

Noyau magnétique

Le noyau magnétique doit être conçu de manière à réduire les pertes à leur plus bas niveau possible. Celles-ci sont principalement de deux natures : les pertes par hystérèse et les pertes par courant de Foucault.

Pertes par hystérèse :

$$P_h = k_1 f \hat{B}^n \quad [\text{W/kg}]$$

avec : k_1 constante liée au matériau
 f fréquence
 \hat{B} valeur de crête de l'induction
 $1,6 < n < 2,5$ exposant de Steinmetz

Pertes courants de Foucault :

$$P_F = k_2 f^2 t^2 \hat{B}^2 / \rho \quad [\text{W/kg}]$$

avec : k_2 constante liée au matériau
 t épaisseur des feuilles
 ρ résistivité électrique

Techniquement, différents procédés sont utilisés pour augmenter à la fois la perméabilité magnétique du matériau et sa résistivité électrique : adjonction de silicium, orientation des grains cristallins par laminage, fragmentation des grains par irradiation au laser. Plus récemment l'utilisation de fer amorphe produit par hypertrempe a permis de réduire jusqu'à 75% les pertes par courant de Foucault.

Isolation papier-huile

Les spires sont isolées à l'aide d'un papier fabriqué à partir du bois ou du coton (ou d'une combinaison des deux). Le plus connu est le *papier Kraft*, obtenu par un procédé chimique particulier (au sulfate). Ses principales caractéristiques sont l'uniformité de l'épaisseur (de 2 à 3 mm, sous forme d'une superposition de couches comprimées les unes sur les autres), son lissé, sa résistance mécanique, sa résistance au vieillissement, sa rigidité diélectrique et sa permittivité. Cette dernière doit être aussi proche que possible de celle de l'huile d'imprégnation, afin d'éviter les contraintes électriques à l'interface entre les deux matériaux.

Les huiles existent en multiples qualités, selon le type de transformateur, les conditions de température à supporter, etc. Leurs deux principales fonctions sont l'*isolation électrique* et le *refroidissement*. La chaleur est transportée depuis le noyau et les enroulements vers la cuve du transformateur, par une convection de l'huile.

Cette convection peut être *naturelle* (sous l'effet des gradients de température) ou *forcée* (à l'aide de pompes). La chaleur peut être évacuée simplement par la surface de la cuve ; mais le circuit de refroidissement peut aussi comporter des radiateurs, ventilés ou non, et parfois refroidis à l'eau.

Extraites du pétrole, les huiles minérales existent en trois catégories :

- les *alcanes* (ou *paraffines*), constitués d'atomes d'hydrogène fixés sur des chaînes linéaires de carbone ;
- les *cyclanes* (ou *naphènes*), constitués d'atomes d'hydrogène fixés sur des groupes de six atomes de carbone, reliés par des liaisons simples et formant des hexagones ;
- les *huiles aromatiques*, comme les cyclanes à l'exception du fait que les atomes de carbones peuvent avoir des liaisons doubles.

☞ Certaines caractéristiques des huiles sont mentionnées dans le chapitre 3, annexe [11].

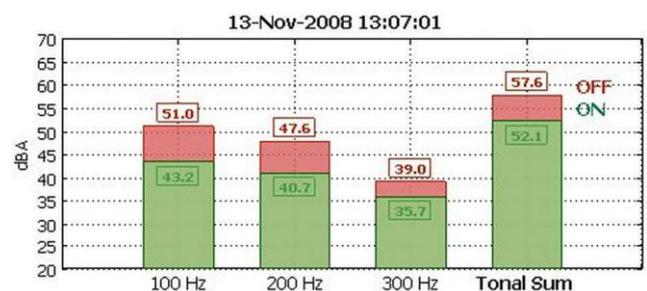
Cuve

La cuve doit satisfaire à des exigences de différentes natures :

- le remplissage de l'huile s'effectue généralement sous vide, de sorte que la cuve doit pouvoir supporter cette opération sans déformation excessive ;
- la stabilité mécanique doit être assurée durant le transport qui, pour les plus gros transformateurs, est une opération extrêmement complexe ;
- l'étanchéité à l'huile doit être garantie au niveau des soudures et de toutes les ouvertures (bornes de traversées, capteurs de mesure, etc.) ;
- la géométrie doit être optimisée de manière à réduire les pertes Joule dues aux courants induits ;
- la structure doit être conçue afin d'éviter les accumulations d'eau de pluie.

Compensation active du bruit

Les oscillations du flux magnétique à 50 Hz produisent des vibrations mécaniques principalement à 100 Hz et multiples. L'intensité du bruit qui en résulte peut s'avérer excessive en zone habitée. Une des solutions à ce problème est la *compensation active du bruit* : des micros captent le son et un système électronique génère un son en opposition de phase, envoyé dans des haut-parleurs. Le diagramme ci-dessous montre que la réduction obtenue (sur un site de Cossonay) permet de respecter la limite de 55 dB imposée en Suisse, durant la nuit, par l'Ordonnance sur la protection contre le bruit.



Source : ABB

Monitoring (Surveillance en continu)

De plus en plus d'équipements du réseau électrique sont pourvus de capteurs de mesures qui permettent d'évaluer leur état en permanence. C'est aussi le cas des transformateurs de puissance, et cela afin de :

- surveiller leur fonctionnement lorsqu'il est proche des limites admises, ou plus encore lorsque ces limites sont dépassées (surcharge temporaire) ;
- détecter un défaut de fonctionnement ;
- prévoir de futures défaillances possibles, en détectant l'évolution atypique d'un paramètre ;
- quantifier le vieillissement, afin d'évaluer la durée de vie restante et de planifier les maintenances ou le remplacement du système.

Un système de monitoring comporte forcément trois types de composants :

- des capteurs mesurant différentes grandeurs physiques (température, tension, vibrations, etc.) ;
- un système de transmission et de stockage des données enregistrées par les capteurs ;
- un système de traitement de ces données, permettant de tirer des conclusions et de prendre des décisions.

Dans un transformateur de puissance, on a les relations indiquées dans le tableau suivant, entre les grandeurs mesurées et les phénomènes potentiellement dommageables (selon Alain SCHENK, *Surveillance continue des transformateurs de puissance par réseaux de neurones auto-organisés*, thèse EPFL n°2390, 2001, p. 44.)

DÉFAUT POSSIBLE → PARAMÈTRE MESURÉ ↓	Contamina- tion de l'huile	Surcharge	Dégrada- tion de la cellulose	Claquage diélectrique	Bulles de gaz	Arc électrique	Défaut du noyau	Défaut des enroule- ments	Déplace- ment des enroule- ments
Température		?				?	?	?	
Analyse des gaz dissous	?	?	?	?	?	?	?		
Concentration de composés furianique			?						
Concentration d'humidité dans l'huile	?	?	?						
Niveau de décharges partielles				?	?	?			
Signature acoustique				?	?	?			
Intensité des vibrations de la cuve							?	?	?