

norme européenne

NF EN 60076-2

Juin 2000

norme française

Indice de classement : C 52-176-2

ICS 29.180

Transformateurs de puissance

Partie 2 : Echauffement

E : Power transformers - Part 2: Temperature rise

D : Transformatoren - Teil 2 :Übertemperatur

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'afnor le 20 mai 2000, pour prendre effet à compter du 20 juin 2000.

Remplace la partie 2 de la norme homologuée NF C 52-100 d'août 1990.

Correspondance La présente norme européenne EN 60076-2 :1997 a le statut d'une norme française. Elle reproduit la publication CEI 60076-2 :1993 et son corrigendum 1993

Analyse Ce document identifie les transformateurs en fonction de leurs modes de refroidissement et définit les limites d'échauffement ainsi que leurs méthodes de mesure ; il s'applique aux transformateurs définis par le domaine d'application de la norme NF EN 60076-1.

Descripteurs Transformateur de puissance, échauffement, mode de refroidissement, limite d'échauffement, essai d'échauffement.

Modifications Par rapport à la précédente édition, adoption de la norme européenne EN 60076-2 ainsi que le corrigendum 1993.

Corrections



AVANT-PROPOS NATIONAL

Ce document constitue la version française complète de la norme européenne EN 60076-2:1997 en reprenant le texte de la publication CEI 76-2 (deuxième édition 1993).

Les modifications du CENELEC sont signalées par un trait vertical dans la marge gauche du texte.

Après consultation de son Conseil d'Administration et enquête probatoire, l'Union technique de l'Électricité et de la communication a voté favorablement au CENELEC sur le projet de EN 60076-2, en décembre 1996.

**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 76-1 (mod.)	1993	EN 600076-1	1997	NF EN 60076-1	1997
CEI 85	1984	HD 566 S	1990	Indice C 52-176-1	
CEI 279	1969	-		NF C 26-206	1985
CEI 354	1991	-		-	
CEI 606		-		-	
CEI 726 (mod.)	1982	HD 464 S1	1988	NF C 52-726	1993
		+A2	1991	+ A1	1997
		+A3	1992		
		+A4	1995		
CEI 905	1987	-		-	
ISO 2592	1973	EN 22592	1993	NF EN 22592	1994
				Indice T 60-118	
<i>Note : Les documents de la classe C sont en vente à l'Union technique de l'Électricité et de la Communication - BP 23 - 92262 Fontenay-aux-Roses cedex - Tél. : 01 40 93 62 00 ainsi qu'au service diffusion de l'Association française de normalisation - Tour Europe - cedex 7 - 92059 Paris la défense - Tél. : 01 42 91 55 55.</i>					
<i>Les documents CEI sont en vente à l'UTE.</i>					

**NORME EUROPEENNE
EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD**

EN 60076-2

Mai 1997

ICS 29.180

Remplace HD 398.2 S1:1980 et son amendement

Descripteurs: Transformateur de puissance, échauffement, mode de refroidissement, limite d'échauffement, essai d'échauffement

Version française

**Transformateurs de puissance
Partie 2: Echauffement
(CEI 76-2:1993, modifiée)**

Leistungstransformatoren
Teil 2: Übertemperaturen
(IEC 76-2:1993, modifiziert)

Power transformers
Part 2: Temperature rise
(IEC 76-2:1993, modified)

La présente norme européenne a été adoptée par le CENELEC le 1997-03-11. Les membres du CENELEC sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la norme européenne.

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

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

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

CENELEC

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

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

© 1997 CENELEC - Tous droits d'exploitation sous quelque forme et de quelque manière que ce soit réservés dans le monde entier aux membres du CENELEC.

Réf. n° EN 60076-2:1997

Avant-propos

Le texte de la Norme internationale CEI 76-2:1993, préparé par le CE 14 de la CEI, Transformateurs de puissance, ainsi que les modifications communes préparées par le comité technique du CENELEC TC 14 a été soumis au vote formel et a été accepté par le CENELEC comme EN 60076-2 le 1997-03-11.

La présente norme européenne remplace le HD 398.2 S1:1980 et son amendement A1:1988.

Les différences techniques ont trait principalement à certaines mesures (par exemple: flexibilité dans des circonstances données) pour aligner la norme sur les exigences actuelles des spécifications des utilisateurs.

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) 1997-09-01
- date limite à laquelle les normes nationales
conflictuelles doivent être annulées (dow) 1997-09-01

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

L'annexe ZA a été ajoutée par le CENELEC.

SOMMAIRE

Pages

Articles

1	Domaine d'application	4
2	Références normatives	4
3	Symboles de désignation selon le mode de refroidissement.....	4
4	Limites d'échauffement	6
4.1	Généralités	6
4.2	Limites normales d'échauffement à puissance assignée en régime permanent .	6
4.3	Spécifications modifiées du fait de conditions de service anormales	8
4.4	Echauffement durant un cycle de charge spécifié	9
5	Essai d'échauffement	9
5.1	Généralités	9
5.2	Méthodes d'essais pour la détermination des échauffements	10
5.3	Détermination des températures d'huile.....	12
5.4	Détermination de la température moyenne des enroulements	13
5.5	Détermination de la température de l'enroulement avant coupure de l'alimentation.....	14
5.6	Corrections	14
	Annexe A	16
	Annexe B	18
	Annexe C	22
	Annexe ZA	29

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Partie 2: Echauffement

1 Domaine d'application

La présente partie de la Norme internationale CEI 76 identifie les transformateurs en fonction de leurs modes de refroidissement, définit les limites d'échauffement et présente en détail les méthodes d'essais pour les mesures des échauffements. Elle s'applique aux transformateurs définis par le domaine d'application de la CEI 76-1.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 76. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 76 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 76-1:	1993	<i>Transformateurs de puissance — Partie 1: Généralités</i>
CEI 85:	1984	<i>Evaluation et classification thermiques de l'isolation électrique</i>
CEI 279:	1969	<i>Mesure de la résistance des enroulements d'une machine à courant alternatif en fonctionnement sous tension alternative</i>
CEI 354:	1991	<i>Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile</i>
CEI 606:		<i>Guide d'application pour les transformateurs de puissance</i>
CEI 726:	1982	<i>Transformateurs de puissance de type sec</i>
CEI 905:	1987	<i>Guide de charge pour transformateurs de puissance du type sec</i>
ISO 2592	1973	<i>Produits pétroliers — Détermination des points d'éclair et de feu — Méthode Cleveland en vase ouvert</i>

3 Symboles de désignation selon le mode de refroidissement

Les transformateurs doivent être désignés selon le mode de refroidissement utilisé. Pour les transformateurs immergés dans l'huile, cette désignation est réalisée par un code à quatre lettres défini ci-dessous. Les codes correspondants pour les transformateurs du type sec sont donnés dans la CEI 726.

Première lettre: Fluide de refroidissement interne en contact avec les enroulements:

- O huile minérale ou liquide isolant de synthèse de point de feu* $\leq 300^{\circ}\text{C}$;
- K liquide isolant avec point de feu* $> 300^{\circ}\text{C}$;
- L liquide isolant à point de feu non mesurable.

Deuxième lettre: Mode de circulation du fluide de refroidissement interne:

- N circulation *naturelle* par thermosiphon à travers le système de refroidissement et les enroulements;
- F circulation *forcée* à travers le système de refroidissement, circulation par thermosiphon dans les enroulements;
- D circulation forcée à travers le système de refroidissement et dirigée du système de refroidissement jusqu'aux enroulements principaux au moins

Troisième lettre: Fluide de refroidissement externe:

- A air ;
- W eau.

Quatrième lettre: Mode de circulation du fluide de refroidissement externe:

- N convection naturelle;
- F circulation forcée (ventilateurs, pompes).

NOTE Dans un transformateur désigné comme ayant une circulation d'huile forcée et dirigée (deuxième lettre du code D), le débit d'huile à travers les enroulements principaux est déterminé par les pompes et n'est, en principe, pas déterminé par la charge. Une faible partie du flux d'huile venant du dispositif de refroidissement peut être dirigée en dérivation contrôlée pour assurer le refroidissement du circuit magnétique et des autres éléments extérieurs aux enroulements principaux. Les enroulements de réglage et/ou les autres enroulements ayant une puissance relativement faible peuvent aussi avoir une circulation non dirigée d'huile en dérivation.

Dans un transformateur avec refroidissement forcé non dirigé, au contraire (deuxième lettre du code F), le débit d'huile à travers tous les enroulements est variable avec la charge et n'est pas directement lié au débit traversant la pompe de l'équipement de refroidissement.

Un transformateur peut être spécifié avec des variantes de modes de refroidissement. La spécification et la plaque signalétique doivent alors comporter l'information, sur les niveaux de puissance pour lesquels le transformateur respecte les limitations d'échauffement lorsque chaque variante de refroidissement est utilisée, voir 7.1 m) de la CEI 76-1. Le niveau de puissance dans la variante ayant la plus grande capacité de refroidissement est la puissance assignée du transformateur (ou d'un enroulement individuel d'un transformateur à

* Méthode d'essai "coupe ouverte Cleveland" selon l'ISO 2592

enroulements multiples, sauf accord contraire entre conducteur et acheteur, voir 4.1 de la CEI 76-1). Les variantes sont par convention énumérées par ordre croissant de capacité de refroidissement.

