

# Expériences de mise en service et de test de protection différentielle pour les transformateurs déphaseurs

T. Hensler, F. Fink\*, H. Mitter†

\*OMICRON electronics GmbH, Autriche, thomas.hensler@omicronenergy.com, †Vorarlberger Energienetze GmbH, Autriche

**Mots-clés :** transformateurs déphaseurs, protection différentielle de transformateur, tests de protection.

## Résumé

En raison de la demande croissante de contrôle des flux de puissance dans nos réseaux, de plus en plus de transformateurs déphaseurs (amplificateurs de quadrature) sont aujourd'hui installés. La fonction de protection la plus importante pour les transformateurs est la protection différentielle. Un déphasage supplémentaire doit être envisagé par la protection différentielle pour satisfaire aux exigences de sélectivité. En particulier pour les défauts biphasés à l'extérieur du transformateur, un déphasage supplémentaire introduira un courant différentiel dans la phase saine. Le relais de protection doit faire face à cette situation et cela doit être vérifié lors de la mise en service. Les différents fabricants de relais utilisent des approches différentes quant à la façon dont les relais assureront la stabilité des transformateurs déphaseurs. La protection différentielle doit être adaptée en fonction du déphasage réel, qui est généralement signalé au relais par l'état des entrées binaires. Différentes approches pour différents types de transformateurs déphaseur (p. ex. versions à un ou deux circuits magnétiques) sont abordées et évaluées. Pour la mise en service d'une protection pour un transformateur déphaseur, le comportement correct de la protection doit être vérifié. Grâce à un logiciel de test basé sur la simulation, capable de simuler le comportement détaillé des déphasages pour chaque position de prise du transformateur, les tests précis peuvent être effectués de manière pratique.

## 1 Introduction

La transition énergétique a entraîné des changements majeurs sur notre réseau électrique au cours des dernières années. L'intégration de nombreuses sources d'énergies renouvelables a considérablement modifié le flux de puissance. Auparavant, le transit d'énergie se faisait principalement des niveaux de tension élevés vers les niveaux inférieurs. Mais aujourd'hui, les réseaux de distribution sont connectés également à des sources d'énergie. De plus, l'environnement du marché du commerce de l'électricité a changé dans de nombreux pays, par exemple dans tous les pays de l'Union européenne, ce qui entraîne une dynamique encore plus forte pour le flux d'énergie électrique.

Les exploitants de systèmes de transport et de distribution souhaitent contrôler autant que possible le flux de puissance. En utilisant un transformateur déphaseur, il est possible de

contrôler le flux de puissance active en modifiant le déphasage des courants. Bien qu'un transformateur déphaseur représente un investissement majeur pour un exploitant, il sera rentable en raison de la dynamique du marché de l'électricité d'ici quelques années.

Pour expliquer le principe d'un transformateur déphaseur, nous tenons à revoir les bases du transfert de puissance active sur les lignes de transmission. Pour un modèle de ligne simplifié, où les pertes résistives sont ignorées, le flux de puissance active  $P$  sur une ligne électrique est affecté par la réactance de ligne  $X$  et le déphasage  $\varphi_1 - \varphi_2$  entre les deux extrémités de la ligne, selon l'équation suivante (1) :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

En introduisant un déphasage supplémentaire  $\delta$  la valeur peut être modifiée comme suit (2) :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\varphi_1 - \varphi_2 + \delta) \quad (2)$$

La protection la plus importante pour les transformateurs de puissance est la protection différentielle. La protection différentielle évalue la différence des courants des deux côtés du transformateur. L'introduction d'un déphasage variable du courant affecte la valeur de la différence et doit être prise en compte par la protection afin que les exigences de sélectivité et de stabilité soient respectées. La situation la plus difficile pour le relais de protection se produit pour un défaut extérieur biphasé, où la protection différentielle doit être stable. Le déphasage du transformateur provoque également un courant différentiel dans la phase saine. Mais le courant de stabilisation de cette phase est assez faible, de sorte que cela peut provoquer un déclenchement erroné du relais.

Les différents fabricants de relais utilisent différentes approches pour faire face à ce problème et assurer la stabilité de la protection. L'élément de protection différentielle doit s'adapter en fonction du déphasage variable du transformateur. Généralement, ce déphasage de courant est contrôlé par les entrées binaires de la protection connectées aux prises du régleur du transformateur déphaseur.

