

## Article du mois

# Tests de diagnostic des transformateurs encapsulés

### Auteurs

Michael Krüger, OMICRON, Autriche | michael.krueger@omicronenergy.com

Christoph Engelen, OMICRON, Autriche | christoph.engelen@omicronenergy.com

### Date de la publication

Mai 2018

### Application

Tests de diagnostic des transformateurs encapsulés

### Mots-clés

Transformateur encapsulé tests par tension induite, mesure des décharges partielles

### Résumé

L'article décrit comment réaliser des tests de diagnostic sur les transformateurs de type sec. Les transformateurs de puissance encapsulés sont largement utilisés dans les zones très sensibles en matière de risque d'incendie et de protection de l'environnement. La raison la plus courante de pannes sur les transformateurs encapsulés est le claquage électrique de l'isolation en résine entre les spires ou les pièces des enroulements. Dans de nombreux cas, des décharges partielles (DP) se produisent avant la panne. En testant les enroulements par tension induite en association avec une mesure sensible de décharges partielles, le risque de pannes imprévues peut être réduit. Les méthodes de réalisation du test par tension induite sur site avec un équipement portable et des systèmes de DP numériques pour réduire les perturbations sont discutés à partir d'études de cas.



## Tests de diagnostic des transformateurs encapsulés

### Introduction

Le développement des transformateurs encapsulés a débuté il y a de nombreuses années en raison de la nature inflammable de l'huile minérale et du risque de déversement d'huile avec la pollution consécutive du sol. Depuis, les technologies des transformateurs encapsulés se sont bien développées et sont aujourd'hui largement utilisées dans des applications où la sécurité est primordiale, par exemple dans les bâtiments, les applications industrielles, ou dans des zones écologiquement sensibles, comme les zones de protection des eaux souterraines. La puissance et la tension nominale des transformateurs encapsulés ont augmenté au cours des dernières années. À l'heure actuelle, les transformateurs encapsulés peuvent atteindre 72,5 kV et plus de 60 MVA. Ils peuvent également être équipés de changeurs de prises en charge (CPeC).

Bien que les transformateurs encapsulés soient réputés « sans maintenance », des mesures de diagnostic périodiques sont plus souvent nécessaires, en particulier, lorsque des pannes engendreraient des coûts de suivi élevés. Certaines assurances proposent des tarifs moins élevés lorsque le risque de pannes est minimisé par des mesures de diagnostic périodiques. Pour les transformateurs encapsulés, les outils de diagnostic sont limités. Pendant la fabrication, les essais individuels de série suivants sont réalisés conformément à la norme CEI 60076-11 [1] :

- Mesure du rapport de transformation
- Mesure de la résistance d'enroulement
- Mesure du rapport de tension et du déphasage
- Mesure de l'impédance de court-circuit
- Mesure en charge et à vide
- Test de tenue par tension appliquée
- Test de tenue par tension induite
- Mesure des décharges partielles ( $U_m > 3,6$  kV, niveau d'acceptation 10 pC)

Pour déterminer l'état du transformateur directement sur site, on ne peut utiliser qu'un nombre limité de procédures de test. En particulier pour évaluer l'état de l'isolation, les méthodes de test courantes généralement réalisées sur les transformateurs remplis d'huile ne sont pas adaptées. Une analyse des gaz dissous dans l'huile (DGA) sur des transformateurs encapsulés n'est, par exemple, pas applicable. Inversement, la mesure du facteur de puissance/dissipation sur des transformateurs encapsulés est largement affectée par les conditions ambiantes. C'est la raison pour laquelle les mesures des décharges partielles (DP) donnent les informations les plus précieuses sur l'état de l'isolation. Un test par tension induite sur site sur des transformateurs encapsulés associé à des mesures des DP est décrit à la section suivante.

### **Mesure des décharges partielles**

Pour les mesures des décharges partielles, la fréquence de la tension de test doit être supérieure à la fréquence nominale afin d'éviter tout courant de magnétisation excessif pendant le test.

La raison la plus courante de pannes sur les transformateurs encapsulés est le claquage électrique de l'isolation en résine entre les spires ou les pièces des enroulements. Dans de nombreux cas, les décharges partielles se produisent avant la panne. En testant les enroulements par tension induite en association avec une mesure des décharges partielles sensibles, le risque de pannes imprévues peut être réduit.

