

# Test et analyse dynamiques d'un changeur de prises en charge à l'aide de la mesure de la résistance dynamique

Cornelius Plath, OMICRON electronics GmbH, Autriche

Markus Pütter, OMICRON electronics GmbH, Autriche

## Introduction

Les transformateurs de puissance représentent le lien le plus coûteux entre la production et l'utilisation de l'énergie électrique. L'un des composants les plus importants d'un transformateur de puissance est le changeur de prises en charge (CPeC). Comme son nom le suggère, un CPeC permet de changer de prise et, par conséquent, de réguler la tension sans interrompre le courant de charge. Cet objectif pouvant être atteint de multiples façons, il existe un grand nombre de changeurs de prises différents. Les deux types de changeur les plus répandus sont les changeurs de prises « inductifs » et « résistifs ».

Des études, telles que celle présentée à la figure 1, indiquent que plus de 30 % des défaillances relatives aux transformateurs de puissance de poste sont liées au vieillissement des CPeC. Il est donc essentiel de suivre de près l'état des CPeC de ces transformateurs. Contrairement à d'autres composants plus statiques, le CPeC compte un grand nombre de pièces mobiles. Les fabricants recommandent généralement un cycle de maintenance principalement déterminé en fonction du nombre total d'opérations de commutation.

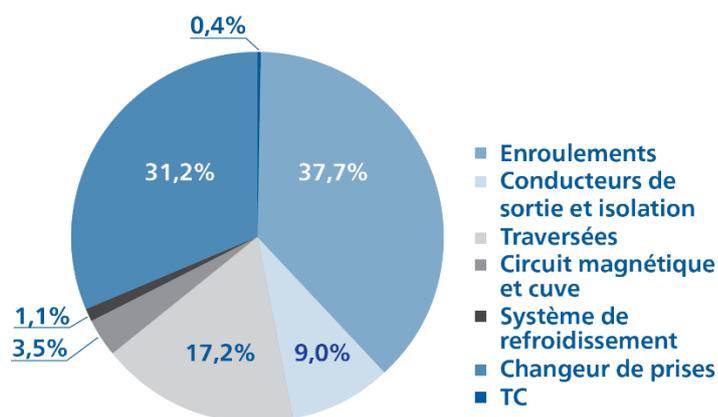


Figure 1. Localisation des défaillances dans les transformateurs de poste, pour 536 cas [1]

## 1. Types de CPeC

Pour une analyse et une évaluation appropriées de la mesure de la résistance dynamique (DRM), il est important de connaître le type et la construction du CPeC. On considère que deux technologies de CPeC se partagent le marché : les CPeC inductifs, que l'on retrouve principalement en Amérique du nord, côté BT, et les CPeC résistifs, qui sont utilisés dans le reste du monde, côté HT.

Cet article se concentre sur les changeurs de prises de type résistif, que l'on peut classer dans deux grandes catégories selon qu'ils sont dotés d'un commutateur de dérivation ou d'un commutateur de sélection (figures 2 et 3).

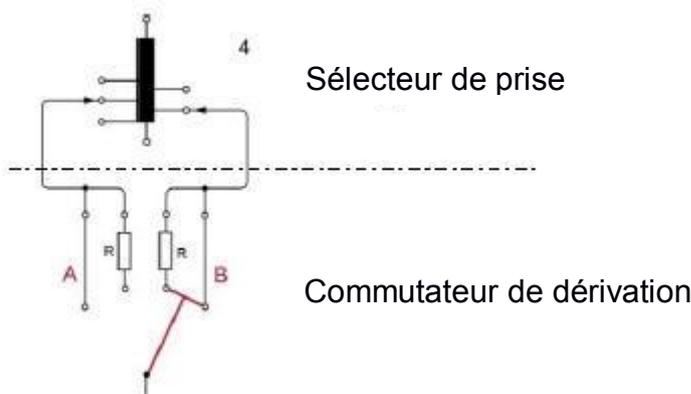


Figure 2. Commutateur de dérivation doté de deux résistances de passage [2]

