

## Améliorations aux protections des filtres c.a. des convertisseurs CCHT en utilisant un calcul d'impédance

P.-A. Chiasson & S. Tremblay  
Hydro-Québec  
Canada

### RÉSUMÉ

Hydro-Québec (HQ) est une société d'État québécoise qui exploite plus de 100 filtres et batteries de condensateurs shunt à courant alternatif (CA) afin d'échanger près de 5 000 MW avec les sociétés électriques voisines par le biais de quatre interconnexions de type convertisseur commutées par les lignes (CCL) à courant continu haute tension (CCHT) [*Anglais : LCC-HVDC*]. Ces filtres n'ont subi aucune défaillance majeure depuis leur construction, principalement dans les années 1980.

En 2017-2018, cependant, de graves cas de défauts sont survenus sur ces filtres et batteries. Certains de ces cas étaient de la malchance (par exemple, la foudre a frappé un filtre) et d'autres étaient dus au vieillissement normal des composants du filtre. La plupart de ces défauts ont été détectés tardivement par les protections, ce qui a causé des dommages supplémentaires aux filtres et donc de longues périodes d'indisponibilités pour ceux-ci. Conséquemment, il y avait un risque plus élevé d'indisponibilité forcée de liens CCHT.

Trois des principaux cas sont survenus dans différents postes. À Châteauguay, l'inductance noyaux à air de la branche résonante d'un filtre de type C présentait un court-circuit inter-spire, ce qui a entraîné un court-circuit complet de la résistance de la branche parallèle après plusieurs secondes. À Outaouais, un oiseau a entraîné un effet d'avalanche dans une batterie de condensateurs configurée en pont en H, ce qui a mené à un court-circuit complet de la batterie après quelques secondes, un défaut qui n'a pas été détecté par la protection de déséquilibre. À Radisson, les filtres resintonisables ont subi les défaillances d'éléments de résistance et d'un condensateur basse tension qui n'ont pas été détectés pendant de nombreux jours avant d'être découverts au moyen d'une inspection visuelle, entraînant une indisponibilité forcée du lien CCHT.

Ces événements ont été reproduits à l'aide de simulations afin de déterminer la séquence exacte des événements. Cette analyse a conclu que l'une des principales améliorations applicables à tous les filtres shunt CA et à toutes les batteries de condensateurs est une protection basée sur l'impédance. À notre connaissance, ce type de protection n'est pas utilisé dans les systèmes CCHT. Dans le cadre d'un projet pilote, une nouvelle protection d'impédance a été développée à même le système de protection programmable et mise en service à Châteauguay sur une batterie de condensateurs et un filtre de type C. En utilisant la même conception de base, une protection d'impédance du 5e harmonique a été développée pour les filtres resintonisables de Radisson. Une protection à haute sensibilité a été obtenue grâce à un filtrage adéquat du déséquilibre d'impédance calculé entre les trois phases, ce qui constitue un élément distinctif. Une temporisation appropriée et une plage de tension de fonctionnement en régime permanent permettent d'éviter les faux déclenchements.

Ce papier présente une brève analyse des cas de défaillance et démontre la nécessité d'améliorer la philosophie de protection des filtres CA. Il décrit ensuite la protection d'impédance mise en service à Châteauguay, incluant des résultats de tests. Ce papier souligne le fait qu'une protection basée sur l'impédance aurait pu aider à réduire les effets néfastes des défauts.

### MOTS CLÉS

Filtres shunt CA, batteries de condensateurs shunt, protection CCHT, protection d'impédance, protection de distance, filtre de type C, filtre resintonisable, court-circuit inter-spire, défaut de court-circuit, pont en H, protection de déséquilibre

Chiasson.Pierre-Andre@hydro.qc.ca

## INTRODUCTION

En raison de sa conception, le CCL-CCHT génère beaucoup de courant harmonique et consomme une puissance réactive croissante à mesure que le transit de puissance augmente. Par conséquent, des filtres shunt CA sont nécessaires dans les cinq postes électriques où se trouvent des convertisseurs CCL-CCHT d'HQ pour maintenir une qualité de puissance (QP) acceptable et fournir une puissance réactive suffisante pour maintenir un facteur de puissance unitaire. Dans presque tous les postes d'HQ, les types de filtres sont redondants à des fins harmoniques, y compris un filtre redondant par convertisseur pour la compensation de la puissance réactive.

À l'exception de l'interconnexion Outaouais, mise en service en 2009, tous les postes CCHT d'HQ, incluant les filtres shunt, ont été mis en service dans les années 1980. En raison de la durée de vie plus courte de leur système de contrôle et de protection, ils ont été remis à neuf à la moitié de la vie du poste, soit entre 2010 et 2015. Comme aucun problème majeur n'a été détecté au cours de la première demi-vie, la philosophie et les réglages de protection des filtres CA ont été transposés aux nouveaux systèmes en utilisant les protections standards du fournisseur.

En 2017-2018, cinq événements de défaillance majeurs se sont produits sur des filtres shunt CA et des batteries de condensateurs dans différents postes. Globalement, les défauts ont affecté un grand nombre d'unités de condensateurs (58), une inductance et de nombreuses unités de résistance (40). La remise en service des filtres a nécessité de longues périodes d'indisponibilité, pouvant aller jusqu'à plus d'un an, principalement en raison du nombre élevé d'éléments à remplacer, du vieillissement et du manque de pièces de rechange. Deux cas de défaillance ont directement affecté le transit de puissance: un convertisseur a dû être déclenché suivant la panne du seul filtre de ce type disponible et deux événements de défaillance distincts sur deux filtres identiques ont entraîné une brève indisponibilité de convertisseurs.

Tous les cas ont été reproduits en simulation pour effectuer une analyse approfondie des actions de protection et identifier les améliorations possibles. La conclusion commune à tous les événements était que les délais de déclenchement étaient trop longs, entraînant des dommages supplémentaires aux filtres. Une philosophie parfois inappropriée, un manque de couverture et une défaillance de la protection primaire, incluant des paramètres inadéquats, ont été découverts, dont la plupart ne pouvaient pas être attribués à la remise à neuf des systèmes. Ces événements ont également démontré que même en utilisant une philosophie de protection de filtre CA selon l'état de l'art actuel [2, 3], il n'est pas possible de se fier à la protection de relève pour éviter des dommages importants.

