

Reconnue et appréciée au plan international, la compétence de France Transfo s'exporte aujourd'hui dans plus de 80 pays.

En effet, durant les 15 dernières années, France Transfo a produit et commercialisé 350 000 transformateurs, soit l'équivalent de la puissance installée d'un grand pays européen.

Lieux de production

France Transfo dispose actuellement de 3 sites de production en Lorraine, au Nord de Metz, avec une des plus grandes installations européennes de production de transformateurs secs enrobés.

Ces usines s'inscrivent dans un même périmètre géographique pour assurer la complémentarité des moyens et des compétences depuis l'étude des projets jusqu'à l'expédition des matériels fabriqués.

Ces unités de production, de conception moderne, font l'objet de réimplantation et de rénovations régulières qui contribuent à l'optimisation de la qualité et de la sécurité.

■ l'usine de Maizières-Lès-Metz (1970)

Le siège social de France Transfo y est implanté.

Superficie : 25 000 m²

Fabrication : transformateurs immergés de distribution jusqu'à 5000 kVA et 36 kV.

■ l'usine d'Ennery (1985)

Superficie : 15 000 m².

Fabrication :

- transformateurs immergés de puissance de 5 à 60 MVA jusqu'à 123 kV.

- transformateurs secs enrobés Trihal de 100 kVA à 15 MVA jusqu'à 36 kV

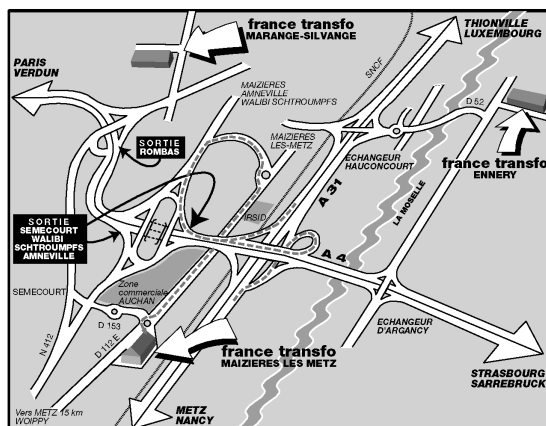
■ l'usine de Marange-Silvange (1980)

Superficie : 11 000 m².

Fabrication : cuves, radiateurs et tous les accessoires métalliques nécessaires aux transformateurs fabriqués dans les 2 autres sites.



Situation des 3 usines



Outils industriels

Les outils de calculs et de conception sont interconnectés informatiquement entre les services techniques, commerciaux et de production de chacune des usines afin d'assurer la fiabilité de la fabrication.

Les principaux équipements de fabrication suivants sont mis-en-œuvre dans le cadre de l'activité "transformateurs immergés de distribution" de l'usine de Maizières :

■ tôles magnétiques

A partir des tôles magnétiques de grande largeur, la découpe des circuits magnétiques est assurée par un ensemble de refendeuses et de cisailles.

■ bobinages

Cette section dispose d'un parc de tours à bobiner les enroulements HTA (Haute Tension) et BT (Basse Tension) pour tous les types de conducteurs ; fil méplat, bande, fil rond (aluminium et cuivre).

■ traitement des parties actives

Avant mise en cuve, un ensemble de fours assure le séchage des parties actives.

■ installation de remplissage

Cette installation permet le remplissage sous-vide des transformateurs, à température ambiante, à partir de citernes d'huiles minérales ou silicones.

Gamme de produits

La gamme des produits fabriqués à France Transfo comprend :

- ✓ les transformateurs immergés de distribution pour une tension d'isolement 36 kV :
 - de type poteau pour des puissances de 50 à 160 kVA.
 - de type cabine standard pour des puissances de 100 à 3150 kVA.
 - de type cabine à niveau de bruit réduit de 250 à 1000 kVA.
 - de type poste socle de 100 et 160 kVA.
- ✓ les transformateurs secs enrobés "TRIHAL" jusqu'à des puissances 15 MVA et de tension 36 kV.
- ✓ les transformateurs de puissance jusqu'à 60 MVA et 123 kV.
- ✓ les transformateurs spéciaux : bobines de point neutre, générateurs homopolaires, selfs de limitation de court-circuit, les autotransformateurs de démarrage moteur, les redresseurs HT pour alimenter les électrofiltres, etc.

Normes

Les essais sont effectués conformément aux procédures décrites par les spécifications internationales IEC 76 et nationales.

Vous trouverez en annexe la correspondance entre ces spécifications et la plupart des normes nationales.

Systeme qualite

Tous les transformateurs de France Transfo, sont construits suivant un systeme qualite systematise certifie conforme par l'AFAQ (Association Francaise pour l'Assurance de la Qualite) aux normes NF EN 29001 - ISO 9001.

La norme internationale ISO 9001 definit les obligations du fournisseur envers le client en termes de qualite, de service, de conception et d'adaptation de ses materiels suivant la technologie.

Elle definit, par exemple dans le cadre des essais ; les mesures, les processus d'etalonnage, etc.

De plus, cette normalisation internationale de l'assurance qualite inclut dans une liste non exhaustive : les audits internes sur les produits et les process par le fabricant, les auto-contrôles et les analyses, les actions correctives, la qualite des fournisseurs, etc.

A France Transfo, la qualite est geree d'une part par le service Assurance Qualite, par le personnel ouvrier des chaines de production, et d'autre part par l'AFAQ qui opere chaque annee un audit de l'usine pour delivrer ou annuler le certificat ISO 9001.

De meme, l'organisation relative a la protection de l'environnement est realisee suivant un systeme de management certifie selon ISO 14001.

France Transfo, leader europeen du transformateur de distribution sec enrobe, est le 1^{er} constructeur francais a obtenir la certification selon ISO 14001, dans ce domaine.



Définition

Appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courant alternatif en un ou plusieurs systèmes de courants alternatifs de même fréquence, d'intensité et de tension généralement différente.

Le transformateur reçoit le courant primaire I_1 sous une tension primaire U_1 , et, en général, restitue un courant secondaire I_2 d'intensité différente du courant primaire et sous une tension différente U_2 .

■ fonctionnement

"Tout enroulement soumis à un flux variable, généré par une tension variable, crée à travers une section d'un circuit magnétique donné, une force électromotrice induite à ses bornes, proportionnelle au nombre de spires de cet enroulement".

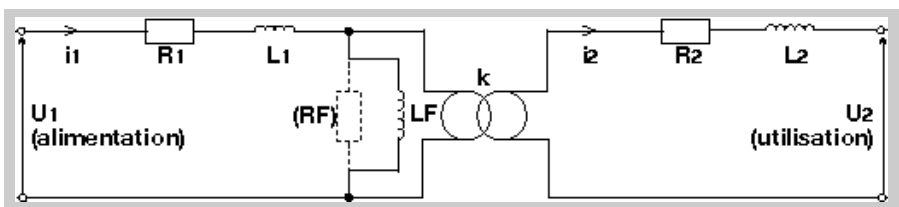
Cette force électromotrice détermine la tension aux bornes du transformateur, par la formule de Boucherot :

$$U = 4,44 B_{\max} \times N \times S \times f$$

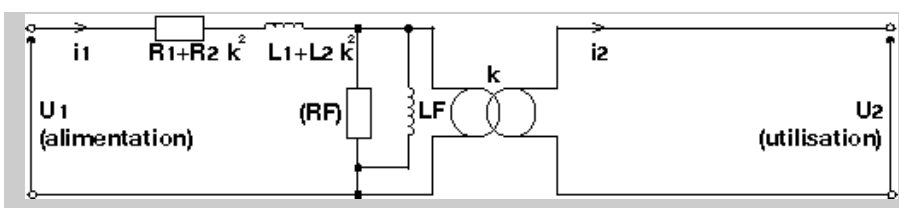
avec	U	= tension aux bornes de l'enroulement primaire ou secondaire.
	B_{\max}	= valeur maximale du champ magnétique dans le circuit magnétique.
	N	= nombre de spires de l'enroulement primaire ou secondaire.
	S	= section du circuit magnétique.
	f	= fréquence d'alimentation du transformateur exprimée en Hertz.

■ schéma équivalent du transformateur

Tout circuit polyphasé est une combinaison de circuits monophasés et par conséquent, nous pouvons schématiser le transformateur en monophasé comme suit :



NB : Nous pouvons ramener au primaire l'impédance du secondaire du transformateur en la multipliant par le rapport de transformation "k" au carré. Nous avons donc :



Le circuit magnétique

Il est constitué de tôles magnétiques à cristaux orientés sur lesquelles sont disposés 2 enroulements parcourus, l'un par le courant I_1 , l'autre par le courant I_2 .

Il est caractérisé par les **pertes à vide (Po)**, appelées aussi pertes fer : elles regroupent les pertes par hystérésis, par courant de Foucault, les pertes par effet Joule (négligeable), les pertes diélectriques (négligeable).

Le choix de la qualité des tôles, du mode de découpage et d'assemblage conditionne les performances du circuit magnétique.

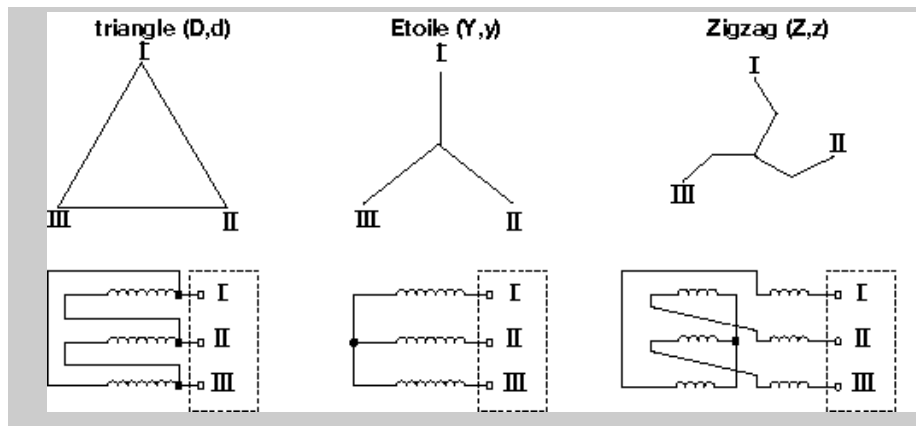
Les enroulements

Les enroulements se caractérisent par :

- leur rapport de transformation "k", qui correspond au rapport des tensions primaires et secondaires :

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

- leur couplage :



Le couplage de la plus haute des tensions (HTA) est en majuscule et la plus basse en minuscule (BT). Si le neutre est sorti, nous avons : YN ou yn
ZN ou zn

L'indice horaire permet de préciser le déphasage, multiple de 30°, entre l'enroulement HTA et l'enroulement BT.

Exemple : Dyn 11 = HTA en triangle (D) et BT en étoile (y) avec neutre sorti. L'indice horaire indique un déphasage de 30° entre les bornes HTA et BT. Le sens de rotation est anti-horaire.

- leurs pertes en court-circuit (Pcc) :

Appelées également pertes dues à la charge ou pertes cuivre, (même pour des transformateurs en aluminium !). Elles se composent des pertes Joule ou ohmiques (RI²) et des pertes par courants de Foucault.

Ces pertes s'expriment à la température de référence normalisée 75°C selon la norme IEC et sont proportionnelles au carré de la charge.

- les enroulements de France Transfo :

Les technologies utilisées pour les enroulements en cuivre ou en aluminium assurent au transformateur la tenue au court-circuit, conformément aux normes en vigueur. D'autre part :

- le séchage au four permet l'élimination de toute présence d'humidité dans la partie active.
- le remplissage sous vide pour l'imprégnation des enroulements et l'élimination de l'air dans la cuve.

Ces 2 opérations garantissent au transformateur d'excellentes performances (tenue au choc de foudre).

- les diélectriques :

Les diélectriques liquides les plus utilisés par France Transfo sont de type huile minérale (O1). La teneur en PCB¹⁾ et en PCBT²⁾ est garantie inférieure ou égale au seuil minimum de mesure de 2 ppm (partie par million).

¹⁾ (PolyChloroBiphényles, contenus dans les Askarels, comme par exemple les Pyralènes)

²⁾ (PolychloroBenzylToluènes, contenus dans l'Ugilec)

Les essais effectués sur les transformateurs ont pour but d'assurer la conformité des caractéristiques électriques et thermiques avec les spécifications de la commande.

Ils sont de 3 sortes :

- les essais individuels (dits "de routine")
- les essais de type
- les essais spéciaux.

Ce document est destiné à vous familiariser avec ces différents types d'essais, et la méthodologie employée à France Transfo pour tester les transformateurs immergés de distribution produits dans son usine de MAIZIÈRES-LÈS-METZ.

Equipement d'essais de l'unité de MAIZIÈRES-LÈS-METZ.

- 3 plates-formes d'essais intégrées aux chaînes de fabrication permettant d'effectuer les essais individuels ainsi que l'essai aux chocs de foudre.
- 2 plates-formes d'essais destinées aux réceptions demandées par les clients. Ces plates-formes permettent de réaliser les essais de routine, les essais de type et 2 essais spéciaux (mesure des décharges partielles et du niveau de bruit).
- 1 laboratoire dédié aux essais des matériaux aussi bien pour le contrôle de réception des matières que pour la recherche, le développement et l'homologation de nouveaux produits.

Enfin chaque section de production dispose des moyens et procédures de contrôle spécifiques à son activité pour assurer la qualité des composants et sous-ensembles.

Tous les essais énumérés dans le sommaire sont réalisés à France Transfo, usine de Maizières-lès-Metz, à l'exception de l'essai de tenue au court-circuit effectué dans un laboratoire agréé.

Les transformateurs ne sont testés une seconde fois en votre présence (essais individuels, de type et spéciaux) que si vous en faites la demande lors de la commande, et ces tests seront à votre charge.

