



Évaluation de l'état des circuits magnétiques de stator avec le CPC 100

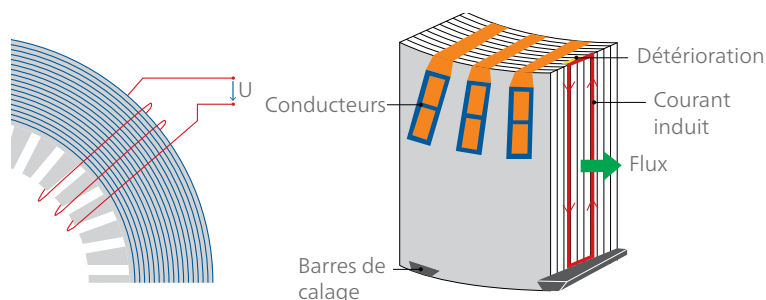
Les circuits magnétiques de stator des machines tournantes se composent de plusieurs couches empilées afin de minimiser les pertes par courants de Foucault. Un court-circuit entre deux ou plusieurs couches entraîne des courants de Foucault locaux plus élevés. Cela peut également engendrer des points chauds locaux pouvant, dans le pire des cas, entraîner une fusion partielle du circuit magnétique et endommager complètement la machine. Une mesure de flux en anneau, où la machine est excitée à un flux nominal et où la détection des points chauds potentiels est effectuée à l'aide d'une caméra thermographique, exige une grande puissance. De plus, le montage est à la fois long et coûteux.

La mesure du flux parasite avec le CPC 100 est une alternative fiable, utilisant une source d'alimentation et un équipement de mesure portables raccordables à une prise électrique ordinaire. Outre la mesure à la fréquence nominale, le CPC 100 vous permet de magnétiser le circuit magnétique du stator à des fréquences plus élevées, jusqu'à 400 Hz. L'effet de l'injection à différentes fréquences, la détection de défauts « plus profonds » dans le circuit magnétique ainsi que la comparaison avec une mesure de flux en anneau sont expliqués dans cet article.

I. INTRODUCTION

Pour détecter les points de fragilité de l'isolation des segments du circuit magnétique du stator, il est possible d'utiliser, entre autres méthodes, une mesure du flux parasite. Dans ce cas, un petit pourcentage du flux nominal, de l'ordre de 2 à 10 %, est induit dans le circuit magnétique par un enroulement auxiliaire (Figure 1, côté gauche) [1]. Si un court-circuit se produit entre les tôles, un courant de Foucault plus élevé (entraîné par la tension induite par le flux de l'enroulement auxiliaire) provoque un flux parasite plus important, comme indiqué dans la Figure 1 à droite.

Figure 1



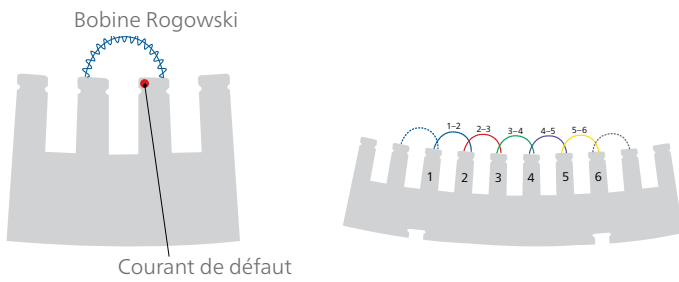
À gauche : enroulement auxiliaire avec indication des lignes de flux bleues ; à droite : courant de Foucault plus élevé en raison d'un dommage au niveau du circuit magnétique du stator.

Ce flux parasite plus élevé peut être détecté par une bobine Rogowski qui scanne la surface du stator, comme expliqué sur la Figure 2. [3] Les mesures de la bobine sont en mA corrélées à une certaine position dans le circuit magnétique du stator. Comme la largeur de la bobine de mesure et le nombre de spires du capteur restent les mêmes à chaque mesure, un étalonnage peut être obtenu avant chacune des mesures.

Lors d'une mesure à une injection à 4 % du flux nominal [1], la magnétisation de la source n'a pas besoin de fournir typiquement plus de 2-3 kVA [2]. Une puissance encore plus faible est nécessaire dans la plupart des machines. Le principal avantage par rapport à d'autres méthodes, comme la mesure à flux élevé, est que l'alimentation électrique et le montage de cet essai sont rapides et faciles.

