

Réalisation de mesures fiables et reproductibles de la réponse en fréquence sur les transformateurs de puissance

Prof. Dr. Stephanie Uhrig, Université des sciences appliquées de Munich
Michael Rädler, OMICRON electronics GmbH

Résumé

L'analyse de la réponse au balayage en fréquence (SFRA) est devenue une méthode classique pour évaluer l'intégrité mécanique et électrique de la partie active d'un transformateur de puissance. Elle offre une sensibilité très élevée pour évaluer les dommages éventuels après le transport ou pour le dépannage après un événement spécifique tel qu'un court-circuit à proximité entraînant des forces mécaniques élevées. Toutefois, les utilisateurs ont souvent du mal à atteindre une reproductibilité élevée, ce qui est essentiel pour une évaluation fiable de l'état du transformateur. Les écarts causés par les problèmes de reproductibilité peuvent conduire à une mauvaise interprétation, à des inspections inutiles ou à des activités de maintenance coûteuses. Cet article se concentre sur les bonnes pratiques afin d'effectuer des mesures SFRA hautement répétables et reproductibles.

1 Introduction

La méthode d'analyse de la réponse au balayage en fréquence (SFRA) a été introduite pour vérifier l'intégrité de la partie active d'un transformateur de puissance. Après la fabrication, les transformateurs de puissance sont transportés sur site, souvent sur de longues distances en utilisant différents moyens de transport comme le bateau, le train ou un camion. Pendant le transport et le chargement d'un véhicule à l'autre, le transformateur peut être exposé à des chocs mécaniques. De tels chocs peuvent également être causés par des tremblements de terre ou des impacts mécaniques causés par des forces survenant en cas de court-circuit après une défaut. Tous ces impacts peuvent entraîner une déformation ou un déplacement partiel de la partie active. Les mesures de diagnostic conventionnelles, comme le rapport de transformation incluant les courants de magnétisation, l'impédance de court-circuit à la fréquence nominale ainsi que la réponse en fréquence des pertes parasites supplémentaires (FRSL), peuvent présenter des inconvénients en termes de sensibilité pour détecter et prouver des déformations mécaniques. Par exemple, le buckling d'un enroulement n'influence généralement pas les mesures de rapport ou de résistance d'isolement et est difficile à détecter en cas de modification de la capacité. En comparaison, la SFRA est la méthode la plus sensible pour une évaluation fiable du circuit magnétique et de l'enroulement [1]. Cet article présente plusieurs bonnes pratiques sur la manière d'effectuer les mesures SFRA afin d'assurer des résultats de test hautement répétables et reproductibles.

2 Notions de base de la méthode SFRA

La méthode SFRA comprend une mesure de réponse en fréquence hautement répétable et reproductible sur un transformateur de puissance et la comparaison faite ensuite avec une empreinte existante, également appelée mesure de référence [3], [4]. En principe, trois méthodes sont généralement employées pour évaluer les traces SFRA mesurées :

- Comparaison basée sur le temps (les résultats actuels de la SFRA seront comparés aux résultats précédents du même échantillon) ;
- Comparaison basée sur la construction (la SFRA d'un transformateur sera comparée à celle d'un autre de même conception) ;
- Comparaison basée sur la phase (les résultats de la SFRA d'une phase seront comparés aux autres traces de la même unité).

La méthode à privilégier est la comparaison basée sur le temps. Toutefois, dans la majorité des cas, l'empreinte ou mesure de référence n'est pas disponible. Néanmoins, une simple comparaison des graphiques SFRA des phases ou une comparaison par type permet d'obtenir une évaluation réussie des résultats. Même si une empreinte de référence du transformateur est disponible, l'expérience a démontré que la comparaison doit être effectuée avec soin car, dans certains cas, les écarts observés ne sont pas liés à des déformations, mais à des mesures dans des conditions différentes ou à des erreurs de mesure [8]. Pour surmonter ces facteurs trompeurs, nous proposons dans cet article le concept global de comparaison basée sur le temps.

2.1 Mesure de la réponse en fréquence

La partie active d'un transformateur de puissance, composée de l'enroulement, du circuit magnétique, de l'isolation et des câbles de connexion, forme un réseau électrique complexe comme indiqué à la Figure 1. Un tel réseau possède des caractéristiques uniques qui peuvent être visualisées par la réponse en

fréquence : un signal sinusoïdal basse tension à fréquence variable de 10 V, par exemple, est appliqué à une borne et la réponse (U_2) est mesurée sur une autre borne (Figure 2). Pour mesurer l'amplitude, le déphasage et la fréquence du signal injecté, un canal de mesure de référence (U_1) est relié au même point d'injection que la source [2]. La réponse en fréquence se compose de l'amplitude, du rapport et du déphasage entre les deux bornes.

