

Nouvelles opportunités de test des fonctions de localisation de défauts par ondes progressives sur le terrain

Auteurs : Christopher Pritchard, Heinz Lampl, Thomas Hensler, OMICRON electronics GmbH
christopher.pritchard@omicronenergy.com, heinz.lampl@omicronenergy.com,
thomas.hensler@omicronenergy.com

Autriche

Résumé

La localisation des défauts à l'aide des ondes progressives s'est avérée être une méthode fiable et précise pour déterminer précisément l'emplacement des défauts sur les lignes longues de transport d'électricité. À la fois intégrées dans les relais de protection de ligne modernes et au sein d'équipements distincts de localisation de défauts, elle fournit des informations utiles pour les opérateurs et les techniciens. Le test et la vérification du bon fonctionnement de ces équipements représentent un véritable défi et ne sont pas souvent réalisés lors de la mise en service. Bien que ce puisse être acceptable pour les localisateurs de défaut purs, les nouvelles générations de relais de protection utiliseront les ondes progressives pour déterminer le défaut et déclencher en conséquence.

Grâce à une approche novatrice, ces tests deviennent possibles à l'aide d'équipements de test de protection classiques sur le terrain. Les impulsions d'ondes progressives sont ainsi superposées aux signaux de basse fréquence mais d'intensité élevée utilisés pour les tests classiques de protection. L'injection de tensions et de courants aux deux extrémités de la ligne est synchronisée avec une très grande précision à l'aide d'horloges GPS. Depuis un logiciel de contrôle installé sur un ordinateur, des défauts situés n'importe où sur la ligne peuvent être simulés, et la réaction des éléments de protection et du localisateur de défaut observée et évaluée de façon intégrée. L'article présentera également les défis inhérents au test des relais devant déclencher suite à l'analyse avancée des ondes progressives.

Mots clés : onde progressive, localisation de défauts, relais de protection, tests de protection, tests synchronisés à distance.

Introduction

Le principe des ondes progressives sur les lignes de transport d'électricité est connu dans l'industrie électrique depuis de nombreuses années. Néanmoins, la plupart des équipements de protection numériques actuels utilisent des éléments basés sur des phaseurs et des algorithmes basés sur les grandeurs de phaseurs et l'impédance pour les fonctions de protection et la localisation des défauts, tout comme les équipements électromécaniques le faisaient auparavant. Mais aujourd'hui, les avancées en matière de traitement du signal et de vitesse de calcul dans les relais numériques ouvrent de nouvelles opportunités pour les algorithmes dans le domaine temporel. Avec une synchronisation temporelle précise des équipements répartis au sein du système électrique global, une localisation des défauts et une protection bien plus rapides et précises sont possibles.

Pour les techniciens ou ingénieurs en protection chargés de la mise en service et de la maintenance du fonctionnement de ces nouveaux équipements sur le terrain, de nouveaux défis se présentent. Les tests classiques utilisant l'injection de tensions et courants en régime permanent ne permettent pas de vérifier les éléments de relais fonctionnant dans le domaine temporel, comme ceux à ondes progressives. En outre, pour les systèmes de protection qui utilisent des informations synchronisées précises provenant de plusieurs extrémités, un essai de mise en service sur le terrain doit pouvoir simuler ou reproduire de tels événements avec des équipements de test de protection synchronisés au moins aussi précis dans le temps que les équipements testés.

Principes de base des ondes progressives

Un défaut sur la ligne, qui se produit à tout moment sauf au passage à zéro de la tension, génère une onde progressive, qui se propage de l'emplacement du défaut vers les deux extrémités de la ligne à une vitesse proche de celle de la lumière. Le principe est illustré à la Figure 1 pour une ligne de transport d'électricité simple lorsqu'un défaut se produit sur celle-ci.

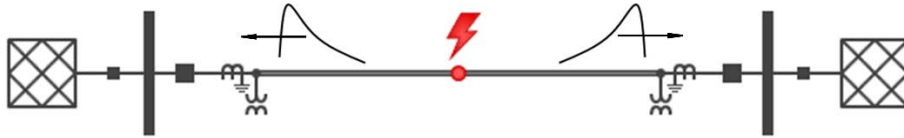


Figure 1 : Principe de base de propagation des ondes progressives

Les ondes progressives peuvent être déduites de la solution du système linéaire d'équations différentielles pour les lignes de transport d'électricité (équations des télégraphistes). Pour une ligne de transport sans perte, les deux équations différentielles partielles du premier ordre couplées suivantes décrivent les tensions $v(x, t)$ et courants $i(x, t)$ sur la ligne :

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C' \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}$$

Où L' est l'inductance de la ligne par unité et C' la capacité par unité. Elles peuvent être combinées dans les équations d'onde (équation de d'Alembert) comme suit :

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = L' C' \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} = L' C' \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2}$$

La solution générale des équations d'onde peut être exprimée comme la somme (superposition) des ondes progressives f vers l'avant et g vers l'arrière :

$$v(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_w} (f(x - ct) - g(x + ct))$$

Où $c = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$ est la vitesse de propagation et $Z_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$ l'impédance caractéristique de la ligne. Dans le cas d'une ligne de transport d'électricité présentant des pertes, les équations doivent également tenir compte des pertes résistives et de conductance. Une discussion plus détaillée est disponible aux points [1] et [2] ou dans tout manuel avancé de génie électrique.