La cause de ce problème peut être attribuée à la protection contre les surintensités de neutre associée, comme relève, à la protection de déséquilibre de condensateur [1]. Comme cette protection est sujette aux faux déclenchements causés par des défauts externes, les temporisations ont été prolongées de plusieurs secondes et les seuils de déclenchement ont été grandement augmentés [3]. Comme il n'y a pas d'autre type de protection de relève couramment utilisé pour les défauts de déséquilibre selon la littérature [2, 3], le résultat final est des dommages importants en cas d'échec de la protection primaire.

L'une des principales recommandations découlant de l'analyse des événements était donc d'ajouter une protection de relève efficace reposant sur des principes différents et des mesures indépendantes. Compte tenu de l'âge des installations et du facteur d'utilisation élevé, la protection devait être économique et ne nécessiter que peu de ressources mémoires. Ainsi, aucun dispositif de mesure ne pouvait être ajouté et la protection devait s'adapter aux plates-formes de protection programmables actuelles, et ce, pour tous les filtres.

Au fil des ans, le relais de distance, en tant qu'exemple de protection basée sur l'impédance, est devenu un outil très sophistiqué de détection des défauts de ligne. Il est également marginalement reconnu comme une protection possible pour la détection de défauts dans les batteries de condensateurs shunt [2]. Cependant, à notre connaissance, il n'est pas utilisé dans les projets CCHT pour protéger les bancs de filtres shunt. Comme cette utilisation présente des défis très différents de la protection des lignes, nous pensons qu'une protection d'impédance spécifique, couvrant les principales faiblesses de la protection primaire, pourrait mieux convenir à la protection de filtres shunt.

Ce papier utilise des exemples concrets pour montrer la nécessité de mettre à niveau les schémas de protection de filtre CA et comment cela peut être réalisé à l'aide de la protection d'impédance. Des conseils seront également fournis pour d'autres améliorations, notamment dans la sélection de paramètres. La deuxième partie du papier présente la nouvelle protection basée sur

l'impédance développée pour protéger une batterie de condensateurs, un filtre de type C et un filtre resintonisable. Une philosophie de protection améliorée assurant une couverture primaire et de relève efficace contre les défaillances de composants sera présentée.

## 1. ÉTUDE DE CAS

Tous les événements ont été reproduits en simulation à l'aide d'un modèle de filtre monophasé détaillé. La séquence d'événements la plus probable a été identifiée malgré des informations parfois manquantes et des enregistrements n'ayant pas le début des événements. Le comportement des systèmes de protection a été soigneusement évalué pour tous les cas et des améliorations ont été identifiées pour chaque cas.

### 1.1 Filtre 2e harmonique de type C, Châteauguay

Des filtres de deuxième harmonique ont été ajoutés à Châteauguay en 1990 pour atténuer les surtensions transitoires causées par des harmoniques [4]. Dans ce filtre de type C (Fig. 1), l'inductance (L) et le condensateur (C2) forment une branche résonnante à 60 Hz, ce qui signifie que presque aucun courant 60 Hz ne circule dans la branche de résistance (R). La défaillance s'est produite lorsque L a connu un court-circuit inter-spire d'origine indéterminée, ce qui a entraîné une désintonisation de la branche. La désintonisation a conduit à un courant 60 Hz excessif circulant dans R, conçue pour 24 A en régime permanent (42A / 60s; 70A / 10s). En l'absence de protection agissant assez rapidement, R est court-circuité et prend feu. La protection de surintensité de résistance (PSR: 110A / 1s dans CT4) a finalement isolé le filtre lorsqu'un courant de 650 A a circulé dans la branche de résistance. L et R furent des pertes complètes.