Pour les tests de DP sur site sur les transformateurs encapsulés, une source de tension adaptée est nécessaire. La fréquence de la tension de sortie doit être supérieure à la fréquence nominale du transformateur afin d'éviter tout courant de magnétisation excessif. Pour minimiser la puissance requise, la source doit fournir une tension de sortie à fréquence variable. L'inductance principale du circuit magnétique, la capacité de l'enroulement haute tension et le condensateur de couplage constituent un circuit résonant parallèle. La fréquence de la tension de test doit être ajustée à la fréquence de résonance de ce circuit pour réduire la puissance nécessaire au minimum. Si la fréquence de résonance est trop élevée, un condensateur supplémentaire peut être connecté à l'enroulement basse tension pour réduire la fréquence jusqu'à la limite supérieure

de 500 Hz, conformément à la norme CEI 60060-3 [2]. La figure 1 illustre le montage avec le CPC 100, une source de tension compacte d'un poids de 30 kg.

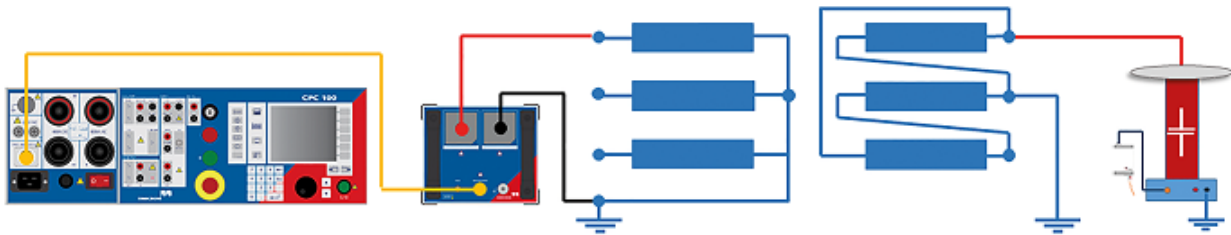


Figure 1. CPC 100 avec transformateurs d'adaptation

L'amplificateur intégré peut fournir jusqu'à 5 kVA à des fréquences variant entre 15 et 400 Hz. Il est doté d'un système de commutation adapté pour éviter les perturbations engendrées par les semi-conducteurs de commutation. Grâce à un transformateur d'adaptation supplémentaire, la tension de sortie de l'amplificateur peut être adaptée à la tension de magnétisation requise du côté basse tension du transformateur. Ce transformateur d'adaptation universel peut fournir des tensions comprises entre 50 et 400 V par incréments de 50 V (à des fréquences de 100 Hz minimum) et jusqu'à 800 V (à des fréquences de 200 Hz minimum). Pendant le test de réception en usine (FAT), des générateurs triphasés sont utilisés comme source de tension. Pour vérifier l'intégrité des bobines sur site, il suffit de tester chaque phase individuellement à l'aide d'une magnétisation monophasée. Dans le pire des scénarios, une hausse de tension supérieure à la tension nominale pourrait engendrer une activité de DP qui reste active même après un retour à la tension de fonctionnement nominale. Le fait de dépasser la tension nominale pendant les tests aide à identifier une telle activité de DP et à évaluer sa gravité. Selon [1], pendant le FAT, une tension de précontrainte est appliquée pendant 30 s. Ensuite, la tension de test est appliquée pendant 3 minutes supplémentaires. Sur site, on peut utiliser ces durées de cycle de test ou convenir d'un cycle adapté. Afin d'empêcher toute panne indésirable des transformateurs âgés, les tests haute tension ne doivent être réalisés qu'à des tensions inférieures à celles des transformateurs neufs en usine. L'expérience sur site a démontré que des tensions jusqu'à 130 % de la tension nominale sont un bon compromis pour détecter les défauts de DP mais sans exercer de contrainte excessive sur la bobine.

Des transformateurs de puissance jusqu'à 3 MVA peuvent être testés à l'aide d'une puissance de test de 5 kVA. Avec le CPC 100, l'impédance de tout le circuit de test peut être mesurée en amplitude et en déphasage (figure 2). Si la fréquence est définie à l'impédance maximale (courbe rouge), la puissance de test nécessaire est réduite.