Au niveau des extrémités des lignes, les ondes progressives, qui résultent d'un changement soudain de tension et de courant, peuvent être détectées sous forme d'impulsions haute fréquence. Les équipements de protection ou localisateurs de défaut utilisent des algorithmes spécifiques pour horodater les heures d'arrivée des ondes progressives. À partir des écarts temporels des heures d'arrivée mesurées, l'emplacement d'un défaut peut être aisément calculé avec une grande précision (jusqu'à 300 m, ce qui correspond environ à l'intervalle d'un pylône).

En raison des effets de dispersion, la forme des ondes est légèrement étirée lors du déplacement le long de la ligne de puissance. Les équipements de protection doivent en tenir compte lors de l'horodatage de l'arrivée des ondes. Dès que des ondes progressives atteignent l'extrémité d'une ligne (ou l'emplacement d'un défaut), une partie de l'onde est transmise, une partie réfléchiée et une partie absorbée. Lors de la réflexion, la polarité de l'impulsion d'onde progressive est inversée, comme illustré à la Figure 2. Pour les

ondes progressives de courant, la polarité de l'impulsion dépend aussi évidemment du sens dans lequel l'onde traverse le transformateur de courant (TC).

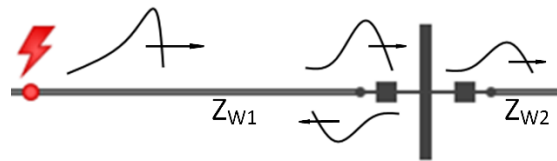


Figure 2 : Ondes progressives séparées en ondes transmises et réfléchies au niveau des discontinuités

La propagation des ondes progressives, ainsi que leurs réflexions, sont couramment visualisées à l'aide de diagrammes en treillis de Bewley, comme illustré à la Figure 3. Le gradient des lignes de propagation est proportionnel à la vitesse de propagation des lignes. Pour différents supports, par exemple dans une ligne aérienne mixte et des topologies de câbles, différentes vitesses peuvent même être représentées dans le même diagramme.

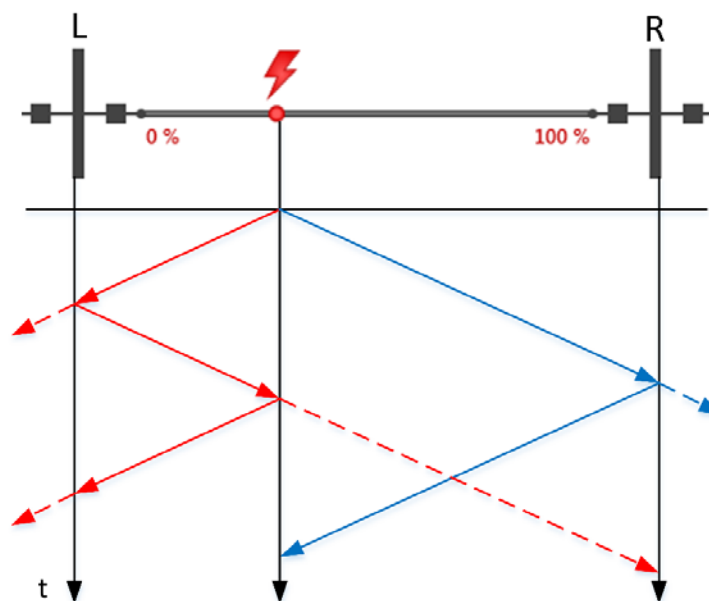


Figure 3 : Diagramme en treillis de Bewley indiquant la propagation des ondes progressives au fil du temps

Si la topologie du système d'alimentation se complique, avec par exemple de multiples jeux de barres, lignes adjacentes et lignes parallèles, les algorithmes des équipements doivent distinguer les ondes progressives réfléchies des divers points présentant des discontinuités dans la topologie. Cela peut parfois s'avérer compliqué et en réalité, il est difficile de prendre de telles décisions avec fiabilité, car même des détails mineurs du circuit peuvent eux aussi engendrer des réflexions, de sorte que quelques algorithmes solides s'appuient uniquement sur le tout premier front d'ondes progressives détecté. Dans le cas illustré à la Figure 4, par exemple, il n'est pas facile de distinguer une onde progressive, réfléchi depuis l'emplacement du défaut sur la ligne protégée jusqu'à l'extrémité locale, d'une réflexion provenant d'une ligne précédente en sens inverse ou d'une réflexion provenant de l'extrémité distante de la ligne.