Exemple:

ONAN/ONAF. Le transformateur a un jeu de ventilateurs qui peuvent être mis en service comme désiré à charge élevée. La circulation de l'huile n'est assurée que par effet de thermosiphon dans les deux cas.

ONAN/OFAF. Le transformateur a un dispositif de refroidissement avec pompes et ventilateurs mais est aussi spécifié avec une capacité de puissance réduite en refroidissement naturel (par exemple, en cas de manque de puissance auxiliaire).

4 Limites d'échauffement

4.1 Généralités

Les valeurs limites d'échauffement des transformateurs sont spécifiées selon des options différentes.

- Un jeu de spécifications s'applique qui se réfère à la puissance assignée en régime permanent. Ces spécifications sont données en 4.2.
- Lorsque cela est explicitement spécifié, un jeu de spécifications additionnel est imposé, qui se réfère à un cycle de charge prescrit. Cette procédure est décrite en 4.4. Elle s'applique essentiellement aux transformateurs de grande puissance pour lesquels les possibilités de charge en secours méritent une attention particulière, et ne devrait pas être normalement applicable pour les transformateurs normalisés de petite et moyenne puissance.

Il est admis dans cette partie de la CEI 76 que les températures de service des différentes parties du transformateur peuvent chacune être définies comme la somme d'une température du fluide de refroidissement (air ambiant ou eau de refroidissement) et d'un échauffement de cette partie du transformateur.

La température du fluide de refroidissement et l'altitude (c'est-à-dire la masse volumique de l'air de refroidissement) sont caractéristiques du site de l'installation. Lorsque les conditions normales de service sur ces aspects prédominent, voir 1.2 de la CEI 76-1, alors les valeurs normales d'échauffement du transformateur déterminent les températures admissibles en service.

Les valeurs d'échauffement sont caractéristiques du transformateur et font l'objet des garanties et des essais aux conditions spécifiées. Les limites d'échauffement normales s'appliquent, à moins que l'appel d'offre et le contrat n'indiquent «conditions spéciales de service». Dans ces cas les limites d'échauffement doivent être modifiées comme cela est indiqué en 4.3.

Des essais supplémentaires d'échauffement, ayant fait l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur au moment de la commande, peuvent être réalisés sur des transformateurs ayant des valeurs assignées garanties relatives à différentes conditions de refroidissement, par exemple ONAN/ONAF, pour vérifier l'efficacité des dispositions de refroidissement autres.

Aucune tolérance positive n'est admise sur les limites d'échauffement.

4.2 Limites normales d'échauffement à puissance assignée en régime permanent

Quand un transformateur a un enroulement avec des prises de réglage, ayant une plage de réglage excédant $\pm 5\%$, alors les limites d'échauffement doivent s'appliquer pour chaque prise

à la puissance de prise, à la tension de prise et au courant de prise appropriée, voir 5.6 de la CEI 76-1. Les pertes dues à la charge sont différentes pour des prises différentes et parfois il en est de même pour les pertes à vide, à savoir dans une plage de réglage où un réglage à flux variable est spécifié.

Si un essai d'échauffement est à faire sur un tel transformateur, il sera fait sur «la prise ayant le plus fort courant», sauf spécification contraire, voir 5.3 dans la CEI 76-1.

NOTE - Dans un transformateur à enroulements séparés, la prise avec le courant le plus élevé est, normalement, la prise qui a les pertes dues à la charge les plus élevées.

Dans un autotransformateur avec prises, le choix de la prise pour l'essai d'échauffement dépendra de la façon selon laquelle ces prises sont disposées.

Pour un transformateur à plus de deux enroulements, les spécifications d'échauffement s'appliquent à la puissance assignée dans chaque enroulement simultanément si la puissance assignée d'un enroulement est égale à la somme des puissances assignées des autres enroulements. Si ce n'est pas le cas, une ou plusieurs combinaisons particulières de charge devront être choisies et spécifiées pour l'essai d'échauffement, voir 5.2.3.

Dans les transformateurs avec disposition concentrique des enroulements, deux enroulements distincts ou plus peuvent être disposés les uns au-dessus des autres. Dans ce cas la température limite d'enroulement doit s'appliquer à la moyenne des mesures des enroulements superposés s'ils sont de même dimension et de même puissance. S'ils ne le sont pas, le mode d'évaluation doit faire l'objet d'un accord.

Les limites d'échauffement données ci-dessous sont valables pour les transformateurs à isolation solide définie comme «Classe A» selon la CEI 85 et immergés dans l'huile minérale ou un liquide synthétique dont le point de feu n'est pas supérieur à 300 °C (première lettre du code: O).

Les limites d'échauffement des transformateurs qui ont un système d'isolation plus résistant à la température et/ou qui sont immergés dans un liquide moins inflammable (lettre du code K ou L) doivent faire l'objet d'un accord.

Les limites d'échauffement pour les transformateurs du type sec avec divers types d'isolation sont données dans la norme CEI 726.

Les limites d'échauffement des transformateurs immergés dans l'huile suivantes (lettre du code O) se réfèrent à un régime établi à la puissance assignée en régime permanent. Elles ne sont valables que lorsque les conditions normales de service en ce qui concerne le refroidissement s'appliquent, voir 4.3.1 ci-dessous.

- Echauffement de l'huile au sommet, voir 5.3.1 60 K

Echauffement moyen des enroulements (mesuré par variation de résistance - voir 5.4)

- Pour transformateurs désignés en tant que ON.. ou OF ... 65 K

- Pour transformateurs désignés en tant que OD... 70 K

Aucune limite en valeur numérique n'est spécifiée pour l'échauffement du noyau magnétique, des connexions électriques extérieures à l'enroulement ou de pièces structurelles à l'intérieur de la cuve. Cependant c'est une évidence que de telles pièces ne doivent pas atteindre des températures susceptibles d'endommager les pièces adjacentes ou de provoquer un vieillissement anormal de l'huile. Pour les transformateurs de grande puissance, cela peut être démontré par un essai spécial, voir l'annexe B.

4.3 Spécifications modifiées du fait de conditions de service anormales

Si les conditions de service sur le site d'installation prévu ne tombent pas dans les limites des «conditions normales de service», alors les limites d'échauffement du transformateur doivent être modifiées en conséquence.

Les règles pour les transformateurs secs sont données en 2.2 de la CEI 726.

4.3.1 Transformateurs immergés dans l'huile à refroidissement par air

Les limites normales de température ambiante (-25°C à $+40^{\circ}\text{C}$) pour transformateurs de puissance sont données en 1.2 de la CEI 76-1. En ce qui concerne le refroidissement de transformateurs à refroidissement par air, il convient que les conditions de température sur le site d'installation prévu n'excèdent jamais, ni:

- + 30°C en moyenne mensuelle du mois le plus chaud;
- + 20°C en moyenne annuelle.

Si les conditions de température sur le site dépassent une de ces limites, les limites spécifiées d'échauffement du transformateur doivent toutes être réduites de la même valeur que le dépassement. Les valeurs doivent être arrondies au nombre entier de degrés le plus proche.

NOTE Les températures moyennes sont à déduire des données météorologiques comme suit (définition 3.12 de la CEI 76-1).

Température moyenne mensuelle:

demi-somme de la moyenne des maxima journaliers et des minima journaliers pour un mois particulier sur plusieurs années;

Température moyenne annuelle:

un douzième de la somme des températures moyennes mensuelles.

Si le site d'installation est situé à plus de 1 000 m au-dessus du niveau de la mer, mais que l'usine de production ne l'est pas, alors l'échauffement limite durant les essais en usine doit être réduit comme suit.

Pour un transformateur à refroidissement naturel (..AN) la limite d'échauffement moyen des enroulements doit être réduite de 1 K pour chaque intervalle de 400 m par lesquels l'altitude de l'installation dépasse 1 000 m.

Pour un transformateur à refroidissement forcé (. . AF) la réduction doit être de 1 K tous les 250 m.

La correction inverse correspondante pourra être appliquée dans les cas où l'altitude de l'usine est supérieure à 1 000 m et l'altitude de l'installation est inférieure à 1 000 m.

Toute correction d'altitude doit être arrondie au nombre entier de degré le plus proche.

Quand les limites d'échauffement spécifiées d'un transformateur ont été réduites, soit à cause d'une température élevée du fluide de refroidissement externe, ou à cause de l'altitude élevée d'installation, ceci sera indiqué sur la plaque signalétique, voir 7.2 dans la CEI 76-1.

NOTE Quand des transformateurs normalisés doivent être utilisés à des altitudes élevées, une valeur de puissance réduite peut être calculée, qui du point de vue du refroidissement et de l'échauffement correspond au service à la puissance assignée dans les conditions normales ambiantes.

4.3.2 Transformateurs immergés dans l'huile à refroidissement par eau

La température normale de l'eau de refroidissement, selon 2.1 de la CEI 76-1, ne dépasse pas + 25 °C. Si l'eau de refroidissement dépasse cette limite, la limite d'échauffement spécifiée pour ce transformateur doit être réduite de la même valeur que le dépassement. Les chiffres doivent être arrondis au nombre entier de degrés le plus proche.

L'influence d'une température ambiante différente ou de l'altitude sur l'air de refroidissement de la cuve est négligée.