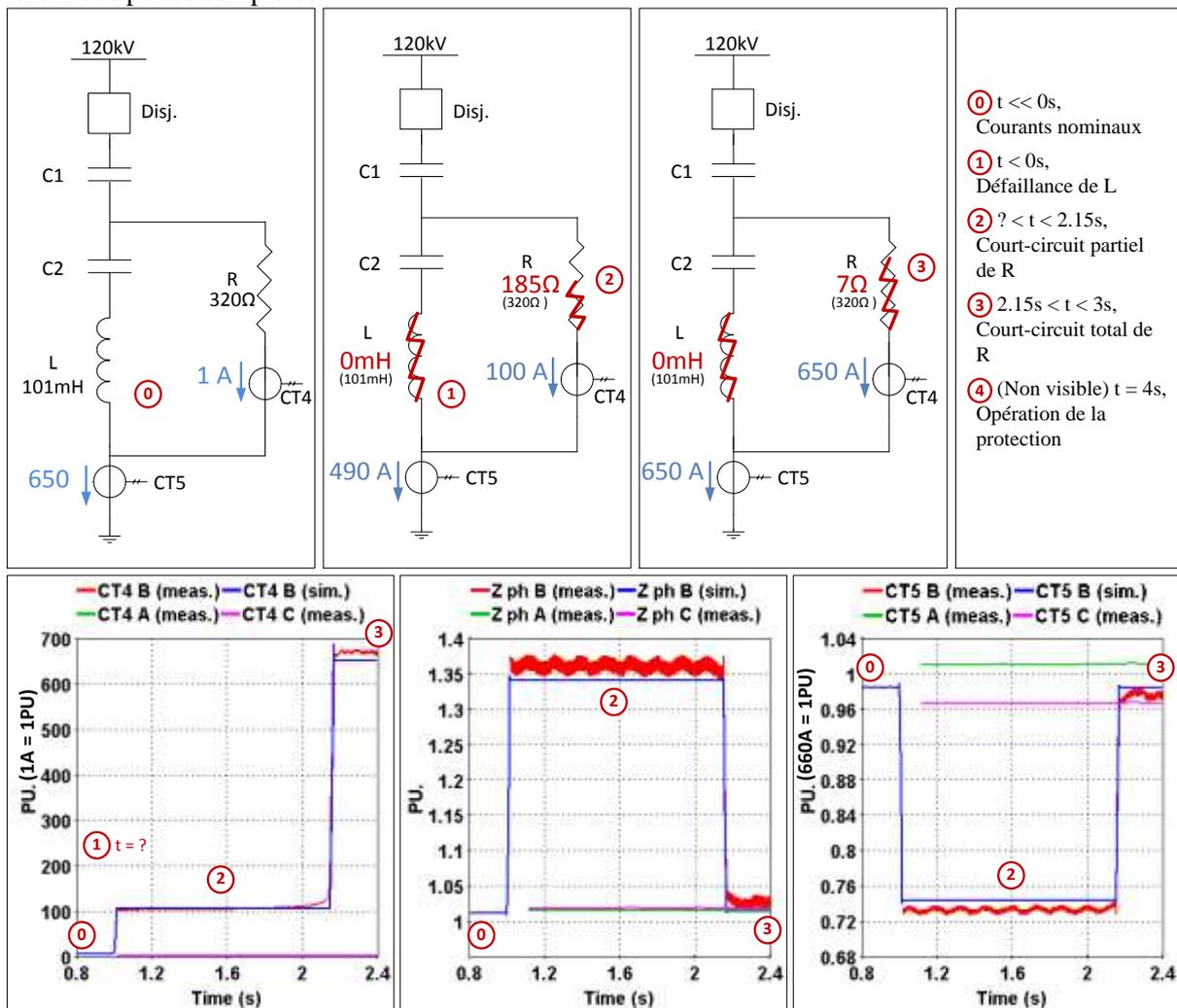


Figure 1: Événement du filtre 2e harmonique de Châteauguay

Le réglage PSR a été initialement mis en place pour couvrir les défaillances majeures de la résistance, mais pas pour ce cas de désyntonisation. La première action corrective consistait à ajouter davantage de seuils à cette protection afin de respecter la capacité actuelle de résistance. La protection contre les surcharges de résistance, utilisant la caractéristique de courbe inverse, ne prend en compte que le courant harmonique et ne résout donc pas ce problème.

Deux approches plus efficaces ont été étudiées et mises en service. La protection d'impédance protège principalement C1, mais peut également détecter la désyntonisation de la branche résonante ( $C2 + L$ ), et ce, en tant que protection de relève. La protection de comparaison de courant fondamental, présentée brièvement dans [3], offre une couverture de protection encore meilleure pour la branche résonante. Elle est basée sur le fait que de faibles courants sont attendus dans la branche résonante étant donné que les composants ne sont pas à leur valeur nominale et n'ont pas un facteur de qualité infini. Ce faible courant peut être estimé en utilisant le courant de filtre total mesuré en charge et les valeurs des composants mesurés hors charge, car les deux branches parallèles forment un circuit diviseur de courant.

Toutefois, l'impédance des composants varie en raison de la température et des dérives de fréquence. Ces aspects peuvent être efficacement compensés par l'utilisation d'une comparaison entre les courants de déséquilibre des trois phases du filtre de la même manière que celle décrite dans la section 2. Il en résulte une protection sensible pouvant servir de protection de relève à la protection contre les déséquilibres de C2 (pont en H) et de protection primaire pour les défauts inter-spikes de L.

### **1.2 Filtre passe-haut 12e harmonique, Outaouais**

Un défaut initié par un oiseau s'est produit sur une branche de filtre passe-haut dont les condensateurs sont montés en configuration de pont en H (Fig. 2). Le défaut consistait à un court-circuit des groupes de condensateurs par formation d'arcs dans la structure durant plus de 1,7 seconde (le temps d'initiation est inconnu). L'ensemble de la batterie de condensateurs a fini par être court-circuitée, entraînant un déclenchement par protection différentielle. Le court-circuit final a d'ailleurs provoqué l'explosion d'un condensateur et l'incinération de toute la batterie. La batterie a dû être reconstruite, signifiant une indisponibilité de plus d'un an.

Un seul scénario de défaillance correspond presque parfaitement aux mesures enregistrées à chaque étape de la défaillance. Ce scénario prouve qu'un courant élevé aurait dû être mesuré par le transformateur de courant de déséquilibre (CT-U: 1,5 A). L'hypothèse la plus probable concernant la cause du défaut implique une des faiblesses de la protection de déséquilibre du pont en H, qui suivent:

- Lors d'un défaut sévère, le courant initial élevé peut entraîner le contournement permanent du transformateur de courant pour la mesure du déséquilibre via l'éclateur passif de protection s'il n'est pas correctement conçu ou un endommagement destructeur de l'appareil de mesure avant le déclenchement du filtre si ce type de dispositif de protection passif ne fonctionne pas correctement.
- Étant donné que le pont en H présente un courant très faible de déséquilibre en fonctionnement normal, toute erreur de connexion ou toute défaillance non supervisée de l'appareil de mesure peut rester longtemps insoupçonné.
- Des défaillances équivalentes dans deux quadrants opposés du pont en H ne peuvent pas être détectées [6].

Dans ce cas particulier, le transducteur CT-U s'est avéré endommagé, possiblement par le défaut initial. La cause fondamentale sera corrigée, si possible (l'enquête est en cours); cependant, ce cas prouve la nécessité d'ajouter une protection de relève qui n'est pas susceptible aux vulnérabilités du pont en H.