## 2 Principe des transformateurs déphaseurs

Le principe des transformateurs déphaseurs repose sur l'introduction d'un déphasage variable afin de contrôler le flux de puissance réel sur un circuit spécifique. Aux États-Unis, les transformateurs déphaseurs sont principalement appelés

transformateurs de régulation de déphasage (PAR), tandis qu'au Royaume-Uni, ils sont connus sous le nom d'amplificateurs de quadrature. Dans le présent article, nous nous en tenons au terme de déphasage.

Le déphasage variable est généralement obtenu en introduisant des composants de tension décalés de  $90^\circ$  (d'où le nom de quadrature) à partir d'un enroulement connecté en triangle, alors que l'amplitude varie en utilisant différentes prises du régleur. Le principe d'un déphaseur simple est illustré dans un circuit triphasé à la figure 1.

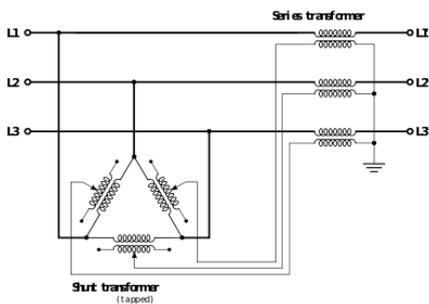


Figure 1 : Principe d'un transformateur déphaseur

L'utilisation du transformateur shunt connecté en triangle permet d'obtenir des tensions décalées de  $90^\circ$  par rapport à chaque phase. La sortie du transformateur shunt est ensuite superposée aux tensions phase à l'aide d'un transformateur série qui crée la somme vectorielle de la tension phase et des composantes de la tension déphasée inférieures à  $90^\circ$ . Les prises sur le transformateur shunt permettent de contrôler l'amplitude du déphasage. Des déphasages positifs et négatifs sont possibles. Les deux transformateurs sont généralement construits séparément dans deux cuves distinctes. Mais il existe d'autres constructions, où tous les enroulements shunt et série sont sur le même circuit magnétique (circuit magnétique unique), intégrés dans une même cuve.

Une autre solution technique courante est l'intégration d'un transformateur déphaseur dans un transformateur de puissance pour la transformation d'un niveau de tension à un autre. Les transformateurs de puissance avec niveaux de tension différents sont généralement équipés de régleurs en charge pour la régulation de tension. Un autre régleur pour le contrôle du déphasage est également intégré dans le même transformateur. Comme le régleur pour la régulation de la tension peut être du côté HT ou BT, le régleur pour le déphasage est habituellement installé sur l'enroulement opposé.

Un exemple est illustré à la figure 2 avec un transformateur YNy0 410 kV :230 kV de 450 MVA. Le transformateur est équipé d'un régleur de tension classique côté haute tension avec 17 prises. Le côté basse tension dispose de 35 prises avec déphasage de  $-17,22^\circ$  à  $+17,22^\circ$ . Le sens du déphasage est inversé à l'aide d'un pré sélecteur, dont la sortie est connectée sur un régleur en charge pour le réglage du déphasage.

Ce transformateur est intégré dans deux cuves séparées, comme l'indiquent les lignes en pointillés entourant les unités séparées. Le transformateur de régulation est simplement

connecté à l'extrémité inférieure de l'enroulement étoile basse tension et l'enroulement triangle du transformateur principal permet de créer les tensions déphasées à  $90^\circ$ . Ceci permet une construction plus économique de l'unité de régulation.

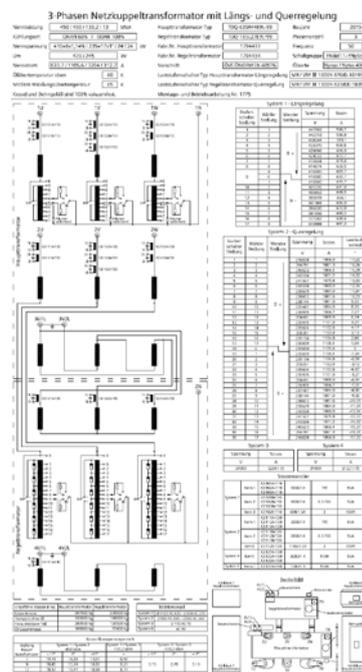


Figure 2 : Transformateur de puissance triphasé 410 kV :230 kV avec prises de contrôle de tension côté HT et prises de déphasage côté BT

Le principe de création du déphasage pour ce transformateur est décrit à la figure 3. Pour chaque phase, une faible proportion de la tension des deux autres phases de même amplitude est ajoutée à la tension de la phase principale, de sorte qu'une composante avec un déphasage de  $90^\circ$  est finalement ajoutée.