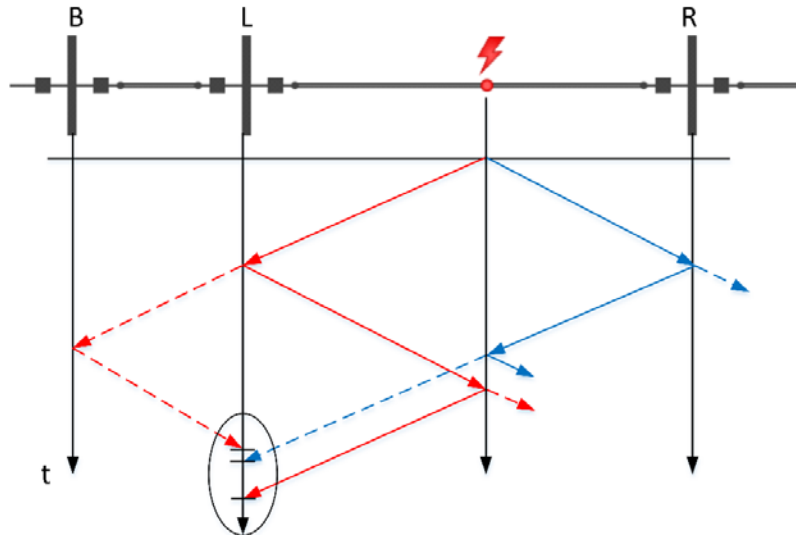


Figure 4 : Défis liés à la distinction des réflexions d'ondes progressives

Pour les équipements secondaires, la détection des ondes progressives est possible sur les bornes secondaires des transformateurs de courant (TC) et de tension (TT). Les TC courants ont une bande passante suffisamment large pour permettre une détection fiable des impulsions d'ondes progressives sur les entrées de courant secondaires des équipements. Pour les TT, et plus particulièrement pour les transformateurs de tension capacitifs et à condensateur de couplage (CVT et CCVT), les surtensions d'ondes progressives sont nettement plus difficiles à détecter du côté secondaire, de sorte que certains principes d'éléments à ondes progressives s'appuient uniquement sur les surintensités transitoires (pour les CVT et CCVT, seules les capacités parasites ouvrent un chemin pour les hautes fréquences). Mais à l'avenir, de nouveaux capteurs de tension et de courant seront possibles, et offriront un meilleur comportement de transfert dynamique pour les signaux haute fréquence.

Les éléments de protection et de localisation des défauts basés sur les ondes progressives présentent certains avantages sur les éléments basés sur des phaseurs. Comme le calcul de l'emplacement du défaut repose sur la mesure des différences temporelles entre les heures d'arrivée des différentes impulsions d'ondes progressives, une localisation très précise du défaut est possible. À l'heure actuelle, des mesures temporelles précises au sein des postes numériques sont possibles sans difficulté, même entre différents équipements distribués qui peuvent être synchronisés à l'aide d'une référence de temps globale commune.

La propagation des ondes progressives n'est pas affectée par la compensation en série des longues lignes de transmission, où qu'elles soient installées (pour les éléments basés sur l'impédance, les compensations en série représentent un défi majeur). Et les ondes progressives ne se produisent pas dans les lignes de transport de courant alternatif uniquement. Ce principe peut également s'appliquer aux réseaux à courant continu HT, où une localisation des défauts basée sur l'impédance est tout simplement impossible.

Comme les ondes progressives se propagent à une vitesse proche de celle de la lumière, les informations relatives à un défaut sont reçues aux extrémités de la ligne très rapidement et peuvent être traitées immédiatement. Pour les éléments basés sur des phaseurs, une fenêtre d'acquisition de données d'une période correspondant à la fréquence du système électrique est nécessaire pour obtenir des valeurs de phaseur fiables. Pour les futurs relais de protection, un déclenchement basé sur les informations des ondes progressives est donc possible et permet des temps de déclenchement de l'ordre de quelques millisecondes uniquement.

Utilisation des ondes progressives pour la localisation des défauts

L'application d'ondes progressives est déjà bien établie et déployée dans de nombreux équipements depuis des années sur le terrain pour une localisation précise des défauts sur les lignes de transport d'électricité. Que ce soit en tant qu'équipements de localisation des défauts ou fonction intégrée au sein des relais de protection, une estimation plus précise de l'emplacement d'un défaut est possible, comparée aux principes basés sur l'impédance.

Tous les algorithmes de localisation des défauts basés sur l'impédance apparente observée en regardant dans la ligne ont une précision limitée en raison des erreurs de mesure des phaseurs de tension et de courant et sont influencés par de nombreux facteurs, difficiles à éliminer, tels que l'impédance de défaut (résistance d'arc), les conditions d'alimentation aux extrémités locale et distante de la ligne, le débit de charge superposé, les conditions de mise à la terre et le couplage mutuel avec une ligne parallèle. Ils dépendent, qui plus est, des paramètres corrects des impédances de ligne, à la fois pour le système positif et homopolaire, qui doivent être calculés correctement ou déterminés à l'aide d'une mesure d'impédance de ligne au primaire des réducteurs de mesure.

Localisation de défaut d'ondes progressives à double extrémité

La localisation de défaut basée sur les ondes progressives la plus évidente et la plus solide repose sur un principe à deux extrémités, tel qu'illustré à la Figure 5, et a été mise en œuvre dans divers équipements de protection et de localisation de défauts sur le terrain (voir [3] et [4] pour des informations détaillées).

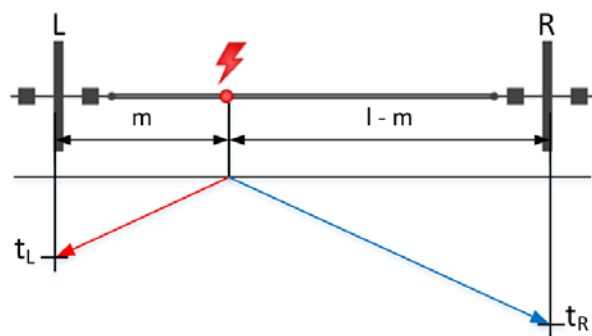


Figure 5 : Localisation de défaut à double extrémité basée sur la différence temporelle entre les premières heures d'arrivée

Les heures d'arrivée des ondes progressives aux deux extrémités de la ligne sont comparées et l'emplacement du défaut m est calculé selon la formule suivante :

$$m = \frac{1}{2}(l + (t_L - t_R)v)$$

Où l est la longueur de la ligne, t_L et t_R les heures respectives d'arrivée de l'onde progressive aux extrémités locale et distante et v la vitesse de propagation. L'emplacement calculé dépend uniquement des horodatages d'arrivée précis des fronts d'ondes progressives détectés et de la longueur correcte de la ligne de transmission. De nos jours, une synchronisation précise des équipements de protection ou de localisation des défauts est possible à l'aide d'une référence de temps basée sur un système GPS aux deux extrémités ou d'une synchronisation au moyen d'une horloge maîtresse basée sur le réseau, qui distribue le temps à l'aide du protocole PTP (Precision Time Protocol) conformément à la norme IEEE 1588 sur un réseau Ethernet au sein d'un poste.