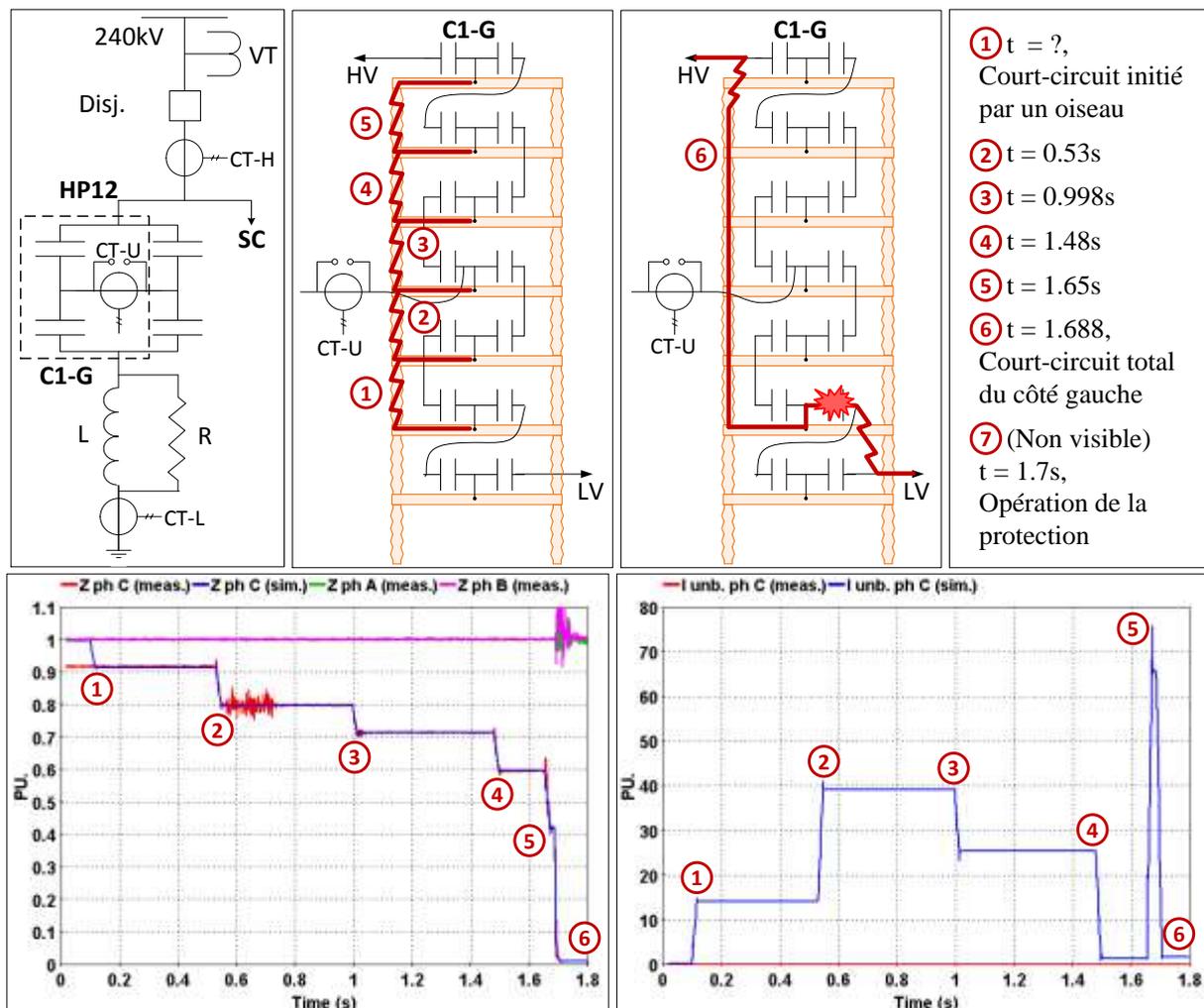


Figure 2: Événement du filtre passe-haut 12e harmonique d'Outaouais

### 1.3 Filtre à résonance double / resyntonisable – 36e/48e/5e harmonique, Radisson

Ce filtre (Fig. 3) est normalement syntonisé aux 36e / 48e harmoniques, mais sera automatiquement resyntonisé au 5e harmonique, en ouvrant le disjoncteur de contournement, s'il y a un excès de 5e / 7e harmonique sur le réseau CA [5]. Au cours des dernières années, ce filtre n'a presque jamais été dans la configuration 5e harmonique. Cependant, en mai 2018, une rare activation de la reconfiguration à la 5e harmonique est passée inaperçue. Après une semaine, des bruits inhabituels ont permis de découvrir que 20 des 80 résistances composant R3 avaient été brûlées. En l'absence de pièces de rechange pour cette résistance, le filtre n'a pas pu être remis en charge. Deux jours plus tard, l'autre filtre du même type s'est avéré avoir l'un de ses deux condensateurs branchés en parallèle formant C2 défectueux. Le transit de puissance sur ce lien CCHT a dû être suspendu pendant une courte période jusqu'à ce que le condensateur puisse être remplacé.

Ce cas est différent de ceux présentés ci-dessus, car le défaut a affecté principalement l'impédance harmonique du filtre et non l'impédance à la fréquence fondamentale. Cela rend plus difficile l'identification d'une défaillance par une protection, compte tenu d'une précision inférieure du dispositif de mesure à des fréquences plus élevées. Une supervision de désyntonisation a été ajoutée pour détecter un déséquilibre dans la somme du courant triphasé des 35e à 37e harmoniques (CT-M) de la branche résonante parallèle (C2 + L2 + R2). La protection d'impédance à ces fréquences ne peut pas être obtenue en raison d'une tension harmonique faible. De plus, une protection d'impédance du 5e harmonique a été ajoutée pour détecter les défaillances dans R3 ou L3. La protection d'impédance considère l'impédance de fréquence fondamentale en mode de fonctionnement normal comme protection de relève pour C1.

