Rubrique



Une approche novatrice pour des tests complets sur les transformateurs déphaseurs

Table des matières

Les transformateurs déphaseurs sont utilisés pour améliorer la capacité de transport, la fiabilité et la sécurité d'exploitation dans les réseaux de transport complexes. Cet article traite d'une approche novatrice permettant de vérifier les paramètres d'exploitation pendant les tests de réception usine et sur site.

Résumé

Le transformateur déphaseur est utilisé pour contrôler le flux de puissance active dans un réseau de transport complexe, et notamment l'amélioration de la capacité de transport, la fiabilité et la sécurité d'exploitation de ce réseau. C'est un outil efficace et économique qui permet d'augmenter la fiabilité et l'efficacité de contrôle du flux de puissance dans une ligne de transport surchargée dans laquelle il a été installé. Les informations relatives à son état technique sont donc également importantes pour garantir un fonctionnement fiable. L'article traite en détail d'une approche de test de diagnostic novatrice sur les transformateurs déphaseurs et présente plusieurs cas de mesure soulignant l'importance des états d'exploitation caractéristiques du transformateur déphaseur.

Mots clés : réseau électrique, régulation du flux de puissance, transformateur, déphaseur, tests des amplificateurs de quadrature.

1. Introduction

Les réseaux électriques actuels ne se limitent généralement pas à un seul pays ou région et comptent souvent de multiples réseaux interconnectés provenant de différents pays. Ces connexions « transfrontalières » peuvent permettre le fonctionnement synchrone de multiples réseaux ou établir un lien non synchrone entre des réseaux exploités de manière indépendante. L'avantage des réseaux électriques interconnectés réside dans la réserve mutuelle d'énergie qui a gagné en importance au fil des ans grâce à l'augmentation de la production décentralisée.

Dans le même temps, certains inconvénients des réseaux électriques interconnectés, comme des flux circulaires imprévus, peuvent survenir si le flux de puissance active entre les sous-systèmes ne peut être contrôlé. Ces flux circulaires occupent une partie de l'interconnexion, réduisant la capacité de transfert disponible des systèmes et augmentant ainsi les pertes. Dans des situations critiques, cela peut engendrer une réduction de l'alimentation électrique des consommateurs. L'un des moyens de contrôler ce type de phénomène est l'installation de transformateurs déphaseurs dans les connexions synchrones. Ces derniers sont capables de contrôler le flux de puissance dans la branche dans laquelle ils sont installés, afin d'affecter le changement de distribution de puissance dans l'environnement du réseau. Cet article traite en détail du principe opérationnel des transformateurs déphaseurs et de certains des défis rencontrés lors des tests de réception sur site et en usine de ces transformateurs particuliers.

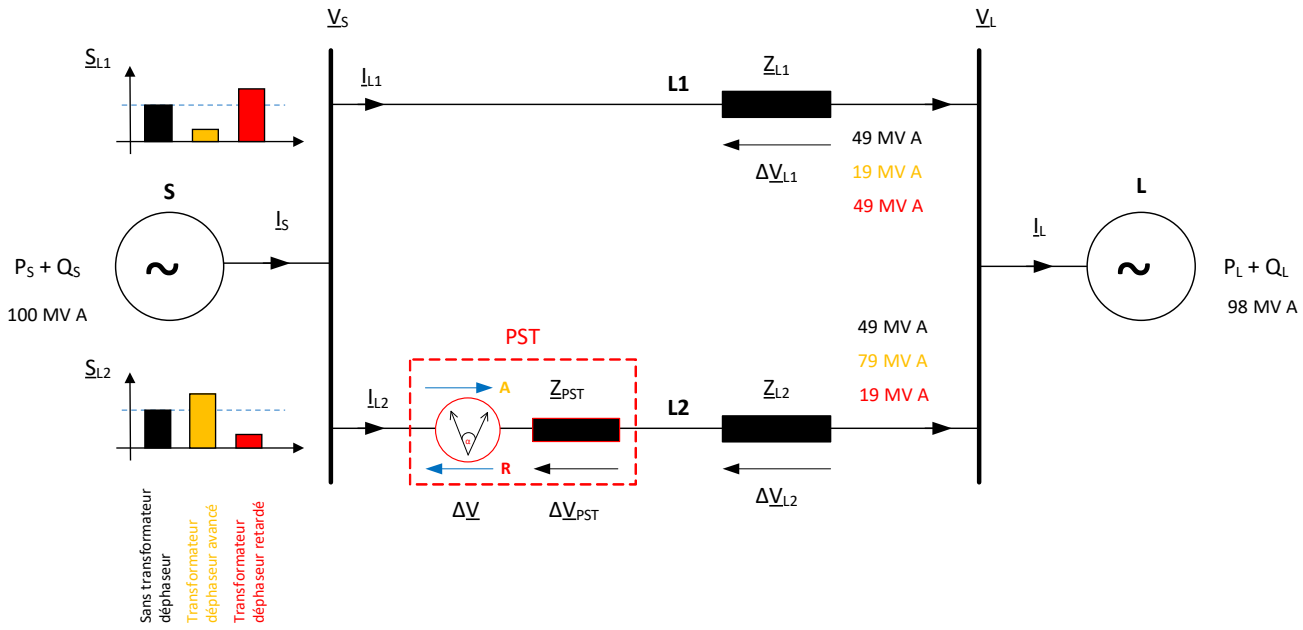


Figure 1. Schéma du réseau d'un circuit de base à double alimentation avec contrôle de la puissance via un transformateur déphaseur