Pour une localisation hors ligne des défauts, les horodatages provenant des deux extrémités doivent être collectés pour effectuer le calcul. Les différents temps d'arrivée des ondes progressives peuvent être alignés dans des diagrammes en treillis de Bewley manuellement ou automatiquement avec un outil logiciel, où l'emplacement du défaut peut être calculé et vérifié. Ce principe peut même être étendu aux lignes à trois bornes ou à des topologies à plusieurs extrémités.

Pour une localisation en ligne des défauts, comme c'est le cas dans les relais de protection, les horodatages sont immédiatement transmis à l'extrémité distante le plus souvent à l'aide des canaux de communications existants, qui sont utilisés par exemple en parallèle pour la protection différentielle des lignes. Dans un relais de protection, les informations relatives à la localisation des défauts des ondes progressives peuvent être complétées d'informations supplémentaires provenant d'un algorithme de localisation des défauts basé sur l'impédance, afin qu'une indication fiable et précise puisse être mentionnée dans l'enregistrement du défaut ou communiquée au centre de commande.

Localisation de défaut d'ondes progressives à extrémité simple

La localisation des défauts à une seule extrémité basée sur les ondes progressives ne requiert aucune information de l'extrémité distante de la ligne pour le calcul de l'emplacement du défaut et donc, pour une localisation en ligne des défauts, fonctionne même sans canal de communication entre les équipements. L'emplacement est calculé en fonction des heures d'arrivée de la première onde progressive et de la première onde réfléchie provenant du défaut comme illustré à la Figure 6.

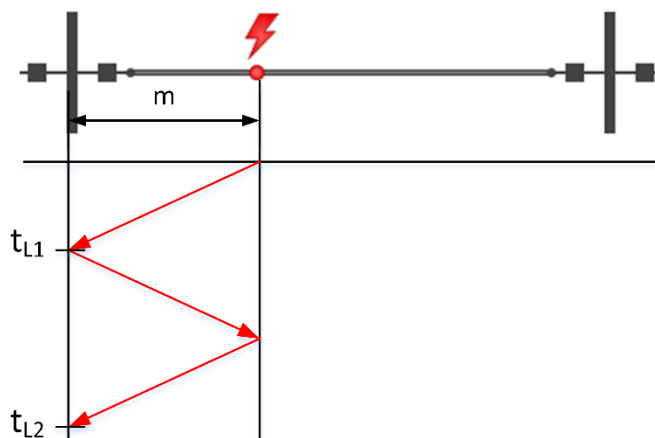


Figure 6 : Localisation des défauts à une seule extrémité basée sur la différence de temps des premières ondes d'arrivée et réfléchie

La simple formule suivante peut être utilisée pour calculer l'emplacement du défaut m :

$$m = \frac{t_{L2} - t_{L1}}{2} v$$

Où t_{L1} est l'heure d'arrivée de la première onde progressive, t_{L2} l'horodatage de la première onde réfléchie à partir du défaut et v la vitesse de propagation. Mais bien entendu, l'équipement de protection doit distinguer l'onde réfléchie provenant de l'emplacement du défaut d'autres réflexions, par exemple, de celle provenant d'une ligne courte située juste derrière elle, telle qu'illustrée à la Figure 3. C'est possible à partir d'une information directionnelle basée sur les polarités respectives des ondes progressives de courant et de tension ou à partir d'informations topologiques plus élaborées, collectées à partir des captures d'ondes progressives pendant la mise sous tension de la ligne (voir [5] pour des informations détaillées). D'autre part, le calcul de l'approche à une seule extrémité est indépendant de la longueur totale exacte de la ligne et n'introduit donc aucune erreur due à la variation de la longueur de ligne en raison de la chute du conducteur.

Défis liés au test et à la mise en service des éléments à ondes progressives

Pour tester et mettre en service les éléments basés sur les ondes progressives, il est nécessaire de simuler ou de reproduire les phénomènes transitoires générés lors de certains événements survenant sur le système électrique, tels qu'un défaut sur la ligne de transport d'électricité protégée. Comme ces phénomènes transitoires incluent des signaux très haute fréquence et se produisent à des moments ultra précis, l'équipement de test doit être capable de simuler et d'injecter de tels signaux dans les équipements testés.

Pour une simulation hors ligne des phénomènes d'ondes progressives sur un ordinateur, il existe de nombreux programmes très performants (par ex. le logiciel Electro-Magnetic Transients Program EMTP), capables de simuler correctement la propagation des signaux sur une ligne de transport d'électricité dans le domaine temporel et à des fréquences d'échantillonnage suffisamment élevées pour inclure les parties haute fréquence applicables. Néanmoins, il est assez difficile de réaliser une telle simulation et de définir

correctement tous les paramètres nécessaires afin d'obtenir un résultat réaliste. En outre, la plupart des programmes disponibles ont différents réglages et algorithmes de simulation, de sorte qu'il est compliqué d'obtenir des résultats fiables et comparables.