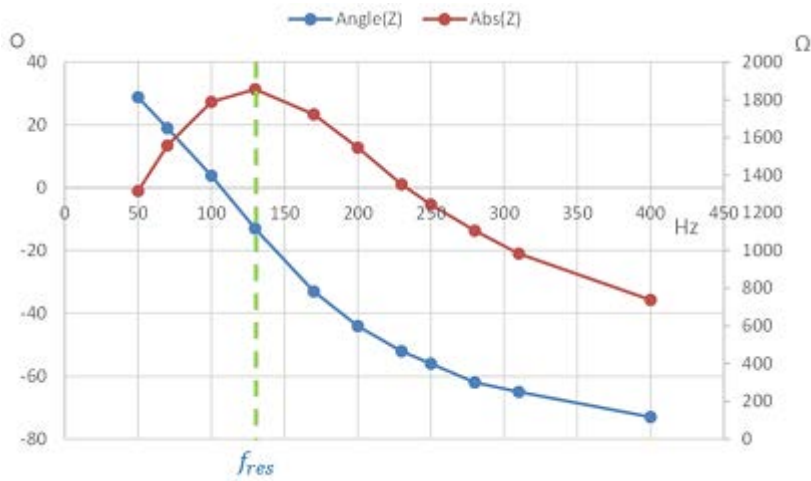


Figure 2. Impédance du circuit de test par rapport à la fréquence

Si la puissance requise pour alimenter le transformateur dépasse la sortie de puissance d'un CPC 100, jusqu'à trois appareils peuvent fonctionner en parallèle (figure 3). Un CPC 100 fonctionne en tant que maître, les deux autres en mode synchrone en tant qu'esclaves. Ils peuvent fournir ensemble 15 kVA sur trois prises d'alimentation 230 V/16 A. Avec ce système de test portable, des transformateurs encapsulés jusqu'à 25 MVA peuvent être testés directement sur site.

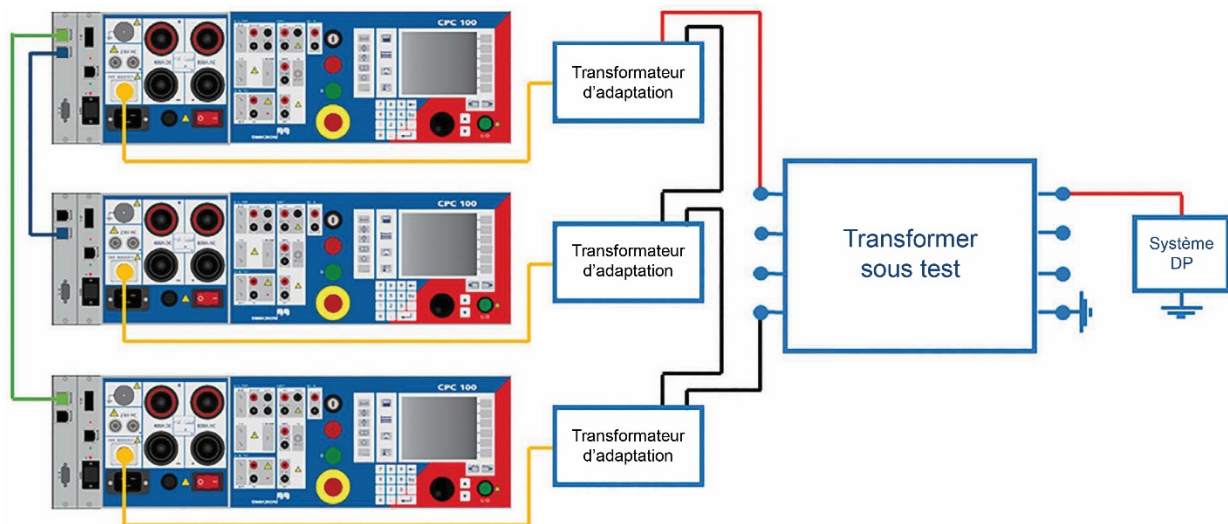


Figure 3. Système de test pour 15 kVA avec trois CPC 100

## Interférences électromagnétiques ambiantes

Les mesures de DP en dehors des cages de Faraday sont difficiles en raison des interférences électromagnétiques ambiantes. Les systèmes de DP numériques modernes offrent des méthodes de filtrage spéciales pouvant réduire, voire éliminer, de tels problèmes de bruit.

