuit considérées dans la conception doit être utilisée pour chaque enroulement physique et composants associés et pour l'ensemble de la structure, respectivement.

NOTE Dans le cas des transformateurs colonnes, une attention spécifique est attirée sur l'importance des contraintes de compression sur les enroulements. Les enroulements soumis à des contraintes circonférentielles de compression peuvent être endommagés en raison soit d'une flexion excessive des conducteurs entre des réglettes verticales consécutives (flambage forcé) soit en raison du dépassement d'un point d'équilibre correspondant à une forme stable conduisant à des déformations radiales importantes des conducteurs à un ou plusieurs endroits de la circonférence de l'enroulement (flambage libre).

Le flambage forcé se produit typiquement sur des enroulements fournis avec des supports relativement rigides sur leurs contours internes.

Le flambage libre est un mode de ruine plus commun, qui se produit soudainement dès que la valeur critique de contrainte circonférentielle de compression pour la structure est atteinte.

La détermination de la valeur critique de contrainte circonférentielle de compression pour le flambage libre est une tâche très complexe, en raison à la fois de la nature hétérogène des enroulements et de l'influence résultant des processus de fabrication.

Pour les raisons ci-dessus, aucune formule spécifique pour les contraintes critiques circonférentielles de compression sur des enroulements n'a été donnée.

Des informations complémentaires à propos du flambage et des autres aspects techniques en rapport à la tenue au court-circuit des transformateurs de puissance sont données dans la Brochure 209 du Cigré: « Les performances de court-circuit des Transformateurs de puissance » – Août 2002.

A la suite du contrôle, le transformateur est considéré comme étant capable de résister aux effets dynamiques du court-circuit à condition qu'aucune de ses valeurs de forces ou de contraintes remplies dans le Tableau A.1 ou A.2 ne dépasse la valeur de force ou de contrainte maximale admissible adoptée par le fabricant pour les besoins de conception et 0,8 fois la valeur de contrainte critique correspondante identifiée par le fabricant.

Les limites de forces et de contraintes admissibles qui sont données ci-dessous pour les besoins du guide sont basées sur l'expérience prenant en considération des conditions limites, telles que les propriétés des matériaux, les tolérances, les détails de conception mécaniques et le processus de fabrication. Néanmoins, ces limites ne doivent pas être considérées comme des limites normalisées et peuvent être dépassées dans la conception dans la mesure où le constructeur peut démontrer toute expérience solide et documentée avec des valeurs plus élevées.

a) Pour les transformateurs colonnes:

- ξ contrainte moyenne circonférentielle de traction sur les enroulements de type disques et en hélice, et sur chaque couche individuel des enroulements de type multicouches¹⁶

$$\xi_{t, act}^* \leq 0,9 R_{p0,2}$$

- ξ contrainte moyenne circonférentielle de compression sur les enroulements de type disque, en hélice, et de type simple couche

- avec câbles continûment transposés non collés (CTCs)¹⁷ et multibrins

$$\xi_{c, act}^* \leq 0,35 R_{p0,2}$$

¹⁶ La contrainte d'essai $R_{p0,2}$ est la contrainte de traction qui produit, lorsque la charge est encore appliquée, un allongement non proportionnel égal à 0,2 % de la longueur du calibre.

¹⁷ CTCs signifie Conducteurs Transposés de manière Continue.

- avec des CTCs renforcés par de la résine et multibrins
 $\zeta_{c, act}^* \delta 0,6 R_{p0,2}$
- ξ contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression sur des enroulements de type multicouches
- avec câbles CTCs non collés et multibrins
 $\zeta_{c, eq, act}^* \delta 0,35 R_{p0,2}$
- avec des CTCs renforcés par de la résine et multibrins
 $\zeta_{c, eq, act}^* \delta 0,6 R_{p0,2}$
- ξ contrainte due à la flexion radiale des conducteurs entre les réglettes verticales ou les espaceurs
 $\zeta_{br, act}^* \delta 0,9 R_{p0,2}$
- ξ contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales radiales
 $\zeta_{ba, act}^* \delta 0,9 R_{p0,2}$
- ξ force de compression axiale maximale sur chaque enroulement physique en rapport avec le déversement latéral du conducteur¹⁸
 $F_{c, act}^* \delta 0,8 F_{tilt}^*$
- ξ contraintes de compression sur les cales radiales¹⁹
 - en présence de papier couvrant des conducteurs
 $\zeta_{sp, act}^* \delta 80 \text{ MPa}$
 - en présence d'email pur recouvrant les conducteurs
 $\zeta_{sp, act}^* \delta 120 \text{ MPa}$
- ξ contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs avec enroulements de type couche
 $\zeta_{pi, act}^* \delta 35 \text{ MPa}$
- ξ contrainte de compression sur les anneaux de cerclage d'extrémité en cartons (type bobiné)
 $\zeta_{er, act}^* \delta 40 \text{ MPa}$
- ξ contraintes de compression sur les anneaux d'extrémité en cartons (type empilés)
 $\zeta_{er, act}^* \delta 80 \text{ MPa}$
- ξ contraintes de compression sur anneaux communs de serrage en cartons ou sur les plateaux de serrage (si utilisé)
 $\zeta_{pr, act}^* \delta 80 \text{ MPa}$
- ξ les contraintes de traction dans les tirants (plaques de renforcement) du système de serrage²⁰
 $\zeta_{rod}^* \delta R_{eL}$