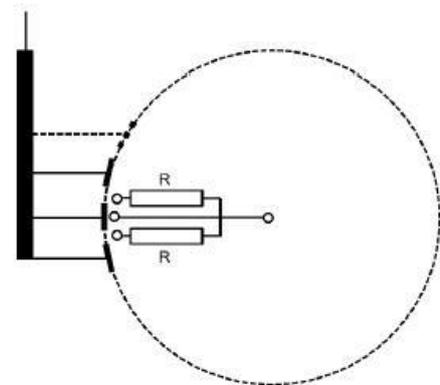


Figure 3. Commutateur de sélection doté de deux résistances de passage [2]

Un CPeC avec commutateur de dérivation comprend deux sections : un sélecteur de prise (en haut) permettant de sélectionner la prise suivante au sein de la cuve principale du transformateur, et un commutateur de dérivation (en bas) permettant de basculer le courant de charge au sein de son propre volume d'huile. Dans ce cas, le sélecteur de prise est déclenché avant le commutateur de dérivation, et est principalement utilisé pour des puissances élevées.

Un CPeC avec commutateur de sélection combine quant à lui les fonctionnalités d'un commutateur de dérivation avec un sélecteur de prise situé au sein de son propre volume d'huile, distinct de celui de la cuve principale du transformateur.

## 2. Principales méthodes de test de CPeC

Dans la mesure où les CPeC des transformateurs de puissance présentent un taux de défaillance élevé, Il est indispensable de contrôler leur état avec soin. Les méthodes de diagnostic suivantes peuvent ainsi servir de base à des fins d'analyse :

- **Mesure de la résistance d'enroulement statique des différentes prises (hors tension)**

La mesure de la résistance d'enroulement statique est un outil de diagnostic précieux, qui constitue d'ailleurs la méthode de test la plus répandue. Une mesure de résistance statique standard permet de contrôler l'état des enroulements ainsi que de l'ensemble des connexions internes, notamment entre les traversées et les contacts mobiles du changeur de prises et l'enroulement, les contacts du sélecteur de prise et les contacts principaux du commutateur de dérivation. Il est également possible de procéder à une évaluation en comparant les résultats avec les données d'usine ou en calculant l'écart avec la moyenne obtenue pour les trois phases.

- **Mesure vibro-acoustique à l'aide de capteurs d'accélération (hors/sous tension)**

Cette méthode vise à détecter les signaux acoustiques causés par les mouvements mécaniques. On compare alors les profils enregistrés, pouvant atteindre jusqu'à 10 secondes et compris dans une plage allant de 10 Hz à 100 kHz dans les domaines temporel et fréquentiel, avec des profils de référence afin d'identifier des modes de défaillance prédéfinis. [3]

- **Mesure de position et de couple sur l'axe d'entraînement (hors/sous tension)**

Le mécanisme d'entraînement des CPeC, constitué d'un moteur, d'un arbre d'entraînement et d'un engrenage, actionne le commutateur de sélection et comprime un ressort afin de déclencher le commutateur de dérivation ou de sélection, respectivement. La mesure de position et de couple utilise les paramètres d'alimentation du moteur (courant et tension) pour détecter les éventuels problèmes mécaniques et le vieillissement du mécanisme d'entraînement. Les résultats peuvent ensuite être comparés avec un profil de référence ou avec des mesures réalisées entre les différentes prises.

- **Analyse des gaz dissous de l'huile du compartiment du changeur de prises (hors/sous tension)**

L'analyse des gaz dissous dans le compartiment des CPeC est de nos jours une pratique relativement courante. Le processus de commutation des CPeC génère une décharge et un échauffement, qui entraînent généralement une augmentation de la concentration en gaz dans le compartiment du changeur de prises, en comparaison avec la cuve principale en fonctionnement normal. L'interprétation des niveaux de gaz diffère donc fortement de celle réalisée pour la cuve principale des transformateurs de puissance. [4]

Chaque méthode de mesure joue un rôle dans l'analyse de l'état des CPeC.