Une première possibilité pour séparer les signaux de DP des sources ambiantes de bruit consiste à utiliser la méthode 3PARD ou 3CFRD [3]. Ces deux méthodes utilisent un diagramme en étoile qui représente les relations entre trois signaux mesurés. La méthode 3PARD utilise trois unités pour détecter simultanément les signaux de DP. Dans la méthode 3CFRD, le système de DP numérique peut mesurer les impulsions de DP simultanément à trois fréquences distinctes. À chaque fréquence, une impulsion de DP est évaluée. Puis, les niveaux de décharges obtenus aux trois fréquences, à l'aide d'un seul système, sont utilisés pour marquer le point correspondant dans un diagramme en étoile (figure 4).

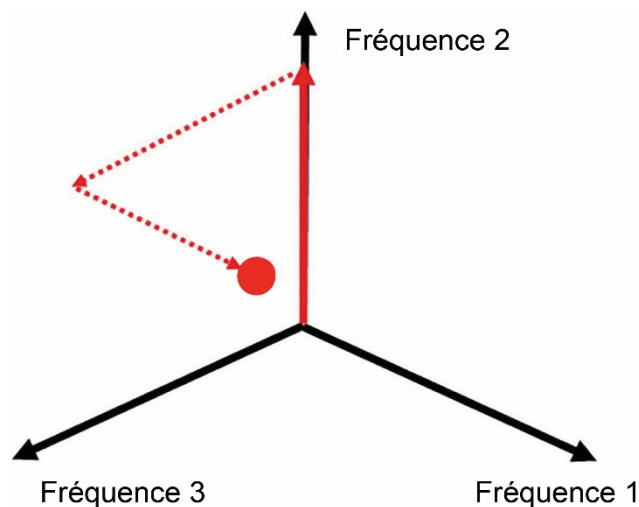


Figure 4. Impulsion de DP unique saisie dans le diagramme 3CFRD

En partant du principe que des sources de bruit et de DP différentes n'ont pas le même spectre de fréquence, chaque source affichera un groupe différent dans le diagramme en étoile. En ajustant les trois paramètres de fréquence, une séparation optimale des grappes individuelles peut être obtenue. Enfin, chaque grappe est évaluée séparément sans les interférences des sources restantes. Cela permet d'obtenir une évaluation fiable de toutes les sources de DP sur site, même en présence de fortes perturbations (figure 5).

