

Réseau de transport électrique intelligent formé de lignes de transport intelligentes et d'un réseau indépendant et redondant de fibres optiques

PIERRE COUTURE *, *Senior Member de l'IEEE*
Hydro-Québec
Canada

RÉSUMÉ

Le présent article présente une architecture de réseau de transport intelligent innovante. Elle se compose d'un réseau de lignes de transport intelligentes dans lesquelles les modules de commutation sont reliés optiquement entre eux par un réseau redondant et indépendant de fibres optiques. Une ligne de transport intelligente est une ligne à conducteurs en faisceaux classique (p. ex., ligne à 400 kV, en Europe, ou à 735 kV, en Amérique du Nord) dont les sous-conducteurs sont isolés sur des tronçons de 30 km. Des modules de commutation dos à dos, des modules de protection et des systèmes de surveillance de ligne sont fixés aux phases d'une ligne sur un pylône d'ancrage, à la position des palonniers, tous les 60 km. Les modules de commutation sont reliés électriquement en série avec chaque phase de la ligne et redirigent le courant dans un ou plusieurs sous-conducteurs. La ligne de transport intelligente est destinée à être utilisée comme actionneur pour le déglacage des lignes électriques afin d'accroître la résilience du réseau et comme dispositif de mesure intégré à un réseau de transport intelligent. Elle peut également réguler les transits de puissance et contrôler la stabilité du réseau. Pour améliorer la fiabilité, la cybersécurité, la redondance et les délais de communication du réseau de transport intelligent, les processeurs des modules de commutation des phases A, B et C, qui agissent comme minipostes électriques, sont optiquement interconnectés par des canaux à double voie et à large bande. Ainsi, la puissance de traitement est répartie le long de la ligne électrique afin d'améliorer les performances de conduite du réseau de transport.

MOTS CLÉS

Conducteurs en faisceau, modulateur d'impédance de ligne, liaison optique, ligne de transport intelligente, FACTS, régulation des transits de puissance, stabilité du réseau électrique, réseau de transport intelligent, impulsions électromagnétiques, perturbations géomagnétiques, cybersécurité, résilience du réseau.

I. Introduction

À la suite de la tempête du verglas de 1998 au Québec, l'auteur a entrepris l'étude et la conception de technologies de déglacage de lignes de transport dans le but d'éviter d'autres pannes majeures et de protéger le réseau contre des défaillances catastrophiques. Il s'est penché notamment sur le développement d'une technologie de contrôle de ligne en faisceau reposant sur des modules de commutation installés sur des lignes de transport dotées de conducteurs en faisceaux [1]-[2]. Cette technologie a évolué vers un concept de système de transport à courant alternatif flexible (FACTS, pour *flexible alternating current transmission system*) réparti, la « ligne de transport intelligente » [3].

Une ligne de transport intelligente est une ligne à conducteurs en faisceaux classique (p. ex., ligne à 400 kV, en Europe, ou à 735 kV, en Amérique du Nord) dont les sous-conducteurs sont isolés sur des tronçons de 30 km. Des modules de commutation dos à dos, des modules de protection et des systèmes de surveillance de ligne sont raccordés aux phases d'une ligne sur un pylône d'ancrage tous les 60 km (fig. 1). Chaque module de commutation est connecté électriquement en série à une phase de la ligne et redirige le courant dans un ou plusieurs sous-conducteurs. Il n'a pas de référence électrique par rapport aux autres phases ni à la terre et n'a pas d'effets sur les propriétés physiques de la ligne, car il n'y est pas physiquement connecté en série.

* couture.pierre@ireq.ca

La ligne de transport intelligente est destinée à être utilisée pour le déglacage de lignes en charge et la suppression de galop par effet Joule. Elle peut également réguler les transits de puissance et contrôler la stabilité, amortir les oscillations interrégionales et sous-synchrones à l'aide d'un modulateur d'impédance de ligne et agir comme dispositif de mesure pour la surveillance de ligne (p. ex., unité de mesure de phaseur, surveillance du chargement mécanique et localisation des défauts) intégré à un réseau de transport électrique intelligent. Cette technologie de base de contrôle de ligne en faisceau vise à augmenter la fiabilité et la durée de vie des lignes et présente une plage de modulation d'impédance de ligne de 60 % sans aucun composant passif [4].

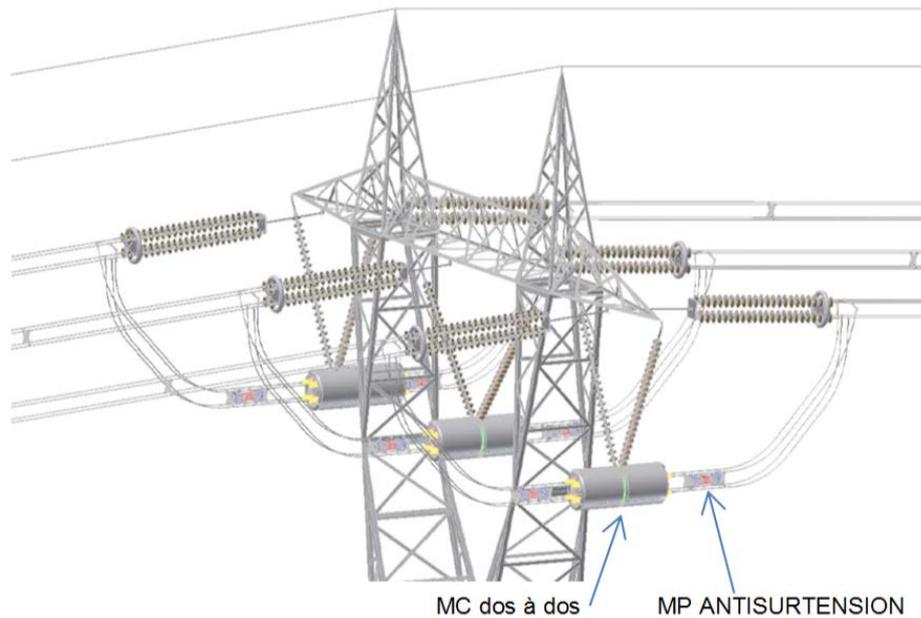


Figure 1 : Modules de commutation dos à dos et modules de protection fixés à un pylône d'ancrage à la position des palonniers