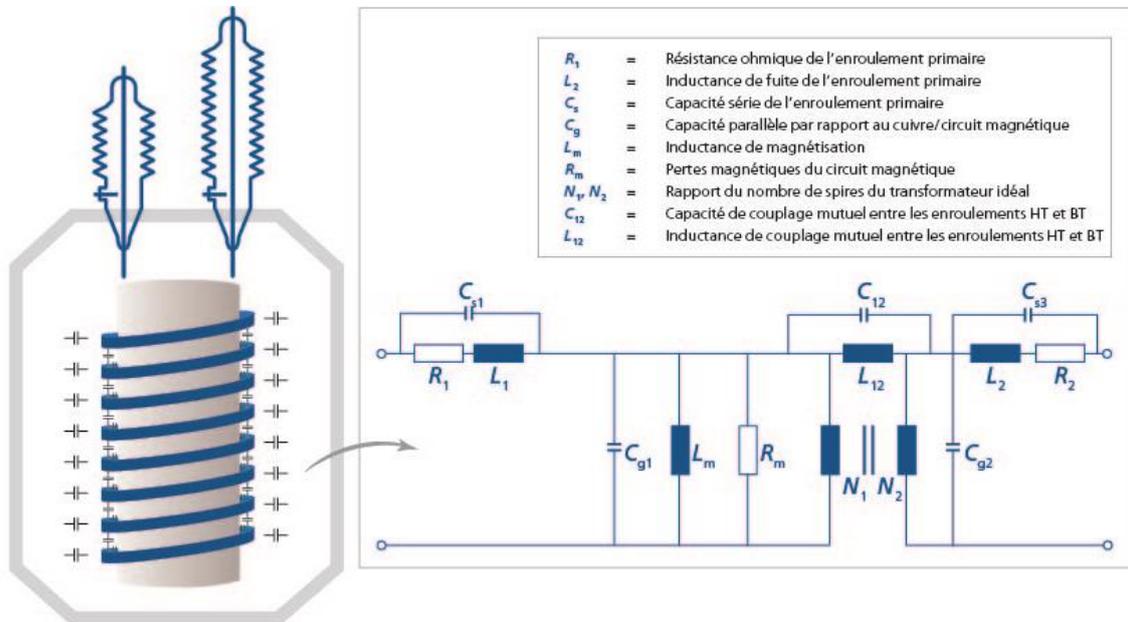


Figure 1 : Circuit équivalent R-L-C simplifié d'un transformateur de puissance

La réponse en fréquence peut être mesurée de différentes manières afin de recueillir plus d'informations pour une évaluation élaborée. L'approche la plus commune est la mesure en circuit ouvert. Ainsi, la réponse en fréquence est mesurée entre deux bornes de même niveau de tension, laissant toutes les autres bornes ouvertes. Lors de la mise en court-circuit des bornes de l'autre niveau de tension (par exemple, l'enroulement basse tension lors de la mesure des enroulements haute tension), une mesure en court-circuit est effectuée. Une mesure capacitive entre enroulements consiste en un test entre deux enroulements sur la même colonne du circuit magnétique (par exemple l'enroulement haute et basse tension), tandis que toutes les autres bornes sont ouvertes. Une mesure inductive entre enroulements est également effectuée entre deux enroulements sur la même colonne du circuit magnétique, tandis que les pinces de mesure sont montées sur chaque borne de l'enroulement et l'autre extrémité de l'enroulement est raccordée à la terre.

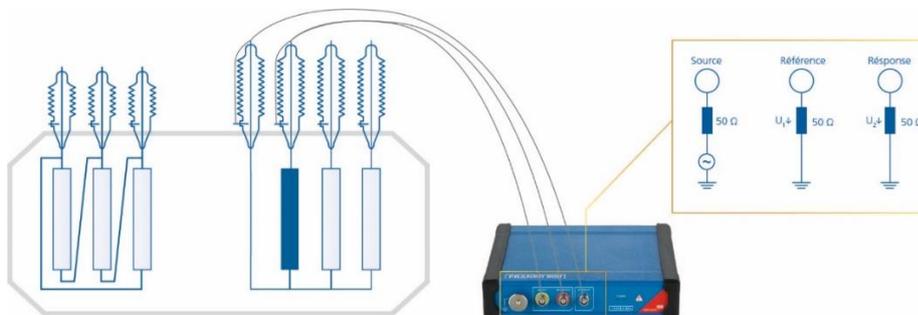


Figure 2 : Configuration type d'une analyse de la réponse au balayage en fréquence

2.2 Méthodes d'analyse pour les mesures SFRA

Selon leurs influences principales, les différents types de défaillance se révèlent plus forts dans les différentes plages de fréquence. Par exemple, les phénomènes au niveau du circuit magnétique influenceront la zone basse fréquence tandis que les problèmes de connexion se trouveront dans la plage très haute fréquence supérieure à 1 MHz [1]. L'expérience montre que les problèmes de montage, comme le fait de ne pas appliquer le concept de tresse la plus courte, peuvent influencer la réponse en fréquence même à 500 kHz. Cependant, il est difficile de fournir un tableau général montrant la relation entre la plage de fréquence et les caractéristiques du transformateur, car trop de facteurs influencent la plage de fréquence (par exemple, la valeur nominale MVA, le type d'enroulement, le niveau de tension, etc.). Les références de base sont disponibles dans la brochure du CIGRÉ. Différents outils d'analyse peuvent être utilisés sur la base d'indices mathématiques [5] ou de changements de caractéristiques dans les courbes mesurées [6]. Pour chaque analyse, une empreinte ou mesure de référence est nécessaire. Si elle est disponible, une comparaison doit toujours être faite avec une mesure précédente du même transformateur utilisant la même configuration [7], ce que l'on appelle une comparaison basée sur le temps. Une telle mesure de référence peut provenir, par exemple, de tests de mise en service ou de tests approfondis sur site. Sinon, si aucune mesure de référence de ce transformateur n'est disponible, la réponse en fréquence peut être comparée à celle d'un élément identique. Les éléments identiques ont généralement une réponse en fréquence très similaire, mais non identique, comme le montre la Figure 3. Par conséquent, de petits écarts sont acceptables et n'indiquent pas nécessairement un problème.