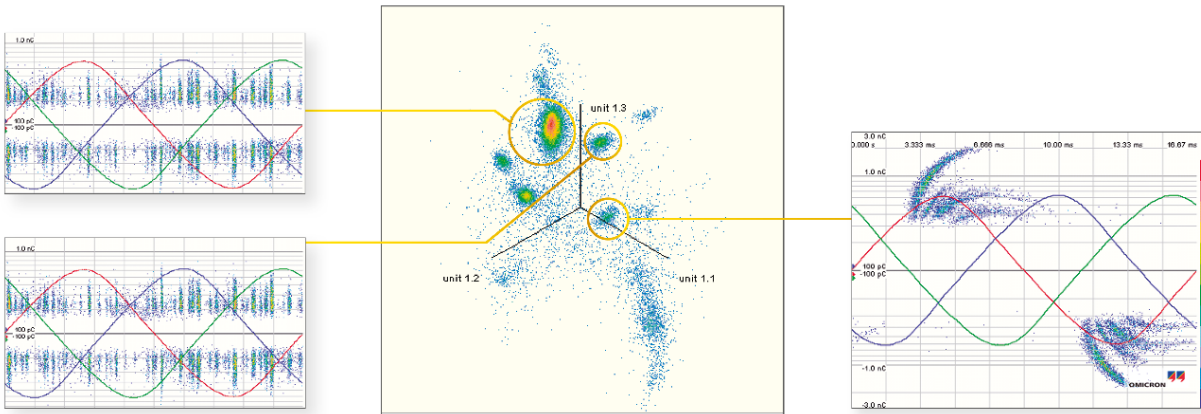


Figure 5. Séparation grâce à la représentation 3PARF ou 3CFRD

## Études de cas

### Cas 1

Une mesure de DP a été réalisée sur un transformateur encapsulé de 3,5 MVA d'une tension nominale de 30 kV. La figure 6.1 montre le diagramme de DP à résolution de phase (PRPD) à 40 kV. Le bruit est à environ 8 pC. L'analyse avec le 3CFRD est illustrée à la figure 6.2. Le signal filtré (figure 6.3) indique un tracé clair de décharges dans les vides internes [4] à un niveau de 6 pC, bien que les décharges partielles soient inférieures au niveau de bruit. La tension d'extinction était supérieure à 36 kV, soit 20 % supérieure à la tension nominale. Conclusion : pendant le fonctionnement normal, aucune source de DP n'est active à l'intérieur du transformateur.

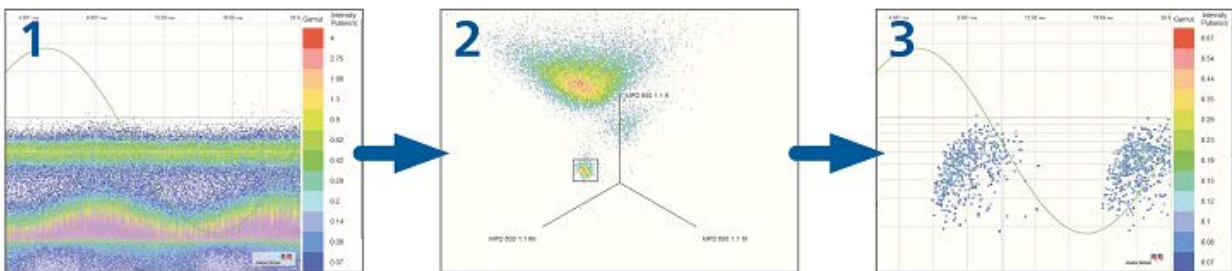


Figure 6. (1) PRPD sans filtrage 3CFRD avec des interférences, (2) diagramme en étoile avec bruit (groupe supérieure) et grappe de DP (marquée), (3) tracé de DP de vides avec filtrage 3CFRD

## Cas 2

Après un défaut monophasé d'un transformateur encapsulé de 2,5 MVA (figure 7), on a vérifié si les deux autres enroulements étaient également endommagés. Une mesure des décharges partielles sur les deux enroulements externes a été réalisée à 130 % de la tension nominale pour s'assurer de l'absence de DP dans ces enroulements. Aucune décharge partielle n'a été détectée au-dessus du niveau de bruit de 15 pC. Il a alors été décidé de remplacer l'enroulement défectueux et de remettre le transformateur en service.



Figure 7. Défaut sur un transformateur encapsulé

La figure 8 montre les résultats de mesure de DP de la phase B après l'installation du nouvel enroulement sur le transformateur. Pendant la mesure de DP sur site, des signaux d'interférence de 17 pC ont été mesurés. La seule grappe visible était liée au bruit ambiant. Dans ce cas, un 3CFRD inverse a été utilisé. La seule grappe visible a été sélectionnée et filtrée (figure 8.2). Au lieu de montrer les impulsions relatives à cette grappe, toutes les impulsions restantes en dehors de cette grappe sont indiquées. La figure 8.3 illustre le principe inverse du filtrage 3CFRD avec la grappe de bruit sélectionnée. On peut voir qu'aucune autre impulsion n'est visible, ce qui indique que la nouvelle bobine installée ne présente pas de DP mesurable. Le filtrage 3CFRD inverse doit être réalisé avec précaution afin d'éviter de filtrer des signaux de DP.