Tableau 1. Principales méthodes de test de CPeC [5]

Méthode de mesure	Application/Objectif	Problèmes
Résistance d'enroulement statique	Contrôle de l'état des enroulements et des connexions internes	Alignement et usure des contacts
Vibro-acoustique	Détection des signaux acoustiques causés par les mouvements mécaniques	Transmission/engrenages, synchronisation/séquence, alignement des contacts, formation d'arcs, surchauffe/cokéfaction, usure des contacts, transition
Position et couple	Détection des problèmes mécaniques et du vieillissement du mécanisme d'entraînement	Transmission/engrenages, commandes/relais, moteur, frein, lubrification, alignement des contacts
Analyse des gaz dissous	Détection d'une concentration en gaz supérieure dans le compartiment du changeur de prises	Formation d'arcs, surchauffe/cokéfaction
Résistance dynamique	Mesure du processus de commutation rapide du commutateur de dérivation	Synchronisation/séquence, usure des contacts, transition

### 3. Mesure de la résistance dynamique (DRM)

Les temps de commutation types d'un commutateur de dérivation ou de sélection, entre 40 et 60 ms, rendent difficile toute détection au cours du processus de commutation à l'aide d'une mesure de résistance d'enroulement statique standard, qui peut nécessiter un certain temps. Le principe de cette mesure a donc été développé afin d'obtenir une méthode de diagnostic complémentaire spécifique à cet usage.

Avec le même montage (figure 4a), la mesure de la résistance dynamique permet d'évaluer le processus de commutation rapide du commutateur de dérivation. Grâce aux contacts d'arc, il est possible de détecter les temps de commutation du commutateur de dérivation, les interruptions de commutation, dues par exemple à des résistances de commutation ou à des conducteurs endommagés, ainsi que l'usure totale des contacts. Cela permet par conséquent un examen plus approfondi de l'état dynamique des CPeC.

L'analyse des relevés permet par ailleurs de tirer un certain nombre de conclusions concernant l'état des CPeC. Il existe trois façons différentes de représenter le comportement dynamique d'un commutateur de dérivation. Notez que nous n'utiliserons ci-après que la courbe de courant.

- (1) Courbe de courant
- (2) Courbe de tension
- (3) Courbe de résistance

## Courbe de courant

La courbe de courant (figure 4b) constitue la méthode d'interprétation des résultats de DRM la plus répandue ; elle est largement utilisée dans le cadre des mesures de résistance statique et permet de détecter les interruptions de courant.

La mise en court-circuit du côté opposé du transformateur entraîne une sensibilité accrue du signal de courant, puisque la chute de courant (ondulation) augmente (figures 7 et 8). Ceci est dû à une constante temporelle inférieure en raison de l'inductance principale réduite. Une comparaison directe du signal de courant s'avère difficile dans le cas de mesures réalisées avec des équipements de test différents, car l'ondulation dépend des propriétés dynamiques de la source de courant. Cependant, le principe et les différentes étapes du processus de commutation restent visibles, quels que soient les paramètres relatifs à la source.

