



Pourquoi l'eau détruit-elle l'isolation des transformateurs de puissance ?

L'eau est un poison lent mais mortel pour les transformateurs de puissance

Martin Anglhuber, OMICRON electronics GmbH, Klaus/Austria

Table des matières

L'analyse de la réponse en fréquence diélectrique est un puissant outil utilisé pour déterminer la teneur en humidité des transformateurs de puissance et évaluer leur état et leur durée de vie restante. L'utilisation d'algorithmes améliorés comme PDC+ permet de réduire considérablement la durée de la mesure. L'automatisation de l'ensemble du processus de mesure et d'évaluation rend la technique simple et fiable pour tous les utilisateurs.

Mots-clés

humidité, isolation des transformateurs de puissance, spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS), courant de polarisation et de dépolarisation (PDC+), réponse en fréquence diélectrique (DFR), teneur en humidité

Résumé

L'eau est une menace pour l'isolation des transformateurs de puissance isolés à l'huile (ou aux esters). Elle entraîne une baisse de la résistance au claquage de l'huile et un vieillissement accéléré de l'isolant cellulosique. L'analyse de la réponse en fréquence diélectrique est un moyen adapté et précis d'évaluer la teneur en humidité de l'isolation et aide à déterminer l'état et la durée de vie restante du transformateur. Les anciens inconvénients de cette technologie, tels que longues durées de mesure et évaluation complexe, peuvent être éliminés grâce à un logiciel moderne. La technique PDC+, une version améliorée de la mesure du courant de polarisation et de dépolarisation (PDC), réduit jusqu'à 20 fois la durée de mesure. L'automatisation de l'ensemble du processus de mesure et d'évaluation rend la technique PDC+ simple et fiable pour tous les utilisateurs.

1 De l'eau dans les transformateurs de puissance

L'eau est la base de la vie sur notre planète. Elle est essentielle pour toute plante ou créature vivante. Mais il y a un secteur dans lequel l'eau réduit considérablement la vie : l'isolation huile-papier des transformateurs de puissance. Cette isolation se compose d'éléments en papier et en carton comprimé qui assurent la stabilité mécanique de l'isolation. Le principal composant du papier et du carton comprimé est la cellulose. Cette dernière est constituée de molécules de glucose qui sont liées entre elles et forment une chaîne (Figure 1). Le nombre moyen de molécules de glucose dans une chaîne de cellulose (également appelé « degré de polymérisation » ou « DP ») est d'environ 1 200 pour du papier neuf. Ces grandes chaînes confèrent au papier la résistance mécanique dont il a besoin pour fixer les enroulements, même dans des conditions difficiles, comme en cas de court-circuit.

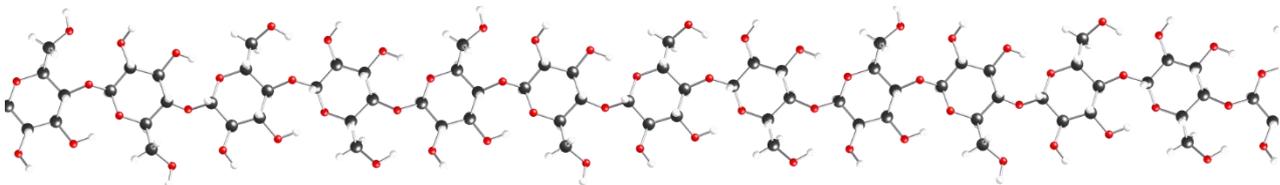


Figure 1 : Partie d'une molécule de cellulose contenant 12 molécules de glucose (schéma)

Malheureusement, ces chaînes peuvent être divisées par des molécules d'eau, ce qui réduit la force mécanique qu'elles sont capables de supporter. Une infime quantité d'humidité est toujours présente dans le papier d'un transformateur de puissance, même s'il est parfaitement séché. À des températures élevées, les molécules d'eau divisent les chaînes de cellulose, entraînant des longueurs de chaîne plus courtes et, comme effet secondaire, encore plus d'eau. Un processus d'auto-accélération a donc lieu, ce qui réduit de plus en plus la stabilité mécanique de l'isolation du transformateur. La vitesse de ce processus dépend fortement de la température mais également du taux d'humidité (Figure 2). Bien qu'il soit peu probable que la température moyenne du transformateur atteigne les températures plus élevées indiquées dans le graphique, il convient de tenir compte des points chauds locaux.