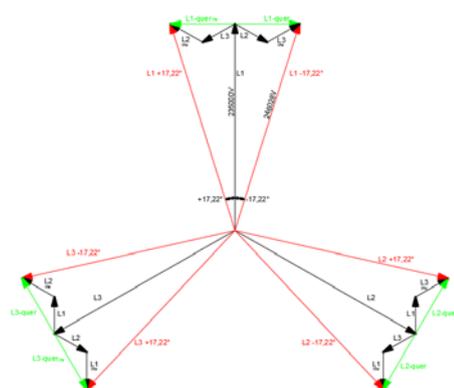


Figure 3 : Principe de création de déphasages avec des composants de tension des deux autres phases

Un deuxième exemple de transformateur déphaseur 220 kV :110 kV de 300 MVA dans une construction circuit magnétique unique/cuve unique est illustré à la figure 4. Ce transformateur dispose à nouveau de prises de régulation de la tension côté haute tension (29 prises dont un CPeC). Côté

basse tension, 17 prises de déphasage sont utilisées avec un déphasage possible de  $-15,2^\circ$  à  $+15,2^\circ$ .

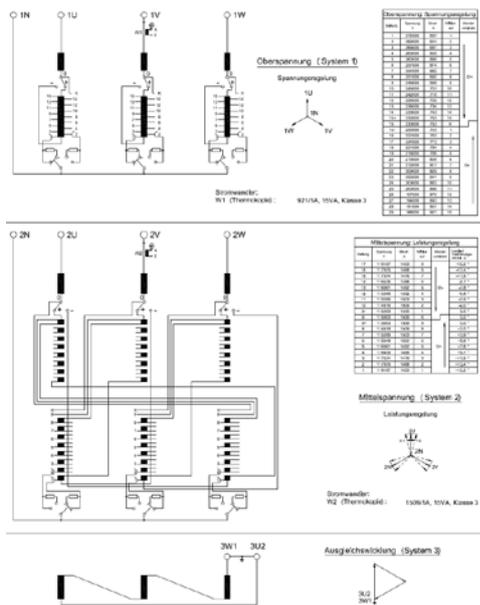


Figure 4 : Transformateur déphaseur triphasé 220 kV:110 kV

Avec ce couplage des enroulements, la tension réactive est réalisée comme la somme de deux composantes, l'une à partir de la propre phase et l'autre avec le double de l'amplitude de l'une des autres phases, comme on peut le voir sur la figure 5 du diagramme des phases (triangle rectangle à  $60^\circ$ ).

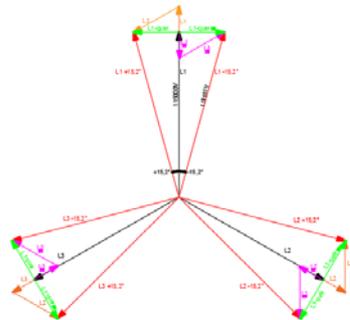


Figure 5 : Principe de création de déphasages avec une composante de tension à partir d'une seule des autres phases

### 3 Les défis liés à la protection différentielle

La protection principale pour les transformateurs de puissance est la protection différentielle (ANSI 87T). Cette protection mesure la différence de courant entre le primaire et le secondaire en prenant en compte rapport de transformation et déphasage, et déclenche lorsque ce courant différentiel dépasse un certain seuil. Pour assurer la stabilité de la protection sur un défaut extérieur à la zone, on utilise généralement une caractéristique à pourcentage où le courant traversant le transformateur (appelé courant de polarisation) va influencer sur le seuil de l'élément différentiel. Plus le courant traversant est élevé plus le seuil différentiel est important.