2. Principe de la régulation de puissance

Le principe de base de la régulation de puissance au moyen d'un transformateur déphaseur peut être expliqué à l'aide d'un réseau simplifié. Prenons une source de 100 MVA (S) connectée à la charge (L) via deux lignes de puissance parallèles (L1 et L2) avec leurs impédances de ligne respectives (Z_{L1} et Z_{L2}). Les pertes sur la ligne sont déterminées par les paramètres de ligne et produisent un déphasage entre les tensions côté source et côté charge. Si Z_{L1} et Z_{L2} ont des valeurs identiques, la puissance transmise via les deux lignes de puissance sera distribuée de manière uniforme. Dans un tel système, la puissance sera toujours distribuée en fonction des paramètres de ligne et ne peut être régulée. C'est pourquoi des transformateurs déphaseurs sont utilisés pour introduire un déphasage additionnel entre la charge et la source, afin de réguler le flux de puissance sur les deux lignes.

En général, selon le type de transformateur déphaseur, il est possible de réguler le flux de puissance active et réactive (en fonction de la construction du transformateur déphaseur) :

$$S = \frac{|U_S| \cdot |U_L|}{X_L} \cdot \left[\sin(\alpha) + j\cos(\alpha) - \frac{|U_L|}{|U_S|} \right], \quad (1)$$

Dépendance de la puissance active et réactive transmise (1) en tenant compte du transformateur déphaseur :

$$S_{PST} = \frac{|U_S| \cdot |U_L|}{X_L + X_{PST}} \cdot \left[\sin(\alpha + \varphi) + j\cos(\alpha + \varphi) - \frac{|U_L|}{|U_S|} \right], \quad (2)$$

où : U_S - tension côté source « S » ; U_L - tension côté charge « L » ; X_L - réactance de la ligne (circuit) dans laquelle le transformateur déphaseur a été installé ; X_{PF} - réactance du transformateur déphaseur interne ; α - déphasage entre les systèmes.

Dans cet exemple, un déphasage négatif est introduit dans la branche dans laquelle le déphaseur est installé en plaçant le transformateur déphaseur dans la position retardée, ce qui réduit la puissance transmise dans cette branche. Comme la somme de la puissance transmise sur les deux lignes reste la même, la puissance dans l'autre branche augmente. En plaçant le transformateur déphaseur dans la position avancée et en introduisant un déphasage positif, la distribution de puissance est complètement opposée au cas précédent. Cette fois, la puissance circulant dans la branche dans laquelle se trouve le transformateur déphaseur augmente, tandis que la puissance dans la branche sans le transformateur déphaseur diminue.

Notre exemple n'a, jusqu'à présent, abordé que la régulation de la puissance active en ajustant le déphasage, ce que l'on appelle généralement « régulation symétrique ». Il est également possible de réguler le flux de puissance réactive en influençant le rapport entre la tension de la source et de la charge. Les transformateurs déphaseurs qui régulent à la fois la puissance active et réactive sont appelés « transformateurs déphaseurs asymétriques ». Cet article ne traitera que des transformateurs déphaseurs symétriques.

3. Principe de fonctionnement des transformateurs déphaseurs symétriques

Le concept de base de l'ajustement du déphasage repose sur l'ajout d'une tension supplémentaire à la tension présente dans le chemin principal avec un déphasage de 90° (tension de quadrature, $\Delta\underline{U}$). En fonction de l'amplitude et de la polarité de la tension induite, le déphasage peut être ajusté (Figure 3). Des

transformateurs déphaseurs sont alors utilisés ; ils se composent généralement de deux transformateurs : une unité série et une unité d'excitation interconnectées pour permettre l'ajustement du déphasage entre la source et le côté charge. L'exemple de construction dans la version symétrique à une seule cuve est décrit à la Figure 2.