Une simulation précise à des fréquences d'échantillonnage aussi élevées reste assez chronophage et requiert beaucoup de mémoire lorsqu'elle est réalisée pendant une durée plus longue. En pratique, elle peut être réalisée uniquement sur une courte durée et pour un seul événement d'onde progressive (de quelques millisecondes à 1 seconde).

Les résultats de ces simulations hors ligne sont ensuite disponibles sous forme de signaux échantillonnés de tensions et courants (par exemple, au format COMTRADE) à des fréquences d'échantillonnage correspondantes élevées et peuvent être utilisés pour un examen et une analyse hors ligne plus approfondis. Pendant le développement et en laboratoire, il est possible d'injecter de tels signaux à bande passante élevée dans les équipements de protection et de localisation des défauts en utilisant directement les entrées de signaux analogiques basse énergie des équipements et en contournant les connexions conventionnelles des TC/TT (voir [6]).

Mais avec un équipement de test de protection, l'injection de ces signaux transitoires dans les entrées analogiques du relais n'est pas possible à l'heure actuelle, car les amplificateurs de tension et de courant des équipements de test ont une bande passante trop limitée. Dans les équipements de protection, les signaux destinés aux éléments à ondes progressives sont échantillonnés à des fréquences minimales de 1 MHz. Les signaux simulés doivent donc avoir une bande passante encore plus élevée que cette fréquence d'échantillonnage. Or, les amplificateurs utilisés pour la génération en régime permanent de signaux sur les entrées de tension et de courant des relais de protection, qui sont connectées aux secondaires de TC de 1 A/5 A et de TT de 100 V pendant le fonctionnement, ont une bande passante de l'ordre de quelques kHz uniquement.

Solutions possibles

Une solution possible pour le test pratique des éléments à ondes progressives repose sur une simulation séparée des impulsions d'ondes progressives haute fréquence. Grâce à un équipement de test d'injection spécifique, capable de créer précisément des impulsions d'ondes progressives pour les entrées de courant et/ou de tension, il est possible de stimuler les éléments à ondes progressives au sein des équipements de protection ou de localisation de défauts testés et de vérifier le bon fonctionnement de l'horodatage et des algorithmes de localisation des défauts.

La création d'impulsions d'ondes progressives diffère légèrement pour les entrées de tension et de courant. Pour les entrées de courant, par exemple, une solution simple peut consister à décharger un condensateur préalablement chargé juste au bon moment. Cependant, le circuit détaillé et la connexion aux entrées de l'équipement de protection doivent être soigneusement conçus et finalement adaptés à la charge des entrées de l'appareil testé. Enfin, la pente du signal doit être suffisamment raide pour que l'équipement testé puisse déterminer avec précision l'heure d'arrivée.

Pour pouvoir simuler différents scénarios avec des ondes progressives, il doit être possible de contrôler la polarité des impulsions ainsi que le timing. L'amplitude des impulsions n'est pas si facile à contrôler, car elle dépend de la charge d'entrée et du circuit de connexion. Mais les équipements à éléments d'ondes progressives ne peuvent pas compter sur l'amplitude absolue des signaux d'ondes progressives, car elle dépend également de nombreux autres facteurs. Pour les scénarios avancés, même de multiples impulsions sur une ligne avec des délais intermédiaires précis sont nécessaires, par exemple, pour simuler les réflexions des ondes progressives.

Pour certains équipements qui supervisent les signaux d'ondes progressives, il suffit d'injecter les impulsions d'ondes progressives, sans signaux significatifs fondamentaux ou à faible bande passante, pour tester uniquement la fonctionnalité des ondes progressives. Pour d'autres équipements, il est possible de configurer les paramètres selon un mode spécifique, qui accepte uniquement les signaux avec des impulsions d'ondes progressives. Cependant, les ingénieurs en protection ne tiennent pas à reconfigurer un équipement sur le terrain dans un but de test uniquement et pour certains équipements, ce n'est pas possible du tout.

Une meilleure approche est celle récemment réalisée en superposant les impulsions d'ondes progressives spécifiques sur les signaux de courant et de tension fondamentaux ou à faible bande passante utilisés pour tester les éléments de protection conventionnels. Les signaux des amplificateurs de sortie d'un équipement de test de protection classique, capable d'injecter des signaux de tension et de courant dans une plage de

fréquence allant de la fréquence fondamentale à quelques kHz, sont donc utilisés en parallèle à une injection spécifique d'impulsions d'ondes progressives, tel qu'expliqué ci-dessus. Pour les courants injectés, par exemple, les sorties des deux systèmes d'injection sont simplement connectées en parallèle aux entrées de courant de l'équipement de protection testé. Pour les tensions, un montage en série à l'aide d'un transducteur de tension pour l'impulsion de tension de l'onde progressive peut être réalisé.

Pour la simulation d'un scénario de défaut, l'équipement de test de protection est contrôlé à partir d'un logiciel de test installé sur un ordinateur, qui calcule les signaux transitoires des tensions et courants à l'aide d'un algorithme de simulation de réseau à une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz, par exemple. Dans le logiciel, la topologie du système d'alimentation est modélisée avec des lignes de transmission, des jeux de barre et des alimentations. Pour la modélisation de la ligne de transport d'électricité, un simple modèle RLC localisé peut être utilisé pour obtenir des signaux suffisamment réalistes à l'apparition du défaut. Les signaux de tensions et de courants ressemblent à ceux de la Figure 7, comme indiqué dans le logiciel de test sur l'ordinateur.