Consignes de sécurité en zone d'essais

Les aires d'essais des transformateurs sont clairement délimitées, et au-delà des portes d'accès à ces zones, tout matériel peut-être sous tension avec des parties à nu, et peut donc entraîner un danger de mort par électrocution, par contact avec ce matériel.

L'accès à ces aires est strictement interdit à toute personne étrangère au service "Essais" et non habilitée.

Les visiteurs ne peuvent franchir les portes d'accès, que s'ils y sont invités par le personnel des essais, dûment désigné et habilité, après avoir été informés des dangers inhérents à l'installation, et en dehors des séquences d'essais.

Dans les feuilles suivantes, vous trouverez pour chaque essai ;
- sur la page de gauche, un résumé des principales normes.
- sur la page de droite, la méthode utilisée par France Transfo.



Références	Symboles	Unités
1) Plaque signalétique		
Puissance assignée	Sn	Voltampère (VA) ou kiloVoltAmpère (kVA) ou MégaVoltAmpère (MVA).
Fréquence assignée	Fn	Hertz, ou kiloHertz (Hz ou kHz).
Haute Tension	HTA	kiloVolt (kV).
Basse Tension	BT	Volt ou kiloVolt (V ou kV).
Température	°C	degré Celsius (°C).
Echauffement	K	Kelvin
Pertes à Vide	Po	Watt ou kiloWatt (W ou kW).
Pertes en court-circuit	Pcc	Watt ou kiloWatt (W ou kW).
Courant à vide	Io	Ampère (A).
Courant assigné	IN	Ampère (A).
Courant de court-circuit	Icc	Ampère (A).
Tension de court-circuit	Ucc	Volt (V).
Facteur de puissance	cosφ	pourcentage (%).
Champ magnétique	B	Tesla (T).
Nombre de spires	N	
2) Essais de routine		
● Mesure des pertes à vide		
Pertes à vide corrigées	Po	Watt (W).
Indication du premier wattmètre	dW1	Watt (W).
Indication du second wattmètre	dW2	Watt (W).
Constante	Cte	
Correction de puissance	k	Watt (W).
Approximation		Pourcentage (%).
● Mesure des pertes dues à la charge		
Courants dans les 3 enroulements	I ₁ , I ₂ , I ₃	Ampère (A).
Puissance mesurée	Pmes.	Watt (W).
Pertes spéciales = Pertes supplément.	Ps	Watt (W).
● Résistance des enroulements		
Résistances HTA, BT	R _{HTA} , R _{BT}	Ohm ().
Pertes joules	RI ²	Watt (W).
3) Essais de type		
● Essais d'échauffement		
Pertes totales	Pt	Watt (W).
Courant moyen	IMOY	Ampère (A).
Température ambiante	T° AMB	°Celsius (°C).
● Essais aux chocs de foudre		
Balayage		microseconde (µs).
4) Essais spéciaux		
● Mesure des décharges partielles		
Tension de classe du transformateur	Um	kiloVolt (kV).
Charge apparente	q	picocoulomb (pC).
● Mesure du niveau de bruit		
Bruit de fond		décibel.(dB)
Niveau pondéré A de pression acoustique	Lp (A)	décibel (A).
Niveau pondéré A de puissance acoustique	Lw (A)	décibel (A)

La norme

La présente norme est résumée à partir de la publication IEC 76-3 (1980).

Définitions

- *isolation uniforme d'un enroulement de transformateur* : c'est l'isolation d'un enroulement dont toutes ses extrémités reliées aux bornes du transformateur, ont la même tension de tenue à fréquence industrielle.
- *tension U_m* : c'est la tension la plus élevée d'un réseau auquel l'enroulement peut être connecté, compte tenu de son isolation. En pratique, elle fait allusion à la tension de classe d'isolement du transformateur.

Description de l'essai

Le type d'essai par tension induite, dépend essentiellement du type d'enroulement du transformateur.

L'essai par tension induite décrit dans cette norme, indique qu'une tension alternative proche de la forme sinusoïdale doit être appliquée aux bornes d'un enroulement du transformateur.

La tension d'essai doit être égale à 2 fois la valeur de la tension assignée, et ne doit pas dépasser la tension assignée de tenue de courte durée à fréquence industrielle (voir tableau ci-dessous), entre bornes de ligne d'un enroulement triphasé.

La fréquence d'essai doit être supérieure à la fréquence nominale afin d'éviter toute saturation (courant magnétisant excessif).

Sauf spécification contraire du client, pour toute fréquence d'essai inférieure ou égale à 2 fois la fréquence assignée, la durée de l'essai à pleine tension est de 60 secondes.

Lorsque la fréquence d'essai dépasse le double de la fréquence assignée, la durée de l'essai doit être de :

$$[120 \times (\text{fréquence assignée} / \text{fréquence d'essai})] \text{ secondes,} \\ \text{avec un minimum de 15 s.}$$

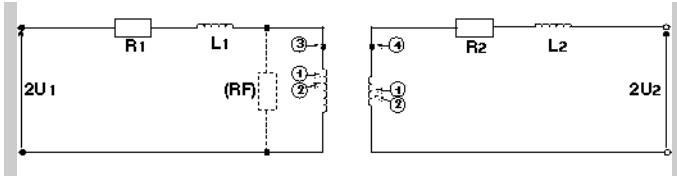
L'essai d'un enroulement triphasé est, de préférence, effectué avec des tensions triphasées équilibrées induites dans les 3 phases de l'enroulement. Si l'enroulement a un neutre sorti, celui-ci peut être mis à la terre, pendant l'essai.

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

<i>Tension efficace la plus élevée le transformateur U_m, en kV</i>	<i>Tension de tenue assignée efficace pour de courte durée à fréquence industrielle, en kV</i>
1,1	3
3,6	10
7,2	20
12,0	28
17,5	38
24,0	50
36,0	70

Rôle de l'essai

Cet essai permet la détection d'un ou de plusieurs éventuels défauts entre les spires des enroulements (Exemple : défaut entre ① et ②, ③ et ④) ou d'un défaut entre phases.



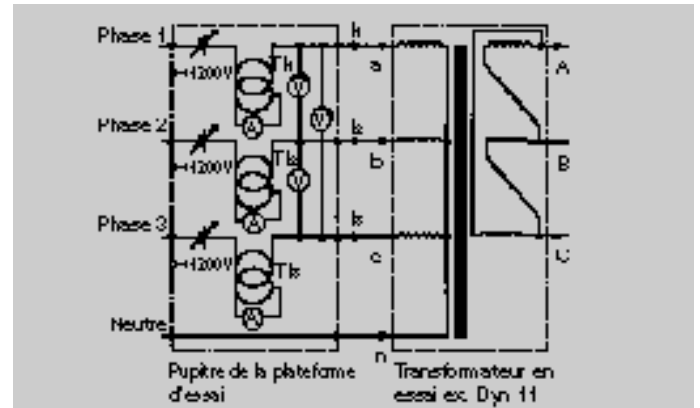
Les modalités

L'enroulement HTA étant ouvert, l'enroulement BT est alimenté sous $2 \times U_{\text{nominale}}$; pour éviter une saturation du circuit magnétique du transformateur, la fréquence utilisée pour l'essai est de 200 Hz ou 150 Hz selon la plateforme utilisée.

La durée maximale de l'essai est de :

- $(120 \times 50) / 200 = 30$ s. pour une fréquence d'essai de 200 Hz.
- $(120 \times 50) / 150 = 40$ s. pour une fréquence d'essai de 150 Hz.

Schéma du montage



Le transformateur est considéré comme bon lorsqu'il ne se produit aucune chute de tension ou déviation ampèremétrique.

La norme

La présente norme est résumée à partir de la publication IEC 76-3 (1980).

Définitions

- *isolation uniforme d'un enroulement de transformateur* : c'est l'isolation d'un enroulement dont toutes ses extrémités reliées aux bornes du transformateur, ont la même tension de tenue à fréquence industrielle.
- *tension U_m* : c'est la tension la plus élevée d'un réseau auquel l'enroulement peut être connecté, compte tenu de son isolation. En pratique, elle fait allusion à la tension de classe d'isolement du transformateur.

Description de l'essai

Le type d'essai par tension induite, dépend essentiellement du type d'enroulement du transformateur.

L'essai par tension induite décrit dans cette norme, indique qu'une tension alternative proche de la forme sinusoïdale doit être appliquée aux bornes d'un enroulement du transformateur.

La tension d'essai doit être égale à 2 fois la valeur de la tension assignée, et ne doit pas dépasser la tension assignée de tenue de courte durée à fréquence industrielle (voir tableau ci-dessous), entre bornes de ligne d'un enroulement triphasé.

La fréquence d'essai doit être supérieure à la fréquence nominale afin d'éviter toute saturation (courant magnétisant excessif).

Sauf spécification contraire du client, pour toute fréquence d'essai inférieure ou égale à 2 fois la fréquence assignée, la durée de l'essai à pleine tension est de 60 secondes.

Lorsque la fréquence d'essai dépasse le double de la fréquence assignée, la durée de l'essai doit être de :

$$[120 \times (\text{fréquence assignée} / \text{fréquence d'essai})] \text{ secondes,} \\ \text{avec un minimum de 15 s.}$$

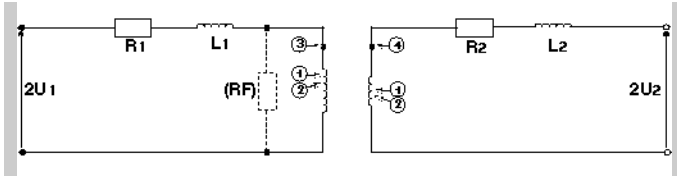
L'essai d'un enroulement triphasé est, de préférence, effectué avec des tensions triphasées équilibrées induites dans les 3 phases de l'enroulement. Si l'enroulement a un neutre sorti, celui-ci peut être mis à la terre, pendant l'essai.

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

<i>Tension efficace la plus élevée le transformateur U_m, en kV</i>	<i>Tension de tenue assignée efficace pour de courte durée à fréquence industrielle, en kV</i>
1,1	3
3,6	10
7,2	20
12,0	28
17,5	38
24,0	50
36,0	70

Rôle de l'essai

Cet essai permet la détection d'un ou de plusieurs éventuels défauts entre les spires des enroulements (Exemple : défaut entre ① et ②, ③ et ④) ou d'un défaut entre phases.



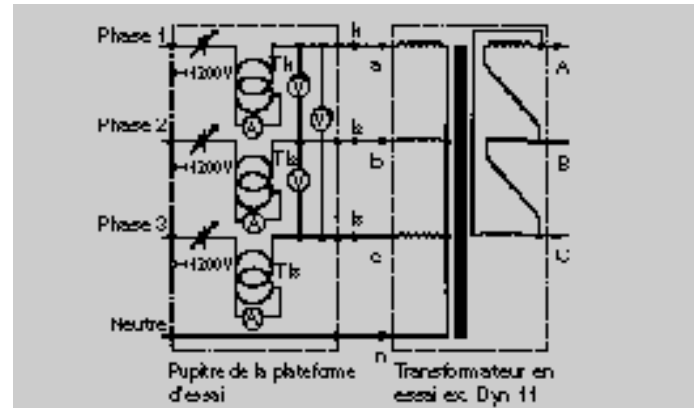
Les modalités

L'enroulement HTA étant ouvert, l'enroulement BT est alimenté sous $2 \times U_{\text{nominale}}$; pour éviter une saturation du circuit magnétique du transformateur, la fréquence utilisée pour l'essai est de 200 Hz ou 150 Hz selon la plateforme utilisée.

La durée maximale de l'essai est de :

- $(120 \times 50) / 200 = 30$ s. pour une fréquence d'essai de 200 Hz.
- $(120 \times 50) / 150 = 40$ s. pour une fréquence d'essai de 150 Hz.

Schéma du montage



Le transformateur est considéré comme bon lorsqu'il ne se produit aucune chute de tension ou déviation ampèremétrique.

La norme

Le résumé de la norme pour cet essai fait référence à la publication des essais diélectriques IEC 76-3 (1988).

Définition

Tension appliquée : c'est la tension monophasée qui est appliquée à un des enroulements du transformateur, les autres étant connectés à la masse.

Description de l'essai

L'essai par tension appliquée doit être effectué avec une tension alternative monophasée de forme sinusoïdale et de fréquence appropriée au moins égale à 80 % de la fréquence nominale.

La pleine tension d'essai doit être appliquée pendant 60 sec. entre l'enroulement en essai et toutes les bornes des autres enroulements, le circuit magnétique, le bâti et la cuve ou l'enveloppe du transformateur, reliés ensemble à la terre.

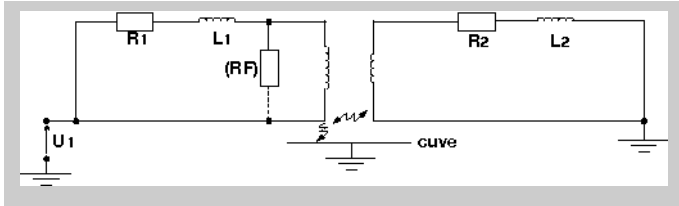
L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

<i>Tension efficace la plus élevée le transformateur U_m, en kV</i>	<i>Tension de tenue assignée efficace pour de courte durée à fréquence industrielle, en kV</i>
1,1	3
3,6	10
7,2	20
12,0	28
17,5	38
24,0	50
36,0	70

Rôles de l'essai

Vérifier la tenue diélectrique du transformateur (caractéristiques isolantes de l'huile et des enroulements), à fréquence industrielle (50 Hz), de l'enroulement par rapport à la masse et aux autres enroulements.