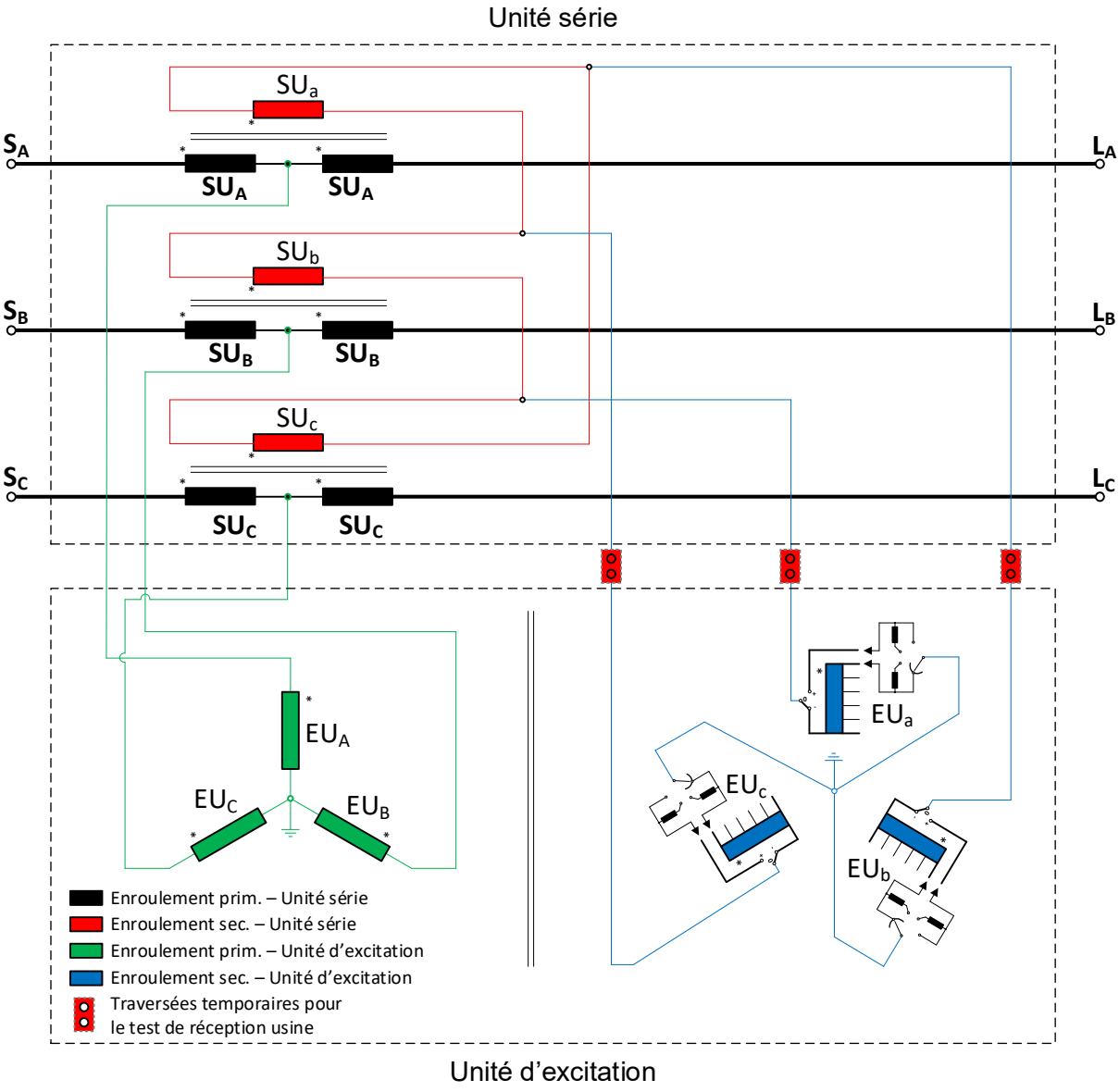


Figure 2. Système de câblage des enroulements des déphaseurs symétriques

3.1 Unité série

L'unité série est l'élément principal d'un transformateur déphaseur, dont le côté primaire est connecté en série à la ligne de puissance entre la source « S » et la charge « L ». Dans la version symétrique, l'unité série de l'enroulement primaire se compose de deux parties divisées symétriquement entre les côtés « S » et « L ». Entre les deux parties séparées de l'enroulement primaire, l'unité série est connectée à l'enroulement primaire de l'unité d'excitation (Figure 2). L'enroulement secondaire de l'unité série est connecté en triangle à l'enroulement secondaire de l'unité d'excitation, afin d'introduire une tension déphasée de 90° par rapport à la tension d'alimentation.

3.2 Unité d'excitation

L'unité d'excitation sert à transformer la tension dérivée par l'enroulement primaire de l'unité série en amplitude et en déphasage, afin qu'elle puisse être ré-induite par l'enroulement secondaire de l'unité série. Ainsi, l'enroulement primaire de l'unité d'excitation est connecté entre les bobines séparées symétriquement de l'enroulement primaire de l'unité série (Figure 2). Une telle connexion permet l'ajustement du déphasage entre « S » et « L » sans modifier l'amplitude de la tension côté charge UL. Pour réguler l'amplitude de la tension de quadrature et donc le déphasage entre la source et le côté charge du transformateur déphaseur, l'enroulement secondaire est équipé d'un changeur de prises en charge (CPeC).