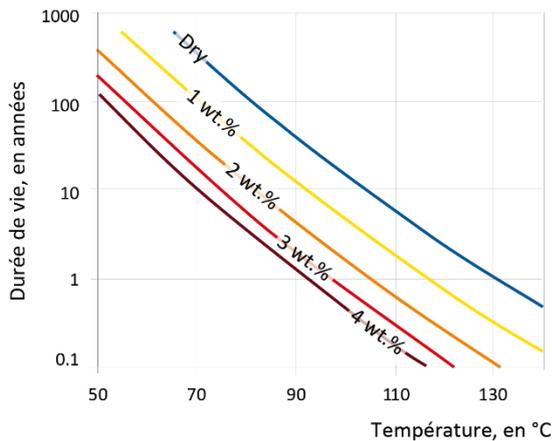


Figure 2 : Dépendance de l'espérance de vie par rapport à la teneur en humidité et à la température [1]

Lorsque la longueur moyenne d'une chaîne de cellulose dans le papier est inférieure ou égale à 200, elle est généralement considérée en fin de vie, car la résistance mécanique est alors tellement réduite qu'elle ne peut pas résister à des contraintes plus fortes.

Comme le vieillissement produit plus de molécules d'eau, la teneur en humidité d'un transformateur de puissance est un très bon indicateur de l'ancienneté de l'isolation du transformateur. Elle permet non seulement l'évaluation de la durée de vie restante, mais également un bon entretien basé sur l'état : un transformateur de puissance modérément humide peut être séché, ce qui réduit la teneur en humidité et ralentit ainsi le vieillissement. Si un transformateur de puissance est très humide, le papier est généralement très usagé et un séchage n'aidera pas, car il ne peut pas améliorer l'état du papier. S'il était sec, le séchage serait une perte de temps et d'argent.

Dans un transformateur de puissance rempli d'huile minérale, la quantité d'huile est près de 10 fois plus importante que la quantité d'isolant cellulosique (Koch, Reliable Moisture Determination in Power Transformers, 2008). Cependant, comme l'eau est à peine soluble dans l'huile, la grande majorité (> 99 %) de l'eau se trouve dans l'isolant cellulosique et non dans l'huile. Les échantillons d'huile des transformateurs de puissance contiennent de l'eau uniquement dans la plage des ppm (partie par million) basse tandis que l'eau dans la cellulose est généralement comprise entre 0,3 et 6 %. La teneur en humidité de l'huile dépend fortement de la température, de l'état de l'huile et des impuretés (Koch, Reliable Moisture Determination in Power Transformers, 2008). Des petites erreurs lors de la prise et de la manipulation des échantillons entraînent des écarts importants du résultat final (Koch, Reliable Moisture Determination in Power Transformers, 2008). La teneur en humidité de la cellulose fournit une valeur beaucoup plus fiable pour évaluer l'état, car elle est à peine influencée par ces paramètres. Malheureusement, la prise d'échantillon de la cellulose pour l'analyse de l'humidité est une tâche très difficile, car l'isolation solide d'un transformateur de puissance n'est pas facilement accessible.

2 Détermination de l'humidité par analyse de la réponse en fréquence diélectrique

L'analyse de la réponse en fréquence diélectrique (DFR) est un moyen simple et fiable de déterminer la quantité d'humidité dans un transformateur de puissance (Krueger & Koch, 2008). Lorsqu'un matériau absorbe de l'eau, il modifie ses

propriétés diélectriques, telles que la conductivité, la capacité et les pertes diélectriques. Ce principe est utilisé, par exemple, dans les capteurs d'humidité. La cellulose montre également une dépendance des valeurs diélectriques à différentes teneurs en humidité.