4.4 Echauffement durant un cycle de charge spécifié

Si des garanties et/ou un essai spécial concernant un cycle de charge doit être spécifié, les paramètres suivants seront à préciser:

- les conditions de température initiale du transformateur, soit la température ambiante soit celle-ci avec un échauffement complémentaire en régime établi correspondant à une fraction spécifiée du courant assigné «charge préliminaire»;
- la valeur (constante) du courant d'essai exprimée en multiple du courant assigné – et sa durée ;
- la valeur maximum d'échauffement admissible à la fin de l'essai pour l'huile au sommet et pour les enroulements (valeur moyenne mesurée par variation de résistance). Cette spécification est optionnelle. L'essai peut être effectué pour information seulement, sans qu'aucune limite ne soit convenue au préalable;
- toutes observations spéciales ou mesures à réaliser, c'est-à-dire les mesures directes de température de point chaud, l'imagerie thermique de l'échauffement de la paroi de cuve et les limitations possibles en relation avec celles-ci.

Pour des recommandations complémentaires et une discussion concernant l'étude des cycles de charge – en particulier mesures et évaluation, voir l'article B.4 de l'annexe B.

5 Essai d'échauffement

5.1 Généralités

Cet article décrit les procédures de détermination des valeurs de température et d'échauffement durant les essais en usine et aussi les méthodes de remplacement d'un régime de charge en service par des procédures d'essai équivalentes.

Il donne des spécifications valables lorsqu'elles sont applicables, pour l'essai des transformateurs immergés dans l'huile et des transformateurs du type sec.

Durant l'essai d'échauffement, le transformateur doit être équipé de ses dispositifs de protection (par exemple le relais Buchholz sur un transformateur immergé dans l'huile). Toute indication pendant l'essai doit être notée.

5.1.1 Température de l'air de refroidissement

Il conviendra de prendre des précautions pour réduire au minimum les variations de température de l'air de refroidissement, en particulier durant la dernière partie de la période d'essai lorsqu'on approche du régime établi. Des variations rapides des lectures dues aux turbulences seront évitées par des moyens adéquats tels que des ponts thermiques, à constante de temps thermique élevée appropriés pour les capteurs de température. Au moins trois capteurs doivent être utilisés. La moyenne de leurs indications doit être utilisée pour estimer la valeur de l'essai. Les lectures seront faites à intervalles réguliers ou un enregistrement automatique en continu pourra être utilisé.

Les capteurs doivent être répartis autour de la cuve, à 1 m ou 2 m de la cuve ou de la surface de refroidissement et être protégés du rayonnement thermique direct. Autour d'un transformateur à refroidissement naturel les capteurs doivent être placés à mi-hauteur environ de la surface de refroidissement.

Pour un transformateur à refroidissement par ventilation forcée, les capteurs doivent être placés de façon à enregistrer la véritable température de l'air pris par les réfrigérants. On prendra soin d'éviter une possible re-circulation de l'air chaud. Il convient de placer l'objet en essai, de façon à minimiser les obstacles à la circulation de l'air et de façon à fournir des conditions ambiantes stables.

5.1.2 Température de l'eau de refroidissement

Il y a lieu de prendre des précautions pour minimiser les variations de température de l'eau de refroidissement durant la période d'essais. La température est mesurée à l'entrée du réfrigérant. Les lectures de température et de débit d'eau devront être faites à des intervalles réguliers ou un enregistrement automatique en continu pourra être utilisé.

5.2 Méthodes d'essais pour la détermination des échauffements

5.2.1 Généralités

Pour des raisons pratiques, la méthode normalisée de la détermination, en usine, de l'échauffement en régime établi de transformateurs immergés dans l'huile équivaut à l'essai en court-circuit selon 5.2.2 ci-dessous.

En variante, il peut être convenu dans des cas particuliers, de réaliser un essai avec approximativement la tension et le courant assignés par raccordement à une charge convenable. Cela est surtout applicable à des transformateurs de faible puissance assignée.

Une méthode d'opposition peut aussi être convenue. Dans cette méthode, deux transformateurs dont l'un est le transformateur en essai, sont connectés en parallèle et alimentés à la tension assignée du transformateur en essais. Le courant assigné est mis en circulation dans le transformateur en essai au moyen de rapports de transformateurs différents ou à l'aide d'une injection de tension.

Les procédures applicables aux transformateurs du type sec sont décrites dans la CEI 726.

5.2.2 Essai par méthode de court-circuit jusqu'au régime établi

Durant cet essai le transformateur n'est pas soumis à la tension assignée et au courant assigné simultanément, mais aux pertes totales calculées, préalablement obtenues par deux déterminations séparées des pertes, c'est-à-dire les pertes dues à la charge à la température de référence et les pertes à vide, voir 10.4 et 10.5 de la CEI 76-1.

Le but de l'essai est double:

- établir l'échauffement de l'huile au sommet en régime établi avec dissipation des pertes totales;
- établir l'échauffement moyen des enroulements au courant assigné, compte tenu de l'échauffement de l'huile au sommet établi comme ci-dessus

Cela est réalisé en deux étapes.

a) Injection des pertes totales

En premier lieu les échauffements de l'huile au sommet et de l'huile moyenne sont déterminés quand le transformateur est soumis à une tension d'essai telle que la puissance active mesurée est égale aux pertes totales du transformateur, voir 3.6, 10.4 et 10.5 de la CEI 76-1. Le courant d'essai excédera le courant assigné de la valeur nécessaire pour

produire un excédent de pertes égal aux pertes à vide et l'échauffement des enroulements sera accru de la valeur correspondante.

Les températures de l'huile et du fluide de refroidissement sont surveillées et l'essai est poursuivi jusqu'à ce qu'un échauffement de l'huile en régime établi soit atteint.

L'essai peut être terminé lorsque le taux de variation de l'échauffement de l'huile au sommet est tombé en dessous de 1 K par heure et est resté en dessous de ce seuil pendant une période de 3 h. Si des lectures discrètes ont été relevées à intervalles réguliers, la valeur moyenne de ces lectures durant la dernière heure est prise comme résultat de l'essai. Si un enregistrement automatique continu est utilisé la valeur moyenne durant la dernière heure est prise comme résultat.

NOTE . Si la constante de temps de l'échauffement de l'huile est inférieure à 3 h, l'erreur de troncature de cette procédure sera négligeable. D'autres variantes de règles de troncature sont discutées dans l'annexe C.

b) Injection du courant assigné

Quand l'échauffement de l'huile au sommet a été déterminé, l'essai doit continuer immédiatement avec un courant d'essai ramené au courant assigné pour la combinaison d'enroulement alimenté (pour un transformateur à enroulements multiples voir 5.2.3). Cette condition d'essais sera maintenue durant 1 h avec observation continue des températures de l'huile et du fluide de refroidissement.

A la fin de l'heure, les résistances des enroulements sont mesurées, soit après une déconnexion rapide de l'alimentation et des courts-circuits (voir 5.5 et les articles C.2 et C.3 de l'annexe C), soit sans coupure de l'alimentation au moyen de la méthode de superposition qui consiste à injecter dans les enroulements un courant continu de mesure de faible valeur superposé au courant de charge.

NOTE 1 – L'emploi d'un courant continu superposé pour la mesure de résistances d'enroulement est décrit dans la CEI 279.

Les valeurs de la température moyenne des deux enroulements sont déterminées à partir des résistances selon 5.4.

Durant l'heure au courant assigné la température de l'huile décroît. C'est pourquoi les valeurs mesurées de température d'enroulement doivent être augmentées de la même quantité que la température d'huile moyenne qui a chuté, à partir de la valeur exacte déterminée selon la procédure a) ci-dessus. La valeur corrigée de la température d'enroulement, diminuée de la température du fluide de refroidissement à la fin de la période d'injection des pertes totales, est l'échauffement moyen de l'enroulement.

NOTE 2 – En ce qui concerne le calcul de températures sous charge variable, il est opportun de considérer l'échauffement des enroulements comme la somme de deux termes: l'échauffement moyen de l'huile de la température du fluide de refroidissement externe, plus la différence entre la température moyenne de l'enroulement et la température moyenne de l'huile (voir 5.6 et les articles 8.2 et 6.3 dans l'annexe B).

Par accord mutuel, les deux phases de l'essai peuvent être combinées en une seule application d'une puissance donnant un niveau de pertes intermédiaire entre les pertes dues à la charge et les pertes totales. Les valeurs d'échauffement pour l'huile au sommet et pour les enroulements doivent alors être déterminées à l'aide des règles de correction de 5.6. La puissance appliquée durant l'essai doit cependant être telle que la valeur des pertes réelles soit au moins 80 % des pertes totales.

5.2.3 Variantes d'essais pour transformateurs spéciaux

Transformateur à deux enroulements avec plage de réglage supérieure à ± 5 %

Sauf spécification contraire, l'essai d'échauffement est réalisé avec le transformateur sur la «prise à courant maximal» (voir 5.3 de la CEI 76-1) et le courant correspondant à cette prise est utilisé durant la dernière partie de l'essai (voir 5.2.2 b)).