En principe, en régions froides et dans les zones à risque élevé de tempêtes de verglas, il serait possible d'accroître la capacité de transport des lignes à un, deux ou plusieurs conducteurs [5]. Il suffirait d'ajouter un ou plusieurs sous-conducteurs, des modules de commutation, des palonniers isolés et instrumentés et des entretoises isolées. Le poids plus élevé des conducteurs supplémentaires serait compensé par la fonction de déglacage, les surcharges les plus défavorables de glace et de vent combinés étant éliminées des calculs. Cette méthode éliminerait la nécessité de renforcer les pylônes, les isolateurs et les fondations de pylône. L'ajout de sous-conducteurs réduirait l'impédance de la ligne et augmenterait sa capacité de transport, tout en réduisant les effluves.

La tension à laquelle doivent résister les modules de commutation, les palonniers et les entretoises est fonction de la longueur du tronçon de ligne. Chaque tronçon contrôlé peut mesurer entre 20 et 50 km. Sa longueur dépend de l'application et est limitée par : a) la tension aux bornes des interrupteurs ouverts à laquelle peuvent résister le module de commutation, les entretoises et les palonniers, et b) l'espace disponible dans le module pour ces interrupteurs. Dans certaines applications, la longueur serait déterminée par compromis entre le coût des modules de commutation et la tension et le nombre de modules requis. Les tensions aux bornes des interrupteurs ouverts d'un module de commutation augmentent avec la longueur du tronçon et l'intensité du courant de ligne. Ces tensions atteignent leur valeur nominale lorsque les trois interrupteurs d'un faisceau sont ouverts alors que le courant de ligne fonctionne à sa valeur nominale. Dans le cas d'une ligne à 735 kV et d'un tronçon de 30 km, la tension aux bornes des interrupteurs peut atteindre 15 kV eff. à une puissance nominale de 2000 MW.

La ligne de transport intelligente peut fonctionner avec n'importe quel nombre de sous-conducteurs par faisceau, mais, aux fins du présent document, nous analyserons une ligne à 735 kV à quatre sous-conducteurs par faisceau sur des tronçons de 30 km. Un tronçon de ligne triphasée composé de faisceaux de sous-conducteurs isolés et de modules de commutation s'appelle un tronçon à contrôle de ligne en faisceau (tronçon CLF). Une ligne de transport intelligente est constituée de nombreux tronçons CLF [6].

Une telle ligne peut, en principe, servir à modifier le transit de puissance dans un réseau de transport électrique en mode statique ou dynamique. Un module auxiliaire doté de composants passifs peut être relié en parallèle au module de commutation pour certaines applications (fig. 2).

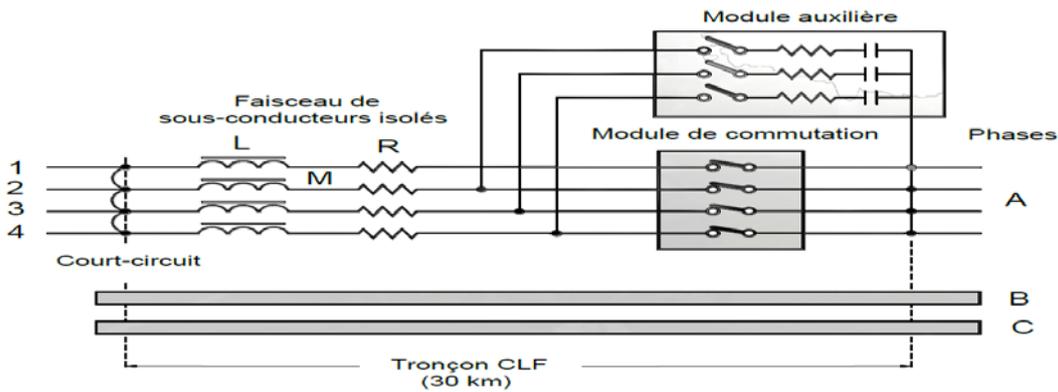


Figure 2 : Schéma d'un tronçon CLF de base

Le concept général d'un réseau intelligent a été exposé par Amin et Wollenberg en 2005 [7]. Le présent article présente une nouvelle architecture technologique pour réaliser un réseau de transport intelligent formé de lignes de transport intelligentes. Ce réseau, constitué de nombreuses lignes de transport intelligentes, dispose de communications améliorées et d'une puissance de calcul répartie directement sur les lignes électriques. Cette architecture conduit à un réseau de transport doté, en principe, de fiabilité, de résilience, de cybersécurité et de redondance supérieures ainsi que d'un temps de réponse plus court que l'architecture de ligne intelligente originale.

2 Caractéristiques et limites des lignes de transport intelligentes

L'approche reposant sur l'utilisation de lignes de transport intelligentes pour déglacer les lignes et réguler les transits de puissance à l'aide de dispositifs FACTS répartis permet de limiter le coût de l'équipement en tirant parti des propriétés inhérentes aux lignes de transport à conducteurs en faisceaux et d'éliminer l'encombrement au sol en ancrant de petits modules de commutation à un nombre limité de pylônes. Pour convertir une ligne électrique à conducteurs en faisceau en une ligne de transport intelligente, celle-ci doit être divisée en tronçons de 20 à 50 km pour satisfaire aux lois de l'électromagnétisme et à la technologie de commutation. La solution de configuration mécanique optimale nécessite l'emploi de module de protection (parafoudres) et de modules de commutation dos à dos fixés à un pylône d'ancrage tous les 40 à 100 km afin de faciliter l'installation et la maintenance des modules (fig. 1).