L'augmentation du seuil différentiel par un courant de polarisation permet d'assurer la stabilité de la protection dans de nombreuses circonstances pendant le fonctionnement du transformateur, telles que les erreurs de mesure ou la saturation des TC. De plus, la caractéristique à pourcentage peut compenser les courants différentiels générés par la position du régleur en charge. Il existe cependant certains relais de protection qui prennent en compte la position réelle de chaque prise du régleur et ajustent le rapport de transformation en conséquence.

Pour calculer le courant traversant (courant de polarisation), les différents fabricants de relais utilisent des approches et des formules très différentes. Il existe des relais de protection qui déterminent le courant de polarisation individuellement pour chaque phase, tandis que d'autres relais choisissent une valeur maximale parmi toutes les phases pour obtenir une bonne stabilité pour des différents cas de défaut.

Dans le cas d'un transformateur déphaseur, l'influence du déphasage en angle et en amplitude ne peut plus être compensée par un pourcentage plus élevé de caractéristique à pourcentage. Des déphasages jusqu'à  $20^\circ$  et plus entraînent un comportement de transformation du courant assimilable à un changement d'indice horaire du transformateur. Ainsi, pour la protection des transformateurs déphaseurs, les protections différentielles doivent adapter leur comportement en fonction de la position de prise actuelle afin d'obtenir une stabilité constante pour l'ensemble des états de fonctionnement du transformateur.

Un défi particulier pour la protection différentielle se pose pour les défauts biphasés à l'extérieur de la zone protégée. Le déphasage réalisé à l'intérieur du transformateur est efficace pour la composante symétrique directe comme spécifié. Mais pour la composante inverse du courant, le déphasage est appliqué dans la direction opposée. Ceci provoquera une distribution asymétrique des courants traversant le transformateur pour les défauts biphasés, où la composante inverse des courants est présente, et introduira également un courant différentiel considérable dans la phase saine.

La distribution du courant sur un transformateur déphaseur pour un défaut extérieur biphasé est illustrée en figure 6 pour un déphaseur à circuit magnétique unique.

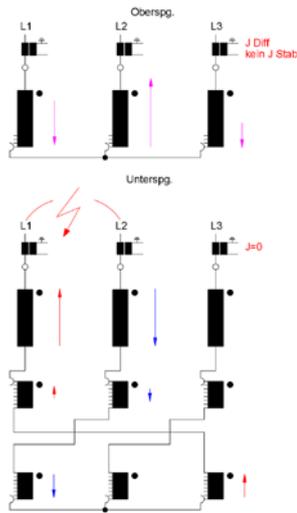


Figure 6 : Distribution du courant d'un transformateur déphaseur pour un défaut extérieur biphasé

Un défaut extérieur L1-L2 côté basse tension, induit un courant de défaut avec un déphasage de  $180^\circ$  entre les phases L1 et L2. Mais en raison des parties d'enroulement des autres phases, qui sont utilisées pour introduire un déphasage de  $90^\circ$ , un courant est également produit du côté haute tension dans la phase saine. Les courants des phases en défaut L1 et L2 côté HT ne sont plus symétriques.

Le même effet peut être observé pour d'autres configurations d'enroulement (voir [2]). Pour la protection différentielle, ce courant supplémentaire dans la phase saine peut provoquer un déclenchement différentiel, puisqu'il n'y a pas de courant de polarisation supplémentaire dans la phase qui n'est pas en défaut. La protection différentielle du transformateur déphaseur doit faire face à cette situation et la protection doit garantir la stabilité pour des défauts extérieurs dans toutes les situations de fonctionnement et pour toutes les positions du régleur de déphasage. Les différents fabricants de relais appliquent des solutions différentes qui seront discutées dans le chapitre suivant.

#### 4 Protection différentielle pour transformateurs déphaseurs

La protection différentielle des transformateurs déphaseurs doit prendre en compte le déphasage des courants pour un calcul précis des courants différentiels. Les anciens relais différentiels de transformateurs standard n'ont pas été conçus pour répondre à ces exigences spécifiques. Néanmoins, pour la protection des transformateurs déphaseurs, des relais de protection conçus pour la protection des transformateurs conventionnels peuvent être utilisés si un troisième enroulement artificiel est paramétré pour simuler les courants déphasés. Il s'agit d'une approche assez souvent utilisée et qui a été documentée par les différents fabricants dans les notes d'application de leurs relais. La dernière génération de relais différentiels de transformateurs est déjà conçue pour prendre en charge les transformateurs déphaseurs et peut modéliser le

comportement spécifique du transformateur dans l'algorithme du relais.