Les pertes totales à injecter durant la première partie de l'essai, voir 5.2.2 a), doivent être égales à la plus grande valeur des pertes totales apparaissant sur n'importe quelle prise (aux

grandeurs de prises correspondantes). Cette prise est souvent, mais pas toujours, la prise à courant maximal. Cette partie de l'essai détermine l'échauffement maximal de l'huile au sommet. Pour la détermination de l'échauffement maximal des enroulements au courant maximal de prise, la valeur d'échauffement de l'huile à utiliser dans l'évaluation doit correspondre aux pertes totales de cette prise. La valeur issue de la première partie de l'essai sera recalculée si elle a été obtenue avec d'autres données.

Transformateur à plus de deux enroulements

Pour la première partie de l'essai les pertes totales doivent être développées, correspondant à la puissance assignée (ou puissance de prise) dans tous les enroulements, si la puissance assignée d'un enroulement est égale à la somme des puissances assignées des autres enroulements.

Si ce n'est pas le cas, il y a des régimes de charge spécifiés avec des combinaisons différentes de charge de chaque enroulement individuel. Le cas qui correspondra aux pertes totales les plus élevées déterminera la puissance de l'essai pour la détermination de l'échauffement de l'huile.

Les valeurs d'échauffement de chaque enroulement individuel au-dessus de l'huile doivent être obtenues avec le courant assigné dans chaque enroulement.

- Dans la détermination de l'échauffement des enroulements par rapport à la température ambiante, l'échauffement de l'huile pour le cas de charge considéré sera recalculé à partir de l'essai avec application des pertes totales selon 5.6. Il en sera de même s'il y a lieu pour la détermination de l'échauffement de chaque enroulement par rapport à l'huile.

Un guide pour le re-calcul des pertes dans les transformateurs à plus de deux enroulements est donné dans la CEI 606.

L'injection des pertes totales pour la détermination de l'échauffement de l'huile peut être réalisée:

- soit de manière aussi proche que possible du cas de charge réel, en injectant un courant, correspondant aux pertes totales dans un enroulement, les autres étant simultanément court-circuités ou reliés à une impédance ;
- soit de manière approchée, en ne court-circuitant pas ou ne fermant pas certains enroulements ; c'est-à-dire que si un des enroulements a une puissance relativement faible et une faible contribution aux pertes totales du transformateur, il peut être accepté de le laisser ouvert et d'augmenter le courant dans les autres enroulements concernés jusqu'à ce que les pertes totales correctes soient obtenues.

Si aucune des méthodes ci-dessus ne peut être appliquée à pleine puissance, à cause des limitations des moyens d'essai, il peut être convenu de réaliser les essais avec des pertes réduites jusqu'à 80 % de la valeur correcte. La valeur de température mesurée doit alors être corrigée selon 5.6.

La règle normale sera que les modalités détaillées de l'essai d'échauffement pour un transformateur à plus de deux enroulements devraient être exposées et agréées dès le stade de l'offre.

5.3 Détermination des températures d'huile

5.3.1 Huile à la partie supérieure

La température de l'huile à la partie supérieure est déterminée par un ou plusieurs capteurs immergés dans l'huile au sommet de la cuve ou dans des doigts de gant dans le couvercle ou dans les tuyauteries supérieures allant de la cuve à des radiateurs ou réfrigérants séparés.

L'emploi de capteurs multiples est particulièrement important sur les transformateurs de grande puissance, et leurs indications doivent faire l'objet d'une moyenne pour arriver à une valeur représentative de la température.

NOTE : La température de l'huile peut être différente en divers endroits au sommet de la cuve, selon sa conception. Les mesures utilisant un doigt de gant sur le couvercle peuvent être perturbées par l'échauffement du couvercle dû aux courants de Foucault. Dans les transformateurs avec circulation forcée de l'huile vers l'équipement de réfrigération, il se fait un mélange de l'huile venant des enroulements avec l'huile dérivée, dans la cuve, qui peut ne pas être identique entre les diverses pièces de la cuve ou entre les diverses tuyauteries supérieures du circuit de refroidissement. Sur la signification de la température de l'huile au sommet dans les transformateurs à circulation forcée, voir plus loin l'annexe A.

5.3.2 Huile à la partie inférieure et huile moyenne

«Huile à la partie inférieure» est le terme qui signifie en fait la (température de) l'huile qui entre par la partie inférieure des enroulements. Pour des raisons pratiques, elle est considérée comme identique à la température de l'huile revenant des circuits de refroidissement vers la cuve. «L'huile moyenne» est un concept utilisé pour la correction de certains résultats d'essais d'échauffement, voir 5.2.2 et 5.6. Il est aussi utilisé dans le modèle mathématique de prédiction des températures en service à des charges spécifiques constantes ou variables, voir annexe B.

La température de l'huile à la partie inférieure est déterminée par des capteurs montés sur les tuyauteries principales de retour des réfrigérants ou radiateurs. Si plusieurs batteries de radiateurs de refroidissement sont montées, il convient d'utiliser plusieurs capteurs.

NOTE Le débit d'huile dans les tuyauteries principales de retour peut être turbulent, s'il est forcé par une pompe, ou laminaire essentiellement, si la circulation est naturelle à travers les radiateurs. Cela est important pour une détermination valable de la température de l'huile dans la tuyauterie principale.

La température de l'huile moyenne doit en principe être la température moyenne de l'huile de refroidissement dans les enroulements. Dans le but d'évaluation des essais, elle est conventionnellement prise comme la moyenne, entre la température de l'huile à la partie supérieure et à la partie inférieure, déterminées comme indiqué ci-dessus.

NOTES

1 Pour les transformateurs ONAN jusqu'à 2 500 kVA, avec cuves lisses ou à ondes ou à tubes individuels de refroidissement montés directement sur la cuve, l'échauffement moyen de l'huile au-dessus de la température de l'air ambiant peut être pris égale à 80 % de l'échauffement de l'huile au sommet.

2 Pour des buts autres qu'une évaluation des essais, la température moyenne de l'huile peut être déterminée différemment, voir l'annexe A.

5.4 Détermination de la température moyenne des enroulements

La température moyenne des enroulements est déterminée par mesure de la résistance des enroulements. Dans un transformateur triphasé, il convient d'effectuer la mesure de préférence sur la colonne milieu. Le rapport entre la valeur de résistance R_2 à la température θ_2 (degrés C) et R_1 à θ_1 est donné par:

$$\text{Cuivre : } \frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} \qquad \text{Aluminium : } \frac{R_2}{R_1} = \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_1}$$

Une mesure de référence (R_1 , θ_1) des résistances de tous les enroulements est faite lorsque le transformateur est à la température ambiante, en régime établi, voir 10.2.3 dans la CEI 76-1. Lorsque la résistance R_2 à une température différente est mesurée, cela donne la valeur de température suivante:

$$\text{Cuivre : } \theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235$$

$$\text{Aluminium : } \theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (225 + \theta_1) - 225$$

La température du fluide de refroidissement externe à l'instant de la coupure de l'alimentation est θ_a .

L'échauffement de l'enroulement est alors finalement:

$$\Delta\theta_w = \theta_2 - \theta_a$$

Quand la résistance d'enroulement est mesurée après ouverture de l'alimentation en puissance et la réalisation de la connexion de court-circuit, la valeur de résistance R_2 , immédiatement avant le déclenchement doit être déterminée selon 5.5.

5.5 Détermination de la température de l'enroulement avant coupure de l'alimentation

L'essai d'échauffement (voir 5.2.2) demande que la température moyenne de l'enroulement juste avant coupure soit déterminée. La méthode normalisée est la suivante:

Immédiatement après la coupure de l'alimentation de puissance et l'enlèvement de la connexion de court-circuit, un circuit de mesure en courant continu est raccordé aux bornes de chaque enroulement de phase à mesurer. L'enroulement a une constante de temps électrique élevée, L/R. C'est pourquoi des lectures précises ne sont obtenues qu'après un certain laps de temps. La résistance de l'enroulement varie avec le temps puisque l'enroulement se refroidit. Celle-ci doit être mesurée pendant un temps suffisant pour permettre l'extrapolation en remontant jusqu'à l'instant de la coupure.

L'annexe C donne des recommandations sur le détail d'exécution de la mesure et des variantes de la méthode qui peuvent être utilisées avantageusement dans des cas particuliers.

Dans le but d'obtenir des résultats aussi corrects que possible, il convient que les conditions de refroidissement soient le moins perturbées possible lorsque les mesures de résistance sont effectuées. Ce problème, en liaison avec les transformateurs immergés dans l'huile à refroidissement forcé, est examiné plus en détail dans l'annexe A.

5.6 Corrections

Si les valeurs spécifiées de puissance, ou de courant, n'ont pu être obtenues durant l'essai, les résultats d'essais doivent être corrigés selon les relations suivantes. Elles sont valables dans la plage de ± 20 % de part et d'autre de la valeur visée de puissance et de ± 10 % de la valeur visée du courant. Par accord elles peuvent être appliquées à une plage plus large: voir l'article B.2 de l'annexe B.

L'échauffement de l'huile au-dessus de la température ambiante obtenu durant l'essai est multiplié par :

$$\left[\frac{\text{pertes totales}}{\text{pertes de l'essai}} \right]^x$$

$x = 0,8$ pour les transformateurs de distribution (refroidissement naturel, puissance assignée maximale 2 500 kVA).

$x = 0,9$ pour les transformateurs de grande puissance refroidis par circulation naturelle d'huile.