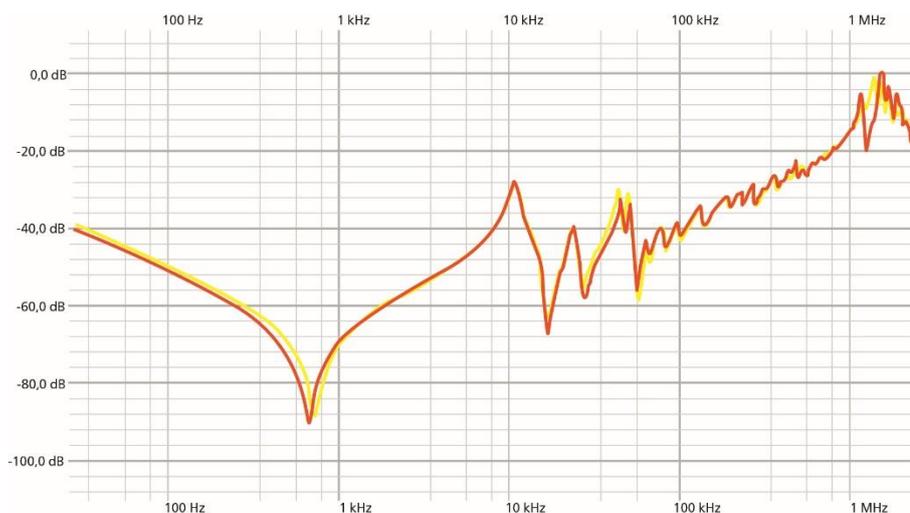


Figure 3 : Réponse en fréquence mesurée lors d'un test en circuit ouvert sur des transformateurs identiques (enroulement en disque entrelacé de 200 MVA, 230 kV)

Dans les cas où aucune trace d'un élément identique n'est disponible, des comparaisons entre phases peuvent être effectuées. Une bonne comparaison n'est possible que pour une conception symétrique, ce qui n'est pas exactement le cas pour les conceptions courantes. Des écarts encore plus importants peuvent être causés par des différences de construction entre les phases. Les comparaisons entre phases exigent donc la plus grande expérience. En général, la phase centrale comprend le plus d'écart, tandis que les deux autres phases se superposent avec une similarité raisonnable. Les principaux écarts entre la phase centrale et les phases extérieures sont attendus à des fréquences plus basses, qui sont principalement affectées par le circuit magnétique en raison des différents chemins du courant.

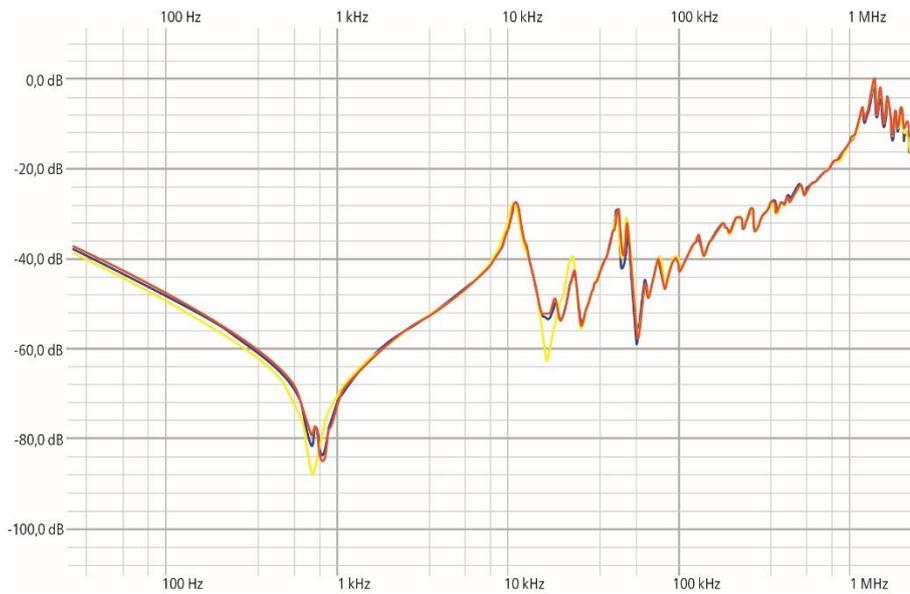


Figure 4 : Comparaison des traces de réponse en fréquence mesurées sur trois phases d'un même transformateur (enroulement en disque entrelacé de 200 MVA, 230 kV)

3 Importance de la technique de connexion

La SFRA est une méthode très sensible utilisée pour détecter les moindres modifications dans le réseau électrique d'un transformateur de puissance. L'avantage d'être très sensible peut parfois être un inconvénient en termes de répétabilité et de sensibilité au bruit. Par conséquent, la technique de connexion est essentielle pour atteindre un haut degré de reproductibilité, en particulier dans la plage haute fréquence supérieure à 500 kHz [1], [9].