À titre d'exemple pour l'application utilisant un troisième enroulement artificiel, nous étudions une solution pour la protection d'un transformateur déphaseur installé sur le réseau Autrichien. Une protection différentielle pour un transformateur à 3 enroulements de Schneider Electric a été utilisée. Les entrées courant pour le côté haute tension sont raccordées normalement sur l'entrée A du relais. Pour le côté basse tension, les courants secondaires du TC sont connectés en série sur les entrées B et C du relais, l'entrée C étant dédiée à l'enroulement fictif.

Dans le relais, différents groupes de réglage sont utilisés. Le paramétrage du troisième enroulement est fait de manière à ne prendre en compte que la composante déphasée du courant secondaire, pour que l'élément différentiel effectue son calcul en fonction du déphasage actuel des courants. Pour un déphasage positif un indice horaire  $Yy0y8$  est utilisé, pour un déphasage négatif l'indice horaire  $Yy0y4$  est choisi.

De plus, le rapport de transformation du TC dans le relais pour le troisième enroulement est réglé de telle sorte que l'amplitude résultante soit à peu près la même que celle de la composante à  $90^\circ$  introduite par le transformateur déphaseur.

Grâce aux contacts du régleur connectés sur ses entrées binaires, le relais commute instantanément entre les différents groupes de réglages. Il est important que le relais supporte un changement de groupe de réglages pendant le fonctionnement normal sans qu'il ait à redémarrer ou que la protection soit momentanément indisponible. Pour cette application spécifique, il suffisait d'utiliser 3 groupes de réglages. Pour la position médiane du régleur, on a utilisé le groupe de réglages 1 qui ne prend pas en compte le troisième enroulement virtuel. Le groupe de réglages 2 a été utilisé pour toutes les positions de prise de 1 à 7 avec déphasage dans le sens positif et le groupe 3 a été utilisé pour toutes les prises de 11 à 17 avec déphasages négatifs. Cela a suffi pour satisfaire aux exigences de stabilité dans toutes les positions de prises, tant pour la régulation de la tension côté HT que pour le déphasage côté BT. Les groupes de réglages étaient permutés en prenant en compte les positions des prises des régleurs connectées sur les entrées binaires du relais.

Le comportement de la protection sur un défaut extérieur biphasé peut être visualisé par la distribution de courant incluant le troisième enroulement virtuel comme illustré à la figure 7.

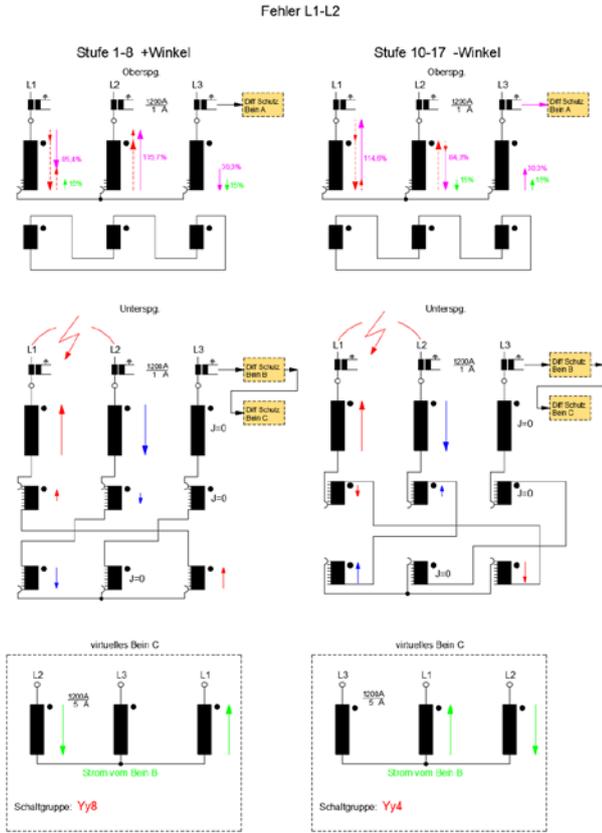


Figure 7 : Distribution de courant pour les défauts extérieurs biphasés, incluant le troisième enroulement virtuel