$x = 1,0$ pour les transformateurs refroidis par circulation forcée ou dirigée d'huile.

L'échauffement moyen des enroulements au-dessus de la température moyenne de l'huile durant l'essai est multiplié par:

$$\left[\frac{\text{courant assigné}}{\text{courant d'essai}} \right]^y$$

$y = 1,6$ pour les transformateurs refroidis par circulation naturelle ou forcée d'huile.

$y = 2,0$ pour les transformateurs refroidis par circulation dirigée d'huile.

Annexe A **(informative)**

Note sur la température de l'huile dans les transformateurs à circulation forcée d'huile

Dans les transformateurs ON., la valeur en régime établi du débit de l'huile à travers les enroulements est en principe égale à la valeur du débit dans les radiateurs. En général, le même résultat est maintenu pour un véritable transformateur QD., ou seulement un faible débit de fuite ou d'écoulement contrôlé passe des réfrigérants dans le volume libre de la cuve. Les conditions sont différentes, d'autre part, dans les transformateurs OF.. avec un débit non dirigé à travers les enroulements.

Dans les transformateurs OF., la capacité totale de la pompe doit être suffisante pour assurer la valeur du débit maximal à travers les enroulements même lors de surcharges limitées. C'est pourquoi, à charge assignée et à charge partielle, il y a un considérable surplus de débit venant des réfrigérants qui est shunté à l'extérieur des enroulements dans la cuve. L'huile dérivée monte lentement, avec des températures inchangées, jusqu'au niveau où l'huile chaude venant au sommet des enroulements est éjectée.

- Ce courant d'huile chaude se mélange de façon turbulente avec celui plus froid de l'huile dérivée dans la cuve. Le volume compris entre le niveau de sortie des enroulements et le haut du couvercle est rempli par un mélange ayant une température relativement homogène, plus faible que la température de l'huile quittant le sommet des enroulements.

Les mesures normales de température de l'huile au sommet feront apparaître cette température d'huile mélangée. Si la mesure est utilisée pour déterminer la température moyenne de l'huile dans l'enroulement et la différence de température entre l'enroulement et l'huile, les résultats sont irréalistes et peuvent être cause d'erreurs s'ils sont utilisés pour des calculs de température de points chauds et des études de capacités de charge.

Une méthode utilisée en variante pour la détermination de la température de l'huile dans les enroulements est quelquefois appelée «huile moyenne extrapolée». Selon cette méthode, la surveillance de la température moyenne de l'enroulement de l'essai d'échauffement par mesure de la résistance après le déclenchement est poursuivie pendant un temps supplémentaire. Le taux de variation de la résistance décroît durant une période de 5 min à 20 min. Comme il n'y a plus de pertes dissipées dans les enroulements, leur température tend vers la température de l'huile environnante. Il a été alors supposé tacitement que la température moyenne de l'huile reste inchangée (ou chutant seulement lentement comme la température du volume entier de l'huile dans le transformateur). Cette supposition n'est pas justifiée. Pour certaines conceptions la méthode donne des résultats tout à fait irréalistes.

Il n'y a donc aucune méthode fiable et universelle pour déterminer la «température d'huile environnante» dans un transformateur OF., qui soit basée uniquement sur des mesures extérieures à l'enroulement.

En 5.5, il est mis en évidence que les conditions de refroidissement devraient être perturbées aussi peu que possible durant les mesures de température d'enroulement après déclenchement. Avant ouverture, le volume libre d'huile autour des enroulements est à la «température de l'huile à la partie inférieure». L'enroulement prend cette huile à cette température. Les réfrigérants reçoivent un mélange d'huile venant du volume au sommet de la cuve, au-dessus de la sortie d'huile des enroulements.

Après déconnexion de la puissance d'essai, la circulation de l'huile peut se poursuivre de diverses façons:

- Si la circulation par la pompe et la ventilation forcée sont maintenues, les réfrigérants continuent à recevoir le mélange d'huile et à renvoyer à la cuve de l'huile à la température de la partie inférieure. Successivement la température du mélange d'huile commence à descendre puis la température de l'huile à la partie inférieure suit par étape.
- Si la circulation par la pompe est maintenue mais que la ventilation forcée est arrêtée, les réfrigérants renvoient de l'huile presque à la température de la partie supérieure à la base de la cuve d'où elle remonte et se mélange avec l'huile libre autour des enroulements.
- Si, à la fois, les pompes et les ventilateurs sont arrêtés, l'enroulement continue à fournir de l'huile chaude au sommet de la cuve. Le niveau de démarcation entre huile à la partie supérieure et huile à la partie inférieure commence à descendre en dessous du niveau de sortie de l'huile hors des enroulements. Successivement cela modifie l'état thermique de l'huile dans la cuve à l'extérieur des enroulements et influence la circulation vers le haut de l'huile à l'intérieur des enroulements.

En général, il est préférable de garder à la fois pompes et ventilateurs en fonctionnement, mais les différences dans les résultats d'essais entre les diverses possibilités, ne sont, il est vrai, pas importantes si on les compare à la grande indétermination de la distribution des températures de l'huile dans l'enroulement, telle que décrite ci-dessus.

Annexe B **(informative)**

Charge transitoire – Modèle mathématique et essais

B.1 Généralités

Le résultat d'un essai d'échauffement au régime établi, selon 5.2, peut être utilisé pour une estimation de l'échauffement en régime établi à différentes charges et aussi pour une estimation de l'échauffement en régime transitoire (si les constantes de temps thermiques du transformateur sont connues).

Pour les transformateurs de petite et moyenne dimension, de telles estimations sont réalisées à l'aide d'un modèle mathématique conventionnel qui est décrit dans les articles B.2 et B.3 ci-dessous.

La validité de ce modèle pour chacun des transformateurs de grande puissance particuliers n'est, cependant, pas aussi certaine que pour les transformateurs de plus faible puissance. C'est pourquoi quand une étude de capacité de charge est à réaliser, par exemple, pour une charge de secours au-dessus de la puissance assignée, il est souhaitable d'obtenir des données propres au transformateur réel. Un moyen est de faire un essai spécial avec une surcharge transitoire au-delà de la puissance assignée. Les recommandations concernant une procédure appropriée d'essai et portant sur les mesures et les observations associées sont exposées dans l'article B.4.

B.2 Modèle mathématique de distribution de température dans un enroulement de transformateur immergé dans l'huile – Le concept de point chaud

L'huile de refroidissement entre par la partie inférieure des enroulements et est à la «température de l'huile de la partie inférieure». Elle monte à travers les enroulements et sa température est supposée s'élever linéairement avec la hauteur. Les pertes des enroulements sont transférées des enroulements vers l'huile tout au long de ceux-ci. Ce transfert de chaleur demande une chute de température entre les enroulements et l'huile environnante qui est supposée être la même à tous les niveaux en hauteur. Dans la représentation graphique, figure B.1, la température de l'enroulement et la température de l'huile apparaîtront donc comme deux lignes parallèles.

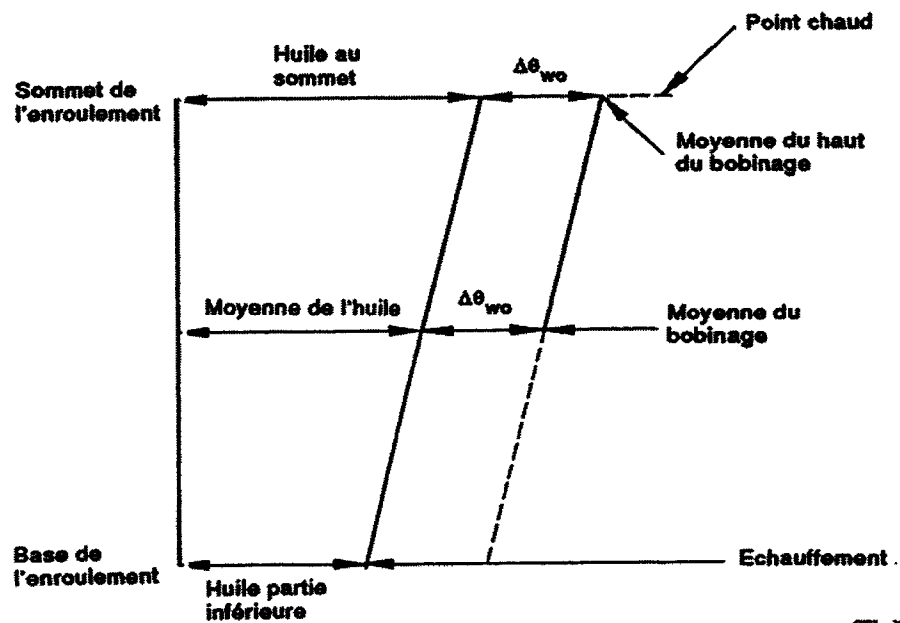


Figure B.1 – Modèle de distribution de température

La température maximale apparaissant en n'importe quel point du système d'isolation des enroulements est appelée la «température du point chaud». Ce paramètre est supposé représenter la limitation thermique due à la charge du transformateur. En règle générale, il convient que les autres pièces du transformateur, par exemple les traversées, les transformateurs de courant ou les changeurs de prises, soient choisis pour ne pas constituer une limitation plus basse de la capacité de charge du transformateur, voir 4.2 dans la CEI 76-1.