Tous les modules de commutation sont entièrement indépendants les uns des autres chacun possédant plusieurs éléments qui lui sont propres : des processeurs, de la mémoire, des capteurs de courant et de tension, une alimentation en ligne (capacitive et inductive), un récepteur GPS et un système de communication sans fil à radiofréquences (RF) avec le câble de garde à fibres optiques (CGFO). Le contrôleur du module de commutation comprend des processeurs, une mémoire et un bus d'entrée-sortie. La combinaison des modules de commutation et de protection triphasés fixés à des pylônes d'ancrage tous les 60 km représente un miniposte électrique. Les modules de commutation des phases A, B et C d'un tel miniposte communiquent entre eux au moyen de dispositifs de communication sans fil RF. Grâce à ceux-ci, les modules de commutation peuvent communiquer entre eux, même s'ils fonctionnent à des potentiels différents. Chaque module de commutation comprend des commutateurs mécaniques ou électroniques, des actionneurs ou moteurs linéaires, des capteurs de courant, de tension et de position, ainsi qu'un émetteur-récepteur pour communiquer avec les capteurs (p. ex., extensomètres) situés le long du tronçon CLF auquel il est associé.

Pour des raisons de redondance et de continuité, chaque sous-conducteur des modules de commutation comprend deux interrupteurs à vide connectés en parallèle, l'interrupteur principal et un interrupteur de contournement [8]. Celui-ci permet de contourner l'interrupteur principal en cas de défaut ou de remettre le tronçon CLF à son état fondamental, rétablissant ainsi sa capacité de transit intégrale, en cas de panne d'alimentation du module de commutation ou de défaillance du réseau de télécommunication du module.

Afin d'assurer la fiabilité de la ligne de transport intelligente, chaque contrôleur des deux modules de commutation dos à dos doit comprendre trois processeurs fonctionnant en parallèle et connectés l'un à l'autre. Les calculs sont effectués simultanément et en parallèle au sein de chaque processeur, et les processeurs comparent leurs résultats entre eux. Si un processeur fournit une valeur qui diffère des valeurs calculées par les deux autres processeurs, il est écarté afin de maintenir la fiabilité des calculs du contrôleur.

Le contrôleur comporte également un processeur de réserve, qui est relié à chacun des trois processeurs susmentionnés et qui est activé pour remplacer le processeur ayant calculé la valeur erronée. Il peut comprendre au moins un ou deux autres processeurs pour effectuer certains calculs de paramètres de ligne électrique (p. ex., unité de mesure de phaseur, localisateur de défaut). Tous les processeurs sont montés sur la même puce et reliés entre eux.

Pour les applications de déglacement et de gestion du transit de puissance en régime permanent, la télécommunication sans fil RF entre les modules de commutation de la ligne et la communication avec la salle de commande au moyen du CGFO sont suffisantes. Pour les applications de contrôle de la stabilité dynamique et pour protéger le réseau de transport contre les impulsions électromagnétiques (IEM) et les perturbations géomagnétiques (PGM) causées par les tempêtes solaires ou contre les intrusions mal intentionnées, un lien de communication plus robuste est nécessaire.

Plus récemment, trois autres dispositifs FACTS répartis ont été présentés [9] : le compensateur statique série décentralisé (DSSC) [10]-[13], le contrôleur de transit de puissance décentralisé (DPFC) [14]-[15] et le contrôleur de transit de puissance décentralisé basé sur un convertisseur à commande optique ETO (DPFC-ETO) [16]-[17]. Leur fonctionnement diffère de celui d'une ligne de transport intelligente à bien des égards.

Malgré ces différences, ces trois dispositifs et la ligne de transport intelligente ont un but commun : réduire les coûts de mise en œuvre grâce à l'emploi de petits modules monophasés standards. Comparativement aux trois autres dispositifs FACTS répartis en série, le domaine d'application de la technologie de ligne de transport intelligente peut être très différent. Par exemple, cette technologie permet de concentrer tout le courant de ligne d'un faisceau dans un sous-conducteur à la fois pour le déglacement par effet Joule, ce que les autres technologies ne peuvent réaliser.

Afin de réduire la dépendance au pétrole et aux combustibles fossiles en général, un nombre croissant de sources d'énergie renouvelable telles que l'éolien et le solaire sont maintenant reliées au réseau pendant que seront bientôt déployés des véhicules hybrides rechargeables avec une autonomie en mode électrique suffisante pour répondre aux besoins quotidiens moyens (IEEE-USA, 2009) [18]. Cette dépendance accrue à l'égard du réseau implique que la capacité et la fiabilité du réseau de transport devront être améliorées. Après l'importante tempête du verglas qui a frappé la Chine en 2008, il a été recommandé d'accroître l'efficacité, la fiabilité et la résilience des réseaux [19]-[20]. Récemment, le gouvernement américain a fait valoir les avantages économiques liés à l'accroissement de la résilience des réseaux électriques pour affronter des conditions météorologiques extrêmes [21].

3 EXIGENCES LIÉES AU RÉSEAU DE TRANSPORT INTELLIGENT

Afin d'améliorer la capacité, la fiabilité et la résilience d'un réseau composé de lignes de transport intelligentes, il serait hautement souhaitable que les modules de commutation puissent aussi exécuter localement certaines des fonctions généralement assumées par le système de conduite à distance centralisé. Afin d'assurer la conduite en temps réel du réseau, il serait plus rapide et efficace que certains calculs exécutés par les minipostes électriques et le réseau soient effectués localement par les modules de commutation plutôt que d'avoir à attendre les instructions du système de conduite à distance. Il va sans dire que l'ampleur des calculs nécessaires à la surveillance, à la gestion et à la conduite d'un réseau de transport est considérable. Il serait donc des plus avantageux d'utiliser la puissance de traitement des modules de commutation pour effectuer au moins certains de ces calculs et de permettre l'échange d'information de haut niveau entre ces modules et la salle de commande.