2.1 Principe de mesure

Dans l'analyse de l'humidité du diélectrique des transformateurs de puissance, l'isolation totale du transformateur principal est utilisée comme capteur d'humidité. Le dispositif de mesure est relié aux traversées et détermine les propriétés diélectriques de l'isolation. Le raccordement est très simple, comme lors d'une mesure normale du facteur de puissance/ $\tan(\delta)$. Une seule isolation doit être mesurée. Généralement, l'isolation principale entre la haute tension et la basse tension (CHL) est utilisée, car elle contient le plus de cellulose. Pour les mesures analogiques ou du facteur de puissance/ $\tan(\delta)$, une protection (mise à la garde) est utilisée pour contourner les influences indésirables (Figure 3).

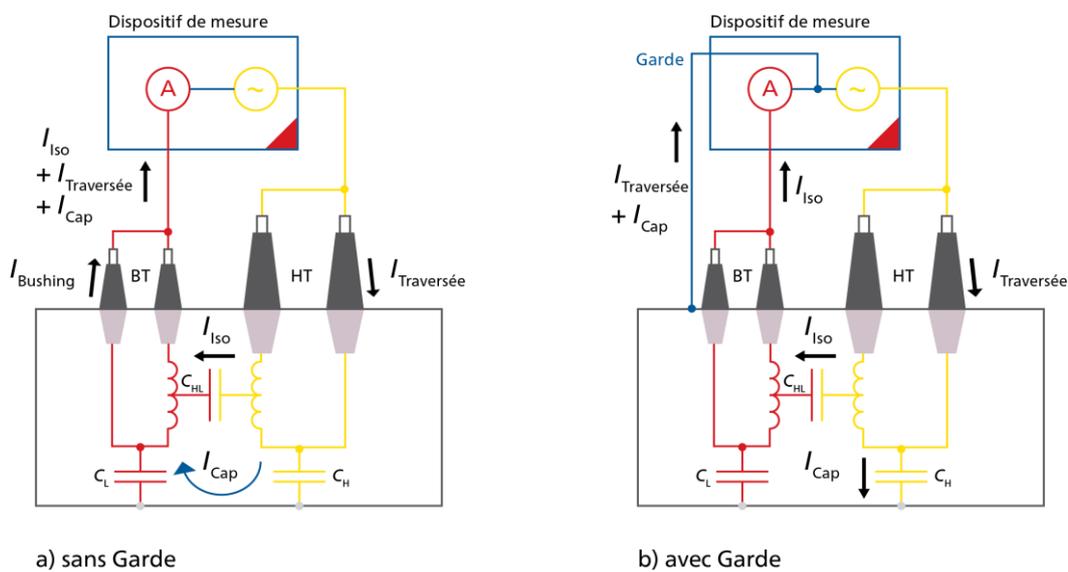


Figure 3 : Mesure CHL sur transformateur à 2 enroulements avec et sans mise à la garde

Comme l'humidité influence les propriétés diélectriques de la cellulose, en particulier à des fréquences très basses, la mesure est effectuée jusqu'aux μHz . La Figure 4 illustre les pertes diélectriques de quatre transformateurs de puissance dans une plage de fréquences allant des μHz à une centaine de Hz. Chaque courbe a une forme caractéristique qui comporte une « bosse » plus ou moins prononcée à des fréquences plus basses. La région située en dessous de la « bosse », à environ 1 à 2 dixièmes du sommet de la « bosse », est fortement influencée par l'eau contenue dans l'isolation papier. Il est essentiel de déterminer cette zone de fréquence.