Le schéma de principe du transformateur est modifié comme suit :



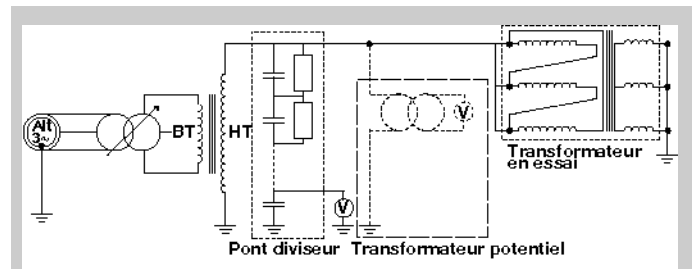
Les modalités

L'essai par tension appliquée est exécuté avec une tension monophasée 50 Hz, dont l'amplitude est fixée par la norme, selon la classe d'isolement du transformateur.

La tension est appliquée successivement à chaque enroulement pendant 60 s., toutes les bornes des autres enroulements et les parties métalliques étant reliés à la terre.

La mesure de tension est effectuée directement à l'aide d'un pont diviseur de tension ou d'un transformateur de potentiel.

Schéma du montage



Caractéristiques de l'appareillage de mesure

Transformateur de potentiel : rapport de transformation = 1000.

Voltmètre (pour le transformateur de potentiel) ou kilovoltmètre (pour le pont diviseur).

La norme

La procédure de mesure est décrite dans la norme IEC 76-1 (1993).

Toutes les valeurs mesurées pendant cet essai, sont rapportées à la prise principale sauf spécification contraire du client, le transformateur étant initialement à la température ambiante.

Définitions

- les pertes à vide : c'est la puissance absorbée par le transformateur quand la tension assignée à la fréquence assignée est appliquée aux bornes de l'un des enroulements, l'autre enroulement étant à circuit ouvert.
- le courant à vide : c'est la valeur efficace du courant nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique.

Description de l'essai

Les pertes et le courant à vide doivent être mesurés sur un des enroulements, (le ou les autres enroulements étant à circuit ouvert) :

- à fréquence assignée et sous une tension égale à la tension assignée, si l'essai est effectué sur la prise principale,
- à fréquence assignée et sous une tension égale à la tension de la prise appropriée, si l'essai est effectué sur une autre prise.

Les tolérances

Certaines grandeurs sujettes aux incertitudes de fabrication et aux erreurs de mesure ne peuvent être explorées avec exactitude.

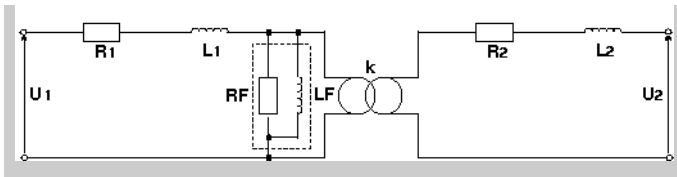
C'est pourquoi, pour garantir la performance des transformateurs, le "Comité Electrotechnique International" a fixé dans la norme 76-1 § 9, des tolérances à respecter, valables pour tous les transformateurs triphasés de distribution.

Articles	Tolérances
1. Pertes à vide	+ 15 % des valeurs déclarées à condition de respecter la tolérance sur les pertes totales.
2. Courant à vide	+ 30 % de la valeur déclarée par le constructeur.
3. Pertes totales (Po + Pcc)	+ 10 % des valeurs déclarées

Rôles de l'essai

- caractériser les pertes à vide, le courant à vide du transformateur.
- vérifier que ces caractéristiques sont conformes à la norme en vigueur.

Concrètement, les pertes à vide sont générées par la partie encadrée en pointillé ci-dessous :



Les modalités

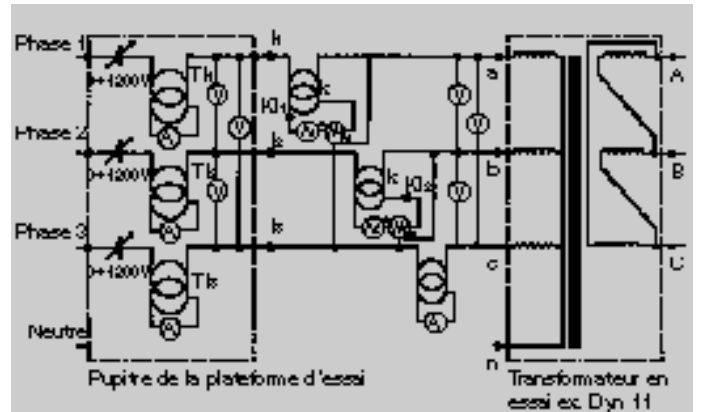
L'enroulement Basse Tension (BT) est alimenté sous tension assignée et à fréquence assignée, l'enroulement Haute Tension (HTA) étant ouvert.

Les pertes à vide sont mesurées par la méthode des 2 Wattmètres avec inverseur (méthode Aaron), alors que le courant à vide est mesuré par l'intermédiaire d'un transformateur d'intensité et d'un ampèremètre sur chaque phase.

N.B : Les valeurs mesurées sur les transformateurs à plusieurs enroulements BT, sont obtenues sur l'enroulement qui a la plus forte tension, c'est-à-dire là où la précision est la meilleure.

Schéma de montage

Des voltmètres et ampèremètres incorporés dans la plate-forme d'essai permettent de contrôler, à tout moment, les grandeurs soumises au transformateur.



Pour des raisons d'efficacité, des commutateurs à 3 positions sont utilisés, réduisant ainsi à l'unité le nombre de voltmètre (V), d'ampèremètre (A) et de wattmètre (W).

Les calculs

$$\text{Pertes à vide mesurées} = [(W1 \pm W2) \times Cte] - k$$

k = consommation des appareils de mesure (du Procès Verbal d'essai)

Cette correction correspond à la Puissance consommée par les appareils de mesure et peut être exprimée sous la forme (U^2 / R) .

La constante "Cte" dépend des calibres des appareils de mesure.

Exemple : dans un montage comprenant un transformateur d'intensité de rapport 5 / 5 et un ampèremètre de calibre 5 sur une échelle de 100 divisions, la constante devient alors :

$$Cte = (5/5) \times (5/100) = 0,05$$

Les tolérances

L'application de tolérances réduites sur les pertes à vide est négociable au moment de l'appel d'offre.

La norme

Les indications suivantes dérivent de la norme IEC 76-1 (1993).

Définition

Les résistances HTA et BT sont les résistances internes au transformateur, vu du côté HTA et vu du côté BT, qui génèrent des pertes Joule proportionnelles au carré du courant.

Description de l'essai

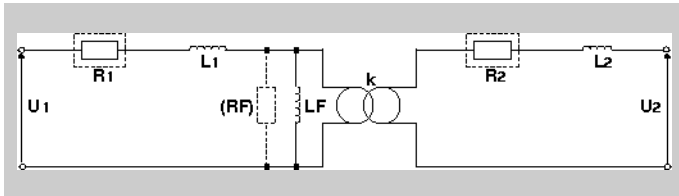
On mesure la résistance de chaque enroulement, et on relève la température ; l'essai se fait en courant continu.

Les effets de l'auto-induction doivent être réduits au minimum dans toutes les mesures de résistance.

Pour les transformateurs immergés dans l'huile, l'essai débute après un repos diélectrique du transformateur ; la température moyenne de l'huile est alors déterminée en la considérant égale à la température de l'enroulement.

Rôle de l'essai

Mesurer la résistance ohmique de chacun des enroulements du transformateur.
Ces résistances sont encadrées en pointillé dans le schéma suivant :



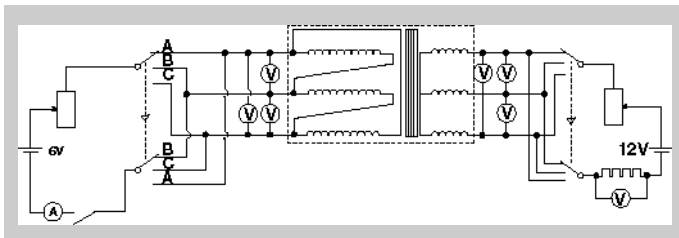
Les modalités

Au cours de cet essai, on relève la température ambiante.

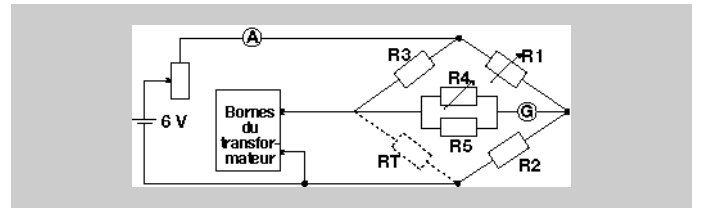
La mesure de la résistance HTA entre phase est opérée en courant continu soit par la méthode voltampèremétrique pour les grandes résistances (de l'ordre de l'ohm), soit avec un micro-ohmètre.

La mesure de la résistance BT est effectuée en courant continu soit avec 2 millivoltmètres et un shunt, soit avec un pont double de Thomson.

Schéma du montage



Mesure des résistances HTA et BT par méthode voltampère métrique



Mesure de la résistance BT avec pont double de Thomson

avec

$$R_T = (2/3) \times r$$

dans le cas d'un couplage des enroulements en Triangle.

$$R_T = 2 \times r$$

dans le cas d'un couplage des enroulements en Etoile.

R_T étant la résistance équivalente entre phases, et r la résistance d'un enroulement du transformateur.

Les calculs

$$R = (U / I)$$

Pour le pont de Thomson, nous avons :

$$\frac{R_3}{R_T} = \frac{R_1}{R_2}$$

si $R_1 = R_4$ et $R_2 = R_5$.

La norme

La procédure de mesure est décrite dans la norme IEC 76-1 (1993).

Définitions

- **la tension de court-circuit** : c'est la tension qu'il est nécessaire d'appliquer entre les bornes de ligne d'un enroulement pour y faire circuler le courant nominal quand les bornes de l'autre enroulement sont court-circuitées. Elle s'exprime toujours en pourcentage de la tension nominale.
- **les pertes dues à la charge** : elles correspondent à la puissance active qui est absorbée (à la fréquence assignée et à la température de référence), lorsque le courant assigné de la prise traverse les bornes de ligne de l'un des enroulements, les bornes de l'autre enroulement étant court-circuitées, et les autres enroulements, s'il y en a, étant à circuit ouvert.
Ces pertes sont aussi appelées pertes en court-circuit (= Pertes Joule + Pertes spéciales).

Description de l'essai

La tension et les pertes en court-circuit doivent être mesurées avec un courant d'alimentation au moins égal à 50 % du courant assigné de la prise.
La valeur mesurée de ces pertes doit être multipliée par le carré du rapport entre le courant assigné de la prise et le courant utilisé pour l'essai.

Les mesures doivent être faites rapidement pour que les échauffements n'introduisent pas d'erreurs significatives ; la différence de température de l'huile entre le haut et le bas doit être suffisamment faible pour permettre la détermination de la température moyenne avec la précision requise.

Pour les transformateurs avec un enroulement à prises dont l'étendue est supérieure à $\pm 5\%$, la tension de court-circuit doit être mesurée sur la prise principale et les deux prises extrêmes.

Les tolérances

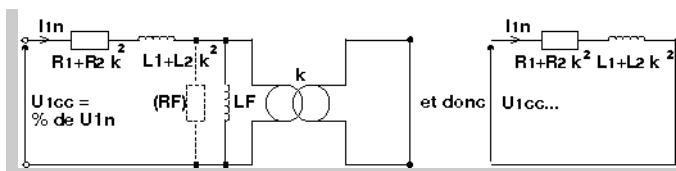
Les tolérances sont issues de la norme, sauf spécification contraire du client.

Articles	Tolérances
1.b) Pertes partielles : (Pertes à vide ou Pertes en charge)	+ 15 % de chacune des pertes partielles, à condition de respecter la tolérance sur les pertes totales (+10% des valeurs déclarées)
3. Tension de court-circuit a) sur la prise principale	$\pm 7,5\%$ de la valeur déclarée par le constructeur si la valeur de la tension de court-circuit (U_{cc}) est $\geq 10\%$. $\pm 10\%$ de la valeur déclarée par le constructeur si U_{cc} est $< 10\%$
b) sur les autres prises	$\pm 10\%$ de la valeur déclarée par le constructeur si U_{cc} est $\geq 10\%$. $\pm 15\%$ de la valeur déclarée par le constructeur si U_{cc} est $< 10\%$.

Rôle de l'essai

- mesurer les pertes cuivre du transformateur (Pcc) ;
- mesurer la tension de court-circuit (Ucc).

Schéma équivalent :



Les modalités

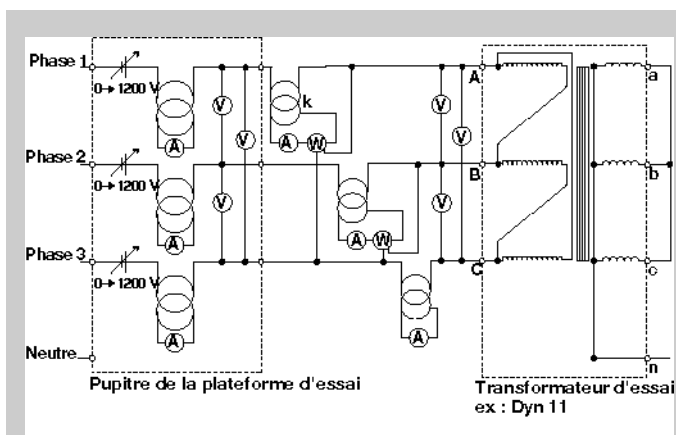
L'enroulement Moyenne Tension est alimenté à fréquence nominale 50 Hz, sous une tension donnant un courant aussi proche que possible du courant nominal, l'enroulement Basse Tension étant en court-circuit.

Les pertes en court-circuit sont mesurées par la méthode des 2 Wattmètres, la tension de court-circuit et le courant sont mesurés par leurs appareils respectifs.