Sur la gauche du schéma, un défaut extérieur biphasé côté BT provoque un courant de défaut avec un déphasage de 180° entre les phases L1 et L2. Le transformateur déphaseur est censé être sur une position de prise avec un déphasage négatif. Cela introduira un courant de défaut dans la phase L3 du côté HT. L'utilisation du troisième enroulement virtuel dans le couplage y8 compensera ce courant dans la phase L3 avec une composante opposée. La distribution de courant à droite dans la figure 7 indique la situation des positions de prise avec déphasage positif, où le troisième enroulement virtuel est connecté sur le couplage y4.

Le comportement du relais de protection peut être vérifié à l'aide de la caractéristique à pourcentage. Toutes les valeurs de courant différentiel sont désormais inférieures à la caractéristique à pourcentage et ne provoquent pas de déclenchement, même pour la phase L3.

Nous allons maintenant aborder un autre exemple de protection différentielle sur un transformateur déphaseur 400 kV : 110 kV de 350 MVA réalisée à l'aide d'un relais différentiel ABB. Ce transformateur dispose de 27 prises côté HT avec un palier de tension d'environ 1,25 %. Le côté BT compte 21 prises avec déphasage de 0° à 27,34°. La composante à 90° de ce transformateur est créée à partir des enroulements de chacune des deux autres phases. Le relais différentiel du transformateur est connecté aux TC comme illustré à la figure 8.

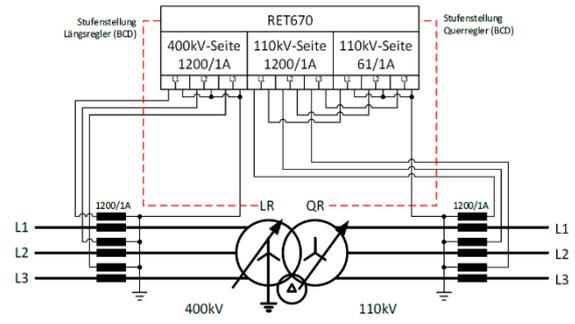


Figure 8 : Schéma de connexion pour la protection différentielle d'un transformateur à l'aide d'un troisième enroulement virtuel

Côté 110 kV, les courants des TC 1200 A : 1 A sont connectés en série aux entrées B et C du relais. Le relais ABB prend en charge la modélisation des prises du régulateur en tension côté HT et adapte ses éléments différentiels en fonction des modifications du rapport de transformation du transformateur.

Pour le troisième enroulement virtuel, le réglage du rapport de TC dans le relais est réglé sur 61 A : 1 A. Dans la logique du relais de protection, ces grandeurs d'entrée sont utilisées pour calculer les composantes de courant à 90°, comme indiqué à la figure 9.

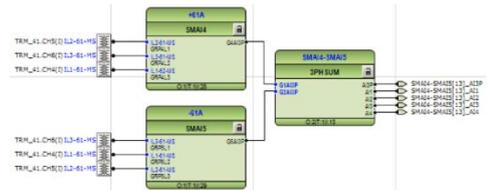


Figure 9 : Calcul des composantes à 90° pour les déphasages de 5° à l'aide d'éléments logiques dans le relais

Une quantité de  $\sqrt{3} 61A e^{j90^\circ} = 105A e^{j90^\circ}$  est calculée pour un élément de somme unique, ce qui correspond au composant à 90° pour un déphasage de 5°. Ces composantes à 90° sont ensuite ajoutés aux composants de courant à partir des entrées de l'enroulement BT, tandis qu'un ou plusieurs paliers de 5° sont utilisés en fonction de la position des prises de déphasage, comme le montre la figure 10.