Vers l'extrémité supérieure des enroulements, il y a habituellement une concentration de pertes par courant de Foucault et les enroulements peuvent être munis d'une isolation électrique renforcée qui augmente l'isolation thermique. C'est pourquoi la différence réelle de température locale entre conducteur et huile est supposée être plus élevée par le «facteur de point chaud». Ce facteur est supposé être de 1,1 pour les transformateurs de distribution, à 1,3 pour les transformateurs de taille moyenne. Dans les grands transformateurs, il y a des différences considérables selon le mode de construction et il y a lieu de consulter le fabricant pour information à moins que des mesures réelles soient faites, par exemple selon le paragraphe B.4 ci-dessous.

La différence de température en régime établi entre les enroulements et l'huile, valeur moyenne le long de l'enroulement, est prise comme la différence entre [la température moyenne des enroulements mesurée par variation de résistance] et [la température moyenne de l'huile], voir 5.4 et 5.3 respectivement.

En régime établi, l'élévation de température du point chaud au-dessus de celle du fluide de refroidissement (air ou eau) est la somme de [l'élévation de température de l'huile au sommet par rapport à la température du fluide de refroidissement] et du produit par [le facteur de point chaud] de la [différence de température moyenne entre enroulement et huile].

Dans les transformateurs à circulation d'huile forcée non dirigée (code 0F..) les concepts de température d'huile au sommet et de température moyenne d'huile sont ambigus, lorsqu'ils sont basés seulement sur des mesures selon 5.3 ou 5.4 (voir annexe A).

Les valeurs mesurées d'échauffements en régime établi à une charge donnée sont utilisées pour calculer les échauffements correspondants à une autre charge au moyen des exposants donnés en 5.6. Ce sont des valeurs typiques, sujettes à variation avec le type de construction, et valables avec une certaine précision seulement dans une plage limitée de variation de charge. Le paragraphe 5.6 impose des limites assez étroites lorsqu'il s'agit d'évaluer des résultats d'essais soumis à des garanties. Pour des estimations demandant une moindre précision, les exposants peuvent, donner des résultats utiles sur de plus larges plages.

B3 Charge ou refroidissement variables. Constantes de temps thermiques

Quand la charge varie, ou que l'intensité d'un refroidissement forcé change, les températures des enroulements et de l'huile suivent avec un certain retard. Cela est représenté par convention par deux constantes de temps. Une de celles-ci est l'image de la capacité calorifique de l'ensemble du transformateur (dans laquelle la capacité calorifique de la masse d'huile joue un rôle prédominant). Elle est généralement de l'ordre de 1 h à 5 h, plus courte pour les gros transformateurs compacts à refroidissement forcé, et plus longue pour les transformateurs à refroidissement naturel. L'autre constante de temps est plus courte, de l'ordre de 5 min à 20 min, et représente comment varie la différence de température entre enroulement et huile en réponse à une variation des pertes dissipées.

En régime variable, l'échauffement de l'enroulement au-dessus de la température de l'air de refroidissement, ou de l'eau de refroidissement est exprimée comme la somme d'un échauffement de l'huile lorsqu'il s'agit d'une longue constante de temps et d'un échauffement de l'enroulement au-dessus de la température de l'huile, dans le cas d'une courte constante de temps. Les expressions mathématiques de la variation de température transitoire en fonction du temps sont données dans la CEI 354.

Les modèles mathématiques pour les transformateurs de type sec sont donnés dans la CEI 905.

Le besoin de conformité à la CEI 354, la CEI 905 ou à d'autres conditions de charge doit être déclaré par l'acheteur au moment de l'offre.

B.4 Recommandations pour essais d'échauffement avec charge transitoire

Comme indiqué en 4.4 de cette partie, il peut être convenu de faire des essais d'échauffement avec une charge excédant le courant assigné pour une durée limitée. Un tel essai peut par exemple, être prévu pour simuler une pointe de charge d'un jour de service d'urgence.

Un diagramme de charge recommandé pour l'essai consiste en un niveau de courant constant, convenablement exprimé en valeur réduite du courant assigné et d'une durée spécifiée au-delà de laquelle le courant d'essai est coupé. L'essai est fait en court-circuit de la même façon que l'essai en régime établi, à charge assignée. (La valeur du courant de charge spécifié peut avoir été choisie pour inclure une provision pour les pertes à vide.)

Les calculs portant sur les cycles de charge réels peuvent être faits, par exemple, selon la méthode donnée dans la CEI 354, afin d'établir une équivalence approchée à un cycle de charge d'essai simplifié en termes de températures maximales. Il sera spécifié si l'essai doit commencer avec l'ensemble du transformateur pratiquement à la température ambiante de la plate-forme d'essais ou dans un état thermique correspondant au régime établi d'un courant de charge préliminaire spécifié. Celui-ci, là encore, sera exprimé en fraction du courant assigné.

Il convient que les capteurs de température soient montés, au moins au même niveau que pour un essai d'échauffement en régime établi. Les températures de l'huile et des enroulements (valeur moyenne, par variation de résistance) seront déterminées par des méthodes normalisées à l'instant du déclenchement.

Des capteurs de température additionnels dans la cuve du transformateur peuvent être employés comme convenu. Si des capteurs sont placés dans les enroulements afin d'enregistrer la température du point chaud, il est conseillé d'utiliser plusieurs capteurs simultanément. En effet, l'emplacement précis du point le plus chaud n'est généralement pas connu initialement. Les températures locales peuvent varier d'un point à un autre et même avec le temps selon les variations erratiques du débit d'huile. Il faut reconnaître aussi que des températures locales, mesurées réellement dans un transformateur de grande puissance, peuvent s'écarter considérablement des valeurs estimées selon les modèles mathématiques conventionnels décrits en B.2 et dans la CEI 354. Jusqu'à ce qu'une expérience plus longue de mesures sur des constructions analogues soit disponible, les études doivent être considérées comme des recherches exploratoires. Une grande prudence est recommandée en ce qui concerne toute possibilité de spécification préalable des limites de la température.

La surveillance des températures locales de la cuve et des connexions électriques au moyen d'une caméra infrarouge peut être réalisée pour réduire le risque de détérioration pendant l'essai. La surveillance de la température des pièces métalliques de la structure interne au moyen de capteurs installés temporairement peut avoir le même but. L'analyse des gaz dissous dans l'huile avant et après l'essai est une méthode de diagnostic pour les surchauffements cachés (voir l'article C .4).

Annexe C (informative)

Techniques utilisées dans l'essai d'échauffement des transformateurs immergés dans l'huile

C.1 Interruption d'un essai en régime établi

Liste des symboles

θ	Température en $^{\circ}\text{C}$
$\theta(t)$	Température de l'huile, variation en fonction du temps (ce peut être l'huile au sommet ou l'huile moyenne)
θ_a	Température du fluide de refroidissement externe (air ambiant ou eau) supposée constante
$\Delta\theta$	Echauffement de l'huile au-dessus de
$\theta_u, \Delta\theta_u$	Dernières valeurs en régime établi
$\varepsilon(t)$	Ecart résiduel par rapport à la valeur en régime établi θ_u
T_0	Constante de temps pour variation exponentielle de l'échauffement de la masse d'huile
h	Intervalle de temps entre lecture
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	Trois lectures successives de température avec intervalle de temps h entre elles.

En principe, l'essai devrait continuer jusqu'au moment où on s'est assuré que l'échauffement (de l'huile) en régime établi est atteint. La température de l'air ambiant, ou la température de l'eau de refroidissement seront maintenues aussi constantes que possible. Il est supposé que la température de l'huile $\theta(t)$ tende vers sa valeur limite θ_u selon une fonction exponentielle de constante de temps T_0 . La température ambiante est θ_a . La dernière variation de l'échauffement d'huile est $\Delta\theta_u$.

$$\theta_u = \theta_a + \Delta\theta_u \quad (1)$$

$$\theta(t) = \theta_a + \Delta\theta_u(1 - e^{-t/T_0}) \quad (2)$$

La déviation restante à partir du régime établi est alors:

$$\varepsilon(t) = \theta_u - \theta(t) = \Delta\theta_u \times e^{-t/T_0} \quad (3)$$

Les valeurs de ε prises à des intervalles de temps égaux formeront une série géométrique. Cela justifie la méthode d'extrapolation graphique selon la figure C.1.