¹⁸ Pour F_{tilt}^* , voir la Note 2 à la fin de la présente annexe.

¹⁹ Valable pour des cales faites en carton comprimé.

²⁰ R_{eL} est la contrainte de rupture la plus faible du matériau, pratiquement égale à $R_{p0,2}$.

b) Pour les transformateurs cuirassés:

ξ contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales entre bobines

$$\zeta_{ba, act}^* \leq 0,9 R_{p0,2}$$

ξ contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs et sur les cales

$$1_{pi, act}^* \quad 1_{sp, act}^* \quad 35 \text{ MPa}$$

ξ contraintes de compression sur les cales entre phases et sur les cales faites en carton

$$1_{iw, act}^* \quad 1_{pb, act}^* \quad 80 \text{ MPa}$$

ξ contraintes de compression sur les cales de coin entre phases et sur les cales de pression faites en plastiques renforcés de fibres ou en bois lamifié

$$1_{iw, act}^* \quad 1_{pb, act}^* \quad 120 \text{ MPa}$$

ξ contrainte de traction et de flexion sur les tôles du circuit magnétique

$$\zeta_{cl, act}^* \leq \delta R_{eL}$$

ξ contrainte de traction et de flexion sur structures de renforcement de cuve

$$\zeta_{tr, act}^* \leq \delta R_{eL}$$

ξ Pression sur les zones de recouvrement des tôles magnétiques²¹

$$P_{act} \leq P$$

A.3.4 Résultat de la revue de conception et connaissance du transformateur en évaluation

Le résultat de la revue de conception est positif si:

- ξ les exigences de spécifications ont été vérifiées pour couvrir dûment les conditions réelles du système électrique;
- ξ la conception couvre entièrement la spécification;
- ξ la revue de conception a été réalisée selon A.3.1/A.3.2 pour identifier toutes les forces et contraintes résultantes;
- ξ l'évaluation du transformateur à l'étude a été réalisée selon A.3.3.2 ou A.3.3.3 et la conformité avec les critères sur les forces de court-circuit et les critères sur les contraintes énumérés dans la présente annexe se déduit de façon évidente à partir du contenu du Tableau A.1 ou du Tableau A.2;
- ξ la conception mécanique et le processus de production/de fabrication ont été jugés satisfaisant pour fournir le comportement au court-circuit requis du transformateur.

L'acheteur est prié de reconnaître formellement que la revue de conception du transformateur a été effectuée positivement en suivant les directives décrites dans la présente Annexe. A la lumière de ce qui précède, un rapport approprié convient d'être signé conjointement par l'acheteur et le fabricant.

La signature de l'acheteur n'exempte pas le fabricant de ses engagements à l'égard de l'absence de non-conformité et de la capacité du transformateur en question à résister aux effets dynamiques de court-circuit en rapport avec les exigences en service spécifiées.

Les informations communiquées à l'acheteur à l'occasion de la revue de conception demeurent la propriété intellectuelle du fabricant et doivent rester confidentielles.

²¹⁾ Pour P, voir la note 3 à la fin de la présente annexe.

[illegible]

Tableau A.1 (suite)

Type de force/contrainte	Enroulement basse tension				Enroulement moyenne tension				Enroulement haute tension				Enroulement de prise			
	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique
Force de compression axiale maximale sur enroulement comparée à la force critique pour le déversement latéral (kN)																
Force de poussée maximale en extrémité de enroulement physique – vers le haut (kN) – vers le bas (kN)																
Contrainte de compression sur l'isolation papier des conducteurs et sur les cales radiales (MPa)																
Contrainte de compression sur structures d'isolation empilées d'extrémité et sur les anneaux de cerclage d'extrémité (MPa)																
Contraintes de compression sur les anneaux communs de serrage (ou plateaux) (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Contraintes de traction dans les tirants (plaques de renforcement) (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Force de serrage par colonne (kN)	réel				réf				admissible							
<p>réel = valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur à l'étude.</p> <p>réf = valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur de référence.</p> <p>admissible = valeur de force ou de contrainte admissible (basée sur les règles de conception du fabricant).</p> <p>critique = valeur de force ou de contrainte critique (basée sur les règles de conception du fabricant).</p>																