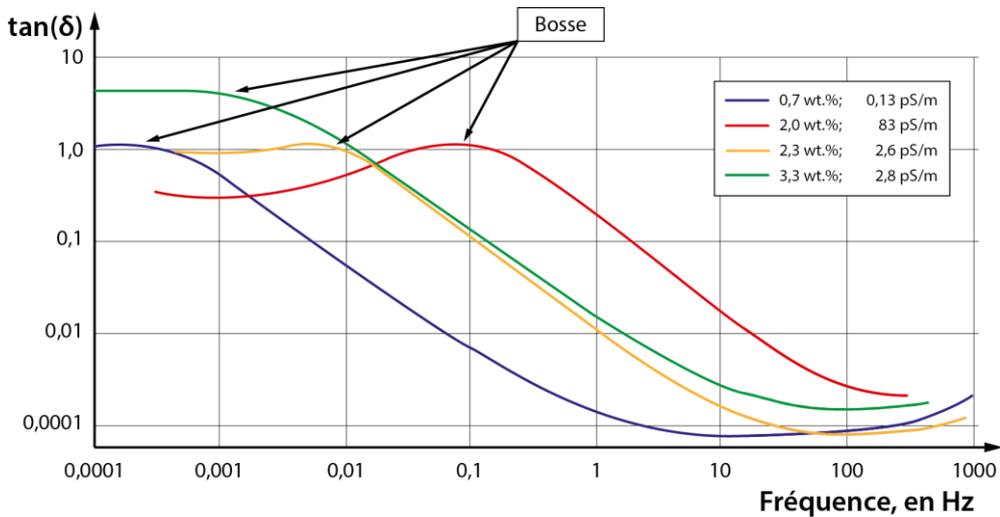


Figure 4 : Réponse diélectrique sur une large bande de fréquence de quatre transformateurs de puissance à 20 °C

2.2 Évaluation des résultats

L'évaluation des courbes est un processus complexe, car de nombreux paramètres influencent les propriétés diélectriques [2]. Cependant, un logiciel de mesure moderne, qui comprend une base de données des propriétés diélectriques du carton comprimé à différentes températures et teneurs en humidité, aide les utilisateurs à automatiser ce processus.

L'évaluation consiste à simuler une isolation de transformateur à l'aide de la base de données et modéliser les entretoises et les cales intermédiaires avec le modèle X-Y [4]. Ainsi, aucune « empreinte originale » ou mesure précédente n'est requise et toutes sortes de transformateurs (et éléments à isolation huile-papier) peuvent être simulés (Figure 5). Le paramétrage de la courbe simulée est adapté jusqu'à ce que la courbe simulée corresponde à la courbe mesurée. Dans ce cas, tous les paramètres (humidité, conductivité de l'huile, etc.) de la courbe simulée « correspondante » sont identiques aux paramètres du transformateur mesuré. L'ensemble de la procédure implique un grand nombre de calculs, mais est effectué en quelques secondes par le logiciel de mesure.

La méthode DFR a été décrite par le CIGRÉ [5] [6], et un guide IEEE est en cours d'élaboration [7]. Il n'existe aucune autre manière non invasive d'évaluer l'humidité dans un transformateur offrant une précision comparable.

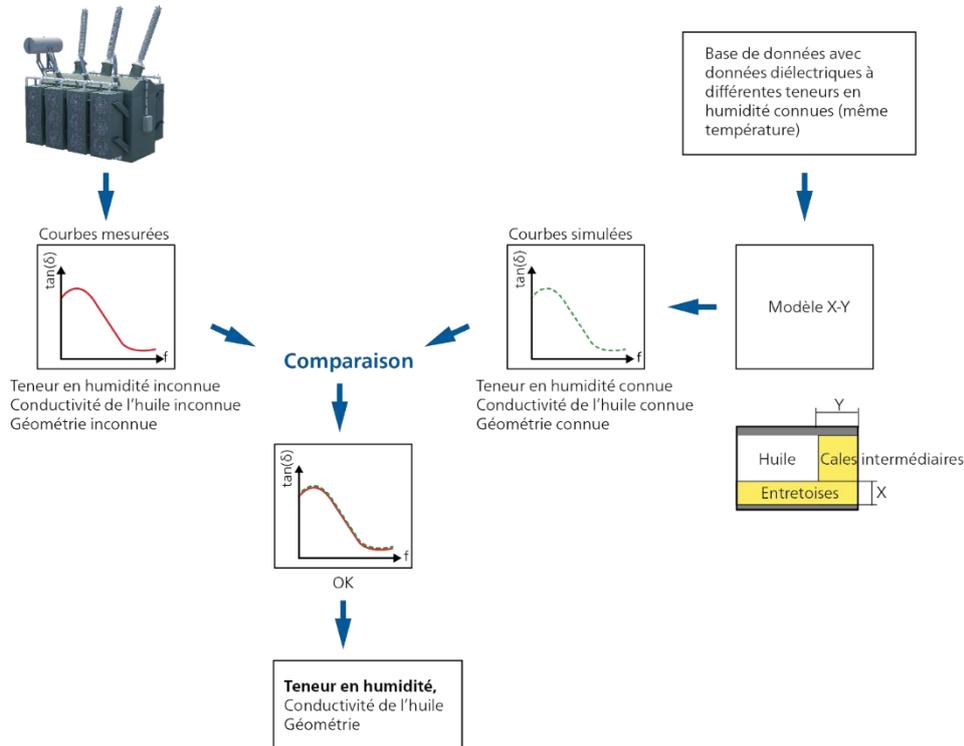


Figure 5 : Principe de l'évaluation de la teneur en humidité des transformateurs de puissance