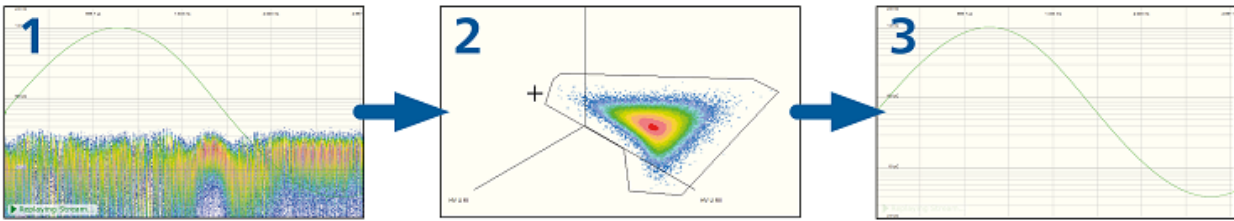


Figure 8. (1) Mesure de DP non filtrée, (2) Sélection de grappe 3CFRD, (3) PRPD avec filtrage 3CFRD inverse

### Cas 3

Dans un réseau industriel de 20 kV, tous les câbles sont équipés de dispositifs de couplage haute fréquence de DP au niveau des terminaisons afin de réaliser les mesures de surveillance de routine semestrielles sur l'ensemble du réseau, y compris les câbles et les transformateurs. Au cours du test de surveillance de routine, des décharges partielles ont été détectées sur les terminaisons de l'un des câbles. Pour déterminer si les DP se trouvent dans le câble ou dans le transformateur connecté, une mesure de DP hors ligne a été réalisée. Le câble n'a montré aucune décharge partielle à l'inverse du transformateur. La figure 9 illustre la configuration d'une mesure de DP sur le transformateur testé. Des décharges partielles ont été détectées sur toutes les phases, affichant les tracés typiques des vides internes avec des niveaux de décharge jusqu'à 101 pC (figure 10). La tension d'apparition était de  $1,0 \times U_n$ , tandis que la tension d'extinction était inférieure à la tension nominale ( $0,6 \times U_n$ ) sur les trois phases. Cela indique que le transformateur présente des décharges partielles continues pendant le fonctionnement et doit être remplacé. Par conséquent, l'exploitant a décidé de le remplacer complètement.



Figure 9. Configuration des mesures de DP sur un transformateur encapsulé de 20 kV/2 MVA

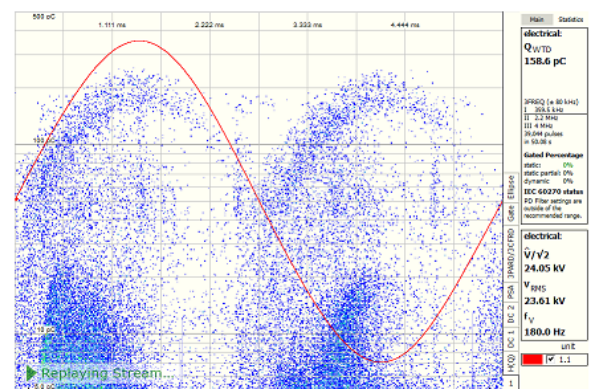


Figure 10. Résultats des mesures de DP

## Cas 4

Des mesures de DP ont été réalisées sur un transformateur encapsulé de 30 kV/6 kV/17 MVA. La figure 11 illustre le montage de test appliqué. Pour alimenter le côté 6 kV du transformateur, un transformateur élévateur supplémentaire était nécessaire. La puissance de 10 kW requise pour créer la magnétisation de l'une des phases des deux transformateurs a été fournie par trois CPC 100 synchronisés. La tension de test de  $1,3 \times U_n$  a été appliquée pendant 60 s comme convenu sur site. La figure 12 montre le résultat de mesure de DP de la phase B, qui n'indique aucune impulsion de DP supérieure au niveau de bruit de 8 pC.



Figure 11. Mesure de DP sur un transformateur encapsulé de 17 MVA avec trois CPC 100

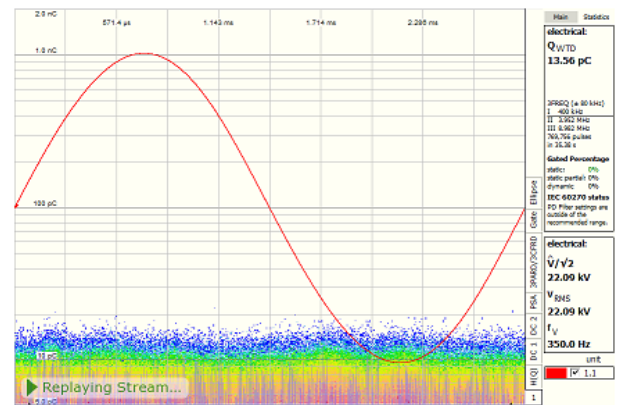


Figure 12. Résultats des mesures de DP sur la phase B

## Conclusions

Les tests de tension induite sur site en association avec des mesures des décharges partielles représentent un outil puissant pour évaluer l'état de l'isolation des transformateurs encapsulés.