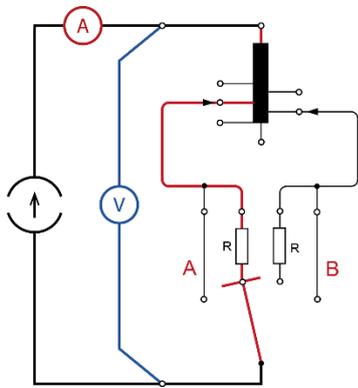


Figure 4a. Montage de mesure type pour une DRM – Courbe de courant

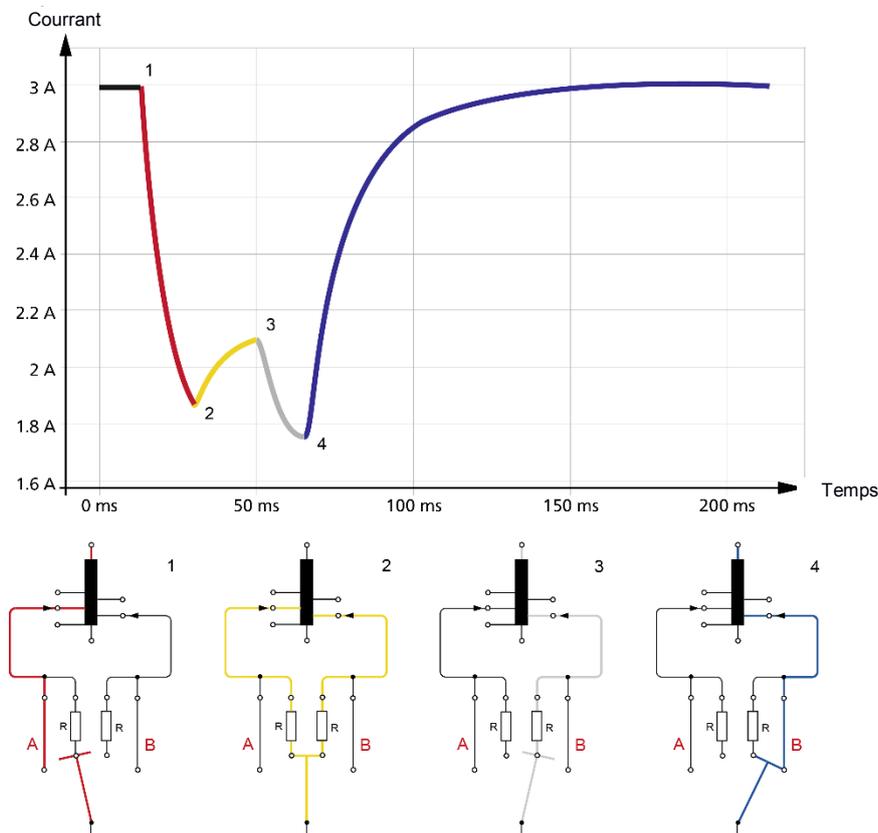


Figure 4b. Comportement dynamique type du commutateur de dérivation en fonctionnement – Courbe de courant

### Courbe de tension

Parallèlement au signal de courant, il est également possible d'évaluer le comportement dynamique à l'aide de la courbe de tension ou de résistance. L'injection d'un courant continu (figure 5) permet d'obtenir un signal de tension, tel que présenté à la figure 6a. L'exploitation de la courbe de tension nécessite toutefois de s'assurer que le signal de tension ne soit pas coupé en raison d'un limiteur de tension inhérent à la source, ce qui rendrait l'analyse du signal extrêmement compliquée. Par ailleurs, des transitoires telles que celle de l'exemple de la figure 6a entre l'étape 1 et l'étape 2 ne seraient pas aussi visibles si la limite de tension était atteinte. Comme pour la courbe de courant, une comparaison directe des courbes mesurées est impossible dans le cas de mesures réalisées à l'aide d'équipements de test différents.