Le réseau électrique doit être fiable et une partie des fonctions de conduite, de surveillance et de protection ne peut pas être transférée d'un système de conduite centralisé pour être répartie entre les modules de commutation d'une ligne de transport intelligente classique. Cela est dû au fait que les signaux de communication RF sont sensibles aux perturbations électromagnétiques, telles que les IEM et les PGM, et aux dérangements et intrusions mal intentionnés. De plus, le contrôleur de modules de commutation d'une ligne classique ne dispose pas d'une puissance de calcul suffisante pour permettre une répartition adéquate des tâches de conduite et de protection du réseau. De plus, la largeur de bande des signaux RF entre les phases A, B et C est trop petite pour assurer une transmission rapide de grandes quantités de données. Enfin, le récepteur GPS, tout comme les signaux RF, peut être perturbé par les IEM et les PGM.

Pour que le contrôleur du module de commutation puisse assumer une partie de la charge des calculs effectués par la salle de commande à distance, les communications entre celle-ci et le module doivent être fiables (elles doivent notamment résister aux IEM et aux PGM) et conformes aux exigences de cybersécurité.

4 Solution le réseau de transport intelligent

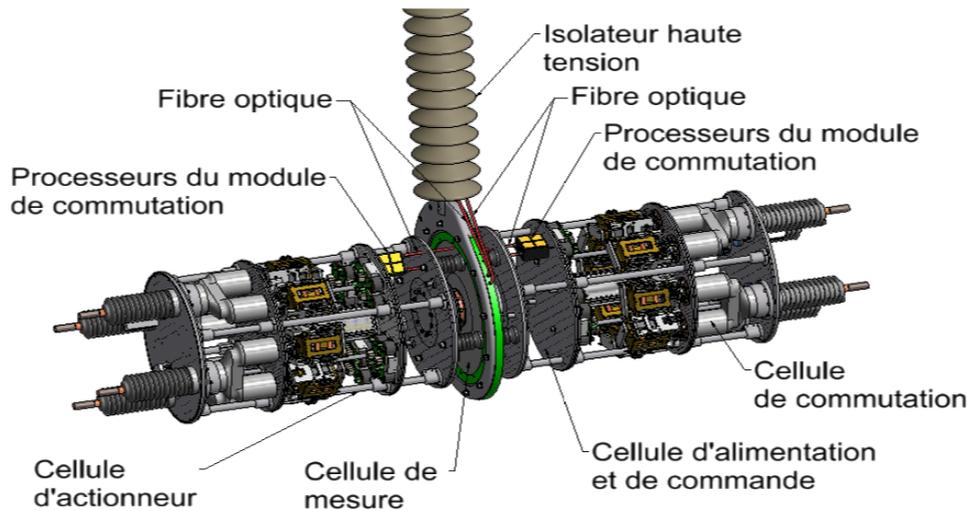


Figure 3 : Schéma du chemin optique sur les modules de commutation dos à dos monophasés (montrés sans enveloppe) d'un réseau de transport intelligent

Afin de résoudre ces limitations et de répondre aux exigences de puissance de calcul, de fiabilité, de cybersécurité et de bande passante du réseau de transport intelligent, nous proposons d'utiliser, dans les modules de commutation d'une ligne de transport intelligente, un micro-processeur avec deux liaisons optiques indépendantes dans une configuration dos à dos [22].

La première fibre optique (A1) relie le processeur d'un module de commutation dos à dos au processeur du second module de la même phase. La seconde fibre optique (A2) relie le module de commutation à son routeur optique en passant par une chaîne d'isolateurs composites à haute tension (fig. 3 et 4). Le routeur utilise le CFGO pour acheminer les signaux optiques des modules de commutation dos à dos vers ceux des autres phases du miniposte électrique et vers les autres minipostes le long de la ligne, qui relaient ces signaux jusqu'à la salle de commande.

La figure 3 illustre les modules de commutation dos à dos d'un réseau de transport intelligent ; leur enveloppe n'est pas montrée afin de simplifier la vue des composants internes. Les deux modules dos à dos partagent la même plaque d'entrée sans qu'ils aient à être reliés par des bielles. Quatre traversées de sous-conducteurs sont situées à l'extrémité extérieure du premier module, chacune d'entre elles étant reliée à l'un des sous-conducteurs du faisceau d'une phase de la ligne. Chaque traversée du module est reliée à un dispositif de commutation commandable, en l'occurrence un interrupteur à vide situé dans un premier compartiment (cellule de commutation). Chaque interrupteur à vide est relié à son tour à un moteur commandable, situé dans un deuxième compartiment (cellule de l'actionneur), pour fermer ou ouvrir l'interrupteur [23]. Un troisième compartiment (cellule d'alimentation et de commande) abrite un contrôleur relié aux dispositifs de commutation commandables. Il comprend également un récepteur GPS et un émetteur-récepteur RF. Les paramètres mesurés par les capteurs (p. ex., extensomètres) situés le long du tronçon CLF peuvent être transmis au contrôleur du module de commutation par l'émetteur-récepteur RF. Dans un quatrième compartiment (cellule de surveillance) se trouvent un capteur de courant et le transformateur du bloc d'alimentation du module.

Le second module de commutation a la même configuration que le premier. Les deux contrôleurs (composés, dans ce cas, de nombreux processeurs montés sur un même substrat) sont équipés de deux ports optiques. Le premier port du contrôleur du premier module est connecté au premier port du contrôleur du second module au moyen d'une première fibre optique (A1).