La tension de court-circuit s'exprime en pourcentage de la tension nominale :

$$U_{cc} (\%) = (U_{cc} \text{ mesurée} / U_{nominale}) \times 100$$

Schéma du montage



Le principe de mesure et l'appareillage utilisé sont identiques à ceux de l'essai de mesure des pertes à vide.

Calculs des pertes dues à la charge

- à la température ambiante (20° C en moyenne) ;

$$P_{cc} = P_{joules_{HTA}} + P_{joules_{BT}} + P_{spéciales}$$

$$= \left[(3/2) \times R_{HTA} \times I^2 \right] + \left[(3/2) \times R_{BT} \times I^2 \right] + P_{spéciales}$$

avec R_{HTA} , R_{BT} = résistances entre phases.

Dans le cas d'un couplage triangle :

$$P_{joules} = 3 \times r \times (I / \sqrt{3})^2$$

$$= (3/2) \times R_T \times I^2 \text{ avec } R_T = (2/3) \times r$$

Dans le cas d'un couplage étoile :

$$P_{joules} = 3 \times r \times I^2$$

$$= (3/2) \times R_T \times I^2 \text{ avec } R_T = 2 \times r$$

Les pertes spéciales se composent principalement des pertes par courants de Foucault.

- à la température de référence (75° C pour les transformateurs immergés).

Les pertes joules varient en fonction de la température alors que les pertes spéciales sont inversement proportionnelles à la température.

$$P_{cc} 75^{\circ}C = (K \times P_j T^{\circ}amb.) + (1/K \times P_s T^{\circ}amb.)$$

K = constante de correction de la température :

- pour le cuivre : $K = (235 + 75) / (235 + T^{\circ} amb.)$.
- pour l'aluminium : $K = (225 + 75) / (225 + T^{\circ} amb.)$.

La norme (suite)

■ **Valeurs normatives de tension de court-circuit pour l'Europe, d'après le document d'harmonisation H 428.S1.**

<i>Puissance nominale (Sn) en kVA</i>	<i>Tension de court-circuit exprimée en % de la tension nominale appliquée à l'enroulement</i>
<i>50 Sn 630</i>	<i>4</i>
<i>630 Sn 2500</i>	<i>6</i>

■ **Valeurs normatives de tension de court-circuit pour les autres pays**

Conformément à la publication IEC 76-5 (1982), la tension de court-circuit appliquée au transformateur en essai est déduite du tableau ci-dessous :

<i>Puissance nominale (Sn) en KVA</i>	<i>Tension de court-circuit exprimée en % de la tension nominale appliquée à l'enroulement</i>
<i>Sn 630</i>	<i>4</i>
<i>630 < Sn 1250</i>	<i>5</i>
<i>1250 < Sn 3150</i>	<i>6,25</i>
<i>3150 < Sn 6300</i>	<i>7,15</i>

La tension de court-circuit Ucc

Cette tension de court-circuit possède une composante réactive U_x et une composante U_r , qui contrairement à U_x dépend de la température.

En valeurs réduites par rapport aux grandeurs nominales, nous pouvons écrire :

$$(U_{cc}\%)^2 = (U_x\%)^2 + (U_r\%)^2$$

avec $U_r\% = (P_{cc} \times 100) / S_n$

$U_{cc}\% = (U_{cc} \times 100) / U_n$

Exemple : avec une température ambiante de 20°C, et à la température de référence 75°C, nous avons, toujours en pourcentage :

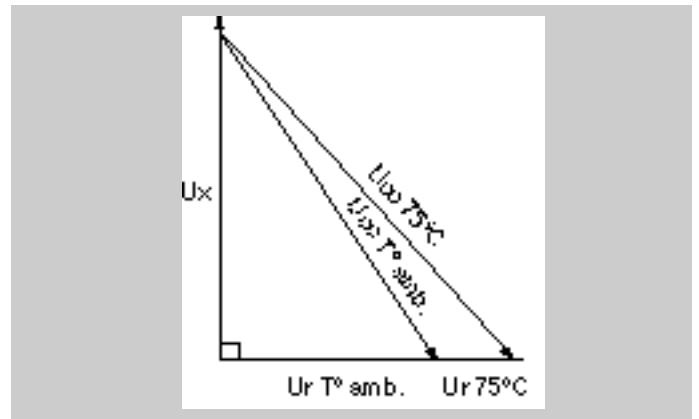
$$(U_{cc75^\circ C})^2 = (U_x)^2 + (U_r75^\circ C)^2$$

$$(U_{cc75^\circ C})^2 - (U_r75^\circ C)^2 = (U_x)^2$$

$$\begin{aligned} & (U_{cc75^\circ C})^2 - (U_r75^\circ C)^2 \\ &= (U_{cc20^\circ C})^2 - (U_r20^\circ C)^2 \end{aligned}$$

L'expression de U_{cc} à 75°C en % est alors déduite :

$$U_{cc75^\circ C} = 100 \times \sqrt{\left(\frac{U_{cc20^\circ C}}{U_n}\right)^2 - \left(\frac{P_{cc20^\circ C}}{S_n}\right)^2 + \left(\frac{P_{cc75^\circ C}}{S_n}\right)^2}$$



La norme

Les indications suivantes sont tirées de la norme IEC 76-1 (1993).

Définitions

■ **déphasage d'un enroulement triphasé** : c'est l'écart angulaire entre les vecteurs représentant les tensions HTA et BT des bornes homologues d'une même paire d'enroulement.

Les vecteurs sont supposés tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Le vecteur de l'enroulement HTA, dont la 1^{ère} phase est orientée à 12 heures sur un cadran horaire, sert de référence, et le déphasage de tous les autres enroulements est exprimé habituellement par un indice horaire.

■ **symbole de couplage** : c'est le symbole conventionnel indiquant les modes de connexion des enroulements HTA, BT et leurs déphasages relatifs exprimés par une combinaison de lettres et des indices horaires.

Description des mesures

Le rapport de transformation est mesuré sur chaque prise du transformateur.

Le symbole de couplage des transformateurs triphasés ainsi que la polarité des transformateurs monophasés doivent être contrôlés.

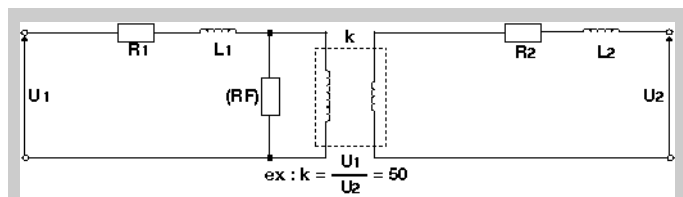
Les tolérances

Articles	Tolérances
2. Rapport de transformation à vide : – pour la prise principale	La plus faible des 2 valeurs suivantes : a) $\pm 0,5\%$ du rapport spécifié par le constructeur. b) $\pm 10\%$ du pourcentage réel de la tension de court-circuit.
– sur les autres prises	Doivent faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et le client, mais le rapport doit être supérieur à la plus petite valeur de a) et de b).

Rôles de l'essai

- vérifier la conformité du couplage du transformateur ;
- vérifier la conformité du rapport de transformation k sur chaque prise par rapport aux valeurs garanties.

La partie du transformateur étudiée pendant cet essai est entourée dans le schéma suivant :



Les modalités

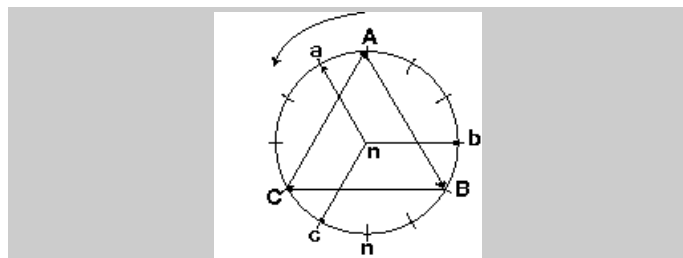
Le contrôle du symbole du couplage et la mesure du rapport de transformation sont faits sur chaque prise, sous une tension de 110 ou 220 V appliquée du côté HTA.

La mesure consiste à comparer pour chaque phase la tension HTA en phase avec la tension BT.

Cette opération s'effectue au moyen d'un "pont de Vettiner", qui met en opposition les tensions en phases dans le but d'en comparer les modules au moyen d'un jeu de décades, (cette condition est obtenue lorsque le courant mesuré au galvanomètre est nul). Le couplage est correct lorsque la valeur du rapport est identique sur chaque phase.

Exemple : couplage Dyn11

- le côté HTA du transformateur est couplé en triangle.
- le côté BT est couplé en étoile avec le neutre sorti.



Mesure du rapport de transformation

Le couplage et le rapport de transformation sont identiques à ceux définis par le constructeur lorsque :

$$\frac{\|\vec{AB}\|}{\|\vec{an}\|} = \frac{\|\vec{BC}\|}{\|\vec{bn}\|} = \frac{\|\vec{CA}\|}{\|\vec{cn}\|} = \frac{\text{[module de la tension HTA sur une même colonne]}}{\text{[module de la tension BT sur une même colonne]}}$$

Les calculs

Calcul du rapport de transformation assigné pour chaque prise :

Ce rapport n'est valable que pour une même référence de tension donnée.

Exemple :

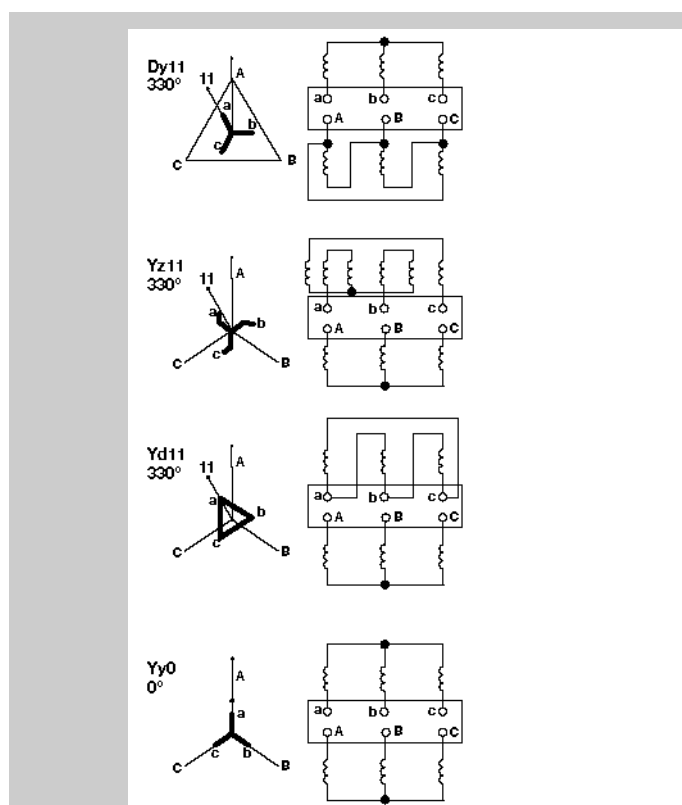
Rapport des tensions HTA/BT simples ou composées.

Pour obtenir le rapport de transformation assigné, il y a lieu (dans le cas de couplages Yd ou Dy) de multiplier ou de diviser respectivement par $\sqrt{3}$ selon que les tensions mesurées sont simples ou composées.

Pour les couplages Yy ou Dd, le rapport de transformation assigné n'est pas modifié.

Couplages usuels

Les couplages les plus courants en France sont :



Les lettres capitales correspondent à la plus haute tension.

La norme

Cet essai est détaillé dans la norme IEC 76-2 (1993).

Rôle de l'essai

Déterminer les échauffements de l'huile et des enroulements HTA et BT du transformateur.

Les modalités

Un transformateur est spécifié avec un mode de refroidissement (ONAN, ONAF, ODWF...) aussi bien interne qu'externe au transformateur.

Sa spécification et sa plaque signalétique doivent alors comporter l'information sur les niveaux de puissance pour lesquels le transformateur respecte les limitations d'échauffement.

La norme définit les valeurs d'échauffement, caractéristiques du transformateur immergé, qui font l'objet des garanties et des essais aux conditions spécifiées :

- échauffement de l'huile en partie haute de l'appareil : 60 K
- échauffement moyen des enroulements :
 - pour transformateurs spécifiés ON ou OF : 65 K
 - pour transformateurs spécifiés OD 70 K

Les limites d'échauffement normales s'appliquent, à moins que l'appel d'offre et la commande n'indiquent "conditions spéciales de service".

C'est le cas notamment, pour l'essai d'échauffement du transformateur à un enroulement avec des prises de réglage excédant $\pm 5\%$, où l'essai est à faire sur la prise qui a le plus fort courant.

Les limites d'échauffement s'appliquent alors pour cette prise, à la puissance, à la tension et au courant appropriés.

Si le site d'installation ne répond pas aux conditions normales de service (altitude < 1000 m, $-25^{\circ}\text{C} < T^{\circ}$ ambiante $< 40^{\circ}\text{C}$, tensions d'alimentations sinusoïdales et symétriques, environnement à faible degré de pollution), les limites d'échauffement du transformateur doivent alors être modifiées en conséquence.

Description de l'essai

Le transformateur doit être équipé de ses dispositifs de protection.

Trois types de mesure de température (T°) sont réalisées à intervalles réguliers :

- la mesure de la T° de l'air de refroidissement par au moins trois capteurs.
- la mesure de la T° de l'huile, à la partie supérieure du transformateur par des doigts de gants plongeant dans le couvercle.
- la mesure de la T° des enroulements déterminée par mesure de la résistance des enroulements.

La valeur de la température ambiante est obtenue par la moyenne des valeurs mesurées par les 3 capteurs ; Pour les transformateurs de puissances nominales allant jusqu'à 2 500 kVA, on prend comme échauffement moyen de l'huile 0,8 fois l'échauffement de l'huile à la partie supérieure.