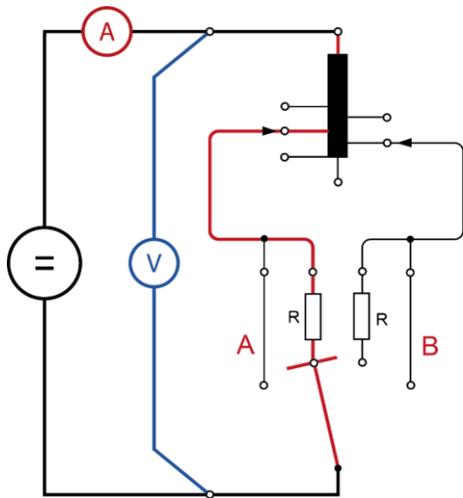


Figure 5. Montage de mesure type pour une DRM - Courbes de tension et de résistance

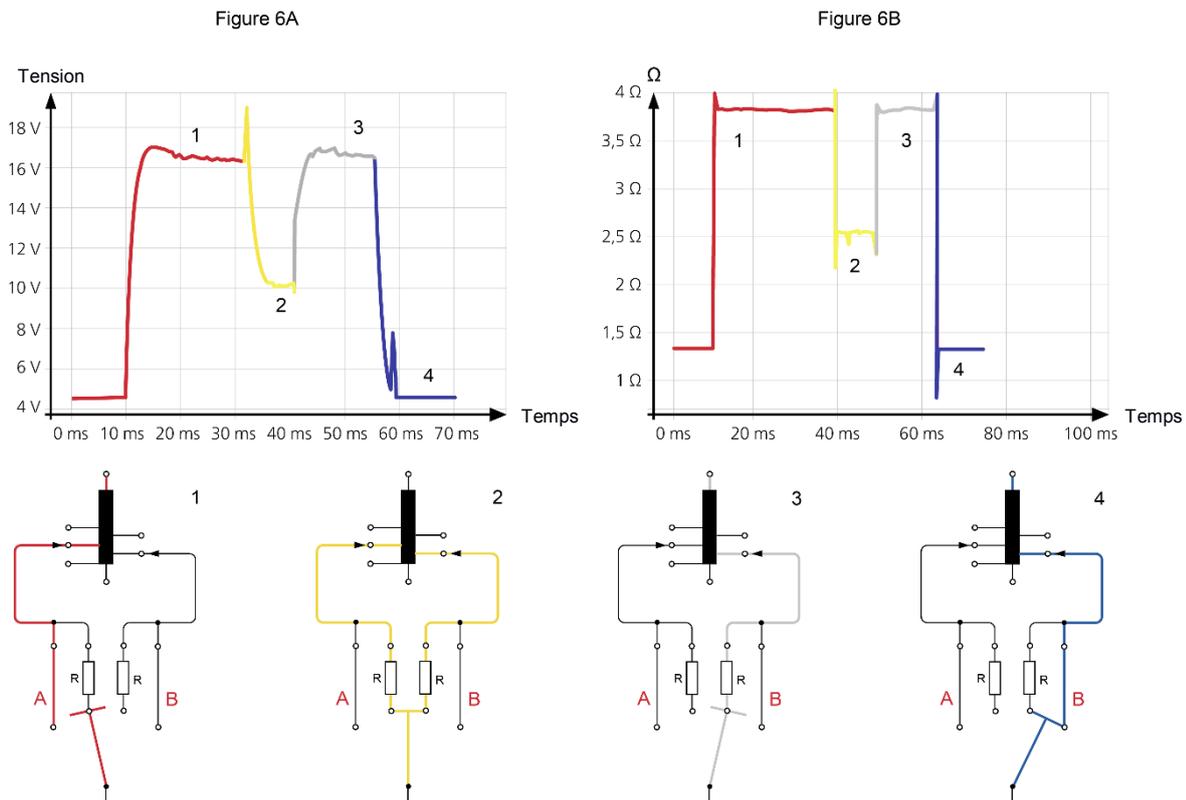


Figure 6. Comportement dynamique type du commutateur de dérivation en fonctionnement – Courbes de tension et de résistance

## **Courbe de résistance**

La courbe de résistance (figure 6b) ne peut être mesurée directement ; elle est obtenue à partir de mesures de tension et de courant réalisées à l'aide du montage présenté à la figure 5. Il est possible de court-circuiter les bornes opposées du transformateur afin de réduire la constante temporelle du système. Par ailleurs, une inductance parasite élevée peut entraîner une tension inductive importante, qui ne peut être distinguée de la composante résistive de la tension avec le montage illustré à la figure 5. Pour compenser cet effet, une méthode a été développée il y a quelques années afin de déterminer la composante inductive de la tension via une mesure simultanée au niveau de l'enroulement opposé [6].