Les emplacements doivent être examinés à une valeur courante de 100 mA de courant de quadrature, lorsque les mesures sont effectuées à 4 % du flux nominal et de la fréquence nominale [1, 2].

Figure 2



Détection du courant de défaut en mesurant le flux parasite au moyen du capteur. Les différentes encoches sont scannées les unes après les autres par différentes mesures. L'intervalle de bobine est compris entre les dents d'une encoche et l'encoche suivante afin de garantir une certaine zone de chevauchement.

II. PARTICULARITÉS DE LA SOLUTION

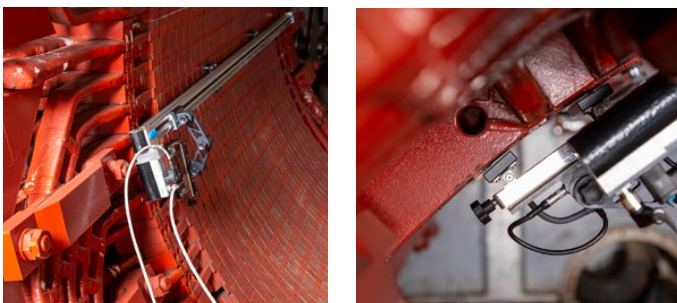
Les paramètres expliqués au chapitre I sont également valables pour la solution du CPC 100. En outre, certaines autres particularités de cette solution permettent une mesure rapide et fiable, y compris une utilisation intuitive :

A. Amélioration de la convivialité grâce au déplacement semi-automatique du capteur

Sachant qu'une mesure manuelle peut être fastidieuse et chronophage, l'intention était de développer la convivialité autant que possible. C'est pourquoi la solution de mesure du flux parasite s'accompagne d'un déplacement semi-automatique du capteur. Le rail (RAA1) permet ce mouvement et est placé sur le circuit magnétique du stator au moyen d'aimants puissants. Des dispositifs antichute supplémentaires empêchent le rail de tomber une fois positionné et d'endommager tout équipement.

Le capteur sur la glissière se déplace à la surface du stator à une distance comprise entre 2 et 3 mm, ce qui garantit une mesure précise. En outre, il n'y a pas de pics au niveau des résultats provenant des conduits de ventilation ou d'autres irrégularités si le support de la bobine ne touche pas la surface.

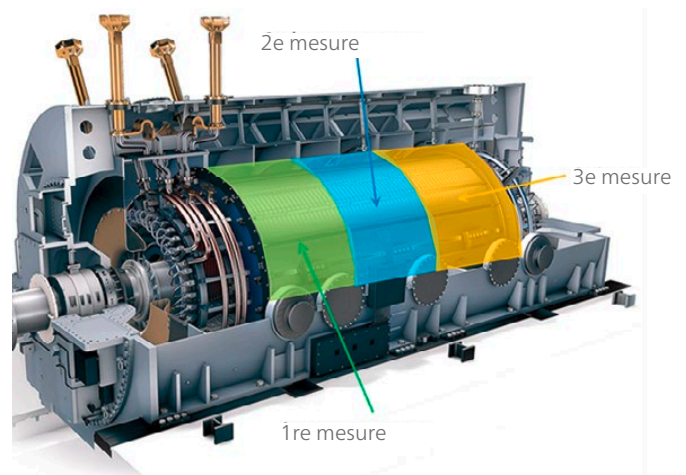
Figure 3



Support du rail et de la bobine pendant une mesure

Le rail peut couvrir une longueur maximale de 1 760 mm. Les stators plus longs peuvent également être mesurés, car les résultats des différentes méthodes de mesure peuvent être combinés dans le logiciel. Dans ce cas, la meilleure approche est de diviser le stator en segments et de mesurer chaque segment, comme expliqué sur la Figure 4.

Figure 4



Approche de mesure si de longs stators doivent être scannés ; Source des images du générateur : Siemens

Les mesures en mode manuel sont également possibles pour le diagnostic local ainsi que pour les cas particuliers, comme les longues sections graduées des gros turbogénérateurs, par exemple.