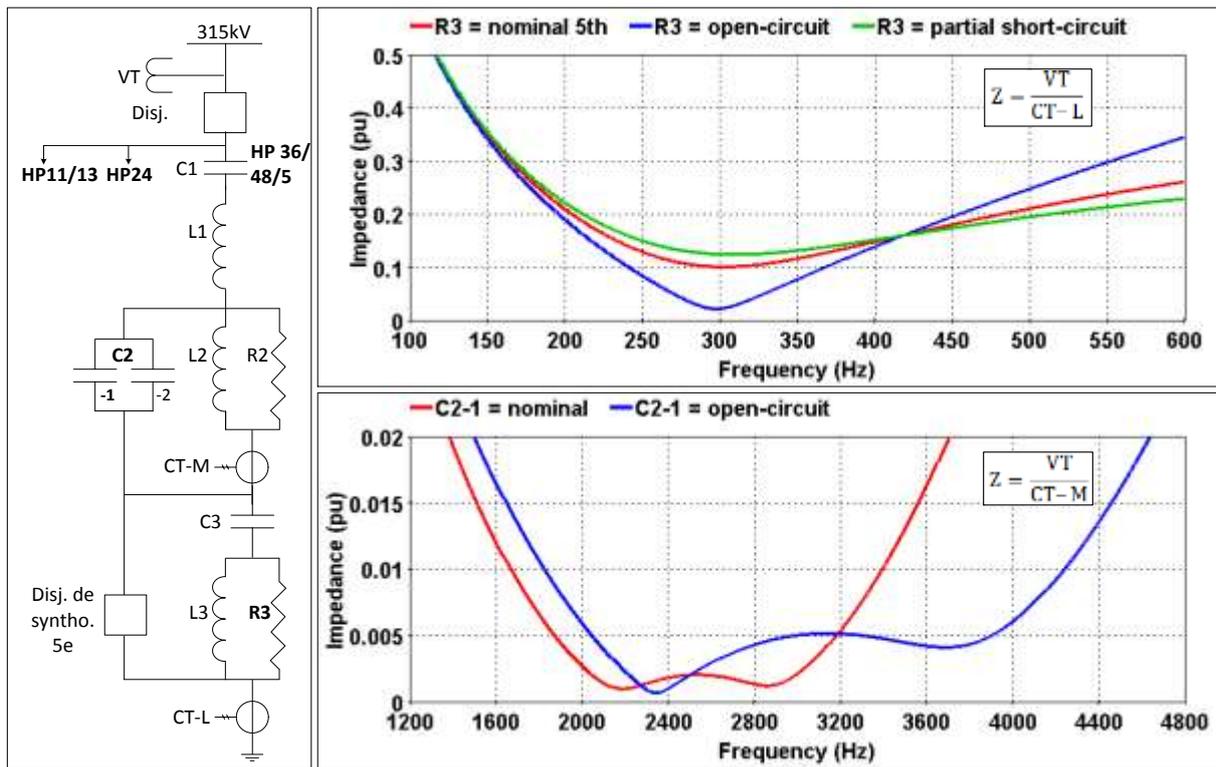


Figure 3: Événement du filtre 36e/48e/5e harmonique de Radisson

#### 1.4 Batterie shunt de condensateurs à fusible externe en configuration double-Y, Châteauguay

Une défaillance diélectrique a entraîné l'explosion d'une unité de condensateur de cette batterie de condensateurs à fusible externe sans connexion de pont en H (Fig. 4). En conséquence, le fusible n'a pas pu fonctionner et un court-circuit de sa rangée a été initié. Jusqu'à cinq groupes de condensateurs en série ont été court-circuités alternativement par un arc électrique dans la structure ou dans les unités de condensateur. De nombreux fusibles ont opéré, car le défaut a duré 22 secondes avant que la protection contre les surintensités à la terre n'isole la batterie défectueuse. De nouveaux condensateurs ont dû être achetés et la batterie a été indisponible pendant presque un an.

La protection principale est basée sur une comparaison de courant avec une autre branche de filtre. Cette protection était désactivée, car la branche de filtre utilisée pour la comparaison n'était pas en charge à ce moment-là. La nouvelle protection d'impédance décrite à la section 2 a été développée notamment pour servir de nouvelle protection principale pour cette batterie de condensateurs shunt. La protection est suffisamment sensible pour afficher une alarme lors d'un événement où une seule unité de condensateur est en circuit ouvert. Elle peut également réagir rapidement au court-circuit d'un groupe de condensateurs.

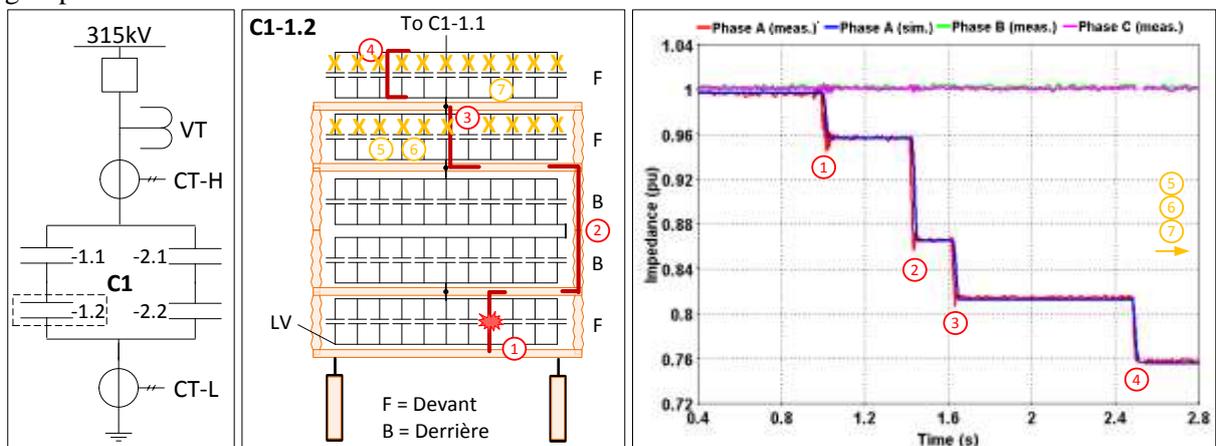


Figure 4: Événement de la batterie de condensateur shunt de Châteauguay

### 1.5 Filtre à syntonisation simple de 13e harmonique, Châteauguay

Un éclair a frappé directement l'une des tours de la batterie de condensateurs (Fig. 5). Ce coup de tonnerre a provoqué la formation d'un arc électrique secondaire entre le bas de la tour C1-1 et la terre. En conséquence, cinq groupes de condensateurs en série dans la tour C1-2 et L ont été contournés par le défaut à la terre. Au bout de 2 secondes, le défaut s'est transformé en un défaut de la barre 315 kV à la terre, entraînant l'explosion de deux condensateurs. Finalement, la protection différentielle a opéré, isolant le filtre.