La courbe de résistance présente l'avantage majeur de ne pas dépendre de la source de courant utilisée. Il est en outre possible de déterminer directement les valeurs des résistances de commutation. Étant donné que la tension induite du côté secondaire peut être très élevée, l'équipement de test doit impérativement être doté de mécanismes de protection spécifiques.

Comme précédemment mentionné, la courbe de courant constituant la méthode d'interprétation des résultats de DRM la plus répandue, c'est cette méthode qui est utilisée dans les sections ci-après.

## **4. Analyse des résultats de mesure**

Cette méthode de test non invasive permet de détecter les défaillances sans ouvrir le compartiment du CPeC. Le type et la construction du CPeC doivent toutefois être connus pour pouvoir analyser et évaluer la mesure de la résistance dynamique de manière optimale. Une empreinte de référence, effectuée après la mise en service ou avec un commutateur de dérivation en bon état avéré, permet une analyse efficace.

On distingue principalement deux types d'informations pouvant être interprétées concernant le profil de courant :

- **Amplitude :**

Les résistances de passage entraînent une variation du courant lors du processus de commutation. Par ailleurs, la résistance de contact, le déplacement des contacts, les interruptions, l'inductance d'enroulement, la formation d'arcs et le rebond des contacts peuvent influencer sur l'amplitude.

- **Synchronisation :**

Les différences de synchronisation peuvent indiquer des problèmes mécaniques, une usure excessive des contacts et/ou le rebond des contacts. Selon la conception et le modèle du CPeC, un certain écart peut être acceptable.

## **5. Variation dans les résultats de DRM**

### *5.1 Sélection du courant de test approprié*

Dans le cadre d'une mesure de résistance statique, il est préférable d'utiliser des courants de test de quelques ampères seulement, en particulier pour les enroulements HT [7]. Bien que le test d'enroulements BT de faible impédance puisse nécessiter des courants compris entre 10 et 20 A, il est recommandé de se limiter à des courants ne dépassant pas 15 % du courant nominal des enroulements. Des courants plus élevés pourraient provoquer l'échauffement des enroulements. Sachant que la mesure de la résistance dépend de la température, cela pourrait entraîner une imprécision dans les résultats [8]. En règle générale, ces considérations s'appliquent également aux mesures de résistance dynamique, notamment :

Des courants de test inférieurs à 3 ou 1 A présentent une sensibilité accrue au rebond de contact pouvant mener à une interprétation erronée des résultats. On observe couramment une couche résiduelle d'huile sur les contacts, qui entraîne de multiples interruptions de courant au cours du test. Ces résidus d'huile ne sont généralement pas considérés comme problématiques lorsque le CPeC fonctionne dans des conditions de charge normales. Par conséquent, les courants de test compris dans cette plage sont susceptibles de révéler des effets à long terme du vieillissement, tels que la cokéfaction, à un stade précoce, mais ces avantages doivent encore être examinés via des études de cas supplémentaires.

Des courants de test plus élevés, compris entre 3 et 5 A, permettent, dans la plupart des cas, d'obtenir une mesure stable du processus de commutation. Les interruptions mineures, dues par exemple à la présence d'huile sur les contacts, n'affectent pas les résultats. Les tests réalisés sur le terrain n'ont démontré aucune différence avec des courants allant jusqu'à 10 ou 15 A.