Type de force/contrainte	Enroulement basse tension				Enroulement moyenne tension				Enroulement haute tension				Enroulement de prise			
	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique
Contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales entre bobines (MPa)																
Contrainte de compression sur l'isolation papier des conducteurs et sur cales (MPa)																
Force totale sur les cales entres phases et les cales (kN)	réel				réf				admissible				critique			
Force totale sur les tôles du noyau magnétique (kN)	réel				réf				admissible				critique			
Force totale sur les structures de renforcement de cuve (kN)	réel				réf				admissible				critique			
Contraintes de compression sur les cales de coin entre phases et les blocs de pression (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Contrainte de traction / de flexion sur des tôles de noyau magnétique due aux forces radiales (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Contrainte de traction / de flexion sur structure de renforcement de cuve due aux forces axiales (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Pression sur les zones de recouvrement des tôles magnétiques (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
<p>réel = valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur à l'étude.</p> <p>réf = valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur de référence.</p> <p>admissible = valeur de force ou de contrainte admissible (basée sur les règles de conception du fabricant).</p> <p>critique = valeur de force ou de contrainte critique (basée sur les règles de conception du fabricant).</p>																

NOTE 1 Le symbole * (sommet) a été utilisé dans la présente annexe pour désigner une quantité physique (force ou contrainte) qui relie à une condition de crête maximale d'un éventuel courant de court-circuit.

NOTE 2 Avec les transformateurs colonnes, lorsqu'un enroulement physique est soumis à une force de compression axiale excessive il peut perdre ses capacités à rester mécaniquement stable. Dans ce cas, les conducteurs d'enroulement «s'inclinent»: l'ensemble des conducteurs adjacents à l'intérieur de la largeur radiale de l'enroulement tournent dans la même direction, alors que l'ensemble suivant de conducteurs adjacents par rapport à l'axe tourne dans le sens opposé. Le résultat est un modèle de déformation en zigzag assuré par les conducteurs d'enroulement.

Il est donc nécessaire que la force de compression axiale maximale F_c^* qui agit sur l'enroulement soit inférieure à la force critique F_{tilt}^* qui déclenche un effondrement de conducteur par déversement latéral. Il doit également exister une marge de sécurité adéquate entre les deux.

On doit distinguer deux cas:

- enroulements de type disque, en hélice ou couches ayant des conducteurs composés de conducteurs transposés de manière continue (CTCs) renforcés par résine, il n'y a aucune contrainte de conception en ce qui concerne la force de compression axiale maximale en relation avec le déversement latéral. En fait, de tels conducteurs sont extrêmement résistants au déversement latéral, indépendamment du degré de dureté du matériau cuivre. Aucun contrôle n'est donc demandé.
- enroulements type disque, en hélice ou en couche ayant des conducteurs composés de conducteurs transposés de manière continue (CTCs) normaux ou non collés, il convient de calculer la force critique correspondante pour le F_{tilt}^* de déversement latéral sur la base de l'équation suivante:

$$F_{\text{tilt}}^* = K_1 E_0 \frac{n b_{\text{eq}} h^2}{D_{\text{mw}}} K_2 \frac{n X b_{\text{eq}}^3}{h} \frac{D_{\text{mw}}}{\Sigma \frac{c z}{D_{\text{mw}}}} K_3 K_4 10^3 \quad (\text{kN})$$

où

E_0 est le module de Young du cuivre = de $1,1 \cdot 10^5$ MPa;

n est le nombre de brins ou de conducteurs doubles dans la largeur radiale de la spire, en cas de conducteurs plats,

et est égal à $g \cdot (f - 1)/2$ dans le cas d'un conducteur transposé de manière continue.

où

g est le nombre de conducteurs transposé de manière continue dans la largeur radiale d'une spire;

f est le nombre de brins dans un CTC simple;

b_{eq} est la largeur radiale du brin dans le cas de conducteurs plat (mm);

est deux fois la largeur radiale d'un conducteur simple dans le cas de conducteurs doubles reliés par résine (mm);

est la largeur radiale d'un brin unique dans le cas d'un conducteur transposé de manière continue non relié (mm);

D_{mw} est le diamètre moyen de l'enroulement (en mm);