La protection différentielle n'a pas fonctionné avant le dernier court-circuit en raison de la pente du courant de retenu, fixée à 53%. Ce courant de retenu ( $0,53 * CT-H$ ) a continué d'augmenter au-dessus du courant de défaut à la terre ( $CT\_H-CT\_L$ ), puisque le défaut a contourné jusqu'à 7 des 13 groupes de condensateurs, démontrant ainsi la nécessité d'une pente de 20% à 30%, comme expliqué dans [3]. Ce réglage erroné aurait pu être découvert en simulant des défauts à la terre lors des essais en usine du système, tel que proposé dans [8]. La protection contre les déséquilibres, à l'aide de la comparaison de courant de branches de filtre, s'est désactivée lorsque le courant a beaucoup diminué dans la mesure du courant de branche ( $CT-L$ ) en raison du défaut à la terre. Cette faiblesse de la protection a été corrigée en veillant à ce que le courant des trois phases soit bas avant sa désactivation. L'utilisation d'une protection d'impédance aurait évité la plupart des dommages.

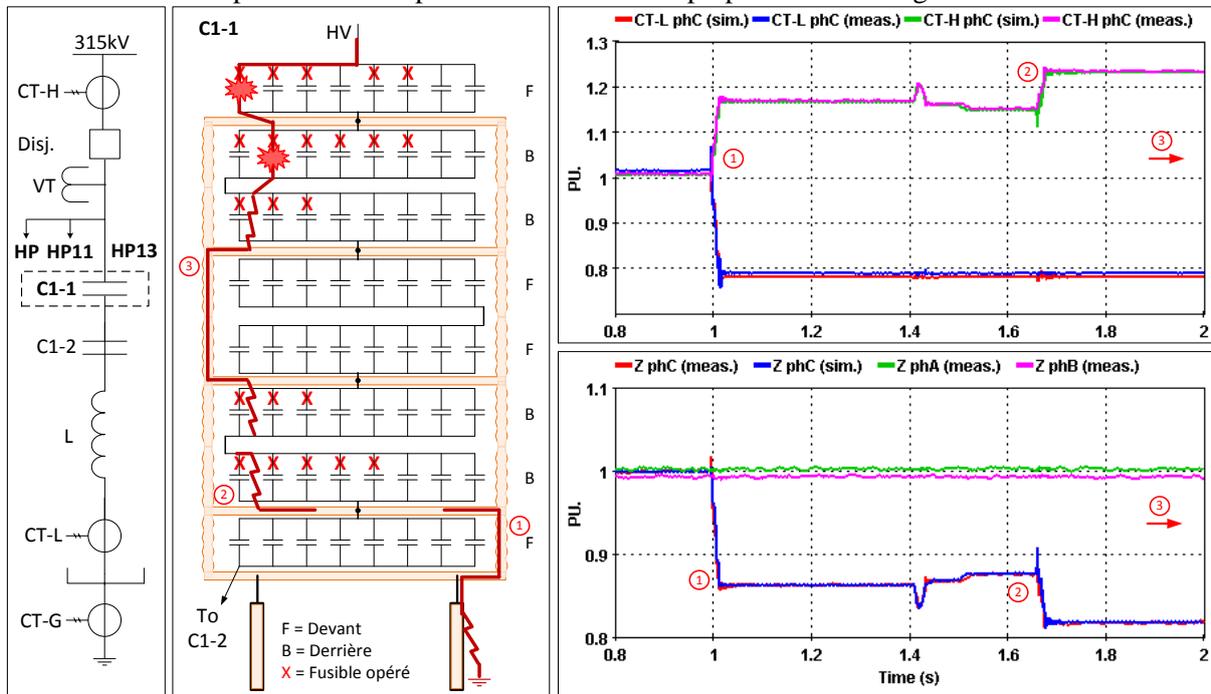


Figure 5: Événement du filtre à syntonisation simple de 13e harmonique de Châteauguay

## 2. PROTECTION BASÉE SUR L'IMPÉDANCE

La philosophie de protection d'impédance est basée sur la loi d'Ohm, qui stipule que l'impédance du filtre de toute phase est égale à la tension à ses bornes divisée par le courant qui y circule.

$$Z_{ph} = \frac{V_{ph} - V_N}{I_{ph}} \quad (1)$$

où  $V_{ph}$  est la tension phase-terre,  $I_{ph}$  et  $Z_{ph}$  sont le courant de phase et l'impédance et  $V_N$  est la tension neutre-à-la-terre.

Lorsque le filtre est solidement mis à la terre, la tension de neutre n'a pas à être mesurée et est considérée comme égale à zéro. Pour les filtres non mis à la terre, si la mesure de tension neutre n'est pas disponible ou si elle n'est pas fiable, la tension et le courant ligne-ligne doivent être utilisés à la place pour calculer l'impédance ligne-ligne.

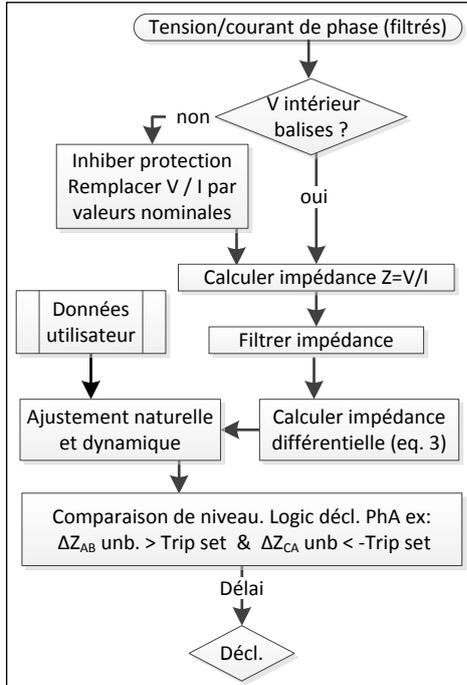
Toute impédance de fréquence fondamentale du filtre est dominée par l'impédance du condensateur haute tension.

$$|Z_{\text{filtre}}| \approx |Z_{\text{Condensateur}}| = \left| \frac{-j}{2\pi f \cdot C(T)} \right| \quad (2)$$

où  $C(T)$  est la valeur du condensateur en fonction de la température et  $f$  est la fréquence du réseau.