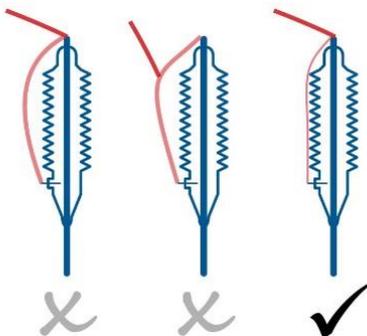


Figure 5 : Schéma de la configuration recommandée conformément à la norme CEI 60076-18



Figure 6 : Exemple de concept de connexion par tresse la plus courte : les câbles de mesure (noirs) sont connectés à la borne de traversée et la tresse de mise à la terre à la borne et à la bride de traversée

La norme CEI 60076-18 décrit en détail la procédure recommandée pour un montage de mesure correct et reproductible (Figure 5). Il est recommandé d'utiliser des câbles coaxiaux à double blindage qui sont connectés à la borne de traversée. À partir de là, une connexion à la bride ou à la cuve doit être installée sur une terre à faible inductance, de préférence à l'aide d'une tresse plate et large en aluminium au lieu d'un simple câble. Comme expliqué dans la référence [9], les tresses ont une surface large, une faible inductance et la maille réduit considérablement l'effet de peau au-delà de 80 kHz. Par conséquent, la structure de la tresse fournit une meilleure conductivité pour les hautes fréquences, ce qui permet une suppression du bruit plus efficace vers la terre qu'avec l'utilisation de câbles simples.

La longueur du raccordement à la terre influence la réponse en fréquence. Pour obtenir une reproductibilité élevée, il est conseillé d'utiliser la longueur la plus courte possible en tirant fermement la tresse le long du corps de la traversée, comme illustré à la Figure 6.

Outre la technique de connexion elle-même, il est important d'établir un contact électrique correct entre la borne ou la bride et la pince de mesure utilisée. Le nettoyage de la borne et le retrait des couches de laque aident à réduire la résistance de contact. Les appareils modernes SFRA fournissent une vérification de la boucle de mise à la terre pour assurer des connexions correctes avec une faible résistance de contact de mise à la terre.

4 Facteurs d'influence de la réponse en fréquence

Comme nous l'avons vu précédemment, il est essentiel qu'une méthode comparative comme la SFRA permette d'exclure avec la plus grande confiance les facteurs d'influence liés au montage de mesure ou les facteurs externes qui seront décrits dans le chapitre suivant. À des fins d'exhaustivité, il convient de mentionner que pour les cas d'utilisation décrits, le système de test SFRA d'OMICRON - le FRANEO 800 - a été utilisé et la mesure en circuit ouvert de bout en bout a été effectuée sur différents éléments.

4.1 Facteurs du montage de mesure

Mise en court-circuit et à la terre des enroulements tertiaires et des bornes neutres séparées

Le type de mesure en « circuit ouvert » ou « court-circuit » définit si les bornes du niveau de tension opposé doivent être mises en court-circuit ou non. Cela signifie qu'en mesurant le côté haute tension, il définit si les bornes basse tension doivent être mises en court-circuit ou non.

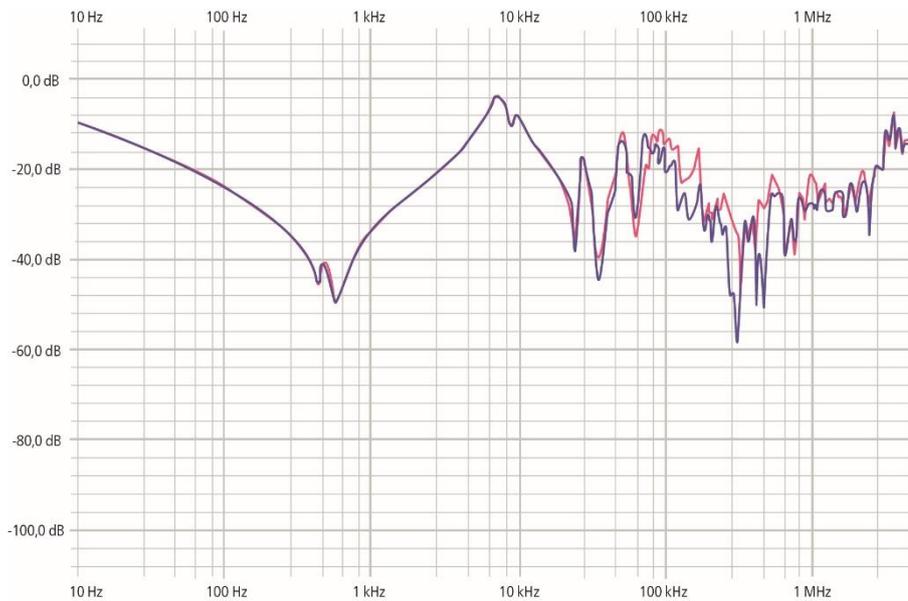


Figure 7 : Influence du tertiaire mis à la terre (bleu) et non mis à la terre (rouge) sur les courbes de circuit ouvert BT mesurées

Le type de mesure ne fournit pas d'informations sur la manière de traiter les bornes neutres séparées ou les enroulements tertiaires qui influencent de manière significative la réponse en fréquence mesurée. Cela inclut les enroulements tertiaires flottants, fermés ou mis à la terre. La Figure 7 montre les écarts entre deux mesures en circuit ouvert effectuées sur les enroulements basse tension avec enroulement tertiaire mis à la terre et non mis à la terre. Différents écarts, en particulier dans le domaine du couplage mutuel (interaction des enroulements) sur la réponse en fréquence mesurée, peuvent être observés. En général, la réponse en fréquence de l'inductance de magnétisation et de la capacité parallèle n'est pas affectée. Par conséquent, il est suggéré de laisser toutes les autres bornes ouvertes et non mises à la terre comme le recommande la norme IEEE C57.149 [3].

Direction de mesure

La direction de mesure, c'est-à-dire dans le cas de transformateurs de puissance connectés en étoile, de la phase vers le neutre ou du neutre vers la phase, influence considérablement le comportement haute fréquence, comme le montre par exemple la Figure 8. Sauf indication particulière, il est conseillé de connecter le câble source et le câble de référence à la borne de phase et le câble de réponse à la borne neutre[3],[4].