3 Réduction de la durée des mesures DFR

3.1 Méthode de mesure FDS traditionnelle

Habituellement, les paramètres diélectriques sont mesurés dans le domaine fréquentiel en appliquant différentes fréquences et en mesurant la réponse. Cette technique est appelée spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS) et s'applique à toutes les fréquences, des μHz au GHz et au-delà. Elle est assez simple à manipuler, mais il faut beaucoup de temps pour mesurer les basses fréquences, car la durée d'une période des ondes sinusoïdales, par exemple à $10 \mu\text{Hz}$, est d'environ 27 heures, sans tenir compte de toutes les autres fréquences qui doivent également être mesurées.

3.2 Méthode de mesure PDC classique

Une autre méthode pour mesurer les propriétés diélectriques consiste à appliquer un palier de tension à l'élément testé et de mesurer le courant de polarisation qui en résulte pendant un certain temps. Cette information dépendante du temps peut être transférée aux propriétés diélectriques dépendantes de la fréquence [8]. C'est ce qu'on appelle la mesure du courant de polarisation et de dépolarisation (PDC), car habituellement on mesure et compare non seulement le courant de polarisation, mais également le courant de dépolarisation. Les algorithmes modernes nécessitent uniquement le courant de polarisation, ce qui divise par deux la durée de mesure. En utilisant le PDC au lieu de la FDS, la durée de la mesure peut diminuer considérablement, car une seule mesure de PDC fournit les informations de toutes les fréquences qui doivent être mesurées.

Ce principe permet de gagner du temps lors de la mesure : la conversion classique du domaine temporel au domaine fréquentiel utilise une corrélation statique entre la durée de mesure et la plage de fréquences calculée. Si, par exemple, la mesure du domaine temporel a été effectuée pendant 1 000 secondes, la réponse en fréquence a toujours été calculée jusqu'à la fréquence inverse de 0,001 Hz.

3.3 Temps amélioré de la méthode de mesure PDC+

Un nouvel algorithme appelé PDC+ utilise une approche dynamique et calcule jusqu'à 20 fois plus de données dans le domaine fréquentiel à partir des mêmes informations du domaine temporel (Figure 6).

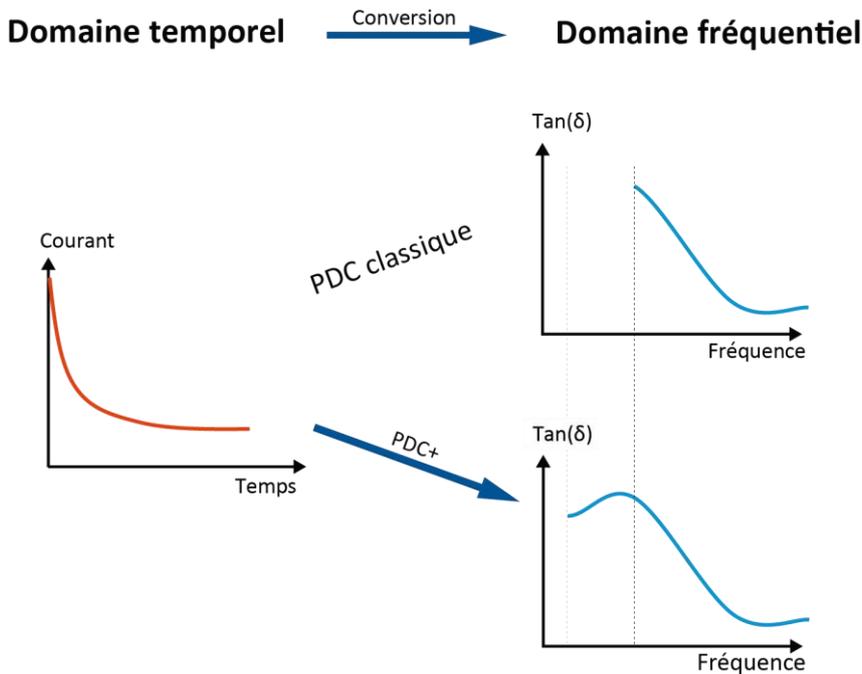


Figure 6 : Conversion du domaine temporel au domaine fréquentiel pour les PDC et PDC+ classiques