B. La magnétisation et la mesure comme solution clé en main

La puissance requise de moins de 3 kVA permet au CPC 100 de faire office de source et d'équipement de mesure en une seule solution. Des puissances de magnétisation encore plus élevées, même depuis la sortie d'une prise électrique ordinaire, sont possibles, car la magnétisation n'est active que lorsque le capteur sur le rail est en mouvement. Avec le rail (RAA1), l'unité de commande (SCU1) et le multiplicateur d'enroulement (WMP1), les utilisateurs disposent de tout ce dont ils ont besoin pour effectuer la mesure. Le câble de magnétisation est déjà inclus et peut être rallongé en cas de mesure de machines plus grandes. Deux câbles de magnétisation différents peuvent être connectés, comme un câble à deux fils et un câble à huit fils, en fonction du type de machine à mesurer.

Figure 5

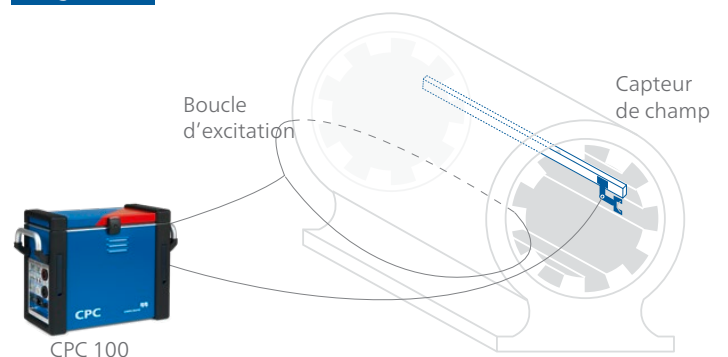


Schéma simplifié du CPC 100 en tant qu'appareil de magnétisation et de mesure

C. Assistance de Primary Test Manager

Le logiciel Primary Test Manager (PTM) fournit des conseils tout au long de l'essai, y compris les schémas de connexion et un calcul automatique de l'enroulement de magnétisation en fonction du schéma d'enroulement (le cas échéant) ou des dimensions du stator.

Le logiciel comprend également un affichage intuitif des signaux en temps réel et un résumé des mesures à l'aide d'une carte thermique, comme illustré à la Figure 14, ainsi qu'une fonction de rapport accessible par un seul bouton. La fonction de rapport inclut tous les autres tests sur l'équipement qui sont également réalisables avec le CPC 100.

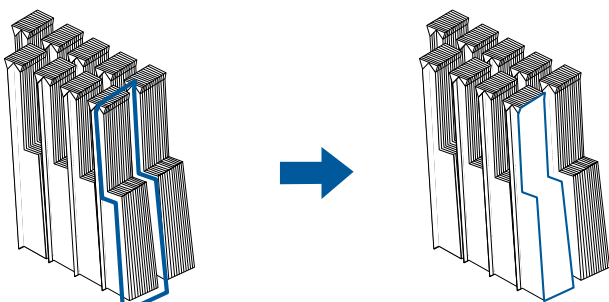
III. MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Des recherches concernant la répétabilité et la mesure avec des fréquences différentes ont été effectuées sur un petit générateur hydraulique mis hors service d'une tension assignée de 6,4 kV et 156 encoches. L'enroulement de stator est un enroulement de bobine avec 2 spires par bobine. Toutes les autres expériences décrites aux chapitres VI et VII ont été réalisées sur des machines différentes. Le montage est expliqué dans les chapitres correspondants.

Pour une meilleure visibilité de l'effet des différentes fréquences de magnétisation sur la répétabilité, les expériences sur le petit générateur hydraulique ont été réalisées avec une mesure sur un défaut artificiel. Un segment du stator est court-circuité par un fil comme expliqué à la Figure 6. Cette modification s'explique par le fait qu'il est plus facile de faire passer le fil par deux conduits de ventilation plutôt que d'endommager le circuit magnétique du stator.

Dans le chapitre IV, un défaut artificiel différent de celui du chapitre V a été utilisé.

Figure 6



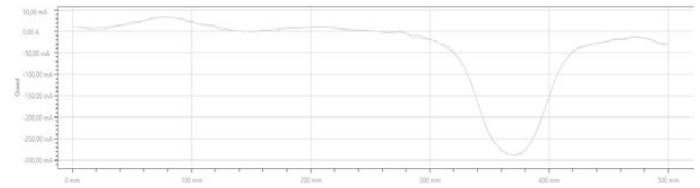
Explication de la mise en œuvre d'un défaut artificiel

IV. RÉPÉTABILITÉ

Des études sur la répétabilité ont été réalisées afin de s'assurer que la limite d'interprétation souvent utilisée n'est pas influencée par le montage de mesure. Cela devient d'autant plus important que l'utilisateur souhaite avoir une tendance au fil du temps, afin d'estimer la criticité des points faibles potentiels existants.