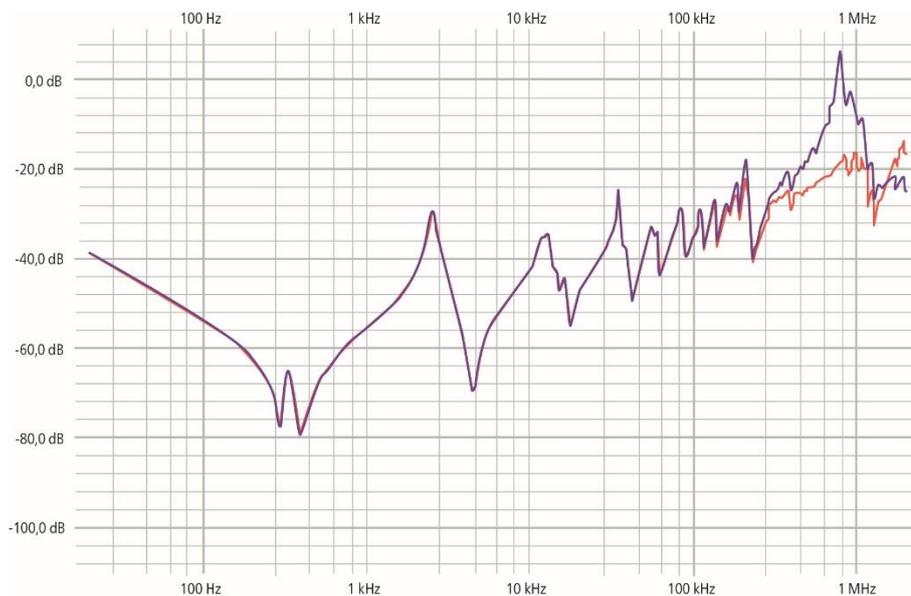


Figure 8 : Influence de la direction de mesure, source à la phase (bleu) et source au neutre (rouge)

Tension de sortie

Dans la plage basse fréquence, la réponse en fréquence est dominée par l'inductance de magnétisation du circuit magnétique et dépend donc de la tension de sortie comme le montre la Figure 9. La courbe résiduelle n'est pas affectée par la tension de sortie car les enroulements du transformateur peuvent être considérés comme un système linéaire, qui n'est, en principe, pas affecté par la tension de sortie.

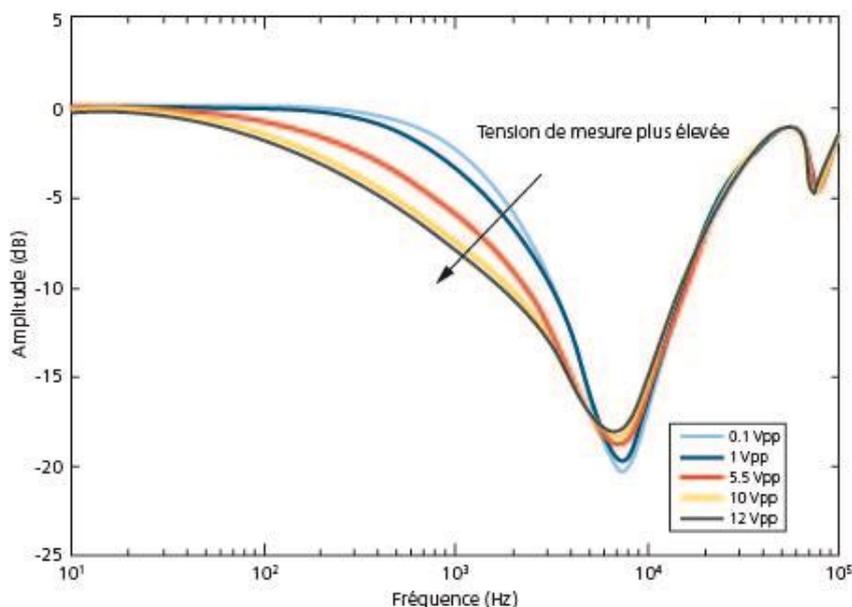


Figure 9 : Effet des tensions de sortie sélectionnées ; influence des différentes tensions de sortie sur l'inductance de magnétisation L_m

Câbles de mise à la terre et de mesure

Différentes procédures de connexion des câbles de mesure et de mise à la terre sont expliquées dans la norme CEI 60076-18 [4]. La manière la plus courante consiste à utiliser des pinces spécialement conçues pour connecter le câble BNC à double blindage à la borne de phase et d'appliquer une tresse ou un câble

pour mettre à la terre le blindage entre la pince et la bride de traversée. Comme décrit dans la section 3, l'utilisation d'une tresse au lieu d'un câble réduira considérablement l'influence du bruit, en particulier autour de la fréquence réseau. De plus, la longueur de la tresse de terre est essentielle pour la zone basse fréquence, comme le montre la Figure 10. Lors de l'utilisation de câbles de longueur fixe, la position du câble influence la réponse en fréquence. Par conséquent, le concept d'adaptation de la tresse de terre afin d'assurer le chemin le plus court à la terre, fournit le plus haut degré de reproductibilité.