Le second port optique sert à connecter les deux modules de commutation dos à dos à un système externe. Une deuxième fibre optique (A2) est connectée au second port du premier module de commutation, et une troisième fibre optique (A3), au second port du second module. Les deuxième et troisième fibres optiques (respectivement, A2 et A3) sortent des deux modules de commutation dos à dos par la même chaîne d'isolateurs composites à haute tension et sont reliées à un routeur optique (fig. 4 et 5). Le contrôleur à ports optiques et le routeur pourraient être construits au moyen d'une technologie photonique sur silicium [24]-[25]. Le routeur est composé de circuits optiques ou optoélectroniques et comprend une source d'alimentation solaire ou capacitive.

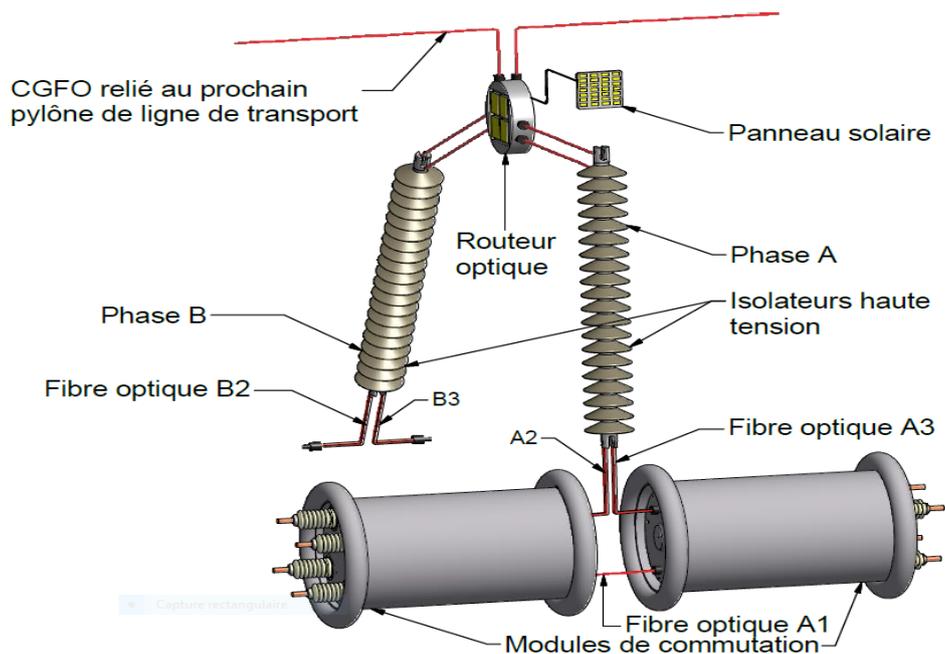


Figure 4 : Schéma des composants mécaniques et du chemin optique d'un miniposte électrique d'un réseau de transport intelligent

Chaque module de commutation dos à dos des phases A, B et C est relié optiquement à un routeur optique par deux fibres optiques. Dans la figure 4, la première fibre optique (B1) de la phase B et les fibres de la phase C ne sont pas représentées afin de simplifier la vue. La configuration « dos à dos » est particulièrement intéressante, car elle permet d'augmenter progressivement l'impédance de ligne d'un facteur de 1,64 sans injecter, dans le réseau de transport, des courants de composante inverse ou des courants homopolaires supérieurs à ceux d'une ligne de transport classique [26].

Comme le montre la figure 5, chaque contrôleur est équipé de bus d'entrée et de sortie en plus des ports optiques, afin d'échanger de l'information avec d'autres types de dispositifs (non illustrés), tels que des capteurs, des actionneurs de commutation et l'émetteur-récepteur RF. Ces dispositifs sont logés dans les modules de commutation afin de fournir au contrôleur de l'information sur le courant, la tension, la position des actionneurs ou la charge de glace sur le conducteur. Dans la configuration présentée ici, les deuxième et troisième fibres optiques (respectivement, A2 et A3) passent par la même chaîne d'isolateurs. Cela étant, afin d'accroître la redondance, il peut être préférable de faire passer ces fibres optiques par des chaînes d'isolateurs différentes.

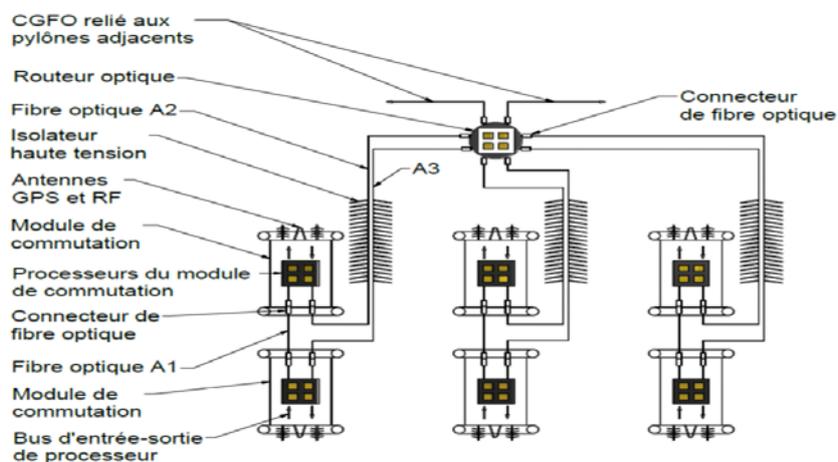


Figure 5 : Schéma des processeurs et de la liaison optique du routeur d'un miniposte électrique d'un réseau de transport intelligent

Toujours en référence à la figure 5, le routeur optique permet d'interfacier les contrôleurs de la paire de modules de commutation dos à dos reliés à la phase A avec les deux autres modules dos à dos reliés aux phases B et C, mais aussi avec la fibre optique principale, qui est connectée aux routeurs suivants de la ligne électrique et, en bout de chaîne, avec une salle de commande à distance. La fibre optique principale est une liaison optique relayée d'un routeur à l'autre, et est généralement située dans le CGFO, le long des tronçons de la ligne de transport (fig. 6).