Ainsi, la technique PDC+ permet des mesures beaucoup plus courtes pour la même plage de fréquences que les techniques FDS ou PDC classiques (Figure 7). Les dispositifs de mesure modernes combinent la FDS pour les hautes fréquences et le PDC+ pour les basses fréquences. Là où les mesures FDS classiques prennent plus d'une journée pour les mesures de 1 kHz à 10 μHz, les dispositifs modernes FDS et PDC+ n'ont besoin que de 30 minutes à 1 heure 45 minutes.



Figure 7 : Temps de test pour un balayage en fréquence de 1 kHz à 10 μHz

Il existe également une autre manière de diminuer le temps de test. Dans de nombreux cas, il est inutile de mesurer toute la plage de fréquences jusqu'à 10 μHz. Si le test peut être arrêté plus tôt, vous pouvez gagner plus de temps. Toutefois, il peut s'avérer critique de raccourcir la durée de mesure, car la plage de fréquences importante sous la bosse doit être mesurée. Si le test est interrompu trop tôt, les résultats n'ont aucune valeur et toute la mesure doit être répétée.

La fréquence minimale requise, à mesurer pour obtenir des résultats valides, n'a pas de corrélation directe avec la température du transformateur, ce qui ne permet pas de déterminer la plage de fréquences requise (Figure 8). La plage de fréquences requise n'est également pas directement liée à la teneur en humidité de l'échantillon (Figure 8).

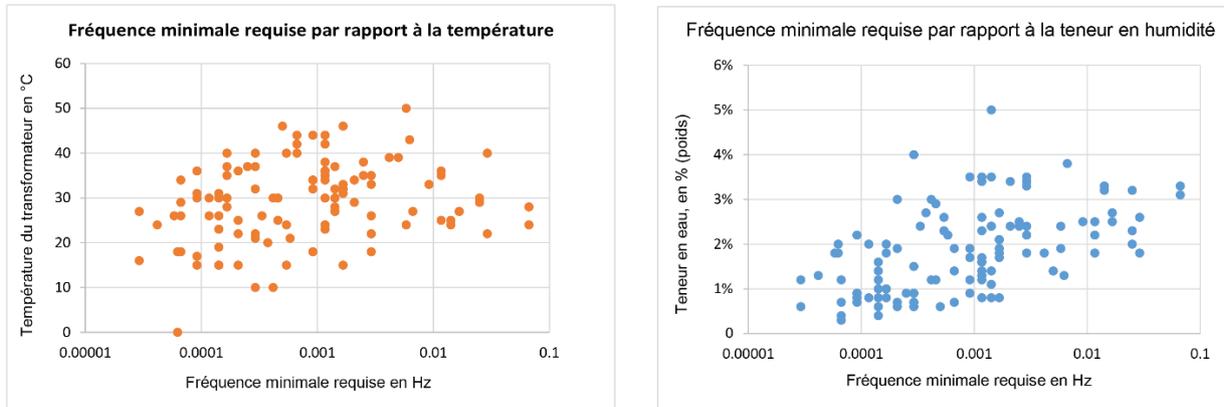


Figure 8 : Corrélation entre la température du transformateur et la teneur en humidité, et la fréquence minimale requise à mesurer. L'évaluation est basée sur 115 mesures diélectriques sur des transformateurs de puissance.