La première comparaison de la Figure 7 montre deux mesures sur la même encoche avec un défaut, sans changer aucun réglage.

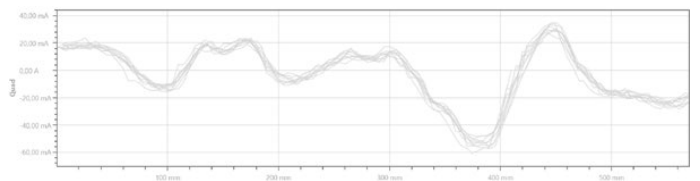
Figure 7



Deux mesures de la même encoche

Comme la répétabilité élevée n'est pas surprenante, dans la comparaison suivante de la Figure 8, le montage et le réglage mécaniques ont été effectués systématiquement au début de chaque mesure. Dans un tel cas, la même encoche « saine » a été scannée, donc aucun défaut n'a été mis en œuvre dans ces mesures. Chaque trace de mesure a été enregistrée après avoir refait le montage mécanique systématiquement au début de chaque mesure. L'écart des résultats est plus important que sur la Figure 7, mais reste très faible et ne constitue pas un obstacle à une mesure fiable.

Figure 8



Explication de la mise en œuvre d'un défaut artificiel

V. MESURES AVEC DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES

L'effet de la mesure à des fréquences plus élevées est expliqué par deux mesures de comparaison à 50 Hz et à 400 Hz. Les deux mesures ont été effectuées sur la même encoche avec le même défaut artificiel. Aucun changement ni aucune modification n'ont été apportés entre les différentes mesures ; les seuls changements effectués concernaient les paramètres de magnétisation. La mesure a été effectuée sur le petit générateur hydraulique avec 24 enroulements de magnétisation décrit au chapitre III.

Comme on le sait, le flux est inversement proportionnel à la fréquence, mais se comporte de manière proportionnelle à la tension. Pour comparer les deux mesures avec des fréquences différentes, on a gardé la même tension de magnétisation dans la première expérience. Par conséquent, le flux pour la mesure de la fréquence 8 fois plus élevée a été divisé par 8.

À l'inverse, lors de la deuxième tentative, le flux est resté le même pour les deux mesures, la tension de magnétisation a donc dû être adaptée en conséquence. Le Tableau 1 et le Tableau 2 donnent un aperçu des deux réglages différents.

Tableau 1

| Fréquence (en Hz) | Tension de magnétisation (en V) | Flux (en % de ϕ) | Facteur d'étalonnage (en mV/A) |
|-------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 50 | 18,6 | 4 | 36,6 |
| 400 | 18,6 | 0,5 | 336,7 |

Mesure avec la même tension de magnétisation pour les deux fréquences

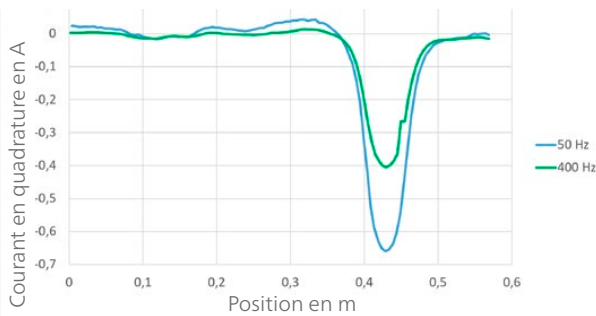
Tableau 2

| Fréquence (en Hz) | Tension de magnétisation (en V) | Flux (en % de ϕ) | Facteur d'étalonnage (en mV/A) |
|-------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 50 | 18,6 | 4 | 36,6 |
| 400 | 148,3 | 4 | 336,7 |

Mesure avec le même flux pour les deux fréquences

Si la mesure est effectuée avec 0,5 % du flux nominal à 400 Hz, le pic le plus élevé au niveau du défaut a une valeur d'amplitude absolue d'environ 400 mA, alors qu'à 4 % et 50 Hz, le pic atteint environ 650 mA (Figure 9). Bien que cette valeur soit beaucoup plus faible, le flux a été divisé par 8 (!).