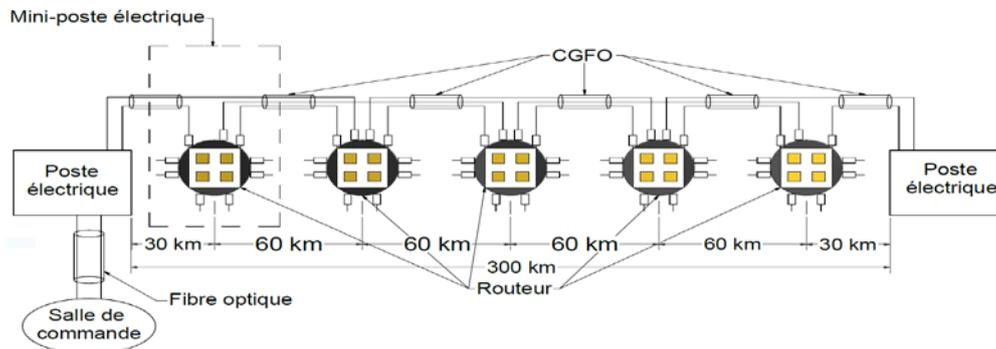


Figure 6 : Schéma de la liaison optique du routeur des minipostes électriques d'un réseau de transport intelligent sur une ligne de 300 km avec CGFO

La figure 6 schématise la liaison optique et les routeurs des minipostes électriques d'un réseau de transport intelligent sur une ligne de transport avec CGFO de 300 km. Les processeurs des modules de commutation ne sont pas illustrés afin de simplifier la figure. En bout de chaîne, la fibre optique principale est reliée à une salle de commande à distance qui surveille et régule le fonctionnement du réseau électrique à haute tension. Bien entendu, la fibre optique principale n'est pas nécessairement située dans le câble de garde.

Évidemment, les contrôleurs du miniposte de chacun des six modules de commutation peuvent envoyer et recevoir par le routeur les deux signaux optiques de chaque module. Dans cette configuration, le contrôleur d'un module de commutation est toujours équipé de deux chemins optiques, ce qui accroît la redondance et la fiabilité du système.

Dans le schéma, chacun des cinq routeurs fait partie d'un miniposte. Les trois routeurs centraux sont associés à deux autres minipostes, alors que les deux routeurs aux extrémités sont également associés aux postes à chaque extrémité du tronçon de la ligne. Dans cette configuration du système réparti, chacun des trois routeurs centraux est doté de dix ports optiques. De ce nombre, trois paires (non connectées dans l'illustration) sont reliées aux trois modules de commutation dos à dos raccordés à chaque phase (fig. 5). Deux autres ports assurent la connexion, au moyen du CGFO reliant les routeurs, aux routeurs adjacents sur la ligne ou à l'un des postes électriques. Enfin, les deux derniers ports assurent la connexion, au moyen du CGFO reliant les routeurs, soit aux routeurs adjacents de part et d'autre des deux premiers, soit au routeur adjacent au premier d'un côté et au poste électrique de l'autre. Les deux routeurs situés aux extrémités de la ligne ne sont dotés que de neuf ports, car ils sont directement adjacents au poste. L'un des postes est relié à un système de conduite à distance.

Comme on peut le voir, une telle configuration améliore la fiabilité et la redondance du système réparti, car il y a toujours deux chemins optiques vers les contrôleurs des modules de commutation. Par exemple, en cas de défaillance de l'ensemble d'un miniposte électrique sur un pylône d'ancrage, composé de trois modules dos à dos et d'un routeur, le tronçon CLF en panne retournerait automatiquement à son état fondamental et à sa capacité de transit intégrale. Les autres systèmes sur la ligne de transport pourraient continuer de fonctionner normalement avec une modulation d'impédance réduite, et la communication avec les postes électriques ou avec le système de conduite à distance ne serait pas compromise par cette panne.

5 Définition du réseau de transport intelligent

Un réseau de transport intelligent (RTI) est formé d'un ensemble de lignes de transport intelligentes (LTI). Les processeurs des modules de commutation des trois phases (A, B et C) d'un même miniposte électrique sont tous optiquement reliés entre eux et avec les processeurs des autres minipostes électriques situés le long de la ligne de transport ainsi qu'avec la salle de commande du réseau de transport grâce à un réseau indépendant et redondant de fibres optiques.

RTI = \sum LTI + réseau de fibres optiques synchronisé indépendant, blindé et redondant

Cette architecture permet de répartir les fonctions de conduite et de protection du réseau le long des lignes de transport en augmentant la puissance de calcul des minipostes électriques, en réduisant les délais de communication et en améliorant la redondance des processeurs de calcul et de contrôle, des systèmes de surveillance et des systèmes de communication. Elle rehausse également la robustesse du système en présence d'IEM et de PGM ainsi que d'intrusions indésirables.

Elle améliore la résilience du réseau dans des conditions de verglas extrêmes grâce à sa capacité de déglçage de ligne. Elle permet également : a) la mesure redondante des phaseurs répartie le long des lignes, b) la protection des lignes, le transit de puissance et le contrôle de la stabilité du réseau, et c) l'augmentation de la capacité de transit. La surveillance en temps réel des lignes et des modules de commutation permet d'établir des bases de données sur les défauts dans le réseau de transport.

La surveillance de ligne sous-entend aussi une surveillance des événements électriques (contournements causés par des tensions de choc de manœuvre), des événements mécaniques (p. ex., galop, vibrations dues au vent), des événements météorologiques (p. ex., verglas, foudre) et de l'environnement des modules de commutation à l'aide d'une caméra vidéo et d'une ministration météorologique.