Un paramètre est directement lié à la bosse et mesuré directement : la partie réelle de la capacité complexe, appelée C' ou la plupart du temps plus simplement « capacité ». À de hautes fréquences, elle est stable mais au début de la bosse elle commence à augmenter (Figure 9). La $\tan(\delta)$ étant le quotient de la partie imaginaire C'' (c'est-à-dire les pertes) et la partie réelle de la capacité C' , il est évident qu'une augmentation plus importante de C' que de C'' conduit à une $\tan(\delta)$ inférieure. L'augmentation de C' peut servir à détecter la position de la bosse. Étant donné que la partie située de 1 à 2 dixièmes à gauche de la bosse est dominée par l'influence de l'humidité, cette plage de fréquences doit être mesurée. Les basses fréquences ne sont pas nécessaires, il est donc possible d'arrêter la mesure une fois que cette plage de fréquences a été déterminée.

L'avantage d'utiliser la capacité C' est que sa valeur est rarement influencée par des perturbations. En outre, pour certains éléments, par exemple, les transformateurs de puissance avec une bonne huile mais une teneur en humidité plus élevée, la courbe de $\tan(\delta)$ ne montre pas une bosse prononcée mais l'évaluation de l'augmentation de C' fournit des informations correctes.

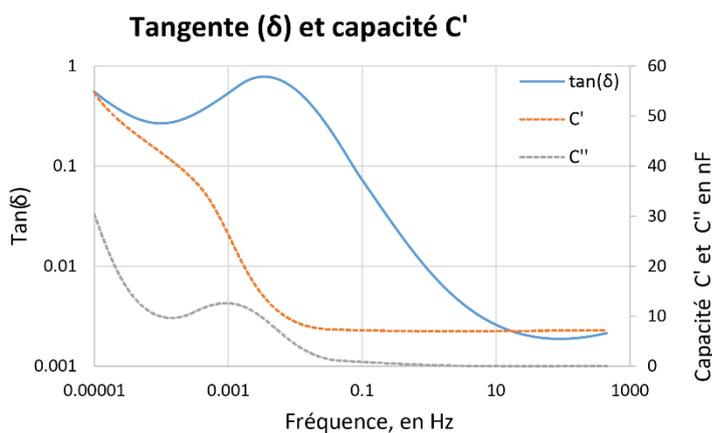


Figure 9 : Corrélation entre la « bosse » en $\tan(\delta)$, la partie réelle C' et la partie imaginaire C'' de la capacité pour un transformateur de puissance

L'effet n'est pas seulement prouvé de manière empirique, il peut également être dérivé du comportement diélectrique : une augmentation de C' dans cette zone de basse fréquence correspond à une polarisation de la charge d'espace qui se produit dans l'isolant cellulosique. Par conséquent, la zone de fréquence dans laquelle C' augmente (par rapport aux hautes fréquences) est influencée par la cellulose.

Avec les informations de la plage de fréquences requise, disponibles pendant la mesure, la plage de fréquences peut être limitée à la plage minimale requise. Ceci permet de réduire considérablement le temps de test dans la plupart des cas et évite des mesures imprécises avec des plages de fréquence trop courtes.

4 Dispositifs de mesure DFR modernes

Par le passé, la grande complexité de la mesure, en plus de la durée de mesure, était l'un des grands problèmes liés à la détermination de l'humidité des diélectriques. Même si le montage de test est très simple, la détermination de la bonne plage de fréquences et l'évaluation de la courbe nécessitaient des connaissances de base.

Le logiciel moderne de mesure DFR est en mesure de définir automatiquement et individuellement la plage de fréquences pour chaque transformateur de puissance. Dans un premier temps, la plage de fréquences maximale est définie et lorsque le logiciel a déterminé l'augmentation de C' , il peut calculer et ajuster la plage de fréquences restante requise et la durée de mesure correspondante.

L'augmentation de C' aide à réduire la durée et permet une évaluation plus précise de l'humidité, car la partie de la courbe dominée par l'humidité est identifiée de manière fiable. Le logiciel de mesure moderne est en mesure d'ajuster les courbes et d'évaluer la teneur en humidité et la conductivité de l'huile automatiquement dès que les données requises ont été mesurées. Il possède généralement une fonction d'évaluation automatisée qui compense les influences de géométrie de l'isolation, la conductivité de l'huile et les effets secondaires du vieillissement. L'équipement de test doit être en mesure d'effectuer l'évaluation automatique conformément aux normes nationales, internationales ou définies par l'utilisateur.