Pour des raisons pratiques, la méthode normalisée de la détermination des échauffements en usine, est l'essai en court-circuit. Néanmoins, une méthode "d'opposition" de 2 transformateurs connectés en parallèle, peut-être convenue.

Durant cet essai en court-circuit, le transformateur n'est pas soumis à la tension assignée et au courant assigné simultanément, mais aux pertes totales calculées en sommant les pertes dues à la charge, à la température de référence, et les pertes à vide.

Rôles de l'essai

- déterminer l'échauffement de l'huile (T_{huile}).
- déterminer l'échauffement des enroulements HTA et BT.
- Vérifier la puissance nominale de l'appareil.

Les modalités

On distingue, dans l'ordre chronologique, 4 grandes étapes :

- a) relevé des mesures de références ;
- b) démarrage de l'essai d'échauffement ;
- c) contrôle de la stabilisation des pertes injectées au transformateur, et mesure de l'échauffement de l'huile (régime des pertes totales) ;
- d) régime au courant assigné, pendant 1 heure, pour déterminer l'échauffement des enroulements HTA et BT.

Au moins 24 heures avant les mesures de références, le transformateur est placé dans un local approprié pour obtenir une homogénéité de la température de ses enroulements et de l'huile.

a) relevé des valeurs de référence :

Ces valeurs permettent de déterminer les valeurs des résistances HTA et BT ainsi que la température de l'huile, à froid, c'est-à-dire lorsque le transformateur n'est pas alimenté et lorsqu'il est à température ambiante.

La mesure de ces résistances à froid conditionne le calcul des échauffements des enroulements :

■ Mesure de la résistance HTA à froid :

On utilise un montage de "superposition de courant continu", après stabilisation du courant dans les enroulements, on mesure le courant, la tension, et la température de l'huile du transformateur.

■ Mesure de la résistance BT à froid entre phases, pour l'élaboration de la courbe de refroidissement :

Les valeurs de résistance étant de l'ordre du milliohm, la mesure est réalisée entre 2 phases par pont double de Thomson ou au moyen de la méthode voltampèremétrique avec shunt.

■ Mesure de la résistance BT à froid entre phases et neutre, dans le cas d'une superposition :

Pour cette mesure les 3 phases BT sont court-circuitées et la méthode de mesure est la même que celle de la résistance BT entre phases.

■ Mesure de la température du transformateur :

Un doigt de gant est plongé dans le couvercle du transformateur ; la température mesurée correspond à la température maximum de l'huile.

b) démarrage de l'essai d'échauffement :

Les enroulements HTA du transformateur sont connectés à l'alimentation continue et à l'alimentation triphasée de la plate-forme, les enroulements BT étant court-circuités.

Les pertes totales mesurées, par la méthode des 2 wattmètres, sont injectées pendant toute la nuit.

La norme (suite)

Le but de l'essai est double :

- établir l'échauffement de l'huile, en régime établi, avec dissipation des pertes totales.
- établir l'échauffement moyen des enroulements à courant nominal I_n .

L'essai est alors réalisé en 2 étapes :

- **l'injection des pertes totales** : le transformateur est soumis à une tension d'essai telle que la puissance active mesurée est égale aux pertes totales du transformateur, et à un courant d'essai supérieur à I_n .

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

- **injection du courant assigné** : après atteinte du régime établi, l'essai doit continuer avec un courant ramené au courant nominal, maintenu pendant une heure avec observation continue des températures de l'huile et de l'air.

A l'issue de l'essai, les résistances des enroulements sont mesurées, soit après une déconnexion rapide de l'alimentation et des courts-circuits, soit sans coupure de l'alimentation au moyen de la méthode de superposition.

NB : Une mesure de référence (R_1, θ_1) des résistances de tous les enroulements est faite à température ambiante, en régime établi.

Par opposition, la température de l'enroulement BT, θ_2 , et de résistance R_2 est établi par la relation :

$$\theta_2 = (R_2/R_1) (X + \theta_1) - X$$

avec $X = 235^\circ\text{C}$ pour le cuivre.

$X = 225^\circ\text{C}$ pour l'aluminium.

Corrections

Si les valeurs spécifiées de puissance, ou de courant, n'ont pu être obtenues durant l'essai, les résultats d'essai doivent être corrigés ;

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

$$\text{[pertes totales / pertes de l'essai]}^x$$

avec $x = 0,8$ ou $0,9$ ou 1 selon le mode de refroidissement du transformateur.

- l'échauffement moyen des enroulements au dessus de la température moyenne de l'huile, quant à lui est multiplié par :

$$\text{[courant assigné / courant d'essai]}^y$$

avec $y = 1,6$ ou 2 selon le mode de refroidissement du transformateur.

c) contrôle de la stabilisation et mesure de l'échauffement de l'huile :

On relève :

- le courant sur chaque phase et la puissance ; cette puissance correspond aux pertes totales à ± 20% .
- la température (T°) de l'huile, des enroulements HTA et de l'air ambiant :

L'échauffement de l'huile maximum est défini par :

$$T^{\circ} \text{ huile} = T^{\circ} \text{ huile} - T^{\circ} \text{ ambiante.}$$

En pratique, la température ambiante est obtenue par une moyenne des indications des 3 thermomètres situés à 1 m et à mi-hauteur de la cuve du transformateur, et plongés dans des bocaux d'huile pour éviter les effets intempestifs de courant d'air.

Lorsque la stabilisation est atteinte avec des pertes P différentes des pertes totales (Pt), on applique la correction :

$$T \text{ huile} = T \text{ huile mesurée (Pt/P)}^x$$

avec :

T huile = échauffement de l'huile aux pertes totales.

T huile mesurée = échauffement de l'huile à puissance mesurée.

x = 0,8 ou 0,9 ou 1 selon le mode de refroidissement du transformateur.

d) régime nominal (pendant une heure) :

Pour faire cette mesure, le courant injecté est ramené au courant nominal (In).

Au bout d'une heure, le régime nominal est terminé, on relève alors les valeurs suivantes :

- les courants et la puissance injectée.
- la température de l'huile et de l'air ambiant.
- la résistance HTA, en relevant le courant et la tension de l'alimentation continue.

Nous pouvons déduire l'échauffement des enroulements HTA par la formule :

$$T \text{ HTA} = [(Rc/Ro) \times (K + to)] - K - t_a + 0,8 (Th_{PT} - Th_{RN})$$

Rc = résistance à chaud mesurée grâce à l'alimentation continue.

Ro = résistance à froid mesurée par la même méthode.

to = température de référence à froid.

K = coefficient de température

t_a = température ambiante moyenne de fin de régime nominal.

Th_{PT} = échauffement de l'huile aux pertes totales mesuré par le doigt de gant.

Th_{RN} = échauffement de l'huile au régime nominal mesuré par doigt de gant.

La résistance BT est mesurée :

- soit entre phase et neutre, en relevant la valeur affichée au pont double de Thomson, connecté à l'alimentation continue. L'échauffement BT est déduit par la relation précédente avec des références BT.
- soit entre phases : à l'aide du pont double de Thomson ou par la méthode voltampèremétrique avec shunt.

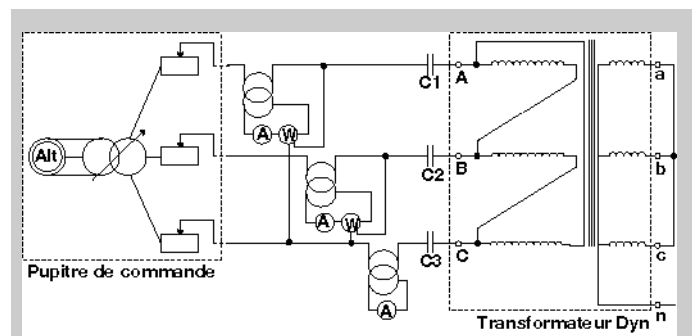
On coupe les alimentations alternative et continue, et on démonte le court-circuit pour relever les résistances entre phases toutes les 15 secondes, pendant 8 minutes.

Ces mesures de résistances à intervalles de temps réguliers permettent d'établir la courbe de refroidissement.

Par extrapolation, la valeur de la résistance à t=0 est déterminée ; on peut alors en déduire l'échauffement de la BT.

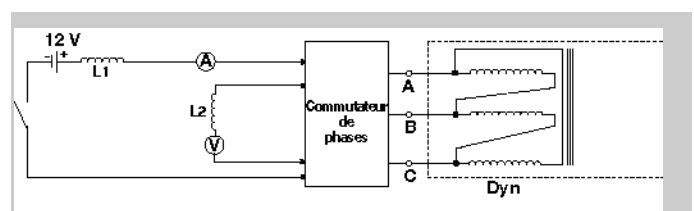
Schéma de principe

- de l'alimentation alternative :



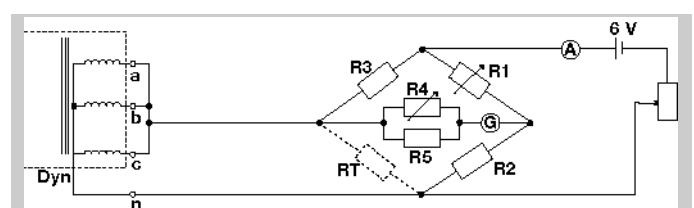
- de l'alimentation continue HTA

(à ajouter au montage de l'alimentation alternative pour la mesure des résistances HTA à chaud)



- de l'alimentation continue BT

(pour la mesure de la résistance BT entre phase et neutre ; Rt)



Légende : G = galvanomètre.

L1, L2 : inductances de filtre.

La norme

Les modalités d'essai et les tolérances qui suivent sont issues de la norme IEC 76-3 (1980).

Rôle de l'essai :

L'essai aux chocs de foudre plein ou coupé, appliqué aux bornes de ligne, a pour but de vérifier la tenue au choc de chaque extrémité de ligne par rapport à la masse et aux autres enroulements, ainsi que la tenue au choc le long de l'enroulement essayé.

Description de l'essai aux chocs de foudre plein :

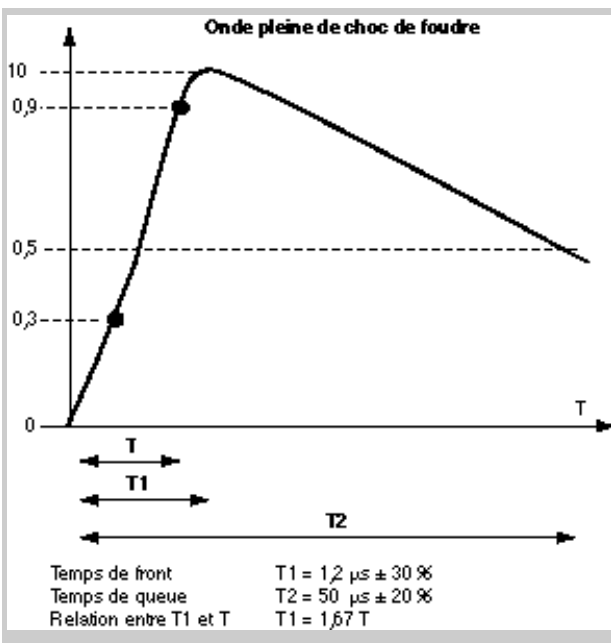
■ Généralités

Pour les transformateurs immergés dans l'huile, la tension d'essai de choc est normalement de polarité négative et fonction du niveau d'isolement du transformateur (voir tableau des valeurs page 32).

La forme d'onde appliquée est caractérisée par son front et sa queue :

Front (temps de montée) : $1,2 \mu\text{s}$, avec une tolérance de $\pm 30 \%$

Queue (temps de décroissance à 1/2 tension) : $50 \mu\text{s}$, avec une tolérance de $\pm 20 \%$



Néanmoins, dans le cas où cette forme de choc ne peut raisonnablement être obtenue, à cause de la faible inductance des enroulements ou d'une forte capacité par rapport à la masse, de plus larges tolérances peuvent être autorisées après accord entre le constructeur et le client.

■ Séquence de l'essai

La norme stipule que la séquence d'essai se compose d'un choc à tension de référence compris entre 50 % et 75 % de la pleine tension, puis de 3 chocs à pleine tension.

Cette séquence d'essais aux chocs est appliquée successivement à chacune des bornes de ligne de l'enroulement essayé.

Dans le cas d'un transformateur triphasé, la cuve ainsi que les autres bornes de ligne de l'enroulement doivent être reliées à la terre directement ou indirectement à travers une faible impédance, par exemple un shunt de mesure de courant.

Si l'enroulement a un neutre sorti, le neutre doit être relié à la terre ou à une faible impédance, et la cuve à la terre.

■ L'enregistrement

Les enregistrements oscillographiques effectués pendant les essais doivent indiquer clairement la forme de la tension de choc appliquée (durée de front, durée de décroissance à la mi-tension), le temps de balayage et l'atténuateur sélectionné.

L'enregistrement doit comporter un oscillogramme du courant s'écoulant de l'enroulement vers la terre et présenter la meilleure sensibilité pour la détection des défauts.

■ Critères de l'essai

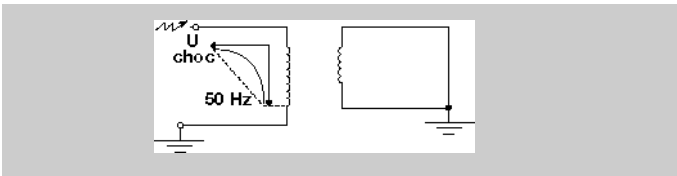
L'absence de différences notables entre les enregistrements des formes de tensions et courants, correspondant à une tension réduite et à la pleine tension, constitue une preuve que l'isolation a résisté sans dommage à l'essai.