De plus, cette architecture offre une vue, en temps réel, de la répartition de puissance dans le réseau et permet la mise sur pied de bases de données d'événements survenus sur une ligne et dans le réseau électrique. À partir de ces données, il sera possible de déduire une série de mesures à prendre, en temps réel ou différé, afin d'optimiser la maintenance du réseau de transport. Avec les données obtenues de tous les modules de commutation d'un réseau de transport intelligent, le comportement et la fiabilité du réseau peuvent être améliorés à l'aide d'applications logicielles et de systèmes experts appropriés.

6 Discussion

Le réseau de transport intelligent permet la répartition des tâches de traitement des données nécessaires à la conduite du réseau et d'une partie des tâches de protection des lignes de transport dans les minipostes électriques situés le long des lignes. Cette technologie de pointe relie chaque module de commutation par deux fibres optiques – l'une provenant d'un routeur et l'autre, du second module de la configuration dos à dos – au lieu d'utiliser une simple connexion RF. Cette liaison optique peut prendre la forme d'un canal large bande (>10 GHz) avec plusieurs canaux de différentes longueurs d'onde. Cette liaison optique redondante utilisant des processeurs photoniques au silicium permet de regrouper les processeurs des deux modules de commutation dos à dos de chaque phase (A, B et C) d'un même miniposte électrique et fait en sorte qu'ils puissent communiquer avec les autres minipostes électriques au moyen d'un routeur optique photonique au silicium. De plus, les routeurs des minipostes électriques d'une même ligne sont reliés entre eux et avec la salle de commande du réseau par au moins deux fibres optiques.

Cette architecture de réseau de transport intelligent accroît :

1. la redondance et la puissance de calcul du système de traitement et de conduite de la ligne électrique. Chaque module de commutation comprend trois processeurs qui exécutent le traitement de la tâche en parallèle et un quatrième processeur en attente prêt à prendre le relais en cas de défaillance. Plusieurs processeurs peuvent être ajoutés pour exécuter des tâches supplémentaires. Tous ces processeurs combinés à ceux d'autres phases de potentiel différent agissent comme un super processeur. Les processeurs de réserve et les processeurs supplémentaires peuvent être mis en commun ;
2. la redondance et la puissance de calcul du système de traitement dans un corridor comportant deux lignes de transport et un CGFO. Pour ce faire, il faut connecter optiquement les processeurs, les processeurs de réserve et les processeurs supplémentaires d'une seconde ligne située dans le même corridor à des potentiels différents et dans les mêmes minipostes électriques ;
3. la robustesse de la ligne de transport intelligente et du réseau de transport intelligent en présence de perturbations électromagnétiques (IEM et PGM). Seuls les capteurs de signaux situés le long du tronçon de 30 km sont connectés par une liaison de communication RF au module de commutation correspondant. Ces signaux ne sont pas indispensables au fonctionnement ou à la protection du réseau de transport ;
4. la redondance des récepteurs GPS et des émetteurs-récepteurs pour la communication avec les capteurs situés le long du tronçon associé au module de commutation ;
5. la robustesse du système de transport en présence de perturbations potentielles dans le système GPS, car un signal de référence temporel avec un indicateur de chemin parcouru est envoyé à chaque module

- de commutation par fibre optique. Cette référence temporelle est calibrée pour différents chemins au moyen d'un GPS ;
6. la robustesse du système de transport en présence d'intrusions indésirables, car l'architecture adopte des protocoles de communication et des cryptages appropriés dans l'environnement relativement sécuritaire d'un réseau de câble de garde à fibres optiques (CGFO). Il est plus facile de perturber le fonctionnement d'un système de communication sans fil que celui d'un système de communication à fibres optiques ;
 7. la robustesse du système de communication, en augmentant la redondance des canaux et des voies de communication par fibre optique.

7 Conclusion

L'intégration de deux nouveaux composants (microprocesseurs à couplage optique et routeur optique à technologie photonique sur silicium) dans le concept de réseau de lignes de transport intelligentes améliore la redondance et la résilience pour créer un réseau de transport intelligent fiable qui répond aux exigences de cybersécurité. Cette nouvelle architecture de réseau de transport intelligent permet de résoudre certains des problèmes liés au concept de réseau de lignes de transport intelligentes grâce à un réseau à commande répartie, où les calculs de base nécessaires à la conduite du système peuvent être exécutés au niveau des modules de commutation répartis sur les phases le long de la ligne. Après un traitement initial, les résultats des calculs, avec les logiciels appropriés, sont mis en commun entre les modules de commutation et la salle de commande, réduisant la quantité d'information à partager de même que les délais de communication tout en maintenant un temps de réponse rapide, sûr et fiable.