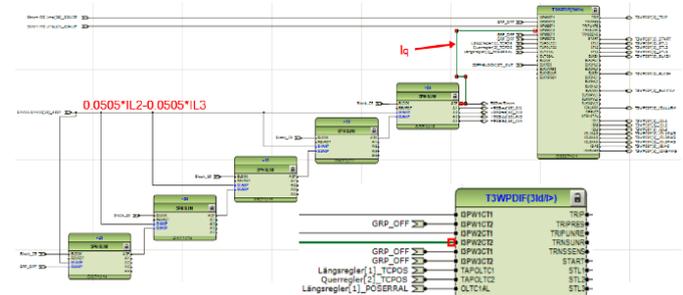


Figure 10 : Logique pour activer les éléments logiques SOMME TRIPHASÉE en fonction de la position des prises du déphaseur

Les positions des prises côté HT et des prises de déphasage côté BT sont connectées aux entrées binaires du relais. Dans le relais, une logique supplémentaire est utilisée pour vérifier la plausibilité des positions données par les contacts des régulateurs du transformateur. En cas de comportement suspect, le relais envoie des alarmes au centre de commande et force la protection différentielle dans une position nominale des prises.

Dans la protection différentielle transformateur d'ABB, le courant de retenue est calculé en prenant en compte le courant maximum de tous les enroulements et de toutes les phases, de sorte que la stabilité pour des défauts biphasés extérieurs à la zone n'est pas aussi critique que celle des relais de protection d'autres fabricants. D'autre part, pour ce transformateur déphaseur, qui peut générer des déphasages jusqu'à 27°, même en fonctionnement symétrique stable, un déclenchement intempestif peut se produire, simplement parce que la composante de courant réactif introduit peut provoquer un courant différentiel supérieur au seuil de la caractéristique à pourcentage. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte les positions des prises pour corriger l'élément différentiel.

Comme dernier exemple d'un relais de dernière génération pour la protection différentielle des transformateurs, la mise en œuvre d'un relais Siemens 7UT86 va être abordée. L'algorithme du relais permet de modéliser les prises du régulateur de déphasage conformément à la réalité. Les prises des deux régulateurs pour la régulation de la tension et pour le déphasage peuvent être paramétrées dans le relais. Un régulateur peut être modélisé aussi bien côté HT que côté BT. Par conséquent, les réglages détaillés des prises doivent être saisis dans le logiciel de paramétrage des relais.

Le relais Siemens offre différentes possibilités pour obtenir les positions réelles des prises du régulateur en charge. Il peut, par exemple, être configuré pour coder la position réelle des prises comme une valeur décimale codée binaire (BCD) sur plusieurs entrées binaires. Les positions des prises pour la régulation de tension, par exemple côté HT, et pour le déphasage peuvent être saisies indépendamment les unes des autres. Voir [3] pour plus de détails.

## 5 Mise en service et tests des relais de protection pour les transformateurs déphaseurs

Étant donné que toutes les solutions de protection de transformateur déphaseurs impliquent soit une logique personnalisée complexe dans les relais, soit des réglages détaillés, des essais de mise en service et des tests complets sont nécessaires avant la mise en exploitation de la protection. Il faut vérifier que, pour toutes les positions des régulateurs, le relais se comporte comme prévu et que les exigences de stabilité et de sélectivité sont respectées.

En Autriche, un exploitant a réalisé un test de court-circuit sur le transformateur lors des essais de mise en service d'un transformateur déphaseur. L'injection primaire a donc été réalisée à l'aide d'un groupe électrogène mobile et de transformateurs de distribution 20 kV :400 V. L'injection a été

réalisée du côté 200 kV du transformateur et un court-circuit effectué du côté secondaire 110 kV. Le courant de court-circuit appliqué au primaire était de 100 A sous une tension de 3,3 kV. Des tests ont été effectués pour les défauts extérieurs tripolaires, bipolaires et unipolaires. Les courants résultants ont été appliqués au relais de protection et les valeurs IDiff et IBias ont été extraites de la protection. Pour tester la caractéristique différentielle à pourcentage les valeurs ont été multipliées pour simuler un défaut dans des conditions normales d'exploitation à tension nominale. Pour tous les tests effectués, il a pu être démontré que la protection était stable en cas de défaut extérieur en utilisant le principe de protection avec le troisième enroulement virtuel.

Pour les tests secondaires, un modèle du transformateur pour calculer sa distribution de courant a été développé à partir d'un modèle mathématique du transformateur (voir [1]) dans une feuille de calcul Excel. L'utilisation de ces valeurs a permis de réaliser des tests de protection avec injection de valeurs en régime permanent en fonction des valeurs calculées, ce qui a donné les mêmes résultats que les tests primaires effectués.