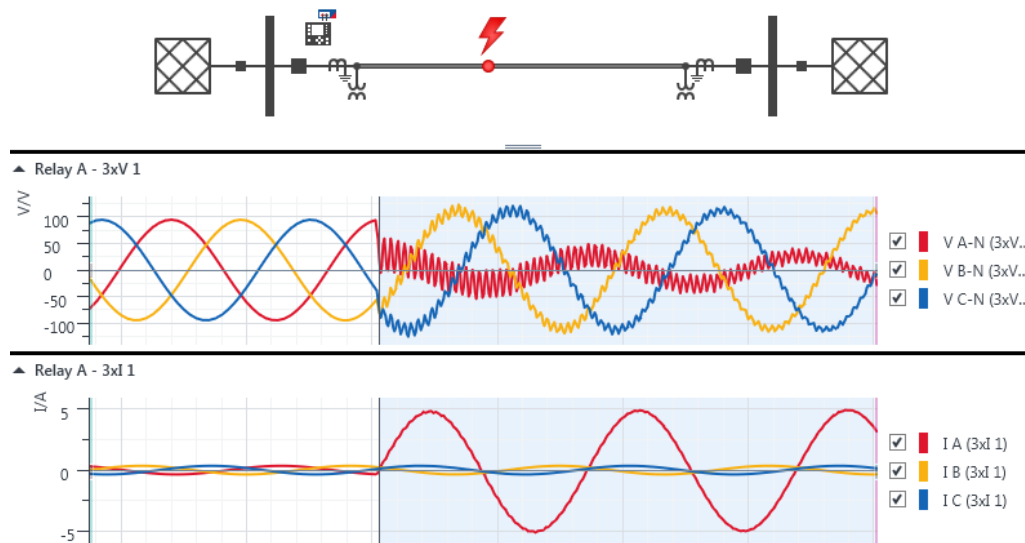


Figure 7 : Simulation de réseau d'un défaut monophasé à la terre sur une ligne de transport d'électricité de 100 km, à l'aide d'un modèle RLC localisé

Les informations relatives à la propagation des ondes progressives sont déduites à l'aide d'un algorithme séparé. Pour les lignes de transport, la longueur de la ligne et la vitesse de propagation des ondes progressives sont connues. Les heures d'arrivée exactes des impulsions d'ondes progressives au niveau des extrémités de la ligne, où les équipements de protection sont connectés, peuvent alors être calculées. La même topologie que celle modélisée dans la simulation de réseau ci-dessus est donc utilisée. L'idée des diagrammes en treillis de Bewley peut être étendue vers un graphe formé de nœuds (jeux de barres) et de lignes de connexion, à partir duquel un algorithme peut déduire aisément la propagation des ondes progressives depuis n'importe quel point de la topologie vers tous les emplacements des différents relais étudiés, notamment les réflexions et changements de polarité au niveau des discontinuités.

Pour l'injection d'un tel scénario de test, l'équipement de test doit contrôler précisément la sortie des signaux à faible bande passante échantillonnés ainsi que les impulsions d'ondes progressives superposées. Le moment d'apparition des impulsions d'ondes progressives doit être calé sur celui du défaut des signaux conventionnels. Par conséquent, ceci requiert un équipement de test dont la génération de signaux est verrouillée sur une horloge de référence interne précise et qui permet un déclenchement des impulsions d'ondes progressives contrôlé selon un temps précis avec une résolution de l'ordre de quelques nanosecondes à l'aide de la même horloge de référence. Une solution impliquant le déclenchement des impulsions d'ondes progressives à l'aide d'un signal binaire externe engendrerait des erreurs de temps supplémentaires, qui peuvent être évitées grâce à cette approche.

Pour les équipements qui utilisent le principe d'ondes progressives à double extrémité, l'injection aux deux extrémités doit évidemment être réalisée simultanément et une synchronisation précise établie entre les deux extrémités. Tel que décrit en détail aux points [7] et [8], un montage tel qu'illustré à la Figure 8 est possible.

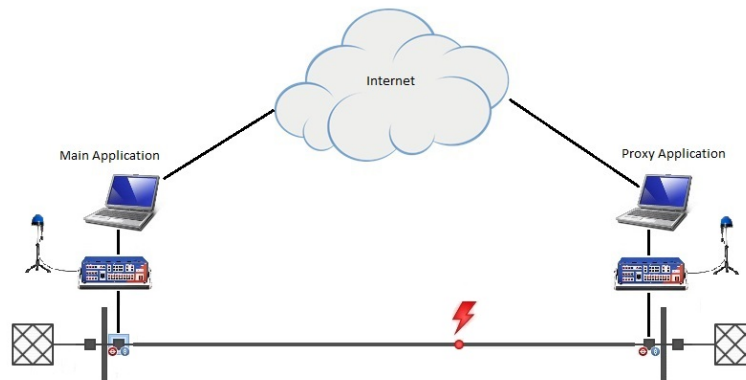


Figure 8 : Montage pour un test synchronisé à distance à l'aide d'un système de test réparti synchronisé par GPS

Pour un montage réparti avec un équipement de test de protection à chaque extrémité de la ligne, la synchronisation des équipements de test est effectuée à l'aide d'une horloge de référence GPS et d'un signal temporel PTP conforme à la norme IEEE 1588 et fournit une précision de temps de l'ordre de quelques nanosecondes. Les deux équipements de test sont contrôlés par logiciel depuis un seul ordinateur installé à une extrémité de la ligne, qui réalise tous les calculs des signaux transitoires et des ondes progressives simulées. Le logiciel contrôle les équipements de test aux deux extrémités à l'aide d'une connexion réseau directe au poste distant ou d'une connexion au travers du cloud Internet.