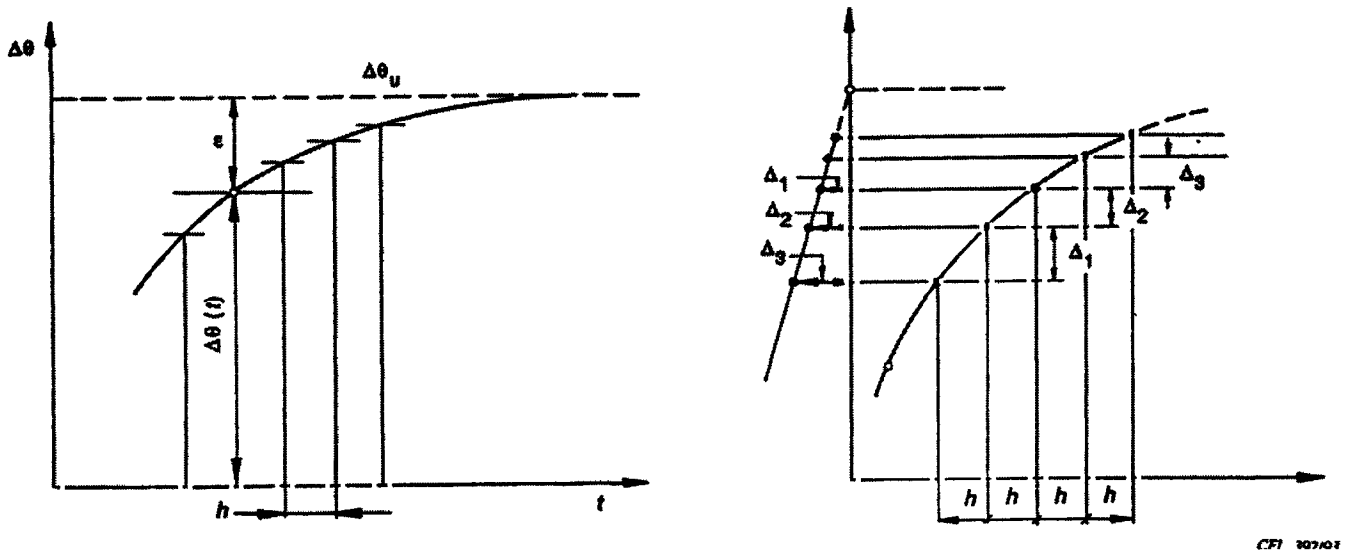


Figure C.1 – Extrapolation graphique pour l'échauffement limite

Pour chaque couple de points consécutifs sur la courbe, séparés par un intervalle de temps de h heures:

$$\Delta(\Delta\theta)_t = \varepsilon_{t-h} - \varepsilon_t = \varepsilon_t (e^{h/T_0} - 1) \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta(\Delta\theta)_t}{(e^{h/T_0} - 1)} \quad (4a)$$

A chaque instant suivant $(t + t_1)$:

$$\varepsilon_{(t+t_1)} = \varepsilon_t e^{-t_1/T_0} = \frac{\Delta(\Delta\theta)_t}{e^{t/T_0} (e^{h/T_0} - 1)} \quad (5)$$

Le critère conventionnel d'interruption est d'observer quand le taux de variation de la température devient inférieur à 1 K par heure. Par exemple:

$h = 1$ et $\Delta(\Delta\theta)_t < 1$ L'équation (4a) donne :

$$\varepsilon_t < (e^{1/T_0} - 1)^{-1}$$

L'essai devrait alors continuer pendant 3 h et pourra être interrompu. L'échauffement moyen durant la dernière heure est pris comme résultat de l'essai. Avec $T_0 = 3$ h cela conduit théoriquement à une erreur de troncature d'environ 1 K. Si la constante de temps est plus petite, l'erreur est plus faible et vice versa.

La constante de temps T_0 peut être estimée de diverses façons.

La formule suivante est basée sur les informations disponibles sur la plaque signalétique du transformateur:

$$T_o = \frac{5 \times [\text{masse totale}] + 15 \times [\text{masse de l'huile}] \times (\Delta\theta_u)}{60 [\text{pertes totales}]} \text{ heures} \quad (6)$$

où

masses en tonnes et pertes en kilowatts;

$\Delta\theta_u$ est l'échauffement final estimé de l'huile au sommet.

Il convient que la masse d'huile du conservateur soit retranchée de la masse totale de l'huile. Elle n'intervient pas dans les variations de température.

Une estimation expérimentale de la constante de temps au cours de l'essai peut être faite à partir de relevés successifs de température à des intervalles de temps égaux h .

Soit trois relevés successifs $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ et $\Delta\theta_3$, si la fonction exponentielle de l'équation (2) est une bonne approximation de la courbe de température, alors les incréments de température sont reliés par la relation suivante:

$$\frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2} = e^{h/T_o}$$

$$T_o = \frac{h}{\ln \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \quad (7)$$

Les relevés permettent aussi de prévoir l'échauffement final:

$$\Delta\theta_u = \frac{(\Delta\theta_2)^2 - \Delta\theta_1\Delta\theta_3}{2\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_3} \quad (8)$$

Des estimations successives doivent être faites et il convient qu'elles convergent. Dans le but d'éviter des erreurs importantes numériques erratiques, l'intervalle de temps h devrait être approximativement T_o et $\Delta\theta_3/\Delta\theta_u$ devrait n'être pas inférieure à 0,95.

Une valeur plus précise de l'échauffement en régime établi est obtenue par extrapolation par la méthode des moindres carrés de tous les points mesurés au-dessus de 60 % environ de $\Delta\theta_u$ ($\Delta\theta_u$ estimé par la méthode des trois points).

Une expression numérique différente de θ_u est:

$$\Delta\theta_u = \Delta\theta_2 + \frac{\sqrt{(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1)(\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2)}}{\ln \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \quad (9)$$

C.2 Procédure de mesure de la résistance d'enroulement après déclenchement

Le paragraphe 5.5 de cette partie de la CEI 76 indique que la température de l'enroulement à la fin de l'essai en régime établi sera normalement déterminée par la mesure de la résistance de l'enroulement. La mesure est commencée après le déclenchement de la source de puissance et le changement de connexion des enroulements de la source alternative de puissance vers la source de mesure en courant continu.

La température des enroulements et sa résistance varient avec le temps. Le problème est d'extrapoler en remontant jusqu'à l'instant du déclenchement. Cette procédure d'extrapolation est discutée dans l'article C.3.

La mesure de résistance est commencée le plus tôt possible après raccordement de l'enroulement à l'équipement de mesure. Au début les relevés sont faux à cause de la chute de tension inductive dans les enroulements avant que le courant continu de mesure soit stabilisé. Le temps nécessaire pour cette stabilisation est réduit par les moyens suivants:

- porter le circuit magnétique à saturation de façon que l'inductance effective tombe d'une valeur «à vide» élevée à une valeur du même ordre de grandeur que l'inductance de court-circuit;
- utiliser une alimentation à courant constant, soit une source d'alimentation stabilisée électroniquement, soit une batterie puissante avec une résistance série additionnelle élevée.

Porter le circuit magnétique à saturation implique d'établir un certain niveau de flux (dimension: Volt x secondes). C'est pourquoi l'emploi d'une force électromotrice élevée dans le circuit réduit le retard – en pratique de l'ordre de quelques secondes.

Les deux enroulements de la paire essayée peuvent soit être raccordés à deux circuits en courant continu distincts ou raccordés en série à un circuit commun. Dans les deux cas, les sens du courant sont choisis pour contribuer ensemble à la saturation du noyau.

La constante de temps électrique du circuit à courant continu, après avoir atteint la saturation, peut aussi être ramenée en dessous d'un ordre de grandeur de quelques secondes, même dans les cas difficiles. Une différence de température de 1 K correspond à une différence relative de résistance de l'ordre de 1/300 qui, pour une décroissance exponentielle de l'erreur, correspondrait à un retard de cinq à six fois la constante de temps électrique. Tout cela signifie que des mesures utiles sont possibles moins de 1 min après que la saturation effective a été atteinte.

Il y a aussi d'autres méthodes en usage pour des cas spéciaux. L'une est de prélever la composante inductive de la tension aux bornes d'un enroulement distinct qui est ouvert et ne fait pas partie du circuit à courant continu, et d'utiliser cette tension comme correction de la tension aux bornes de l'enroulement objet de la mesure de résistance.

Lorsque deux moitiés d'enroulement en parallèle bien équilibrées sont disponibles, il est possible de faire circuler un courant continu dans un sens dans une moitié, et en sens inverse dans l'autre. Cela permet de surveiller la résistance, en principe sans effets inductifs, et il est même possible de le faire lorsque le transformateur est alimenté en puissance alternative.

C.3 Extrapolation de la température d'enroulement à l'instant de la coupure

L'article C.2 de cette annexe traite du circuit d'alimentation en courant continu pour la mesure de la résistance et du temps de retard avant que les effets inductifs aient disparu.