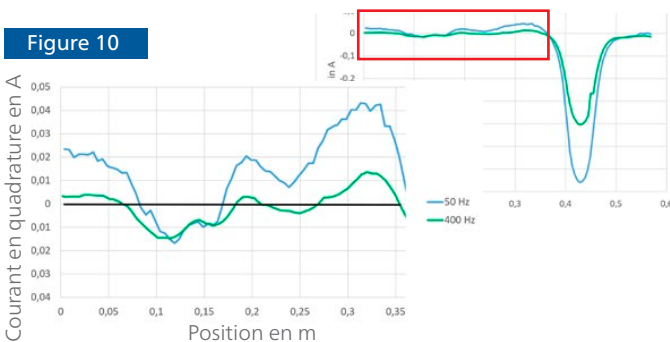
Figure 9



Mesure avec la même tension de magnétisation

De plus, nous constatons également une fluctuation plus faible autour de la ligne zéro de la mesure à 400 Hz lorsque l'on regarde la section « saine » de l'encoche (Figure 10).

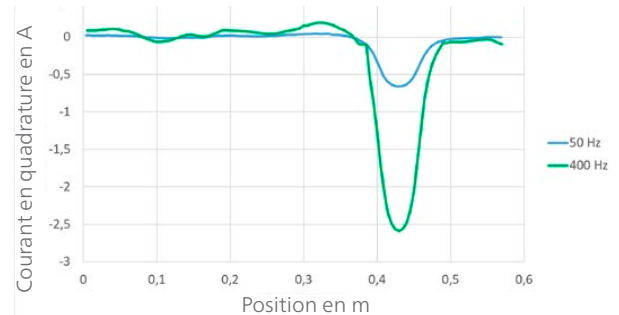
Figure 10



Zoom arrière sur la section d'encoche sans le défaut

Comme on l'a déjà supposé lors de la première expérience, lorsque le flux est identique pour les deux fréquences, l'image change complètement, comme le montre la Figure 11. Dans ce cas, l'amplitude de la mesure de 400 Hz est beaucoup plus élevée que celle de 50 Hz. En comparant cette mesure avec celle de la Figure 10, il faut tenir compte de la différence d'échelle sur l'axe vertical.

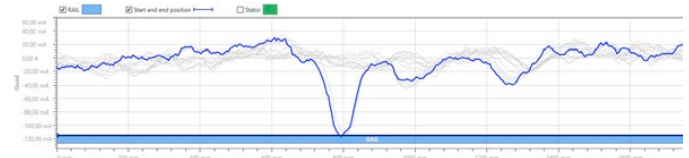
Figure 11



Mesure avec le même flux ; veuillez noter la différence d'échelle sur l'axe vertical par rapport à la Figure 9.

Il n'existe pas de limite absolue pour les fréquences différentes de la fréquence nominale et cela pourrait faire l'objet de recherches futures. Bien qu'aucune limite n'existe, la mesure avec des fréquences plus élevées peut être une approche intéressante. Comme la mesure du flux parasite est également une méthode comparative, il semble que les pics de mesure sur les emplacements de défaut soient clairement visibles avec des fréquences plus élevées.

Figure 12



Résultat de la mesure du moteur dans l'atelier de réparation où un problème dans le circuit magnétique du stator autour de 800 mm est clairement visible.

VI. DÉTECTION DE DÉFAUTS PLUS PROFONDS DANS LE CIRCUIT MAGNÉTIQUE DU STATOR

Les défauts de l'isolation des tôles peuvent être détectés, même s'ils sont situés plus profondément dans le circuit magnétique du stator. Cela a été démontré dans un cas d'utilisation pratique, où un moteur se trouvait dans un atelier de réparation en raison d'un défaut phase-terre dans la machine. La protection a bien fonctionné dans ce cas et s'est déclenchée immédiatement, de sorte que les dommages causés par le défaut dans la machine étaient relativement faibles et non visibles de l'extérieur. Une inspection endoscopique dans chaque conduit de ventilation a permis de localiser le problème. Cette investigation a permis de constater que le défaut se situait en bas d'une barre inférieure. Le chef de projet responsable de la réparation voulait savoir si le circuit magnétique du stator était affecté et devait également être réparé.

De plus, l'opérateur était convaincu que le problème dans le circuit magnétique du stator était déjà présent avant les travaux de maintenance et que le dommage ne s'était pas produit pendant le changement de la bobine.