Afin de réaliser la mesure, une source de tension à fréquence variable est nécessaire. Selon la consommation d'électricité, on peut synchroniser jusqu'à trois CPC 100 d'OMICRON, afin d'augmenter la puissance de sortie à 15 kVA. Selon la conception du transformateur et la tension de test requise, cette fonctionnalité de synchronisation permet de mesurer des transformateurs de puissance jusqu'à 25 MVA. Néanmoins, cela reste une solution portable flexible pour les tests sur site, chaque composant nécessaire pesant moins de 30 kg.

Généralement, différents types de sources de bruit sont présents pendant les mesures sur site. Le système de DP numérique offre ainsi plusieurs façons de gérer les fortes perturbations. L'un des outils éprouvés de filtrage du bruit et de séparation des différentes sources de DP est la méthode 3CFRD. En évaluant les niveaux de décharges obtenus avec trois paramètres de fréquence différents, l'influence des sources de bruit peut être réduite et chaque source de DP évaluée individuellement.

## Literaturverzeichnis

- [1] CEI 60076-11 « Transformateurs de puissance – Partie 11 : Transformateurs de type sec », Commission électrotechnique internationale, Genève, 2004
- [2] CEI 60060-3 « Techniques des essais à haute tension – Partie 3 : Définitions et prescriptions pour des essais sur site, Commission électrotechnique internationale, Genève, 2006
- [3] K. Rethmeier, A. Obralic, A. Kraetge, M. Krüger, W. Kalkner , R. Plath. « Improved Noise Suppression by real-time pulse-waveform analysis of PD pulses and pulse-shaped disturbances », Symposium international d'ingénierie haute tension (ISH), Le Cap, 2009
- [4] Cigré 676 « Décharges partielles dans les transformateurs », Groupe de travail D1.29, Cigré, 2017

## Points clés

« Selon la conception du transformateur et la tension de test requise, cette fonctionnalité de synchronisation permet de mesurer des transformateurs de puissance jusqu'à 25 MVA »

« Une première possibilité pour séparer les signaux de DP des sources de bruit ambiantes consiste à utiliser la méthode 3CFRD »

« Si la puissance requise pour alimenter le transformateur dépasse la sortie de puissance d'un CPC 100, jusqu'à trois appareils peuvent fonctionner en parallèle »

« Un CPC 100 fonctionne en tant que maître, les deux autres en mode synchrone en tant qu'esclaves »

« En testant les enroulements par tension induite en association avec une mesure sensible des décharges partielles, le risque de pannes imprévues peut être réduit »

## Auteurs



**Michael Krüger** est ingénieur chez OMICRON electronics GmbH à Klaus, en Autriche. Il a fait ses études de génie électrique à l'Université technique d'Aix-la-Chapelle (RWTH) et à l'Université de Kaiserslautern (Allemagne) et obtenu son diplôme d'ingénieur en 1976. En 1990, il a reçu son doctorat de l'Université technique de Vienne. Michael Krüger a plus de 35 ans d'expérience dans l'ingénierie haute tension et le diagnostic d'isolation sur les PSEM, transformateurs de mesure, câbles, transformateurs de puissance et machines tournantes.

Il a publié de nombreux articles au sujet des mesures électriques sur différents éléments et détient 15 brevets. Il est membre du VDE, du Cigré et de l'IEEE et participe à plusieurs groupes de travail pour l'OEVE, la CEI et le Cigré.



**Christoph Engelen** machte seinen Master of Science in Elektrotechnik an der RWTH in Aachen, Deutschland. Nach seinem Abschluss 2013 begann er seine berufliche Laufbahn als Anwendungstechniker bei OMICRON und spezialisierte sich auf die Diagnose von Transformatoren. Seit 2017 ist er Produktmanager und spezialisiert auf die Entwicklung der Prüfung von Trockentransformatoren.

**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 œuvre 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.