Afin d'illustrer le principe de l'introduction de tension de quadrature, la Figure 4 présente plusieurs diagrammes vectoriels à différentes étapes opérationnelles de la transformation. Les valeurs de tension indiquées concernent des transformateurs déphaseurs symétriques d'une tension nominale de 400 kV avec un angle d'ajustement ± 20˚ [1]. Les couleurs des enroulements (Figure 2) sont identiques à celles des vecteurs. Figure 3.

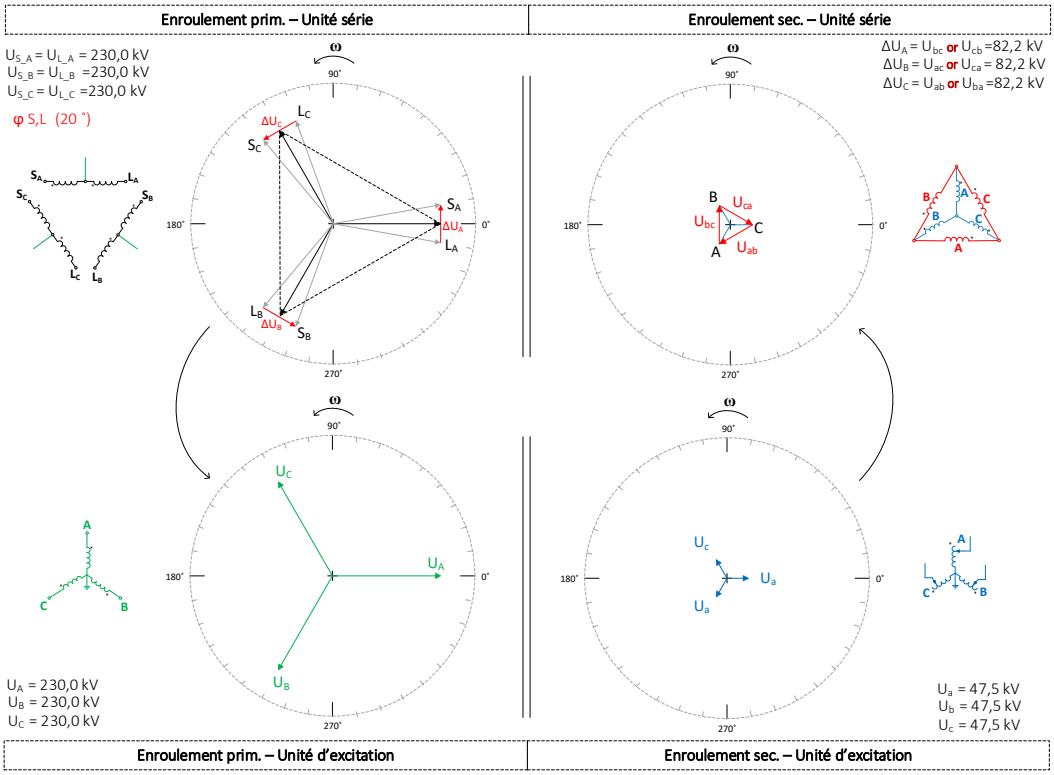


Figure 3. Schéma vectoriel des tensions à différentes étapes de transformation pour un transformateur déphaseur à vide

La norme [2] distingue deux types de déphaseurs. En fonction des conditions météorologiques, les unités série et d'excitation sont installées dans une ou deux cuves distinctes. Quelle que soit la conception choisie, le fonctionnement reste le même ; la différence réside dans la mise en œuvre de la tension ΔU, ainsi que dans les avantages et les inconvénients de la solution. Lors du choix du type de structure de transformateur déphaseur, de nombreux aspects sont pris en compte, mais le paramètre déterminant reste le plus souvent la puissance transmise.

4. Tests des transformateurs déphaseurs

Lorsque les transformateurs déphaseurs sont installés sur site, les bornes de l'unité d'excitation ne sont généralement pas accessibles. Bien qu'il soit courant d'installer des traversées temporaires à des fins de test pendant la réception en usine, cette option est rarement utilisée lors des tests sur site. C'est pourquoi les tests individuels de l'unité d'excitation ne sont généralement possibles qu'en usine. Le tableau 1 énumère plusieurs tests électriques faisant partie des tests de réception standard des unités série et d'excitation. Remarque : le tableau 1 indique les tests choisis dans le cadre de cet article car ils permettent de montrer le comportement caractéristique des transformateurs déphaseurs et font généralement partie de la procédure de test de réception usine ou sur site. Ils ne représentent cependant pas la liste complète de tests pouvant être réalisés. Dans notre cas, l'équipement à tester est un transformateur IIId/YNyn0 symétrique de 500 MVA, 230 kV, avec un déphasage compris entre -10° et +10°. Cela signifie que l'enroulement primaire de l'unité série est connecté en série (III) et que l'enroulement secondaire est connecté en triangle (d) sans déphasage. Les côtés primaire et secondaire de l'unité d'excitation sont tous deux connectés en étoile à la connexion neutre (YNyn) et avec un déphasage de 0 degré entre les deux côtés. Le déphasage entre -10° et +10°, entre les bornes côtés source et charge, n'est possible qu'avec l'introduction de la tension de quadrature. °.