$X = \frac{c z}{\Sigma D_{\text{mw}}}$ est le facteur de couverture de cale pour enroulements de type disques et en hélice

où

c est la largeur circonférentielle des cales radiales (dans la direction circulaire) (en mm);

z est le nombre de cales radiales sur la circonférence;

$X =$ 1,0 pour les enroulements de type couche;

h est la hauteur de brin si le conducteur est un conducteur plat (en mm);

est égal à deux fois la hauteur d'un brin unifilaire s'il y a deux brins parallèles dans la direction axiale qui sont recouverts ensemble du papier de guipage (en mm);

est la hauteur d'un brin unifilaire si le conducteur est un conducteur transposé de manière continue CTC (mm);

est la constante pour la forme de conducteur;

= 1,0 pour un rayon de courbure d'un brin normal;

= 0,85 pour les brins ou les conducteurs entièrement arrondis;

K_1 est le coefficient pour le terme de torsion = 0,5;

K_2 est le coefficient pour le terme de transposition (N/mm³);

= 45 pour les conducteurs simples et doubles;

= 22 pour le conducteur transposé de manière continue non relié;

K_3 est le facteur pris en compte pour le degré de dureté du cuivre (voir Tableau A.3);

K_4 est le facteur pris en compte pour le basculement dynamique (voir Tableau A.4).

Tableau A.3 — Valeurs pour le facteur K_3

$R_{p0,2}$ MPa	K_3
Recuit	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
>230	1,4

Tableau A.4 — Valeurs pour le facteur K_4

Type de conducteur	Type d'enroulement	
	A disque, en hélice	En couche
Brin ou double	1,2	1,1
Conducteur transposé de manière continue non collé	1,7	1,3

On doit noter que l'équation ci-dessus pour calculer F_{tilt}^* renvoie au basculement dynamique et est basée sur une approche semi-empirique. La valeur critique réelle de la force dépend également de la construction de l'enroulement, de la nature et de l'épaisseur de l'isolation du conducteur.

NOTE 3 Il convient que la pression P qu'il est nécessaire d'appliquer sur les zones de recouvrement des tôles afin de tenir le circuit magnétique soit d'au moins:

$$P \geq \frac{F^* 10^3}{2 S a t h} \quad [\text{MPa}]$$

où

F^* est la force de court-circuit (valeur de crête) exercée sur la culasse d'extrémité (kN);

S est la zone de recouvrement arrondie des tôles magnétiques (mm²);

a est le facteur de frottement (p.u.);

t est le nombre de feuilles du noyau magnétique par unité de hauteur (mm⁻¹);

h est la hauteur du circuit magnétique (mm).

Annexe B (informative)

Définition de transformateur similaire

Un transformateur est considéré similaire à un autre transformateur pris comme référence s'il a en commun avec ce dernier les caractéristiques suivantes:

- le même type d'application, par exemple transformateur élévateur de production, transformateur de distribution ou transformateur d'interconnexion;
 - conception identique, par exemple de type sec, de type immergé dans l'huile, de type colonne avec enroulements concentriques, de type alterné, de type cuirassé, à enroulements cylindriques ou non;
 - même disposition et arrangement géométrique des principaux enroulements;
 - même type de conducteurs d'enroulement, par exemple, aluminium, alliage d'aluminium, cuivre recuit ou cuivre durci, bande métallique, fil, conducteur méplat, conducteurs transposés en continu et renforcés époxy, si utilisé;
 - même type d'enroulements principaux, par exemple, en hélice, à disque, de type couche, à galettes alternées;
 - puissance absorbée en court-circuit (puissance assignée/ par unité d'impédance de court-circuit) entre 30 % et 130 % de celle du transformateur de référence;
 - forces axiales et contraintes d'enroulement se produisant en court-circuit n'excédant pas 120 % de celles du transformateur de référence;
 - même procédé de fabrication;
 - même disposition de serrage et de support d'enroulement.
-

Annexe ZA (normative)

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

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

NOTE Dans le cas où une publication internationale est modifiée par des modifications communes, indiqué par (mod), l'EN / le HD correspondant(e) s'applique.

<u>Publication</u>	<u>Année</u>	<u>Titre</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Année</u>
CEI 60076-1 (mod) + corr. juin + A1	1993 1997 1999	Transformateurs de puissance - Partie 1: Généralités	EN 60076-1 + A1 + A11 + A12	1997 2000 1997 2002
CEI 60076-3 + corr. décembre	2000 2000	Transformateurs de puissance - Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air	EN 60076-3	2001
CEI 60076-8	1997	Transformateurs de puissance - Partie 8: Guide d'application	-	-
CEI 60076-11	2004	Transformateurs de puissance - Partie 11: Transformateurs de type sec	EN 60076-11	2004