5 Conclusion

L'eau est un danger pour l'isolation des transformateurs de puissance à isolation huile-papier, car elle est responsable du vieillissement et de la diminution de la résistance mécanique de l'isolation. En cas d'augmentation de la teneur en humidité, il est nécessaire d'appliquer des contre-mesures, comme le séchage, avant que l'isolation ne soit fortement usagée. Les mesures diélectriques permettent d'évaluer avec fiabilité la teneur en humidité sans les inconvénients d'autres méthodes.

La nouvelle méthode PDC+ associée à un logiciel moderne permet de diminuer considérablement la durée de mesure et de faciliter la pratique.

Avec l'automatisation de l'ensemble du test, qui est possible dans un logiciel moderne, le technicien d'essai a juste à configurer l'équipement de test et appuyer sur le bouton de démarrage. Le seul paramètre qui doit être saisi manuellement est la température de l'élément. Par conséquent, même les utilisateurs inexpérimentés peuvent évaluer de manière fiable la teneur en humidité des transformateurs de puissance. Cette information permet à l'utilisateur de déterminer si des mesures de prolongation de la durée de vie doivent être prises ou si l'élément est encore en bon état.

6 Références

- CIGRE. (2002). *Technical Brochure 254: Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers*. CIGRE.
- CIGRE. (2010). *Technical Brochure 414: Dielectric Response Diagnoses For Transformer Windings*. Dielectric-WGC57.161. (s.f.). PC57.161 - IEEE Draft Guide for Dielectric Frequency Response Test.
- Graevert, U. (2004). Dielectric Response Analysis of Real Insulation Systems. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*.
- Koch, M. (2008). *Reliable Moisture Determination in Power Transformers*. Sierke Verlag.
- Koch, M., & Kaufmann, F. (2009). Transforming Dielectric Response Measurements from Time to Frequency Domain. *Nordis*. Göteborg.
- Krueger, M., & Koch, M. (2008). A fast and reliable dielectric diagnostic method to determine moisture in power transformers. *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*.
- Lundgaard, L. E. (2004). Aging of oil-impregnated paper in power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), 230-239.

Pistes

- L'eau diminue la durée de vie de l'isolation huile-papier des transformateurs de puissance.
- La DFR est un moyen simple et fiable de déterminer la quantité d'humidité dans l'isolation d'un transformateur de puissance.
- Les dispositifs de DFR modernes permettent d'évaluer automatiquement la teneur en humidité et la conductivité de l'huile dès que les données requises ont été mesurées.
- Associée à un logiciel moderne, la nouvelle méthode PDC+ permet des durées de mesure beaucoup plus courtes.

Autor



Martin Anglhuber a obtenu son diplôme en génie électrique à l'université technique de Munich en 2007. De 2007 à 2011, il a travaillé en tant qu'assistant scientifique à l'Institute for High-Voltage Technology and Power Transmission (Institut de technologies haute tension et transmission de puissance) de l'université technique de Munich en Allemagne, où il a effectué des recherches sur les nanocomposites polymères utilisés comme matériaux d'isolation dans les appareils à haute tension. Il a obtenu son doctorat en ingénierie (Ph.D.E.E.) en 2012.

Depuis 2012, il travaille chez OMICRON Electronics à Klaus, en Autriche, en tant que chef de produit spécialisé dans le domaine du diagnostic diélectrique des transformateurs.

OMICRON est une société internationale qui développe et commercialise des solutions innovantes de test et de diagnostic pour l'industrie électrique. Les produits OMICRON offrent aux utilisateurs une fiabilité extrême dans l'évaluation de leurs équipements primaires et secondaires. Des services dans le domaine du conseil, de la mise en service, du test, du diagnostic et de la formation viennent compléter l'offre OMICRON.

Des clients dans plus de 140 pays bénéficient déjà de la capacité d'OMICRON à mettre en oeuvre les technologies les plus innovantes dans des produits d'une qualité irréprochable. Les centres de support implantés sur tous les continents leur offrent en outre une expertise et une assistance de tout premier plan. Tout ceci, associé à un réseau solide de partenaires commerciaux a contribué à faire de notre société un leader sur son marché dans l'industrie électrique.

Pour un complément d'information, une documentation supplémentaire et les coordonnées précises de nos agences dans le monde entier, veuillez visiter notre site Internet.