Tableau 1. Tests électriques choisis pour les tests de réception usine (FAT) et sur site

Measurement	Unité série	Unité d'ex citation
Rapport de tr ansformation	FAT / sur site	FAT
Courant de magnétisation	FAT / sur site	FAT
Déphasage	FAT / sur site	FAT
Résistance d'enr oulement	FAT / sur site	FAT
Résistance d'enr oulement dynamique (balayage CPeC)	FAT / sur site	FAT

4.1 Mesure des unités série

Comme la mesure du rapport de tension à différentes positions de prise d'un transformateur de réseau conventionnel, il est important de vérifier la plage de déphasage spécifiée entre les bornes de ligne des côtés « S » et « L » des transformateurs déphaseurs.



Figure 4. Connexion ponctuelle du système de test de transformateur triphasé pour réaliser l'ensemble des tests électriques conformément au Tableau 1.

Dans ce cas, un système de test de transformateur triphasé portable (Figure 4) est utilisé pour réaliser une mesure simultanée du déphasage (Figure 5), du rapport de transformation (Figure 6) et du courant de magnétisation sur les trois phases. Les résultats confirment que la plage de fonctionnement est comprise entre +10° et -10° avec une largeur d'incrément de 0,87° à vide.

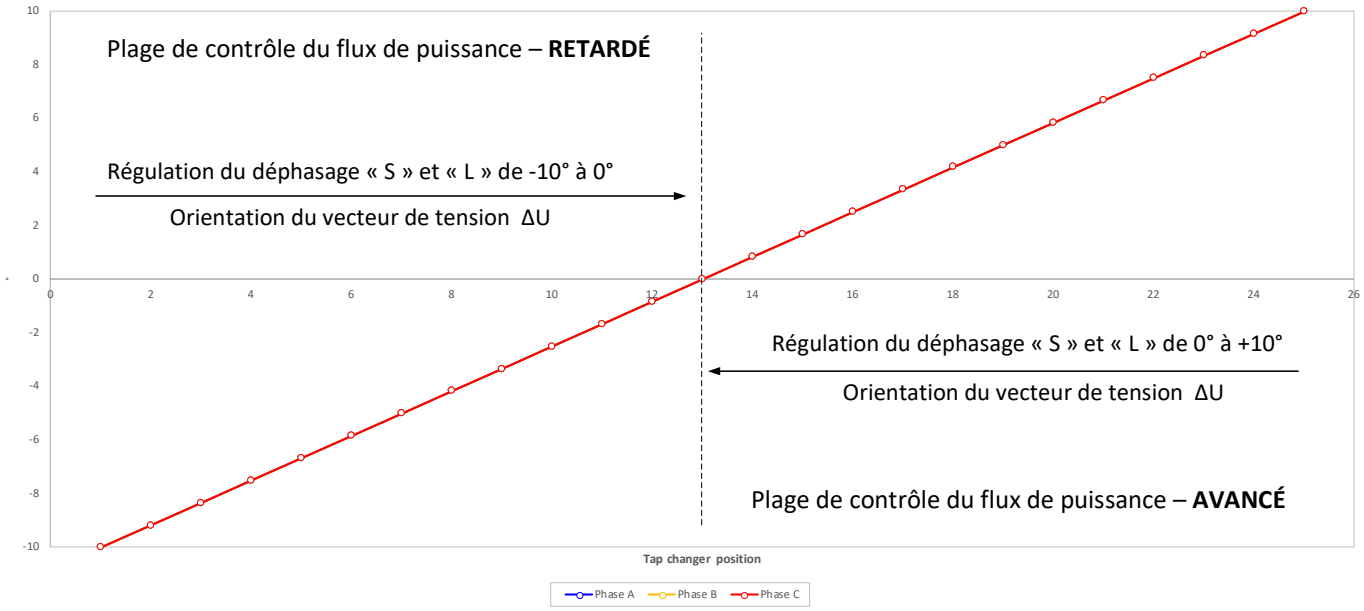
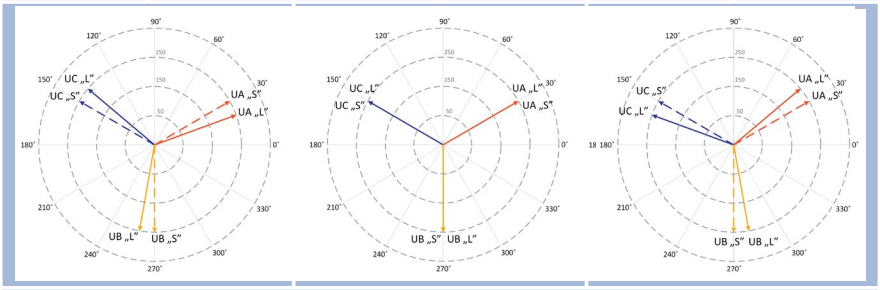
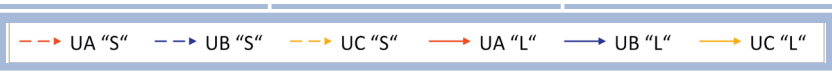