Les tests les plus pratiques sont possibles grâce à un nouveau logiciel de tests de protection, capable de simuler le comportement transitoire d'un transformateur déphaseur. Dans ce logiciel, le transformateur est modélisé avec toutes ses prises côté HT et BT. Il est alors possible de simuler facilement différents scénarios avec des défauts en régime permanent et des défauts dynamiques, tandis que les signaux de courant transitoire résultants peuvent être injectés dans le relais de protection à l'aide d'un appareil de test de protection conventionnel. L'interface utilisateur de ce logiciel est illustrée à la figure 11.

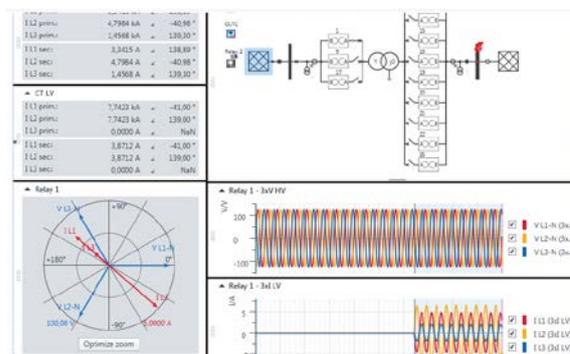


Figure 11 : Logiciel de tests de protection pouvant simuler un transformateur déphaseur

Encore une fois, tous les tests pour les différentes positions de prises ont montré les bons résultats et prouvé que le concept de protection remplit les exigences de stabilité et de sélectivité.

## 6 Résumé

Les relais différentiels des transformateurs déphaseurs doivent tenir compte de la position des prises des régulateurs de déphasage et de tension pour pouvoir calculer correctement les grandeurs IDiff et IBias. Une approche courante utilisée avec les relais de protection différentielle conventionnels consiste à utiliser un

troisième enroulement virtuel connecté en série avec l'entrée courant de l'enroulement secondaire. Cette approche permet de simuler la composante de courant à 90° à l'aide d'éléments logiques du relais ou d'un couplage correspondant dans l'appareil de protection. En utilisant les contacts du régleurs connectés sur des entrées binaires du relais, la logique du relais peut s'adapter ou passer d'un groupe de réglages à l'autre. Dans la dernière génération de relais différentiels de transformateur, il est déjà possible de modéliser le comportement détaillé des régleurs de tension et de déphasage dans le logiciel du relais.

Pour la mise en service des relais différentiels de transformateur déphaseur, il est nécessaire de vérifier le comportement correct de la protection pour les différentes positions du régleur du déphaseur. Dans le cas critique d'un défaut extérieur biphasé, qui provoquera un courant différentiel supplémentaire dans la phase saine, il ne doit pas y avoir de déclenchements intempestifs.

À l'aide d'un nouveau logiciel de tests de protection basé sur la simulation, pouvant simuler un transformateur déphaseur avec toutes ses prises de tension et de déphasage, il est possible de tester et de mettre en service de tels relais de protection de manière pratique. Un calcul manuel des grandeurs de test, compliqué et sujet à erreur, n'est plus nécessaire.

## Références

- [1] P. Baumgartner, W. Lickinger, « Protection différentielle pour les transformateurs de déphasage » (en allemand : « Differentialschutz am Querreglertransformator »), thèse de licence, Technische Universität Graz, Autriche (2016)
- [2] L. Fickert. « Exploitation d'un réseau électrique à l'aide de transformateurs déphaseurs et défis en matière de protection » (en allemand : « Netzbetrieb mit Quer-/Schrägregler-transformatoren und schutztechnische Herausforderungen »), réunion des utilisateurs OMICRON, Darmstadt, Allemagne (2016)
- [3] H-J. Hermann, S. Schneider. « Protection différentielle optimisée pour les transformateurs déphaseurs et les transformateurs spécifiques » (en allemand : « Optimaler Differentialschutz für Phasenschieber- und Spezialtransformatoren »), Netzpraxis, Jg. 55, Heft 5, S. 12-18 (2016)

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.