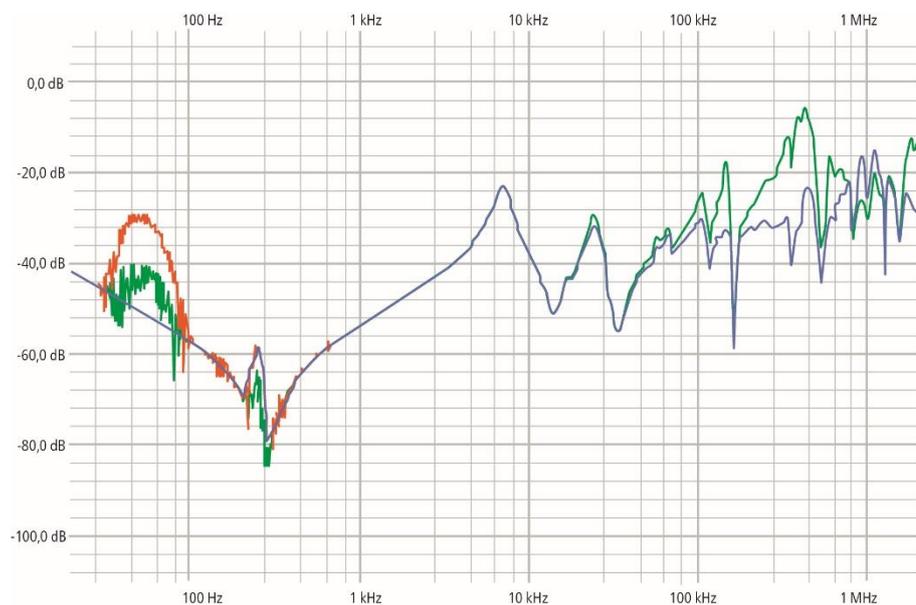


Figure 10 : Influence des différentes techniques de connexion, influence minimale du bruit et répétabilité maximale à l'aide d'une tresse de mise à la terre dans le concept de chemin le plus court (bleu), une connexion de câble (vert) et une tresse de mise à la terre avec une boucle plus grande (rouge)

Position du changeur de prises et traversées

Conformément aux normes en vigueur, les tests SFRA doivent être effectués avec la même configuration de transformateur, y compris les traversées ou la position du changeur de prises. Parfois, des traversées de test sont utilisées lors des tests de réception en usine et les traversées finales sont montées sur site. Si l'on compare la réponse en fréquence mesurée en usine à celle mesurée sur site, des écarts se produiront très probablement dans la plage haute fréquence. La modification de la position du changeur de prises provoquera des changements continus de la forme de la courbe sur une large plage de fréquences, comme indiqué à la Figure 11. Il est conseillé d'effectuer des mesures pour chaque phase concernée sur la position la plus basse, la plus élevée et intermédiaire du changeur de prises, tout en passant continuellement de la position la plus élevée à la plus basse [3], [4].

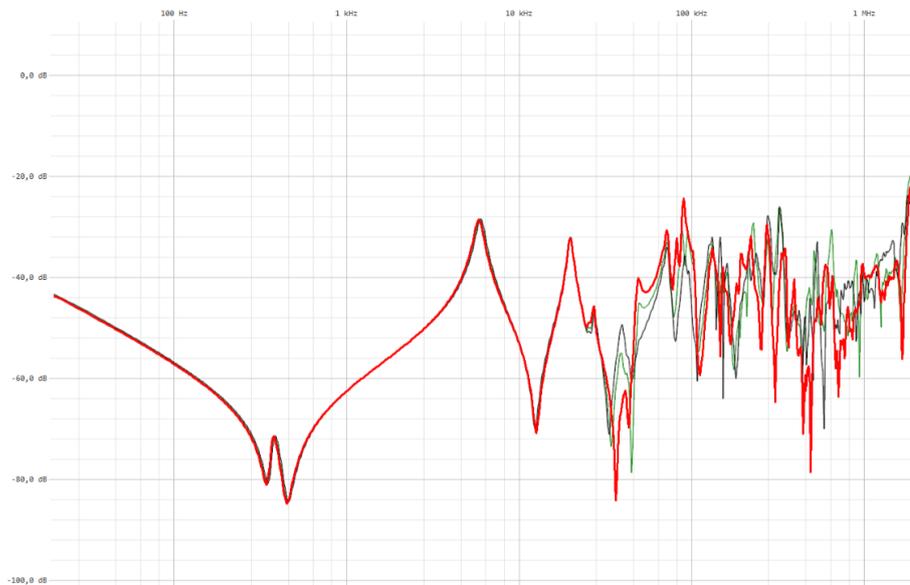


Figure 11 : Influence de la position du changeur de prises (prise 1 : rouge, prise 2 : vert, prise 3 : noir) sur la réponse en fréquence d'un transformateur de puissance

Contact entre la borne de traversée et la tresse de terre

L'une des erreurs de connexion les plus fréquentes est un contact indésirable de la tresse de terre avec la borne de traversée. Une telle erreur influence la réponse en fréquence principalement sur les fréquences plus élevées, comme le montre la Figure 12. Il est recommandé d'utiliser une gaine isolante pour les tresses afin d'éviter ce court-circuit.