Figure 5. Résultats des mesures de déphasage « S » et « L » en fonction de la position du CPeC de l'unité d'excitation

Un défi de taille pour les techniciens d'essai, en particulier pendant les tests de mise en service sur site, consiste à déterminer si le transformateur déphaseur fonctionne en position avancée ou retardée, c'est-à-dire, si le transformateur déphaseur améliore ou bloque le flux de puissance dans la branche concernée

(Figure 1). Cette opération est essentielle pour déterminer les bornes côté source et côté charge. À l'aide d'une mesure triphasée, la relation de phase des tensions et courants côté source et côté charge peut aisément être indiquée dans un schéma vectoriel afin de déterminer l'état du contrôle du flux. Un exemple des résultats obtenus à différentes positions de prise est illustré dans le Tableau 2.

Tableau 2. Résultats des mesures de déphasage « S » et « L » à trois positions caractéristiques

Canal	Déphasage 10°		Déphasage 0°		Déphasage -10°	
	Valeur	Phase	Valeur	Phase	Valeur	Phase
UA "S"	250 V	30°	250 V	30°	250 V	30°
UB "S"	250 V	-90°	250 V	-90°	250 V	-90°
UC "S"	250 V	150°	250 V	150°	250 V	150°
UA "L"	250 V	20°	250 V	30°	250 V	40°
UB "L"	250 V	-100°	250 V	-190°	250 V	-80°
UC "L"	250 V	140	250 V	150°	250 V	160°
						
						

L'interprétation vectorielle des résultats de mesure du sens de contrôle du déphasage donne une indication claire des vecteurs de tension sur le côté « S » ou « L » qui sont en avance ou retardés. Grâce à la visualisation des résultats de mesure, il n'est pas nécessaire de disposer d'un enregistrement d'oscilloscope en plus, qui nécessiterait un équipement supplémentaire et rallongerait la durée de test.

Il est possible de déterminer les valeurs mathématiques de la tension additionnelle ΔU à introduire entre les vecteurs de tension US - UL pour obtenir le déphasage souhaité [3] :

$$\Delta U = \frac{2 \cdot U_{LL}}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right), \qquad (3)$$

où : U_{LL} - tension entre phases du transformateur déphaseur, φ - déphasage attendu entre « S » et « L ».

La valeur de tension | ΔU | sera calculée pour le transformateur déphaseur analysé ainsi que les deux exemples de positions de contrôle du déphasage 5° et 10° :

$$\Delta U_{5^\circ} = \frac{2 \cdot 220}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\frac{5}{2}\right) = 11.08 \text{ kV},$$

$$\Delta U_{10^\circ} = \frac{2 \cdot 220}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\frac{10}{2}\right) = 22.14 \text{ kV},$$

En mesurant le rapport entre les côtés « S » et « L » de l'unité série, il est possible d'identifier le type de transformateur déphaseur testé. Un rapport de tension constant sur toute la plage de déphasage (Figure 6)

est caractéristique d'un transformateur déphaseur symétrique. Cela s'explique par le fait que la tension $\underline{\Delta U}$ (Figure 3) est introduite entre les bobines séparées symétriquement de l'enroulement primaire (Figure 2). Un changement de déphasage et de rapport indiquerait une régulation asymétrique, c'est-à-dire un ajustement de la puissance active et de la puissance réactive.

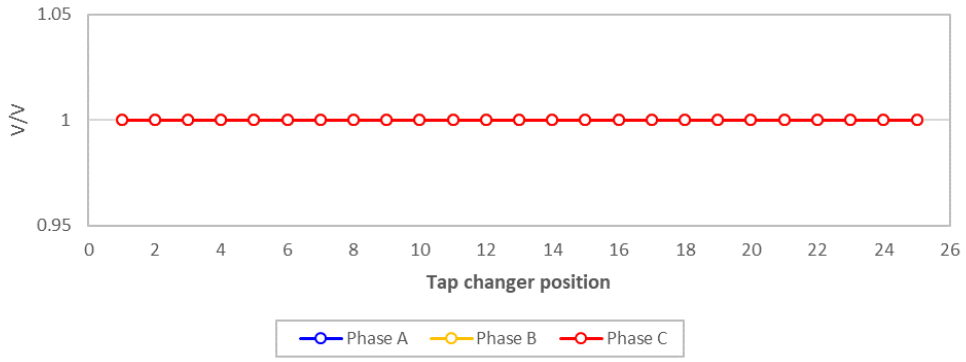


Figure 6. Résultats des mesures du rapport de tension « S » et « L » de l'unité série en tant que fonction de la position du CPeC de l'unité d'excitation

4.2 Mesure des unités d'excitation

La première mesure de l'unité d'excitation consiste à vérifier le rapport de tension de toutes les positions du changeur de prises. En changeant le rapport de tension de l'unité d'excitation, l'amplitude de la tension de quadrature et, donc, le déphasage entre la source et le côté charge, peuvent être ajustés. La Figure 7 indique le changement de rapport de 4,52 à 54,19 pour les positions 1 à 12 et inversement pour les positions 12 à 25. Les positions 13A à 13B sont les positions du sélecteur de commutation permettant de changer la polarité de l'enroulement de régulation (Figure 8).