### *5.2 Mise en court-circuit du côté secondaire*

La mise en court-circuit du côté secondaire du transformateur peut avoir deux effets positifs. D'une part, en cas d'interruption du courant lors de la commutation, l'énergie emmagasinée dans le circuit magnétique peut ne pas être libérée, et un changement rapide de courant ne génère pas de tension élevée pour l'enroulement opposé. D'autre part, la chute de courant (ondulation) lors de la commutation apparaît être, dans la plupart des cas, deux fois plus élevée en raison de la réduction de l'inductance principale. Cela permet une mesure de la résistance dynamique plus précise, ainsi que des courbes plus significatives.

### 5.3 Processus de commutation d'une prise à une autre

À des fins d'analyse et de comparaison de plusieurs prises, il convient de déterminer si les courbes diffèrent en fonction du sens de commutation. Dans un cas, des enroulements sont ajoutés au circuit tandis que dans l'autre cas, ils sont retirés. Selon les enroulements de prise du transformateur et du CPeC, le schéma de câblage peut différer d'un transformateur à un autre. Dans le cas d'ajout d'enroulements, l'inductance supplémentaire doit être chargée en énergie ; dans le cas du retrait d'enroulements, l'énergie chargée dans l'inductance est libérée. Cet effet est beaucoup plus probable lorsque le côté secondaire n'est pas placé en court-circuit, comme illustré à la figure 7.

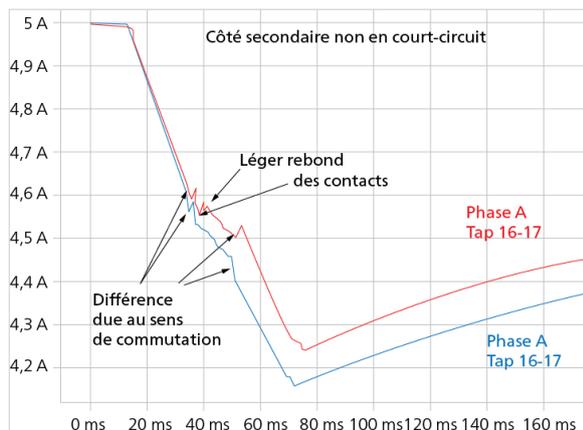


Figure 7. Différence dans la DRM selon le sens de commutation<sup>1</sup>

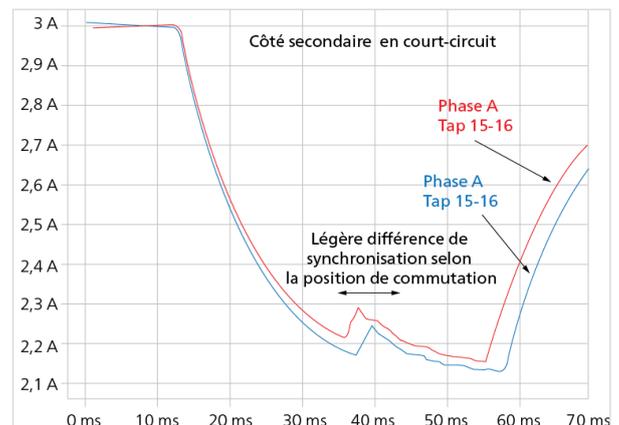


Figure 8. Différence dans la DRM selon le sens de commutation<sup>1</sup>

Les courbes mesurées diffèrent également lorsque l'on passe d'une position de prise impaire à une position de prise paire puisque le commutateur de dérivation présente alors une alternance du sens de rotation (figure 8). Cela peut généralement être interprété comme des temps de commutation différents selon les étapes. Par ailleurs, il arrive parfois que l'on observe un rebond des contacts dans un seul sens uniquement.

C'est pourquoi la gamme OMICRON propose le logiciel Primary Test Manager (PTM), qui permet d'analyser et de comparer des mesures de résistance statique et dynamique. PTM présente le processus de commutation des différentes prises au sein d'un graphique unique, afin d'en faciliter la comparaison. Étant donné que les signatures de courant de nombreux types de CPeC peuvent varier selon leur phase et le sens de commutation, PTM offre des options de filtrage uniques permettant de comparer les deux opérations pour des positions paires et impaires, et pour les trois phases. Cela permet l'analyse des résultats de mesure à des fins de diagnostic complet des défaillances.