L'impédance du filtre variera constamment en fonction de la fréquence et de la température. Ces variations doivent être prises en compte dans les réglages de protection ou compensées par des mesures. Sans utiliser de compensation externe, cette philosophie de protection atteint une sensibilité élevée en calculant l'impédance différentielle entre les phases du filtre, telles que:

$$\Delta Z_{ab} = |Z_a| - |Z_b| \quad \Delta Z_{bc} = |Z_b| - |Z_c| \quad \Delta Z_{ca} = |Z_c| - |Z_a| \quad (3)$$

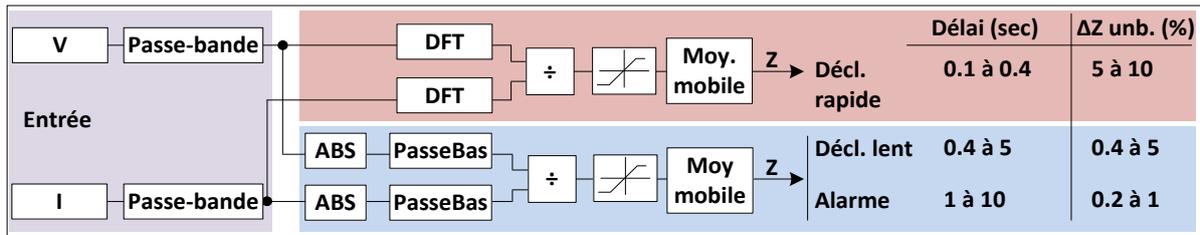


**Figure 6 : Organigramme de la protection différentielle d'impédance**

température ambiante. La philosophie proposée n'a pas cet enjeu, car, suivant la remise en charge du filtre, seulement un court laps de temps est requis pour atteindre une impédance en régime permanent non affectée par une condition commune triphasée. Néanmoins, si l'orientation physique de la batterie de condensateurs n'est pas idéale, des conditions d'exposition au soleil inégales pour les trois phases doivent être compensées de manière dynamique.

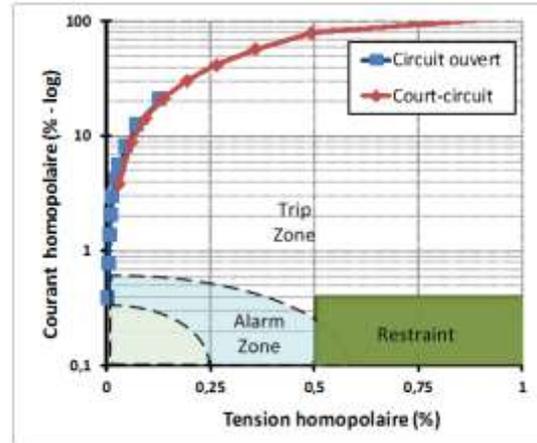
Une situation ambiguë rare pour cette philosophie se produit lorsque deux ou trois phases accumulent lentement des défaillances équivalentes, telles que le même nombre de fusibles ayant opéré dans une batterie de condensateurs à fusibles internes. Pour cette raison, il est recommandé de prévoir un autre seuil rapide de protection pour superviser l'impédance de phase individuelle, mais avec des réglages suffisamment élevés pour prendre en compte les variations d'impédance normales. En tant que protection de relèvement, toutefois, cette philosophie présente une forte complémentarité avec la protection contre les déséquilibres de pont en H, cette dernière présentant des angles morts et des faiblesses liées à des défauts internes affectant la même phase [6], mais non par rapport aux trois phases. La fiabilité de ce système de protection principale et de relèvement est également améliorée par l'utilisation de différents principes et dispositifs de mesure.

Ce schéma de protection d'impédance (Fig. 7) est une protection en régime permanent qui vise exclusivement une seule composante de fréquence. Deux seuils de protection sont nécessaires pour détecter une défaillance d'un seul élément dans une grosse batterie (par exemple, un fusible ouvert) et pour agir rapidement en cas de défaillance importante (par exemple, un court-circuit). L'impédance calculée à partir des valeurs de tension et de courant redressées, étant moins bruyante que la transformée de Fourier directe (DFT) à un cycle, a permis d'obtenir une sensibilité plus élevée. Cependant, la DFT a permis une action de déclenchement plus rapide sur un défaut plus important.



**Figure 7 : Schéma des deux étages de filtrage parallèles de la protection d'impédance**

Contrairement à la protection de distance de lignes, la protection d'impédance de filtre shunt CA peut être désactivée en cas de défaut sur le réseau CA. La chute de tension provoquée par un défaut interne est très faible en raison de la haute impédance d'un groupe de condensateurs par rapport à l'impédance du réseau. Les batteries de condensateurs totalement court-circuitées doivent être déclenchées par une protection différentielle et de surintensité; par conséquent, une plage de tension en régime permanent par phase (par exemple, 0,8 à 1,2 pu) active la protection pour maintenir une sensibilité et une sécurité élevées.



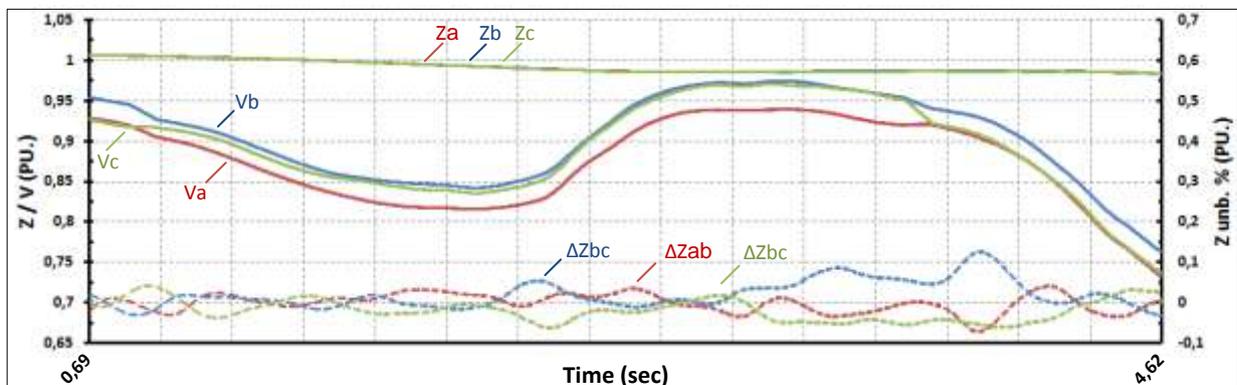
**Figure 8 : Retenue de tension  $V_0$  pour une batterie de condensateurs à fusible externe**

L'inconvénient majeur de cette philosophie de protection est l'utilisation d'une mesure de tension à partir d'un transformateur de tension présentant un taux de défaillance généralement supérieur à celui du transformateur de courant. En particulier, un transformateur de tension capacitif (CVT) peut avoir un condensateur défectueux qui entraîne des mauvaises actions de protection étant donné la tension erronée [7].