Cependant, s'il y a un doute quant à l'interprétation de divergences éventuelles entre les oscillogrammes, 3 chocs à pleine tension doivent à nouveau être appliqués ou tout l'essai au choc doit être répété.

Rôle de l'essai :

Vérifier la tenue au choc de foudre de chaque enroulement par rapport à la masse, par rapport aux autres enroulements et le long de l'enroulement essayé.

Nous pouvons schématiser cet essai par :



NB : En haute fréquence la tension de choc est répartie exponentiellement le long de l'enroulement en essai ; alors qu'en Basse Fréquence (ex : 50, 60 Hz, etc) la tension est répartie uniformément le long de l'enroulement.

Description de l'essai au choc de foudre plein

L'onde de choc est appliquée à chacun des enroulements de la HTA en court-circuitant les autres à la masse par l'intermédiaire d'un shunt, la BT ainsi que la cuve étant reliées à la terre.

Concrètement, toute borne non choquée est reliée directement à la terre ou indirectement à travers un shunt de mesure.

Les essais consistent en l'application d'ondes de choc de polarité négative (afin de réduire le risque de claquage extérieur aléatoire dans le circuit d'essai), caractérisées par la forme normalisée 1,2 / 50.

Au début de l'essai, le transformateur est testé à 50 % de la tension de choc.

Chaque enroulement attaqué subit alors 3 chocs de référence suivis de 3 autres chocs à pleine amplitude de cette tension de choc.

L'étalonnage de la tension de choc à appliquer se fait au moyen d'un spintermètre.

Lors de chaque essai, 2 grandeurs enregistrées simultanément à l'oscillographe cathodique, à des vitesses de balayage appropriées, sont relevées, à savoir :

- la tension appliquée
- le courant primaire résultant de la propagation de l'onde de choc le long des enroulements.

Pour des raisons pratiques, un jeu d'atténuateurs permet de conserver une amplitude constante des oscillogrammes de courant à pleine tension et à tension de référence, facilitant ainsi la comparaison des enregistrements obtenus.

Le compte-rendu des essais de choc comporte un tirage des oscillogrammes enregistrés en cours d'essai.

L'examen des clichés permet de conclure si le transformateur a subi ces essais avec succès.

En cas de défaut, celui-ci peut se traduire par une augmentation de l'amplitude du courant et/ou une déformation de la tension, provenant :

- soit d'un défaut par rapport à la masse.
- soit d'un court-circuit entre spires.

La norme (suite)

Description de l'essai au choc de foudre coupé

Cet essai au choc de foudre coupé est un essai particulier appliqué aux bornes de ligne d'un enroulement.

Lorsqu'il a été décidé d'effectuer cet essai, il est recommandé de le combiner à l'essai au choc de foudre plein, dans l'ordre suivant :

- un choc plein à tension réduite ;*
- un choc plein à 100 % ;*
- un choc coupé à tension réduite ;*
- 2 chocs coupés à 100 % ;*
- 2 chocs pleins à 100 %.*

La valeur de crête du choc coupé défini par la norme, pour chaque type de tension HTA du transformateur, doit être la même que celle de l'essai au choc plein.

En pratique, les constructeurs appliquent les mêmes réglages du générateur de choc et des dispositifs de mesure que ceux de l'essai aux chocs de foudre plein, en ajoutant uniquement le dispositif éclateur de coupure dit "anti-oiseau", et en adaptant les atténuateurs de courant.

La coupure doit se situer entre 2 et 6 μ s.

Comme pour l'essai au choc de foudre plein, la détection des défauts au cours d'un essai au choc en onde coupée est fondée sur la comparaison des oscillogrammes relevés avant et après l'onde de choc coupée.

Valeurs normatives des tensions de choc

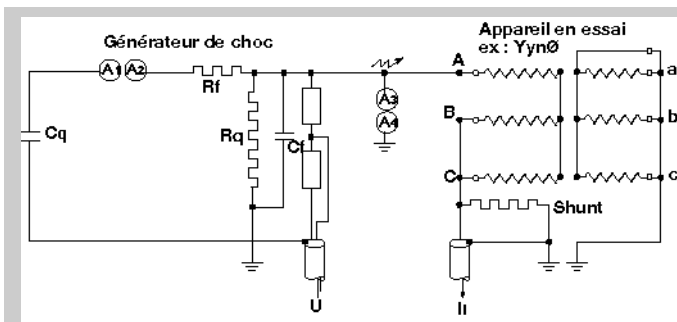
niveau d'isolement assigné en kV	3,6	7,2	12	17,5	24	36
tension assignée à fréquence industrielle en kV, à 50 Hz, 1 mn	10	20	28	38	50	70
tension de choc en kV (liste 2 du tableau 1 de la norme IEC 76-3-1 (1987).	40	60	75	95	125	170

Description de l'essai au choc de foudre coupé

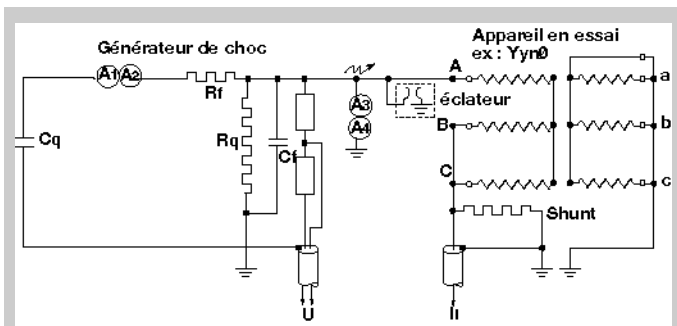
A l'exception de la mesure qui est réalisée au moyen d'un éclateur, les modalités de l'essai sont les mêmes que pour l'essai de chocs en ondes pleines.

Schéma du montage

- en onde de choc pleine



- en onde de choc coupé



Valeurs des tensions de choc

niveau d'isolement assigné en kV	3,6	7,2	12	17,5	24	36
tension assignée à fréquence industrielle en kV, à 50 Hz, 1 mn	10	20	28	38	50	70
tension de choc en kV	40	60	75	95	125	170

La norme

La procédure de mesure est décrite pour une majeure partie dans la publication IEC 270 (1981). Les décharges partielles, sont considérées dans cette norme comme des décharges électriques localisées dans des milieux isolants, qui se présentent généralement sous la forme d'impulsions individuelles et qui dégradent progressivement les propriétés diélectriques des matériaux isolants. Les pointes ou les angles aigus des surfaces métalliques, les cavités à l'intérieur d'une isolation solide sont à l'origine de la production de ces décharges partielles.

Définitions

- les **décharges partielles** : ce sont des décharges électriques qui ne court-circuitent que partiellement l'isolation entre conducteurs.
- la **charge apparente** : exprimée en picocoulombs, elle est considérée comme étant la charge qui, si elle était injectée aux bornes du transformateur en essai, donnerait la même lecture sur l'appareil de mesure que la décharge partielle.
- le **débit quadratique** : c'est la somme des carrés des charges apparentes, pendant un certain intervalle de temps, divisée par cet intervalle de temps :

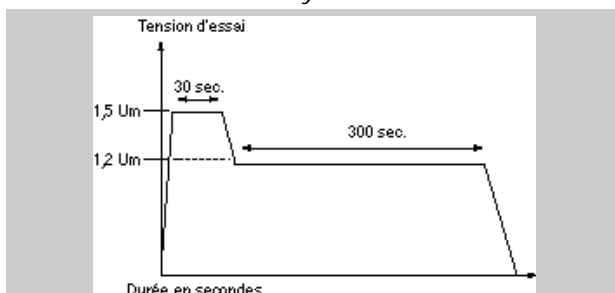
$$\text{Débit quadratique} = [1/T] [(q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 \dots + q_n^2)]$$

- la **tension d'essai de décharges partielles** : cette tension appliquée au transformateur d'essai est décrétée dans la norme pour chaque type de transformateur.

Modalité d'application de la tension d'essai

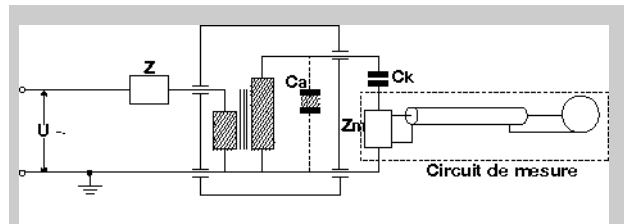
La tension d'essai de décharge partielle appliquée au transformateur doit se rapprocher au maximum de la forme sinusoïdale et être de fréquence supérieure à la fréquence assignée, afin d'éviter un courant magnétisant excessif pendant l'essai.

La tension entre bornes de ligne soumise au transformateur doit suivre le cycle suivant :



Circuit d'essai et appareils de mesure

Quel que soit le type de circuit d'essai et d'appareil de mesure utilisé, ceux-ci doivent être étalonnés. Sauf spécification contraire du client, le transformateur est à la température ambiante lors de l'essai et les surfaces des isolateurs sont sèches et propres. La norme énumère une série de circuits d'essai ; celui qui a été adopté par France Transfo est le suivant :



Circuit d'essai pour des objets auto-excités

Ce schéma, représente un circuit d'essai où la tension est induite dans le transformateur de puissance.

Ce circuit, se compose :

- d'une source de tension alternative.
- d'une impédance ou d'un filtre Z bloquant les impulsions de décharges, produites par le transformateur et réduisant les perturbations provenant de la source.
- d'une capacité Ca, correspondant à l'impédance capacitive propre au transformateur.
- d'un condensateur de liaison Ck.
- d'un circuit de mesure, connecté aux bornes du transformateur en essai par l'intermédiaire d'un condensateur de liaison convenable et composé :
 - de l'impédance de mesure Zm, incluant une résistance ou une résistance et un condensateur ou un dispositif filtrant plus complexe.
 - du câble coaxial de liaison.
 - de l'appareil de mesure appelé aussi mesureur ; ce dernier fixe la bande passante du circuit de mesure et permet de visualiser les décharges partielles.

Les décharges partielles produites par le transformateur provoquent des transferts de charges dans le circuit d'essai, et des impulsions de courant à travers l'impédance Zm.

Cette impédance détermine alors à l'aide du transformateur en essai et du condensateur de liaison, la durée et la forme des impulsions des tensions mesurées.

Ces mêmes impulsions sont ensuite mises en forme et amplifiées pour fournir au mesureur la valeur du débit quadratique du transformateur.

Rôles de l'essai

L'objectif de cet essai est de déterminer l'état diélectrique global du transformateur.

Les modalités

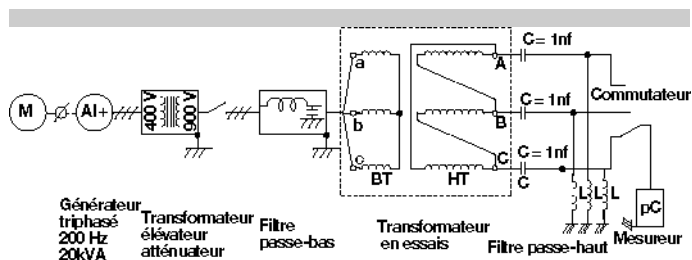
Le transformateur est alimenté à vide à une fréquence 200 Hertz.

Les niveaux de tension appliqués sur la HTA sont les suivants :

- tension nominale U_n .
- tension de la classe d'isolement du transformateur U_m .
- $1,2 U_m$.
- $1,5 U_m$.

La mesure des décharges partielles se fait par des capacités branchées entre chaque phase HTA et la terre.

Schéma du montage



- le filtre passe-bas laisse passer le 200 Hz et évite de mesurer des décharges partielles provenant de l'alimentation.
- le filtre passe-haut, connecté entre la sortie des capacités et la terre, permet de ne laisser passer que les fréquences autres que 200 Hz, c'est-à-dire celles correspondant aux décharges partielles.
Les condensateurs sont dimensionnés pour des fortes tensions 50 kV, tout en étant exempt de décharges partielles.
- le mesureur de décharges, relié à un commutateur à 3 positions permet de relever les points de mesure suivant le cycle de la norme, sur chaque phase.
La plage de mesure se situe habituellement dans la bande passante 10 à 500 kHz.

La norme (suite)

Etalonnage

Les mesures de décharges partielles doivent être précédées d'un étalonnage, car les impulsions des tensions mesurées sont atténuées à la fois dans les enroulements et dans le circuit de mesure.

Pour cela, on injecte des impulsions, simulées au moyen d'un générateur de décharges calibrées, aux bornes du transformateur.

Sensibilité de la mesure et niveaux de décharges partielles admissibles :

Les mesures de décharges partielles comportent des erreurs plus importantes que d'autres types de mesures effectuées lors d'essais à Haute Tension.

Les mesures sont d'une part influencées par de nombreux paramètres non quantifiables, et d'autre part par la valeur du bruit de fond qui ne doit pas dépasser 50 % du niveau de décharges partielles acceptable spécifié.

Cependant, lorsque l'intensité des décharges partielles spécifiée est inférieure ou égale à 10 picoCoulombs (pC), un bruit de fond atteignant 100 % de la valeur spécifiée peut être accepté.

Des valeurs concrètes de tension d'application au transformateur n'étant pas fixées dans la publication 270, on a adopté les contraintes suivantes issues de la spécification EDF HN 52S07 de Mai 1978.

Cette norme conseille le schéma du circuit d'essai de la publication 270, les grandeurs ainsi mesurées étant :

– soit la charge apparente.

– soit le débit quadratique des décharges.

L'installation doit permettre de mesurer des décharges de 10 pC ou 10^{20} C²/s, ramenées aux bornes Haute Tension.

Conformément à la spécification EDF, les niveaux de décharges sont considérés comme satisfaisants lorsqu'ils sont inférieurs, pour 50 Hz, à :

– 50 pC ou 10^{-18} C²/s à la tension de la classe du transformateur, Um..