RECONNAISSANCE

L'auteur remercie Michel Belley de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) pour son aide avec les dessins de cette publication.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] COUTURE, Pierre. « Module de dégivrage sous charge pour lignes de transport avec des phases à multiconducteurs », 67^e Congrès de l'ACFAS – Colloque C-213, 12 mai 1999.
- [2] COUTURE, Pierre. « Switching apparatus and method for a segment of an electric power line », brevet américain 6 396 172 B1, 28 mai 2002.
- [3] COUTURE, Pierre. « Smart power line and photonic de-icer concepts for transmission-line capacity and reliability improvement », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 65, janvier 2011, p. 13-22.
- [4] COUTURE, Pierre. « Switching modules for the extraction/injection of power (without ground or phase reference) from a bundled HV line », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, n° 3, juillet 2004, p. 1259-1266.
- [5] COUTURE, Pierre. « Method for increasing high-voltage power line transmission capacity in a region subject to freezing rain », demande de brevet canadien 2441241, 10 septembre 2003.
- [6] COUTURE, Pierre, J. Brochu, G. Sybille, P. Giroux et A. O. Barry. « Power Flow and Stability Control Using an Integrated HV Bundle-Controlled Line-Impedance Modulator », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, n° 4, octobre 2010.
- [7] AMIN, S. M. et B. F. Wollenberg. « Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century », *IEEE Power and Energy Magazine* 3 (5): sept.-oct. 2005, <http://massoud-amin.umn.edu/publications/Smart_Grid_IEEE_P&E_Amin_Wollenberg.pdf>
- [8] COUTURE, Pierre et J. Leduc. « Switching apparatus and method for varying an impedance of a phase line of a segment on an electrical power line », brevet américain 7 639 460, 29 décembre 2009.
- [9] GAIGOWAL, S. R. et M. M. Renge. « Some studies of distributed series FACTS controller to control active power flow through transmission line », International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), février 2013.
- [10] DIVAN, D. M., W. E. Brumsickle, R. S. Schneider, B. Kranz, R. W. Gascoigne, D. T. Bradshaw, M. R. Ingram et I. S. Grant. « A distributed static series compensator system for realizing active power flow control on existing power lines », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, n° 1, janvier 2007, p. 642-649.
- [11] JOHAL, H. et D. Divan. « Current Limiting Conductors: A distributed approach for increasing T&D system capacity and enhancing reliability », IEEE PES, mai 2006, p. 1127-1133.
- [12] GOLSHANNAVAZ, S., M. Mokhtari, M. Khalilian et D. Nazarpour. « Transient stability enhancement in power system with distributed static series compensator (DSSC) », Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), mai 2011.

- [13] RATHI, A., A. Satta, L. Nebhnani et V. M. Maheshwari. « Loss minimization with D-FACTS devices using sensitivity based technique », India International Conference on Power Electronics (IICPE), décembre 2012.
- [14] YUAN, Z., S. W. H. de Haan, J. B. Ferreira et D. Cvoric. « A FACTS device: Distributed power-flow controller (DPFC) », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, n° 10, octobre 2010, p. 2564-2572.
- [15] JAMSHIDI, A., A. M. Barakati et M. M. Ghahderijani. « Power quality improvement and mitigation case study using distributed power flow controller », International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), mai 2012.
- [16] SONG, W., A. Q. Huang et A. Bhattacharya. « Distributed power flow controller design based-on ETO-light converter », Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), février 2008.
- [17] HUANG, A., Y. Liu, Q. Chen, J. Li et W. Song. « Emitter turn-off (ETO) thyristor, ETO light converter and their grid applications », Power & Energy Society General Meeting (PES), juillet 2009.
- [18] IEEE-USA, 2009. Policy Position Statement, “National Energy Policy Recommendations”, janvier.
- [19] YE, Q. « Building resilient power grids from integrated risk governance perspective: A lesson learned from china’s 2008 Ice-Snow Storm disaster », *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 223, juillet 2014, p. 2439-2449.
- [20] JIANG, X., Y. Wang, L. Shu, Z. Zhang, Q. Hu et Q. Wang. « Control scheme of the de-icing method by the transferred current of bundled conductors and its key parameters », *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 9, n° 15, 2015, p. 2198-2205.
- [21] Bureau exécutif du président. « Economic benefits of increasing electric grid resilience to weather outages », août 2013.
- [22] COUTURE, Pierre. « Switching apparatus, control system and method for varying an impedance of a phase line », brevet en instance, PCT/CA2011/00850, 22 juillet 2011.
- [23] FRANCOEUR, B. et P. Couture, 2018 Actionneur électromagnétique bistable, brevet en instance, PCT/CA2018/051391, 5 novembre.
- [24] SOREF, R. « The Past, Present, and Future of Silicon Photonics », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, novembre-décembre 2006, p. 1678-87.
- [25] FATHPOUR, S. « Emerging heterogeneous integrated photonic platforms on silicon », *Nanophotonics*, vol. 4, 2015, p. 143-164.
- [26] BROCHU, J. et P. Couture. « Load flow modeling of the integrated bundle-controlled line impedance modulator », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, n° 2, avril 2015, p. 957-966.

BIOGRAPHIE



Pierre Couture obtient un doctorat en physique des plasmas de l’INRS-Énergie, Université du Québec, en 1979. Il entre au service de l’Institut de recherche d’Hydro-Québec (IREQ) en 1978 pour travailler à la conception du projet Tokamak de Varennes. De 1983 à 1985, il travaille au Laboratoire de physique des plasmas de Princeton sur le mode H, dans le cadre de l’expérience PDX, et sur le plasma à bêta élevé dans les tokamaks, dans le cadre de l’expérience PBX. De retour à Hydro-Québec, il entreprend des recherches sur la polarisation du plasma dans les tokamaks. En 1989, il prend en main le projet Tokamak de Varennes et, après la mise en service de l’écorceur poloïdal, il réalise, en 1990, la première expérience de polarisation du plasma dans un écorceur. Il quitte le programme en 1991 pour diriger l’équipe de recherche de M4 œuvrant au développement d’un système de propulsion rechargeable à moteurs-roues hybrides en série pour véhicules électriques. En 1996, il rejoint le service responsable des lignes de transport pour étudier les phénomènes de foudre et, en 1998, à la suite de la tempête du verglas au Québec, il conçoit et élabore une technologie de déglacage. Il collabore actuellement à la conception et à la mise au point d’un traitement de recuit continu à avance rapide CFF-RTA pour un ruban de métal amorphe et d’un transformateur de distribution à noyau formé par enroulement d’une bande en métal amorphe. Ses principales activités de travail consistent à concevoir et à élaborer le concept de ligne de transport intelligente et de réseau de transport intelligent dans le but d’améliorer la capacité de transit du réseau de transport et sa fiabilité.