## Conclusion

Une mesure de résistance statique standard permet de contrôler l'état des enroulements ainsi que de l'ensemble des connexions internes fixes. Dans certains cas, cependant, il est impossible de détecter les éventuelles défaillances à l'aide d'une mesure de résistance d'enroulement classique [9]. L'utilisation de la DRM en complément apparaît donc bénéfique pour l'analyse du processus de commutation, et des contacts mobiles, des CPeC des transformateurs de puissance. Avec le même montage de test que pour une mesure de résistance statique, la DRM permet d'examiner le processus de commutation rapide du commutateur de dérivation en vue de détecter l'usure mécanique des contacts, des conducteurs et des résistances de commutation, sans aucun recâblage. Résultat, la fiabilité de l'évaluation des CPeC peut être améliorée, les coûts de maintenance réduits et, plus important encore, les défaillances imprévues et coûteuses évitées.

## Bibliographie

- [1] Groupe de travail A2.3 du Cigré, 2015, TB 642 - Transformer Reliability Survey
- [2] Rudolf Klaus, 50 Jahre VDE Bezirksverein Nordbayern, Die Entwicklung von Stufen-schaltern für Hochspannungstransformatoren
- [3] K. Viereck, A. Saveliev, 2015, Acoustic Tap-Changer Monitoring using Wavelet Analyses, ISH 2015, Pilsen
- [4] IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers, IEEE C57.139-2010
- [5] Jur Erbrink, Edward Gulski, Johan Smit, Rory Leich, 20th International Conference on Electricity Distribution 2009, Experimental Model for diagnosing on-load tap changer contact aging with dynamic resistance measurements
- [6] E. Woschnagg und H. Koglek, 1977, Zum Problem der Widerstandsmessung von niederohmigen Transformatorwicklungen
- [7] OMICRON, Test électriques standard pour les transformateurs de puissance, [www.omicron.at](http://www.omicron.at)
- [8] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers et IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers, IEEE C57.12.90 – 2006
- [9] Raka Levi, Budo Milovic, TechCon 2011, OLTC Dynamic testing

## Auteurs



**Cornelius Plath** est titulaire d'un Master en Génie électrique et Gestion d'entreprise de l'Université d'Aix-la-Chapelle (RWTH), en Allemagne. Pendant ses études, il a participé à plusieurs projets de recherche financés par l'industrie sur l'évaluation de l'état des appareils électriques à l'Institut de la technologie à haute tension (IFHT). Il a rejoint OMICRON en 2010 en tant qu'ingénieur en applications, et occupe aujourd'hui le poste de responsable produit. Il possède une grande expérience des applications à l'international, et est spécialisé dans le domaine du diagnostic électrique des disjoncteurs et des transformateurs de puissance.



**Markus Pütter** a étudié le génie électrique à l'Université de Paderborn, d'où il est sorti diplômé en 1997. Il a débuté chez OMICRON electronics en 1999 en tant qu'ingénieur électrique dans le domaine du diagnostic des transformateurs avant de devenir, en 2008, responsable produit pour les solutions de test et de diagnostic des équipements primaires. À ce poste, il a développé des solutions de test novatrices pour les transformateurs de puissance. Markus Pütter a fait partie du comité sur les transformateurs CEI TC14 et du groupe de travail A1.39 du Cigré. Il a également participé activement à un groupe de travail AM Forum portant sur la mesure de la résistance dynamique pour les changeurs de prises en charge. Markus nous a quittés en juin 2015 suite à un tragique accident.

**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 150 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.

[www.omicronenergy.com](http://www.omicronenergy.com)