– 100 pC ou 10^{-17} C²/s à 1,2 Um.

Etalonnage

Un générateur étalon connecté entre une borne Moyenne Tension et la terre, envoie des impulsions calibrées.

Lorsque la valeur observée au mesureur est identique à celle générée par le calibre étalon, cela signifie qu'il n'y a pas d'atténuation du signal. La valeur des décharges partielles est alors déduite directement de la lecture du mesureur.

Dans le cas contraire, lorsque la valeur lue sur le mesureur n'est pas la même que celle envoyée par le générateur d'impulsion, l'atténuation de tension doit être relevée et ajoutée à chaque point de mesure.

Les niveaux de décharges partielles admissibles

Le niveau 0 du débit quadratique conformément à la norme correspond à 10^{-20} C²/s à 50 Hz.

La correspondance du niveau de **D**écharge **P**artielle (DP) en dB et du débit quadratique d'une variable X, est définie par :

$$\text{Niveau de DP en dB} = 10 \log (X / 10^{-20})$$

La norme considère comme satisfaisants à 50 Hz, les transformateurs dont les décharges sont inférieures à :

- 10^{-18} C²/s = 20 dB à la tension Um ;
- 10^{-17} C²/s = 30 dB à la tension 1,2 Um.

Pour $f = 50 \times 4 = 200$ Hz

→ Niveau de DP en dB à 200 Hz

$$= 10 \log (4X / 10^{-20}) = 10 \log 4 + 10 \log (X / 10^{-20})$$

$$= 6 \text{ dB} + \text{niveau de DP à 50 Hz.}$$

Par conséquent, à 200 Hz, les transformateurs sont considérés comme satisfaisants lorsque les décharges partielles sont inférieures à :

- 26 dB ou $4 \cdot 10^{-18}$ C²/s à la tension Um ;
- 36 dB ou $4 \cdot 10^{-17}$ C²/s à la tension 1,2 Um.

La norme

Le procédé de l'essai est décrit dans la norme IEC 551 (1987).

Définitions

- **niveau de pression acoustique, L_p** : c'est la valeur exprimée en décibels (dB), égale à 20 fois le logarithme décimal du rapport entre la pression acoustique donnée et la pression acoustique de référence ; la pression acoustique de référence étant de 20 μ Pascals.
- **niveau de puissance acoustique, L_w** : c'est la valeur exprimée en dB, égale à 10 fois le logarithme décimal du rapport entre la puissance acoustique donnée et la puissance acoustique de référence ; la puissance acoustique de référence étant de 1 picoWatt.
- **bruit de fond** : c'est le niveau pondéré A de pression acoustique lorsque le transformateur est hors tension.

Appareils de mesure

Les mesures doivent être faites en utilisant un sonomètre de classe 1.
De plus, le niveau de bruit de fond doit être mesuré immédiatement avant et après avoir effectué la mesure du transformateur.

Si la différence entre L_p du bruit de fond et le niveau résultant à la fois du bruit de fond et du bruit du transformateur est 10 dB, il est possible de n'effectuer les mesures du bruit de fond qu'en une seule position de mesure, sans qu'aucune correction du niveau de bruit mesuré de l'appareil ne soit nécessaire.

Si la différence est comprise entre 3 et 10 dB, il faut appliquer les corrections du tableau ci-dessous.

Par ailleurs, si la différence est inférieure à 3 dB, l'essai ne sera pas accepté, à moins que le niveau résultant du bruit de fond et du bruit du transformateur ne soit inférieur à la valeur garantie.

En pareil cas, nous prendrons pour cette différence une valeur inférieure, et le niveau total diminué de 3 dB pourra être considéré comme la limite supérieure du niveau de pression acoustique en cette position.

Cette condition devra figurer au procès-verbal de l'essai.

Corrections pour influence du bruit de fond

Selon les niveaux de pression acoustique énumérés ci-dessus et enregistrés en chacune des positions de mesure, ceux-ci peuvent être corrigés de l'influence du bruit de fond, conformément au tableau suivant :

Différence entre L_p mesuré avec l'appareil en service et L_p du bruit de fond seul en dB.	Correction à soustraire du L_p mesuré avec l'appareil en service pour obtenir le L_p dû à l'appareil en dB.
3	3
4 à 5	2
6 à 8	1
9 à 10	0,5

Rôle de l'essai

Comparer le bruit généré par le transformateur à celui fixé par la norme.

Modalités de l'essai

Le bruit est provoqué par magnétostriction des tôles du circuit magnétique, bobines d'inductance et de leurs dispositifs de refroidissement associés.

Après avoir mesuré le bruit de fond, on alimente le transformateur à vide, à la tension et à la fréquence assignée, le changeur de prises étant sur la prise principale. On relève alors le niveau de pression acoustique en différents points autour du transformateur.

Le niveau de bruit peut être exprimé sous 2 formes :

- en niveau pondéré A de **pression acoustique, L_p (A)**, mesurée au moyen d'un sonomètre, à une distance définie du transformateur.
La valeur obtenue est la moyenne quadratique des valeurs mesurées :
 - au 1/3 et au 2/3 de la hauteur de la cuve lorsqu'elle est supérieure à 2 m 50 ; dans le cas contraire la mesure est faite à mi-hauteur de celle-ci.
 - à une distance minimale de 30 cm autour du transformateur (contour prescrit).L'intervalle des points de mesure est d'1 mètre maximum et au minimum à une valeur telle que l'essai comporte au moins 6 points de mesure.

- en niveau pondéré A de la **puissance acoustique** de l'appareil, **L_w (A)**, calculée à partir de la pression acoustique par la relation suivante :

$$L_w (A) = L_p (A) + 10 \log S - X$$

L_w (A) = niveau pondéré A de la puissance acoustique en dB.

L_p (A) = pression acoustique en dB (A).

X = correction due au bruit de fond (voir page précédente)

S = surface équivalente, en m², définie par la formule :

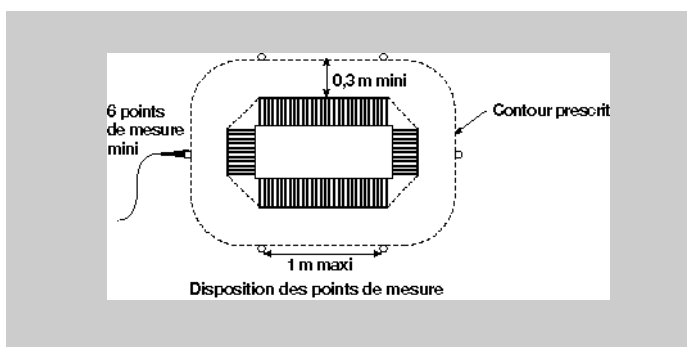
$$S = 1,25 \times H \times P$$

avec **H** = hauteur du transformateur en mètre.

P = longueur du contour des mesures, à la distance de 30 cm maximum, en mètre.

1,25 = facteur empirique destiné à tenir compte de l'énergie sonore rayonnée par la partie supérieure du transformateur ou des refroidisseurs.

La puissance acoustique tient compte de la géométrie du transformateur et permet d'exprimer un niveau de bruit indépendant de la distance de mesure au transformateur ; elle permet donc la comparaison entre appareils.



La norme

Cet essai résumé d'après la norme IEC 76-5 (1982 et amendement 2 de 1994), spécifie que les transformateurs doivent être conçus et construits pour résister sans dommage aux effets thermiques et mécaniques des courts-circuits extérieurs.

Généralités

Le transformateur doit avoir subi préalablement les essais individuels, et le montage des accessoires n'est pas exigé pour cet essai.

Si les enroulements sont munis de prises, la réactance X et éventuellement la résistance R doivent être mesurées pour les positions correspondantes aux prises sur lesquelles les essais de court-circuit seront exécutés.

Au début des essais de court-circuit, la température moyenne des enroulements doit être comprise entre 0°C et 40°C.

■ courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit est caractérisé par :

- une valeur asymétrique de départ égale à $k \cdot 2 \times I_{cc}$ symétrique, où $k \cdot 2$ dépend du rapport des réactances et des résistances X/R (voir tableau ci-dessous).

Ce courant, de durée inférieure à une période, est la source des efforts électromagnétiques générés dans le transformateur.

- une valeur symétrique de courant de court-circuit, qui provoquera principalement l'effet thermique dans le transformateur.

Ce courant est fonction entre autre de la tension de court-circuit.

(Exemple : I_{cc} symétrique pour $U_{cc} 4 \% = 25 \times I_n$).

Le courant de court-circuit symétrique doit être calculé en tenant compte de l'impédance de court-circuit et de l'impédance du réseau pour les transformateurs de puissance assignée > 3150 kVA, ainsi que pour ceux < 3150 kVA si l'impédance du réseau est supérieure à 5 % de l'impédance de court-circuit (sinon, l'impédance du réseau est négligée).

La tolérance acceptée entre les valeurs spécifiées et les valeurs mesurées est de $\pm 10\%$ pour le courant symétrique de court-circuit, et $\pm 5\%$ pour la valeur crête du courant.

Valeurs du facteur $k \cdot 2$

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
k. 2	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

■ puissance apparente :

La puissance apparente de court-circuit du réseau à l'endroit où est installé le transformateur, pourra être spécifiée par l'acheteur dans son appel d'offres, pour permettre de trouver la valeur de I_{cc} symétrique à prendre en compte dans le calcul et dans les essais.

Si le niveau de puissance de court-circuit n'est pas spécifié, les valeurs données dans le tableau ci-dessous peuvent être utilisées :

Tension la plus élevée du de réseau en kV.	Puissance apparente court-circuit en MVA.
7,2 - 12 - 17,5 et 24	500
36	1000

■ dispositif de changement de prises :

Ce dispositif doit être capable de supporter les mêmes surintensités dues aux courts-circuits que les enroulements.

■ les bornes neutres :

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

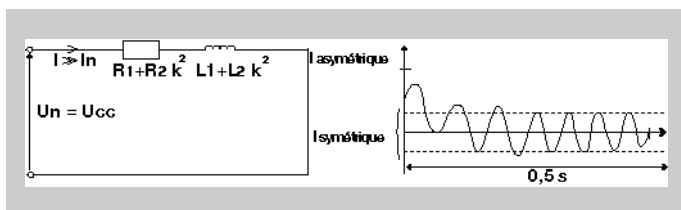
■ température :

La température maximale des enroulements après court-circuit ne doit pas dépasser 250°C pour le cuivre et 200°C pour l'aluminium.

Rôle de l'essai

Vérifier la tenue du transformateur aux courants de court-circuit (I_{cc}) définis dans la norme.

Le schéma de l'essai est identique à l'essai des pertes en court-circuit, mais le transformateur est soumis à $U_{cc} = U_n$, et donc à un courant de court-circuit élevé :



Exemple : pour un transformateur caractérisé par une $U_{cc} = 4\%$ (lors de la mesure de P_{cc}), le courant de tenue au court-circuit peut atteindre en module :

$$\| I_{\text{symétrique}} \| = 25 I_n$$

Par choix de l'instant d'enclenchement $U = 0$;

$$I_{\text{asymétrique}} = k \cdot 2 \times 25 I_n$$

Le transformateur est alors soumis :

- 1) à des efforts électrodynamiques considérables, car la Force = constante $\times I^2$.
- 2) puis, à un échauffement excessif.

Modalités de l'essai

Pour obtenir le courant de court-circuit, un des enroulements du transformateur est alimenté sous une tension ne devant pas dépasser 1,15 fois la tension nominale de l'enroulement alimenté, l'autre enroulement étant court-circuité.

De plus, l'instant d'enclenchement de la valeur crête initiale du courant dans l'enroulement de la phase en essai doit être réglé avec un enclencheur synchrone.

Les valeurs de ces courants ainsi que la tension appliquée entre les bornes de lignes doivent être enregistrées à l'aide d'un oscillographe.

Pour les transformateurs triphasés, le nombre total d'essais doit être de 9, à raison de 3 sur chaque colonne, la durée de l'essai étant de 0,5 secondes avec une tolérance de $\pm 10\%$.

Sauf spécification contraire du client, les essais sur chacune des colonnes pour les transformateurs à prises sont effectués sur des positions différentes du changeur de prises soit :

- 3 essais sur la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé sur l'une des colonnes extrêmes.
- 3 essais sur la prise principale sur la colonne du milieu.
- 3 essais sur la position correspondant au rapport de transformation le plus bas, sur l'autre des colonnes extrêmes.

Après chacun des essais, les impédances sont mesurées et comparées aux valeurs d'origine.

Détection des défauts et sanction de l'essai

Après l'essai, le transformateur et, s'il y en a un, le dispositif de protection par détection de gaz (DGPT2), doivent être inspectés.

Les résultats des mesures des réactances de court-circuit et les oscillogrammes pris aux différents stades des essais doivent être examinés pour y rechercher toute indication d'anomalie.

Le transformateur est ensuite soumis à nouveau aux essais individuels, notamment aux essais diélectriques qui sont opérés à 75 % de leur valeur initiale, avant d'être décué pour l'inspection de la partie active afin de déceler d'éventuels défauts apparents.

(Exemple de défaut : changements de position de connexion, déformation des enroulements, etc).

Le transformateur a réussi les essais de court-circuit si :

- les essais de routine ont été répétés avec succès.
- les mesures durant les essais de court-circuit et l'inspection après décuage ne révèlent aucun défaut.
- la réactance de court-circuit mesurée après les essais ne diffère pas de celle mesurée à l'état initial :

● de plus de 2 % pour les transformateurs à bobines concentriques. Toutefois, quand le conducteur de l'enroulement est une bande de métal, une limite plus élevée n'excédant pas 4 % pour les transformateurs dont U_{cc} est au moins égale à 3 %, peut être adoptée par accord entre constructeur et acheteur.