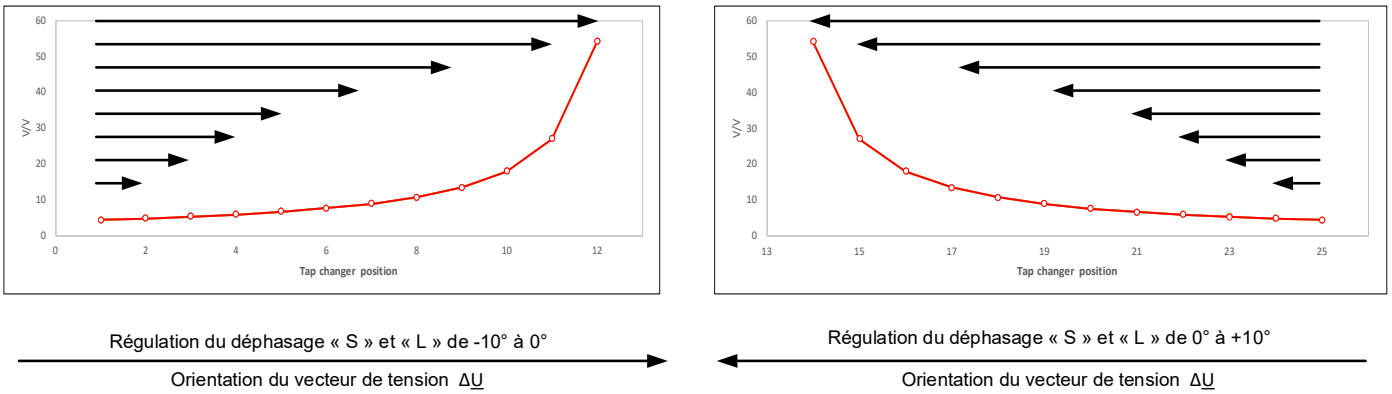


Figure 7. Résultats des mesures du convertisseur de tension de l'unité d'excitation en tant que fonction de la position du CPeC

Même si, conformément à la plaque signalétique, le déphasage de l'unité d'excitation est désigné par 0 - 0°, le changement de polarité est clairement visible lors de la mesure du déphasage entre les deux enroulements du couplage 6 - 180° (Figure 8). Ce changement de polarité est nécessaire pour faire fonctionner le transformateur déphaseur en position avancée ou retardée.