VII. COMPARAISON AVEC LES MESURES DU FLUX EN ANNEAU

Une mesure comparative a été effectuée pour pouvoir faire des déclarations concernant la comparaison entre la mesure du flux parasite et la situation pendant le fonctionnement de la machine. La machine de test ayant été entièrement renouvelée, il était possible de mettre en œuvre des défauts et de les comparer avec le test de flux total et une caméra thermographique.

La Figure 13 illustre la mise en œuvre de ces défauts, de manière exemplaire sur deux points. Différents modes de mise en œuvre ont été expérimentés.

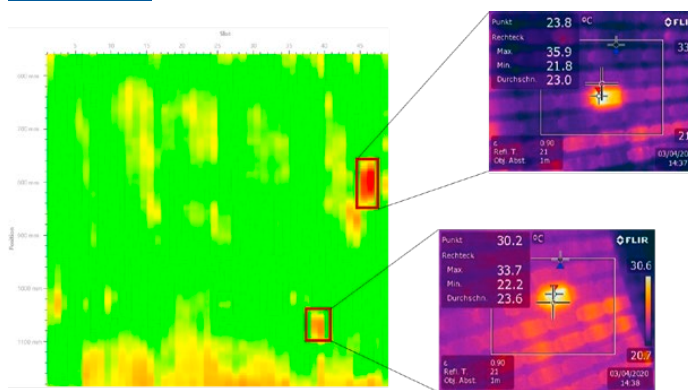
Figure 13



Exemple de la mise en œuvre du défaut et de la peinture noire pour éviter la réflexion pendant la mesure thermographique.

En fonction de la technique de modification, tous les points ne présentent pas une augmentation significative, par exemple en ce qui concerne l'augmentation de la température pendant le test de flux total ou la mesure du flux parasite. Deux modifications ont montré une augmentation de température de plus de 10 °C, ce qui est considéré comme critique [1]. Ces emplacements ont également pu être détectés de manière fiable avec la mesure du flux parasite et une amplitude supérieure à 100 mA. La Figure 14 présente la carte thermique avec les résultats de l'ensemble du stator ainsi que l'image thermographique des deux points critiques. Les autres points ont montré une augmentation de température moindre par rapport à l'environnement. Ils ont également été visibles dans la mesure du flux parasite, car les emplacements avec un flux parasite plus élevé sont restés en dessous de la limite de 100 mA.

Figure 14



Carte thermique de la mesure du flux parasite comprenant des images thermographiques de la mesure comparative avec le flux total. Les deux emplacements où la température a augmenté le plus ont pu être identifiés lors de la mesure du flux parasite, où les deux points avaient une amplitude supérieure à 100 mA.

VIII. CONCLUSION

Comme le montre cet article, la mesure du flux parasite avec le CPC 100 est une méthode fiable pour détecter les points faibles de l'isolation interlaminaire des circuits magnétiques de stator. La portabilité de l'équipement et le montage aisé rendent la solution intéressante pour effectuer des mesures sur site ainsi que pour les applications en atelier. En outre, une importante facilité d'utilisation est assurée par le déplacement semi-automatique du capteur et l'assistance du logiciel PTM.

Il a été prouvé avec succès que des défauts situés plus profondément dans le circuit magnétique du stator ont été détectés. En outre, la comparaison avec la mesure à flux élevé a montré les mêmes résultats.

Références

1. IEEE Std 56-2016 « IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines, » Annex D (informative), septembre 2016.
2. Brochure 257 du CIGRÉ, « EL CID (ELECTROMAGNETIC – CORE IMPERFECTION DETECTOR) TESTING OF LARGE STEAM-TURBINEDRIVEN GENERATORS », Working group A1.01.06, octobre 2004.
3. [3] Bertenshaw, David Ronald : « STATOR CORE INTERLAMINATION FAULTS AND THEIR DETECTION BY ELECTROMAGNETIC MEANS ». Manchester, 2014

Les auteurs

Fabian Öttl est responsable produit chez OMICRON Technologies en Italie. Dans le cadre de ses fonctions, il est responsable des équipements de test et de diagnostic des machines tournantes. Avant de rejoindre OMICRON, Fabian travaillait dans le département R&D d'un fabricant de gros générateurs en tant que spécialiste de l'isolation haute tension. Il a obtenu sa maîtrise en sciences à l'Université technique de Graz en 2011.

Il a rédigé de nombreux articles scientifiques et techniques et contribue à différents groupes de travail du Cigré et de la CEI.

fabian.oettl@omicronenergy.com



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 160 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.