L'injection des signaux transitoires des courants et tensions à des fréquences d'échantillonnage de 10 kHz et les impulsions d'ondes progressives temporisées selon l'apparition du défaut du scénario utilisent la même référence de temps. La fluctuation du temps des impulsions d'ondes progressives dans un tel montage réparti peut être maintenue à quelques dizaines de nanosecondes même sur une longue durée, comme illustré à la Figure 9.

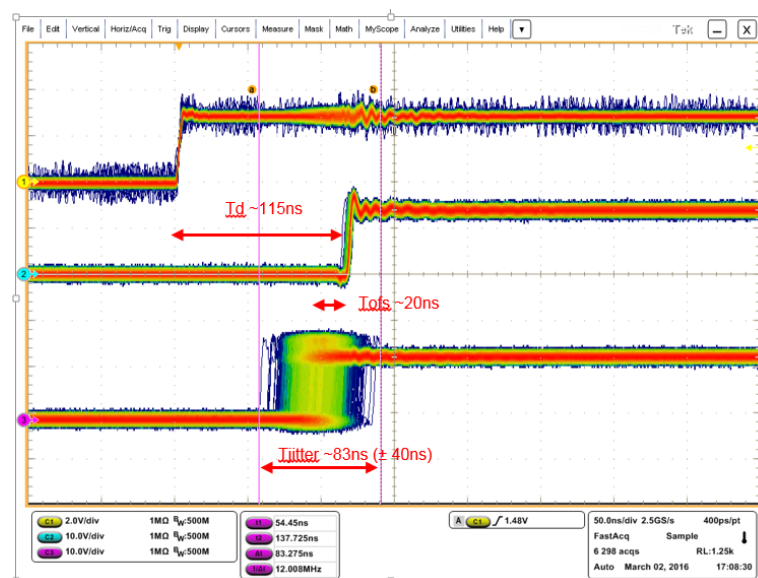


Figure 9 : Fluctuation des impulsions d'ondes progressives pour deux équipements de test répartis synchronisés

Cette approche a permis de réaliser des tests avec des relais différentiels de ligne en mettant en œuvre une localisation de défauts d'ondes progressives à double extrémité, à partir d'ondes progressives de courant dans un montage à 2 extrémités. Pour les défauts simulés à différents emplacements sur la ligne

protégée, allant de 0 à 100 % de la longueur de la ligne, les relais ont calculé précisément l'emplacement du défaut avec seulement quelques erreurs de l'ordre de 10 à 30 m. La localisation des défauts basée sur l'impédance a été évaluée dans les relais en parallèle et a donné des valeurs correspondantes, bien que pas toujours avec la même précision. Tous les tests ont été réalisés avec des paramètres de relais strictement identiques comme si les relais fonctionnaient dans les postes.

Perspectives à venir

À l'heure actuelle, la plupart des équipements de protection et de localisation de défauts déployés dans les postes utilisent des éléments basés sur les ondes progressives à des fins exclusives de localisation des défauts. Mais avec le nouveau développement des relais de protection, l'avantage d'ondes progressives aussi rapides que la vitesse de la lumière et ne nécessitant pas de fenêtre d'acquisition de données relativement longue pour un calcul fiable des phaseurs sera exploité et permet la protection des lignes avec des temps de déclenchement de l'ordre de quelques millisecondes seulement.

Pour une décision de déclenchement fiable dans un relais de protection, la localisation des défauts basée sur les informations des ondes progressives ne doit bien évidemment pas être réalisée uniquement de manière rapide mais également de manière fiable. Le relais doit distinguer les défauts sur la ligne protégée des défauts hors de la zone protégée, par exemple, les défauts sur les lignes adjacentes, en amont du relais ou sur la ligne en aval du relais situé sur l'extrémité distante, et les défauts sur une ligne parallèle, tel qu'illustré à la Figure 10.

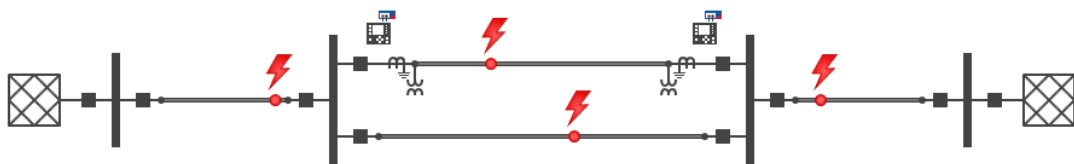


Figure 10 : Différents défauts qu'un relais de protection doit distinguer

Pour mettre en œuvre un relais de protection fiable à partir des éléments à ondes progressives, la plupart des éléments supplémentaires fonctionnent en parallèle et la décision de déclenchement est complétée des informations de tous ces autres éléments. Les éléments de relais basés sur des quantités incrémentielles sont un bon choix, utilisés avec les éléments à ondes progressives, car ils fonctionnent également dans le domaine temporel et peuvent fournir très rapidement des informations sur les défauts.