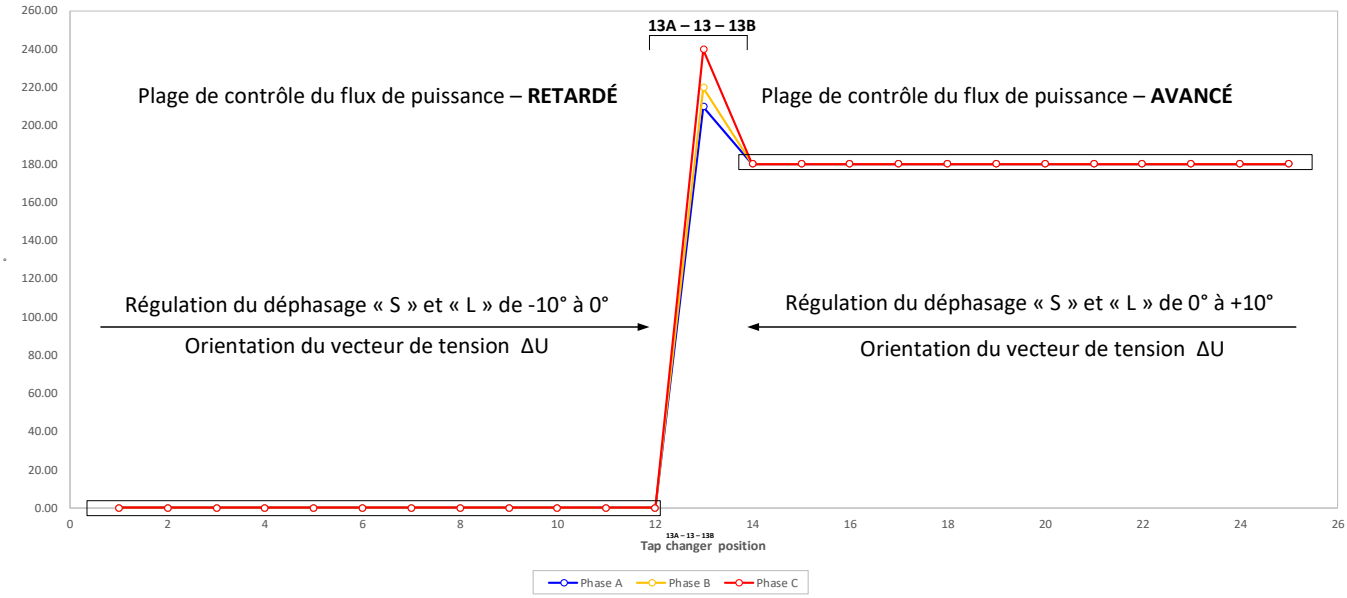


Figure 8. Résultats des mesures du déphasage de l'unité d'excitation en fonction de la position du CPeC

Conclusion

Les transformateurs déphaseurs constituent une part importante des réseaux électriques synchrones actuels. En raison de l'évolution de l'infrastructure de la production d'énergie, ils devraient jouer un rôle encore plus majeur pour garantir la fiabilité des réseaux électriques à l'avenir. Les transformateurs déphaseurs étant généralement installés au niveau de nœuds critiques du réseau, la durée de maintenance hors ligne est primordiale. Les résultats ont démontré que l'utilisation d'un système triphasé de test de transformateur permet de vérifier très rapidement et efficacement les paramètres de fonctionnement d'un transformateur déphaseur pendant la mise en service et la maintenance sur site. En étudiant l'exemple d'un transformateur déphaseur symétrique, nous avons démontré que le principe de fonctionnement, en tant que combinaison d'unités série et d'excitation, peut être facilement vérifié pendant les tests de réception usine. La même approche peut être utilisée pour les transformateurs déphaseurs asymétriques.

Bibliographie

[1]. T. Bednarczyk, M. Szablicki, A. Halinka, P. Rzepka : Structure de la protection automatique d'un transformateur déphaseur symétrique à 2 cuves. Acta Energetica 32/2018

[2]. CEI 60076-52-1202/2017. Transformateurs de puissance – Partie 57-1202 : Transformateurs déphaseurs immergés dans un liquide

[3]. M.A. Ibrahim, F.P. Stacom : Protection des transformateurs de régulation de déphasage IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, N° 1, Janvier 1994

[4]. Manuel d'utilisation du TESTRANO 600 OMICRON electronics GmbH 2018

Points clés

Le concept de base de l'ajustement du déphasage repose sur l'ajout d'une tension supplémentaire à la tension présente dans le chemin principal avec un déphasage de 90°. En fonction de l'amplitude et de la polarité de la tension induite, le déphasage peut être ajusté.

Lors du choix du type de structure de transformateur déphaseur, de nombreux aspects sont pris en compte, mais le paramètre déterminant reste le plus souvent la puissance transmise.

C'est pourquoi les tests individuels de l'unité d'excitation ne sont généralement possibles qu'en usine.

Dans ce cas, un système triphasé portable de test de transformateur est utilisé pour réaliser une mesure simultanée du déphasage, du rapport de transformation et du courant de magnétisation sur les trois phases.

Un défi de taille pour les techniciens d'essai, en particulier pendant les tests de mise en service sur site, consiste à déterminer si le transformateur déphaseur fonctionne en position avancée ou retardée, ce qui nécessite de définir les bornes côté source et côté charge.

Un changement de déphasage et de rapport indiquerait une régulation asymétrique, c'est-à-dire un ajustement de la puissance active et de la puissance réactive.

Biographie



Cornelius Plath est titulaire d'un diplôme 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 technologie haute tension (IFHT). Il a rejoint OMICRON en 2010 en tant qu'ingénieur 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.



Tomasz Bednarczyk est titulaire d'un diplôme du département d'électricité de l'École polytechnique de Silésie (2015). Il prépare actuellement un doctorat à l'Institut de génie électrique et de commande systèmes. Il étudie plus particulièrement les activités de recherche liées à l'analyse de l'état fonctionnel des transformateurs déphaseurs dans des conditions d'utilisation normales et perturbées afin de tester le bon fonctionnement du système de protection. Il est professionnellement impliqué depuis de nombreuses années dans la mesure des équipements primaires et secondaires des postes. Depuis mars 2017, il travaille comme ingénieur applications pour OMICRON electronics GmbH.



Adam Jaros est titulaire d'un diplôme en génie électrique (faculté : moteurs électriques et transformateurs) de l'Université technique de Łódź (2003). Depuis le début de sa carrière professionnelle (en 2002), il travaille avec l'usine de Transformateurs de puissance d'ABB à Łódź en qualité d'ingénieur de tests. Depuis 2009, il gère la section tests de la division Transformateurs de puissance d'ABB.

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 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.

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

© OMICRON