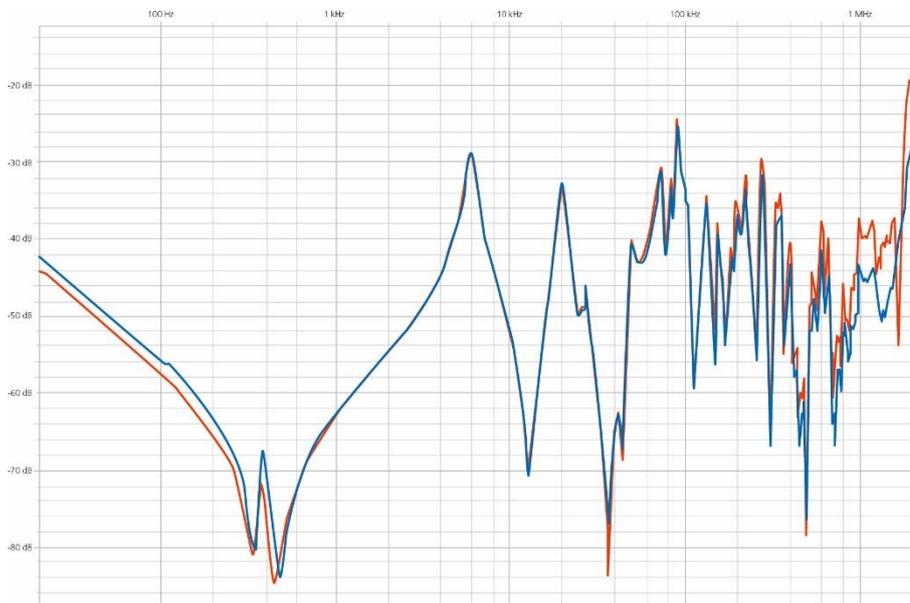


Figure 12 : Réponse en fréquence mesurée du côté HT lors d'un test en circuit ouvert ; correctement connecté (rouge) et court-circuit entre la borne et la terre au niveau de la référence (bleu)

4.2 Autres facteurs d'influence

Rémanence

La rémanence est un phénomène fréquent causé par des mesures précédentes, comme la mesure de la résistance d'enroulement. Il est possible de l'éviter en procédant à une démagnétisation avant d'effectuer des tests SFRA. L'influence se manifeste en particulier dans la plage très basse fréquence, comme le montre la Figure 13 où la résonance du circuit magnétique est décalée vers la droite. Les autres parties de la trace SFRA ne sont pas affectées par ce phénomène. Par conséquent, la rémanence peut être identifiée simplement et n'influence généralement pas les analyses ultérieures.

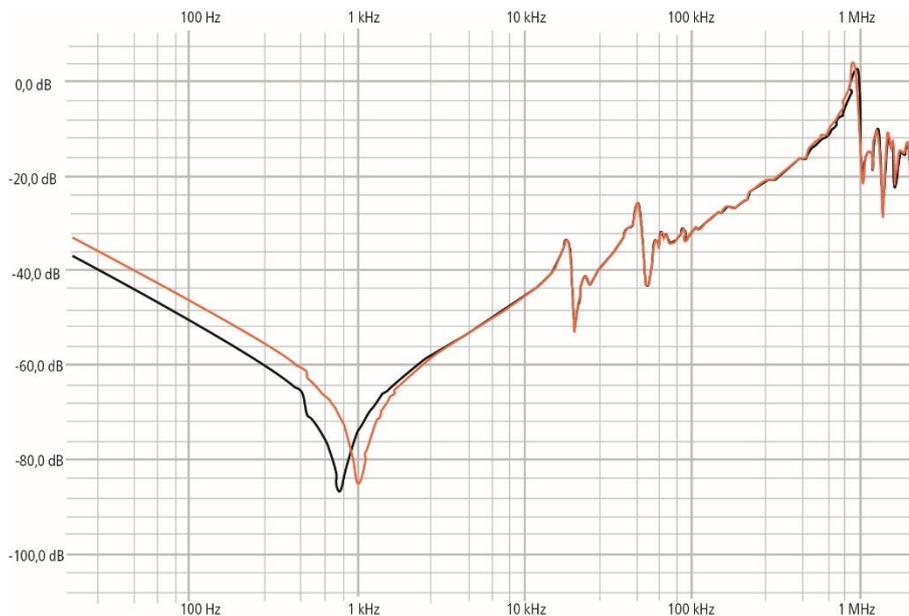


Figure 13 : Réponse en fréquence d'un transformateur de puissance mesurée lors d'un test en circuit ouvert avant (rouge) et après démagnétisation (noir)

Liquide isolant

Un transformateur de puissance doit toujours être mesuré avec la même configuration que sur site. Cela inclut le liquide isolant, qui influence la réponse en fréquence de manière significative. En comparant les mesures SFRA d'un transformateur de puissance non rempli et d'un transformateur rempli d'huile, comme le montre la Figure 14, on peut observer un décalage systématique des fréquences caractéristiques. Ce décalage est causé par plusieurs diélectriques (air/gaz avec $\epsilon_{r,gas} = 1$ ou huile avec $\epsilon_{r,oil} = 2,2$) et correspond approximativement à la valeur théorique qui peut être calculée par la racine carrée de la permittivité relative de l'huile minérale [11].