● ou de plus de 7,5 % pour les transformateurs à bobines concentriques non circulaires (oblong) ayant une U_{cc} au moins égal à 3 %. La valeur de 7,5 % peut être réduite par accord entre constructeur et acheteur.

Essais des transformateurs 60 Hz sur plate-forme alimentée à 50 Hz



Nos plates-formes d'essais étant alimentées à 50 Hz, l'essai des transformateurs 60 Hz demande quelques adaptations ;

Mesure de la tension de court-circuit et des pertes dues à la charge :

- La tension de court-circuit en pourcentage ($U_{cc}\%$) a 2 composantes : active et réactive.

Tension active :

$$U_r \% (60 \text{ Hz et } 75^\circ\text{C}) = 100 \frac{P_{cc}}{S_n}$$

Tension réactive :

$$U_x \text{ 60 Hz} = \frac{60}{50} \sqrt{U_{cc}^2 (\text{ambient, 50 Hz}) - U_r^2 (\text{ambient})}$$

et

$$U_{cc}\% (60\text{Hz } 75^\circ\text{C}) = \sqrt{U_r^2 (60\text{Hz, } 75^\circ\text{C}) + U_x^2 (60 \text{ Hz})}$$

P_{cc} = pertes dues à la charge à 75 °C et à 60 Hz.

S_n = puissance nominale.

- Les pertes par effet Joule sont indépendantes de la fréquence.

Les pertes spéciales P_s sont principalement des pertes par courant de Foucault, qui varient en raison inverse de la résistivité et en raison directe du carré de la fréquence.

Donc les pertes spéciales P_{s2} , à la température θ_2 et fréquence f_b , et les pertes P_{s1} , à la température θ_1 et fréquence f_a sont dans le rapport :

$$\frac{P_{s2}}{P_{s1}} = \frac{X + \theta_1}{X + \theta_2} \frac{f_b^2}{f_a^2}$$

avec $X = 235$ pour le cuivre et 225 pour l'aluminium.

Mesures des pertes à vide

Les pertes à vide sont pratiquement égales aux pertes dans le circuit magnétique. Dans celui-ci, les pertes sont dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault.

A induction constante les pertes par hystérésis varient proportionnellement avec la fréquence et celles dues aux courants de Foucault varient proportionnellement au carré de la fréquence.

Pour rester à induction constante, nous appliquerons à 50 Hz une tension $U = U_n \times (50/60)$.

Les pertes à 60 Hz (P_{V60}) se déduisent des pertes P_{V50} mesurées à 50 Hz par :

$$P_{V60} = 1,32 \times P_{V50}$$

De même, le courant à vide à 60 Hz se déduit de celui à 50 Hz :

$$I_{o60} = 1,1 \times I_{o50}$$

Essais diélectriques

– l'essai par tension induite doit durer :

- 60 sec. pour toute fréquence d'essai (f_e) 2 x fréquence nominale (f_n), soit $f_e = 120$ Hz.

- $\left[120 \times \frac{f_n}{f_e} \right]$ sec. avec un minimum de 15 sec.

pour $f_e = 2 \cdot f_n$, soit $f_e = 120$ Hz.

– l'essai par tension appliquée doit être réalisé à toute fréquence appropriée au moins égale à 80 % de f_n .

En conséquence, pour $f_n = 60$ Hz, la fréquence d'essai doit être : **$f_e = 0,8 \times 60$ c'est-à-dire $f_e = 48$ Hz.**

Donc l'essai à 50 Hz est valable, sans majoration de temps d'épreuve.

Essai d'échauffement

Compte-tenu du fait que nous utilisons la méthode de mise en charge simulée, dite méthode de court-circuit, nous injectons dans le transformateur un courant qui génère les pertes totales (P_t) égales à la somme des pertes à vide et des pertes dues à la charge.

Après stabilisation, nous réduisons la tension d'alimentation pour obtenir les pertes dans les enroulements pour I_n et f_n .

Comme pendant l'essai, nous sommes à 50 Hz au lieu de 60 Hz, nous ajustons le courant pour arriver aux pertes voulues par la formule :

$$P_{cc60} = P_j \frac{X + \theta_2}{X + \theta_1} + P_{s50} \frac{X + \theta_1}{X + \theta_2} \frac{60^2}{50^2}$$

Pour obtenir à 50 Hz les mêmes pertes qu'à I_n et 60 Hz, il faut injecter un courant

$$I = \sqrt{\frac{P_{cc60}}{P_{cc50}}} I_n$$

Mesure du niveau de bruit

La puissance sonore étant proportionnelle au carré de la fréquence, l'augmentation de niveau de bruit est de l'ordre de **$10 \log (60/50)^2 = 1,6$ dB.**

Il est donc possible de juger le niveau de bruit du transformateur 60 Hz par un essai à 50 Hz à même induction, à condition d'accepter une incertitude s'ajoutant aux erreurs de mesure inévitables.

Procès verbal d'essais n° 620786-01



tél. : 87 70 57 57
 fax : 87 51 10 16
 télex : 860 418 FRAFO

adresse postale :
 BP 140
 F 57211 Maizières-lès-Metz cedex

Produit : <i>Transformateur immergé de distribution poteau</i>	Puissance assignée : 100 kVA
Type : <i>Abaisseur - Extérieur - Triphasé</i>	Fréquence assignée : 50 Hz
Norme : <i>HN 52S20</i>	Masse totale : 470 kg
Diélectrique : <i>Huile</i>	Masse diélectrique : 76 kg
Mode de refroidissement : <i>ONAN</i>	Année : 1996

Ambiante maximum selon IEC. 76 : 40 °C	Altitude de fonctionnement : X < 1000 m
--	---

Tensions assignées : HT 20000 V	Courants : 2.89 A
Prises : HT 20500 V - 19500 V	

Isolement : 24 kV (125/50)	Tension appliquée : 50 kV	Durée : 60 s
----------------------------	---------------------------	--------------

Tensions assignées : BT 410 V	Courants : 140.8 A
-------------------------------	--------------------

Isolement : 1.1 kV (30/10)	Tension appliquée : 10 kV	Durée : 60 s
----------------------------	---------------------------	--------------

Couplages : <i>Dyn11</i>	Tension induite : 40000 V	Durée : 30 s	Fréquence : 200 Hz
--------------------------	---------------------------	--------------	--------------------

Observations : *Classe thermique A*
Procédures d'essais n° 49 et MOD/IQ/ESS008. - Essai d'étanchéité 100 g/cm²/6 h minimum satisfaisant.
France Transfo garantit que la teneur en PCB de l'huile minérale de ce transformateur en sortie d'usine est inférieure à 1 ppm.



	PV	IV/IN	PCC à 75°C	UCC à 75°C	PV+PCC à 75°C	Rapport de transformation	
Garanties	210 W	2.50 %	2150 W	4.00 %	2360 W	Prise principale	Autre
						± 0.43 %	± 1 %

Rapport de transformation assigné							
-----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

HT/BT	
1 - 49.99	
2 - 48.78	
3 - 47.56	
Résistances à 25.0 °C	
HT : 88.07	BT : 0.0223
87.86	0.0226
87.21	0.0225
Moyennes : 87.72	0.0225
RI ² : 1096 W	668 W
R1 ² 75 °C : 1307 W	796 W

Mesure des pertes à vide									Résultats			
Hz	U(V)	I1(A)	I2(A)	I3(A)	IV(A)	dW1±dW2	cte	k	PV	PV	IV/IN	IV/IN
50	410	0.410	0.255	0.390	0.352	195	1		195 W	-7.08 %	0.250 %	-90.01 %

Mesure des pertes dues à la charge à 25.0 °C (HT/BT)										Résultats à 75°C			
U(V)	I1(A)	I2(A)	I3(A)	cte	dW1±dW2	cte	k	Pmes	PCC	PCC	UCC	UCC	
820.0	2.89	2.89	2.88	1	1796	1		1796					
820.0			IN = 2.89 A					1796	2131 W	-0.88 %	4.26 %	6.43 %	

Edité le	PV+PCC	2326 W	PV+PCC	-1.43 %
Responsable des essais M. RONAT	Rendement		Chute de tension	
	cos φ 0.8 : 97.174 %		cos φ 0.8 : 3.930 %	
	cos φ 1.0 : 97.727 %		cos φ 1.0 : 2.199 %	

PV/IQ/ESS 17

Bibliographie et correspondances des normes

IEC	Publications internationales (International Electrical Commission)	IEC 76-1	IEC 76-2	IEC 76-3	IEC 76-4	IEC 76-5	IEC 296	IEC 354	IEC 270	IEC 551	
HD	Document d'harmonisation européen (Comité Européen de Normalisation Electrique)	HD 398-1	HD 398-2	HD 398-3	HD 398-4	HD 398-5				HD 399 S2	HD 428 S1
	Transformateurs de puissance : Généralités	■									
	Transformateurs de puissance : Echauffements		■								
	Transformateurs de puissance : Niveaux d'isolement et essais			■							
	Transformateurs de puissance : Prises et connexions				■						
	Transformateurs de puissance : Tenue au court-circuit					■					
	Spécification des huiles minérales isolantes neuves						■				
	Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile							■			
	Mesure des décharges partielles								■		
	Détermination des niveaux de bruit des transformateurs									■	
France											
NFC 52-100	Transformateurs de puissance :	■	■	■	■	■					
NFC 52-112-1	Transformateurs triphasés immergés dans l'huile, de 50 à 2500 kVA, de tension la plus élevée ne dépassant pas 24 kV dépassant 24 kV										■
NFC 52-112-3	Transformateurs triphasés immergés dans l'huile, de 50 à 2500 kVA, de tension la plus élevée ne dépassant pas 24 kV dépassant 36 kV										■
NFC 52-112-4	Détermination de la caractéristique de puissance d'un transformateur avec des courants de charge non sinusoïdaux										■
NFC 52-101	Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs						■				
Allemagne											
DIN 42 500	Drehstrom-Öl - Verteilungstransformatoren, 50 Hz, 50 bis 2500 kVA										■
VDE 0532 Teil 1	Allgemeines	■									
VDE 0532 Teil 2	Übertemperaturen		■								
VDE 0532 Teil 3	Isolationspegel und Spannungsprüfungen			■							
VDE 0532 Teil 4	Ansapfungen und Schaltungen				■						
VDE 0532 Teil 5	Kurzschlußfestigkeit					■					
VDE 0532 Teil 7	Bestimmung der Geräuschpegel									■	
	Belastbarkeit von Öltransformatoren							■			
VDE 0370	Neue Isolieröle für Transformatoren										
Belgique											
NBN C 52-223	Transformateurs triphasés de distribution	■	■	■	■	■					
NBN - HD 428.1 S	Transformateurs triphasés immergés dans l'huile, de 50 à 2500 kVA, de tension la plus élevée ne dépassant pas 24 kV dépassant 24 kV										■
	Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile							■			
NBN C 27 101	Spécification des huiles minérales isolantes neuves						■				
NBN C 52 001	Mesure des niveaux de bruit des transformateurs									■	
Angleterre											
BS 171	Power transformers	■	■	■	■	■					
BS 148	Unused mineral insulating oils for transformers										
BS7735-94								■			

Bibliographie et correspondances des normes (suite)

IEC	Publications internationales (International Electrical Commission)	IEC 76-1	IEC 76-2	IEC 76-3	IEC 76-4	IEC 76-5	IEC 296	IEC 354	IEC 270	IEC 551	
HD	Document d'harmonisation européen (Comité Européen de Normalisation Electrique)	HD 398-1	HD 398-2	HD 398-3	HD 398-4	HD 398-5				HD 399 S2	HD 428 S1
Espagne											
UNE 20-101	Transformadores de potencia	■	■	■	■	■					
UNE 20-110	Guida de carga para transformadores sumergidos en aceite							■			
UNE 21-315	Medida de los niveles de ruido de los transformadores									■	
UNE 21-320/5	Prescripciones para aceites minerales aislantes nuevos						■				
UNE 20-138	Transformadores trifásicos para distribución en baja tensión de 25 a 2 500 kVA, 50 Hz										■
UNE 5201											
UNE 5204 D											
Italie											
CEI 14-4	Trasformatori di potenza	■	■	■	■	■					
CEI 10-1	Oli minerali isolanti per trasformatori						■				
Danemark											
DEFU	Technical regulations for distribution transformers	■	■	■	■	■		■		■	
Suède											
SS 427 01 01	Power transformers (sauf divergences aux clauses 2 de IEC 76-1 et 5 de IEC 76-3)	■	■	■	■	■					
SS IEC 551	Measurement of transformers sound levels									■	
SS 427 01 06	Oil immersed power transformers - Loading capacity							■			
SS 427 02 01	Distribution transformers										
Hollande											
NEN 2761	Energietransformatoren. Algemeen	■									
NEN 2762	Energietransformatoren. Temperatuurverhoging		■								
NEN 2763	Energietransformatoren. Isolatie-niveaus en diëlektrische proeven (in voorbereiding)			■							
NEN 2764	Energietransformatoren. Aftakkingen en schakelingen				■						
NEN 2765	Energietransformatoren. Kortsluitskerte					■					
NEN 3184	Energietransformatoren	■									
NEN 3541	Kortsluitsterke van energietransformatoren met vermogens tot en met 1600 kVA (vervallen).										
Norvège											
NEN 05.71	Norske normer for krafttransformatorer : power transformers	■	■	■	■	■					
Autriche											
ÖVE-M 20, TEIL 1	Allgemeines	■									
ÖVE-M 20, TEIL 2	Übertemperaturen		■								
ÖVE-M 20, TEIL 3	Isolationspegel und Spannungsprüfungen			■							
ÖVE-M 20, TEIL 4	Anzapfungen und Schaltungen				■						
ÖVE-M 20, TEIL 5	Kurzschlußfestigkeit					■					
Portugal	pas de références normatives particulières										
Finlande	pas de références normatives particulières										