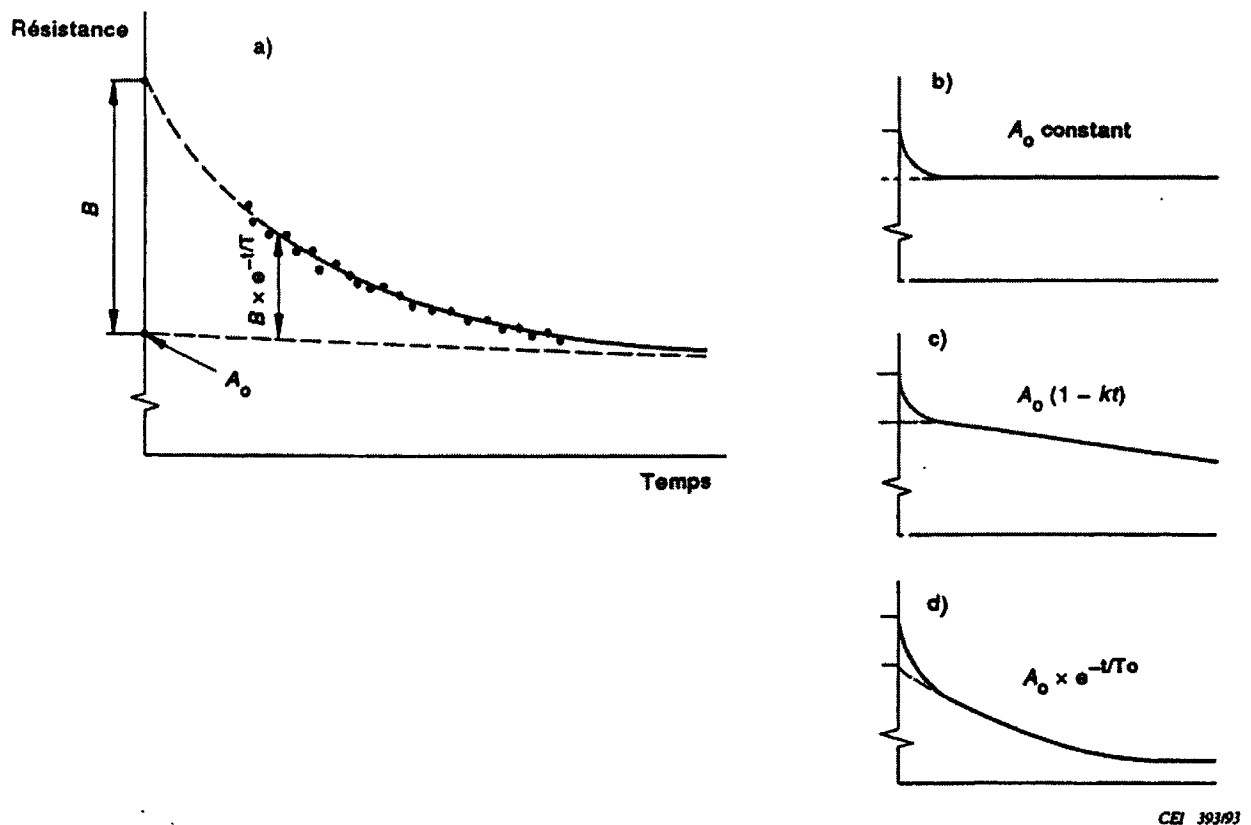
L'instrumentation utilisée pour la mesure peut être analogique ou digitale, pour une lecture individuelle par l'opérateur ou pour un enregistrement automatique. Un nombre considérable

de lectures échantillonnées sont obtenues sur une période de, disons 20 min, et elles doivent être extrapolées en arrière dans le temps pour évaluer la valeur à l'instant de la coupure.

Un tracé des relevés aurait l'allure montrée en figure C.2. Il indique que la température de l'enroulement varie relativement rapidement pour une période de quelques minutes et puis se redresse.

Dans un transformateur avec une grande constante de temps thermique de variation de température d'huile, on peut supposer que cette asymptote est une valeur constante (cela s'applique essentiellement aux transformateurs ON de relativement faible puissance nominale).

Dans les autres cas (en particulier lorsque de gros transformateurs à refroidissement forcé sont essayés et que l'équipement de refroidissement est maintenu en fonctionnement après coupure de la puissance d'essai – voir annexe A) il peut être nécessaire de retrouver une asymptote tombante, sur laquelle se superpose la variation initiale plus rapide. La figure C.2 illustre ce point.



- a) La partie initiale de la courbe avec la décroissance rapide de température.
b) c) d) Variantes de modèles mathématiques pour les suivantes, décroissance lente.

Figure C.2 – Evaluation de la variation de résistance d'enroulement après la coupure

L'évaluation pourra être réalisée de façon convenable en utilisant une procédure de calcul numérique par ordinateur qui fait correspondre une fonction analytique à l'ensemble des points relevés. L'exposé, ci-dessus, ne fait qu'illustrer les principes généraux.

La variation de la résistance R avec le temps t est interprétée comme la combinaison d'un terme A fixe ou peu variable et d'un autre terme montrant une décroissance exponentielle à partir d'une valeur B avec une constante de temps T :

$$R(t) = A(t) + B \times e^{-t/T} \quad (10)$$

Pour le premier terme, on peut utiliser une constante, ou une décroissance linéaire, ou une décroissance exponentielle:

$$A = A_0 \quad A = A_0 (1 - kt) \quad A = A_0 \times e^{-t/T_0} \quad (11)$$

Les mesures sont réalisées sur un intervalle de temps tel que le second terme a pratiquement disparu. Les paramètres A_0 , ou A_0 et k , ou A_0 et T_0 peuvent alors être estimés assez bien à partir de la dernière portion du tracé.

Après que cela a été fait, la variation exponentielle rapide est isolée en écrivant:

$$R'(t) = R(t) - A(t) = B \times e^{-t/T} \quad (12)$$

A partir des jeux de valeurs (R'_t, t_i) les paramètres B et T sont déterminés par une procédure de régression numérique.

Le résultat de cette estimation est alors:

$$R(0) = A_0 + B \quad (13)$$

d'où la température moyenne de l'enroulement est calculée selon 5.4 de cette partie de la CEI 76.

Une procédure d'extrapolation graphique conventionnelle pour la même évaluation utilise un tracé manuel lissé. Des points d'intersection sont relevés à des intervalles de temps réguliers le long de la courbe en partant de l'instant du déclenchement. Il convient que les variations de résistances forment une série géométrique si la décroissance de la courbe est exponentielle. Une droite inclinée dans le dessin est tracée, comme le montre la figure C.3. Cette droite coupe l'axe R au point correspondant à A_0 (figure C.3) et, à l'autre extrémité, permet aussi bien une estimation graphique de R_0 .

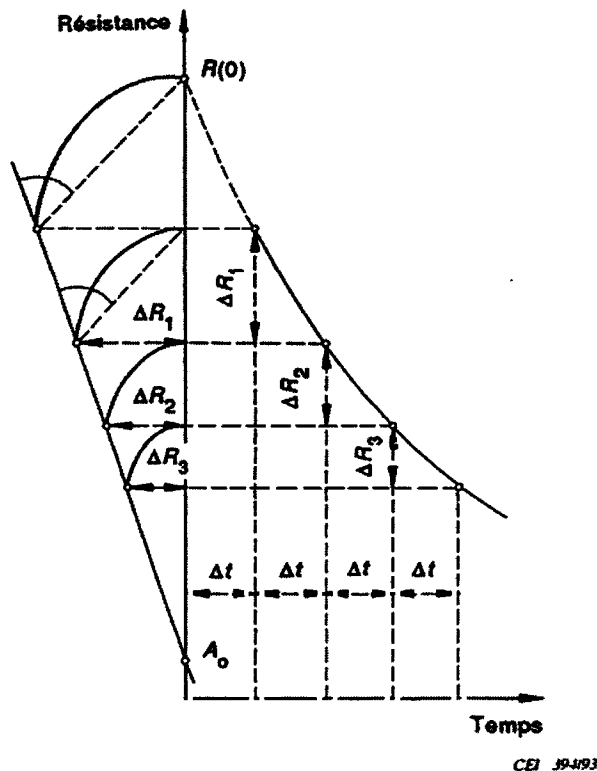


Figure C.3 – Extrapolation graphique donnant la valeur de résistance au déclenchement

C.4 Analyse des gaz dissous dans l'huile

Une analyse chromatographique des gaz dissous dans l'huile peut être avantageusement utilisée pour détecter un suréchauffement localisé éventuel qui ne ferait pas apparaître une valeur d'échauffement anormal durant l'essai.

Une telle analyse est, en général, capable d'indiquer un «léger suréchauffement» des enroulements ou des pièces de structure disons de 170 °C à 200 °C ou un suréchauffement local sérieux, disons de 300 °C à 400 °C, par exemple des contacts involontaires entraînant la circulation de courants de Foucault.

L'analyse des gaz dissous dans l'huile est spécialement recommandée pour les gros transformateurs car les effets des flux de fuite sont un facteur de risque potentiel croissant avec la taille.

La technique d'essai est décrite, par ailleurs, dans le rapport du groupe de travail CIGRÉ, Electra n° 82, mai 1982, pages 33 à 40.

Annexe ZA (normative)

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

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

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

<u>Publication</u>	<u>Année</u>	<u>Titre</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Année</u>
CEI 76-1 (mod)	1993	Transformateurs de puissance Partie 1: Généralités	EN 60076-1	1997
CEI 85	1984	Evaluation et classification thermiques de l'isolation électrique	HD 566 S1	1990
CEI 279	1969	Mesure de la résistance des enroulements d'une machine à courant alternatif en fonctionnement sous tension alternative	-	-
CEI 354	1991	Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile	-	-
CEI 606	1978 ¹⁾	Guide d'application pour les transformateurs de puissance	-	-
CEI 726 (mod)	1982	Transformateurs de puissance de type sec	HD 464 S1 ²⁾ + A2 + A3 + A4	1988 1991 1992 1995
CEI 905	1987	Guide de charge pour les transformateurs de puissance de type sec	-	-
ISO 2592	1973	Produits pétroliers - Détermination des points d'éclair et de feu - Méthode Cleveland en vase ouvert	EN 22592	1993

¹⁾ En révision, la dernière édition s'appliquera.

²⁾ Le HD 464 S1 comprend A1:1986 à la CEI 726:1982, mod.