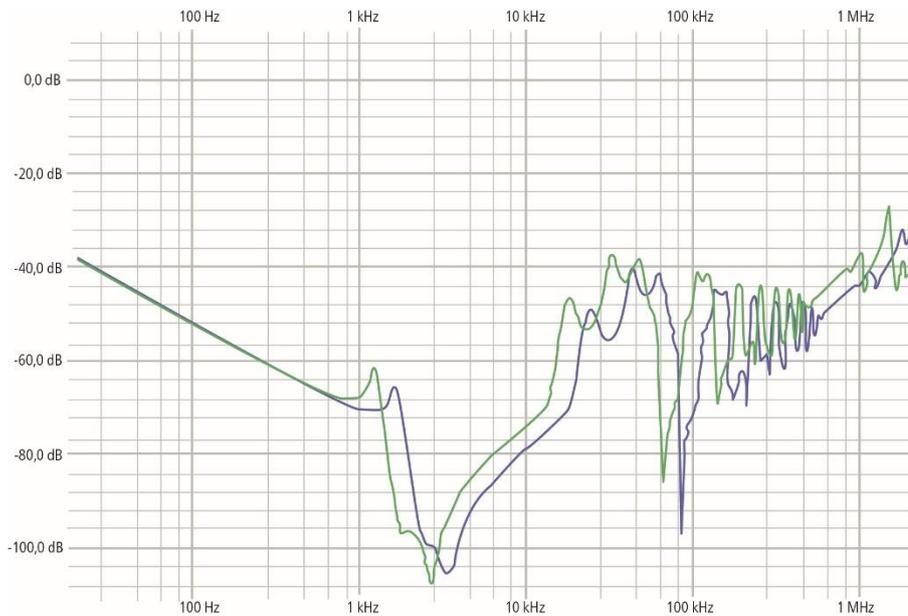


Figure 14 : Traces HT mesurées avec cuve remplie d'huile (vert) et non remplie (bleu)

Température

Les conditions environnementales ambiantes telles que la température peuvent influencer les réponses en fréquence mesurées. Toutefois, des études ont montré que les coefficients thermiques de décalage des points de résonance en fonction de la température sont très faibles [12]. Par conséquent, le décalage peut être négligé dans la plage de température type entre 15 °C et 70 °C.

Conclusion

L'importance d'une technique de connexion appropriée a été soulignée. Les avantages de la technique suggérée par la norme CEI 60076-18 par rapport à d'autres techniques ont été discutés. En plus d'un haut degré de reproductibilité, l'utilisation de tresses de mise à la terre au lieu de simples fils permet d'éviter l'influence du bruit à bande étroite autour de la fréquence réseau et augmente la reproductibilité, en particulier dans la plage haute fréquence supérieure à 500 kHz.

Les facteurs d'influence de la réponse en fréquence ont été nommés, décrits et des exemples de changement de forme de la courbe ont été donnés. Cela inclut leur influence sur le montage de mesure, comme la mise en court-circuit ou à la terre des enroulements tertiaires, la direction de mesure, la tension de sortie, la technique de connexion ou la position du changeur de prises. En outre, d'autres effets ont été discutés, tels que la rémanence, l'influence du liquide isolant ou les changements dus à la température et à l'humidité.

Bibliographie

- [1] Cigré WG A2/26, « Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA) », Brochure 342, Paris 2008.
- [2] T. Leibfried, K. Feser. Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 4, octobre 1999, p. 1333-1341.
- [3] Norme IEEE C57.149, « IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers », 2013.
- [4] CEI 60076-18 « Transformateurs de puissance – Partie 18 : Mesure de la réponse en fréquence », 2012.
- [5] NCEPRI, « Application Guideline for Transformer Winding Distortion Test Technology », Chine 1999.
- [6] Cigré WG A2/26, « Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA) », Electra N° 228, Paris 2006.
- [7] J. Christian, K. Feser. Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, N° 1, janvier 2004, p. 214-220.
- [8] Juan L. Velásquez, et al. « Noise in FRA Measurements: Sources, Effects and Suppression », OMICRON DMPT Workshop 2009.
- [9] S. Tenbohlen, R. Wimmer, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger, J. Christian. « The influence of grounding and connection technique on the repeatability of FRA-results » - Compte-rendu du XV^e symposium international d'ingénierie haute tension, Université de Ljubljana, Ljubljana, Slovénie, 27-31 août 2007.
- [10] R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, M. Michael Krüger. « Richtlinien für den Messaufbau für eine hohe Reproduzierbarkeit der FRA-Messergebnisse », ETG Fachtagung Diagnostik elektrotechnischer Betriebsmittel, Kassel, Allemagne, 19-20 septembre 2006.
- [11] J. Christian, R. Wimmer. « Comparability of transfer function results », European Transactions on Electrical Power 2006, Édition 16, p. 137-146.
- [12] R. Wimmer, K. Feser, J. Christian. « Reproducibility of Transfer Function Results », XIII^e symposium international d'ingénierie haute tension, Delft, Pays-Bas, 25-29 août 2003.

Biographies



Michael Rädler possède un diplôme d'ingénieur (ES) en génie industriel de l'Université des sciences appliquées de Mittweida, en Allemagne. Après avoir obtenu son diplôme de l'HTL (École secondaire fédérale d'ingénieurs) de Bregenz, en Autriche, en 2007, il a débuté sa carrière professionnelle en tant qu'ingénieur applications chez OMICRON electronics, plus particulièrement sur les transformateurs de puissance. Depuis septembre 2013, il est responsable de produit pour le système de test primaire multifonctions d'OMICRON pour la mise en service et la maintenance des postes (CPC 100). Il a publié plusieurs articles au sujet des mesures électriques sur les transformateurs de puissance, est membre du Cigré et fait partie du groupe de travail SFRA.



Stephanie Uhrig (née Ratzke) est professeure en génie électrique à l'Université des sciences appliquées de Munich. De 2010 à 2017, elle a été responsable de produit pour OMICRON electronics, en Autriche, où elle s'est concentrée sur les mesures de la réponse diélectrique et l'analyse de la réponse en fréquence. Elle a obtenu son diplôme d'ingénieur et son doctorat à l'Université technique de Munich (TUM), en Allemagne, en 2003 et 2009 respectivement.