Les canaux de communication entre les unités de relais réparties étant aujourd'hui aisément disponibles, la protection de la ligne peut être renforcée à l'aide des informations provenant des deux extrémités de la ligne. Les schémas de téléprotection et les schémas différentiels de ligne peuvent augmenter encore l'information rapide provenant des ondes progressives pour une décision de déclenchement fiable à l'aide des canaux de communication rapide entre les deux équipements de protection. Néanmoins, le canal de communication engendre évidemment un délai supplémentaire au moins aussi long que le délai de propagation de la ligne protégée. Voir [9] et [10] pour les récents développements relatifs à la réalisation de relais de protection de ligne basés sur des éléments du domaine temporel et à ondes progressives.

La mise en service et le test des équipements dans un poste sont beaucoup plus importants pour les relais de protection, qui déclenchent les disjoncteurs, que pour les équipements, qui fournissent uniquement des informations sur l'emplacement du défaut. Un test intégré, qui inclut tous les éléments de relais, est obligatoire et doit être exécuté sur le terrain sur les équipements installés dans le poste. Pour les schémas de protection utilisant des canaux de communication entre les postes, un test synchronisé à distance à l'aide d'un système de test réparti est également nécessaire.

Des solutions de tests de protection basées sur celle décrite ci-dessus seront développées de manière intégrée afin d'être applicable à tout nouveau relais basé sur des éléments travaillant dans le domaine temporel sur le terrain. Avec la possibilité de stimuler plusieurs éléments qui fonctionnent ensemble dans les relais, et d'injecter en parallèle des quantités insuffisamment précises pour vérifier quels algorithmes fonctionnent comme prévu et si le relais est correctement paramétré, il sera désormais possible pour les

techniciens et ingénieurs en protection de réaliser de manière pratique la mise en service et le test de tels systèmes.

Conclusion

Le test et la mise en service des éléments à ondes progressives dans les équipements modernes de protection et de localisation de défauts ne sont pas possibles avec les moyens conventionnels d'injection d'un équipement de test de protection classique. L'utilisation d'une solution superposant des impulsions d'ondes progressives précises sur l'injection de tension/courant à faible bande passante permet de réaliser un test intégré de l'équipement testé qui inclut simultanément tous les éléments du relais et évite de recourir à une connexion de test ou une configuration de test spéciale dans le relais.

Un montage utilisant de multiples équipements de test synchronisés permet même d'effectuer un test réparti de schémas complets de protection, ce qui est obligatoire, puisque le principe de la plupart des éléments à ondes progressives dans les schémas de protection de ligne reposent sur les informations provenant des deux extrémités, au moyen d'un canal de communication à grande vitesse.

Les éléments à ondes progressives et du domaine temporel ouvrent la voie à de nouveaux relais de protection, qui peuvent fonctionner bien plus rapidement qu'un équipement basé sur des phaseurs. Pour le test et la mise en service de tels appareils, un nouvel équipement de test utilisant ces nouvelles approches de test intégré sera nécessaire.

Veuillez trouver plus d'information dans notre dernière vidéo sur les ondes progressives :

[„Field Testing Travelling Wave Protection System“](#)

Références

- [1] L. V. Bewley, « Traveling Waves on Transmission Systems », General Electric Company, Pittsfield, MA, 1933
- [2] A. Greenwood, « Electrical Transients in Power Systems », 2nde éd., John Wiley & Sons, 1991
- [3] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny et S. Marx, « Locating Faults by the Traveling Waves They Launch », 40th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, États-Unis, 2013
- [4] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny et S. Marx, « A New Traveling Wave Fault Locating Algorithm for Line Current Differential Relays », 12th International Conference on Developments in Power System Protection, Copenhagen, Danemark, 2014
- [5] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, C. Gallacher et S. Marx, « Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves », 13th International Conference on Developments in Power System Protection, Edimbourg, Royaume-Uni, 2016
- [6] S. Marx, B. K. Johnson, A. Guzmán, V. Skendzic et M. V. Mynam, « Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results », 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, GA, États-Unis, 2013
- [7] B. Bastigkeit, C. Pritchard, T. Hensler, « New Possibilities in Field Testing of Distributed Protection Systems », PAC World Conference, Zagreb, Croatie, 2014
- [8] T. Hensler, C. Pritchard, F. Fink, « New Possibilities for Protection Testing using Dynamic Simulations in the Field », Conférence MATPOST, Lyon, France, 2015
- [9] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic et M. V. Mynam, « Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations? », 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, États-Unis, 2014

- [10] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic et M. V. Mynam, « Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults », 42st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, États-Unis, 2015

À propos des auteurs



Christopher **Pritchard** est né en 1982 à Dortmund (Allemagne). Il a obtenu son diplôme en génie électrique à l'université des sciences appliquées de Dortmund en 2006. Il a rejoint OMICRON en 2006 et travaillé au développement des logiciels d'application dans le domaine des solutions de test pour les systèmes de protection et de mesure.

christopher.pritchard@omicronenergy.com



Heinz **Lampl** est né en 1962 à Graz (Autriche). Il a reçu son master en génie électrique à l'Université technique de Vienne en 1986. Il a rejoint OMICRON en 1990 et travaillé au développement matériel des équipements de test de protection des systèmes d'alimentation.

heinz.lampl@omicronenergy.com



Thomas **Hensler** est né en 1968 à Feldkirch (Autriche). Il a reçu son master en informatique à l'Université technique de Vienne en 1995. Il a rejoint OMICRON en 1995 et travaillé au développement des logiciels d'application dans le domaine des solutions de test pour les systèmes de protection et de mesure. Il est également responsable de la gestion de produits pour le logiciel d'application des tests de protection.

thomas.hensler@omicronenergy.com