En particulier, un transformateur de tension capacitif (CVT) peut avoir un condensateur défectueux qui entraîne des mauvaises actions de protection étant donné la tension erronée [7].

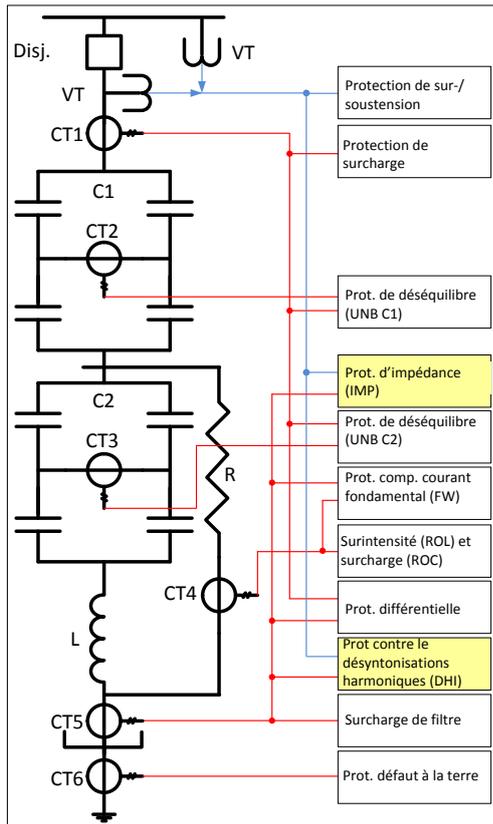
Cette défaillance doit principalement être détectée si une seule mesure de tension est utilisée pour plusieurs filtres shunt. Ce schéma de protection propose d'inhiber l'action de la protection lorsqu'une tension homopolaire élevée ne correspond pas à un courant homopolaire équivalent initialement compensé (Fig. 8), une stratégie renforçant la sécurité.

Comme toute nouvelle protection, cette philosophie de protection a fait l'objet de tests approfondis, en utilisant un simulateur et une réplique en temps réel. Une large gamme de défauts à la terre et de déséquilibre sur les barres et les filtres à proximité ont été simulés. En fonction du délai de déclenchement attendu de la protection, des modèles appropriés de CVT et de TC devraient être utilisés dans la simulation. Il est également intéressant de pouvoir rejouer les événements passés avec la nouvelle protection en place. Ainsi, des défauts internes et externes majeurs (Fig. 9) ont été rejoués avec succès. Ce processus a renforcé la confiance dans la nouvelle protection. Une période d'observation d'un an est également prévue, avec une surveillance continue de l'impédance mesurée et des alarmes.



**Figure 9: Événement réel affectant la tension et la fréquence rejoué à la protection d'impédance**

### 3. PROPOSITION D'AMÉLIORATION À LA PHILOSOPHIE DE PROTECTION



**Figure 10: Exemple d'amélioration de la philosophie de protection pour un filtre de type C**

Comme le montrent les événements présentés, une protection de relèvement efficace à la protection contre les déséquilibres est indispensable pour éviter des dommages importants aux composants de filtre. La figure 10 présente une suggestion d'amélioration de la philosophie de protection complète. Elle inclut la protection d'impédance en tant que protection de relèvement globale. Tous les composants ont une protection primaire et de relèvement efficace. En se basant sur cette philosophie de protection, un exemple de Châteauguay sur la couverture de protection attendue est présenté dans le tableau 1. Le coût de cette philosophie est faible, en particulier si des relais programmables ou un système de protection programmable sont utilisés, car aucun dispositif de mesure supplémentaire est nécessaire.

Une protection contre les désynchronisations harmoniques est proposée, car elle pourrait aider à détecter les composants défectueux ayant un faible impact sur l'impédance à 60 Hz, mais un impact beaucoup plus

Tableau 1: Exemple de couverture de protection basée sur un filtre de type C à Châteauguay

Efficacité de couverture de protection pour défaut interne à tension nom.						
Élément	Protection primaire			Protection de relèvement		
	Protection	Couverture	Délai	Protection	Couverture	Délai
C1	UNB C1	98%	0,1 sec	IMP	98%	0,3 sec
C2	UNB C2	99%	0,1 sec	FW	96%	0,1 sec
R	FW	50%	0,1 sec	DHI	75%	1 sec
L	FW	96%	0,1 sec	IMP	95%	0,3 sec

important sur l'harmonique synchronisé. Si le transformateur de tension a une précision suffisante, l'impédance harmonique peut être calculée pour améliorer la détection d'un défaut et éventuellement ajouter une condition de déclenchement pour les défauts majeurs.

### CONCLUSION

Ce papier utilise des exemples explicites pour montrer la nécessité – dans le cas de filtres fortement utilisés – de mettre à niveau la philosophie globale de protection pour les filtres shunt CA afin de réduire considérablement les dommages et donc la durée des pannes résultant de défaillances internes. La protection d'impédance, qui utilise des stratégies simples, mais efficaces, est l'une des solutions proposées dans ce document. Cette solution flexible, peu coûteuse et à faible charge pour les ordinateurs peut s'appliquer à plusieurs branches de filtres avec les paramètres et les conditions de verrouillage appropriés pour assurer une sécurité maximale de la philosophie de protection.

Les courts-circuits inter-spores des inductances de filtres restent un problème et peuvent nécessiter une protection d'impédance harmonique avec des dispositifs de mesure améliorés.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] IEC TS 60871-3 Edition 2.0. "Shunt capacitors for AC power systems having a rated voltage above 1000V – Part 3: Protection of shunt capacitors and shunt capacitor banks", (2015).
- [2] IEEE Std C37.99-2000. "IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks", (2000).
- [3] CIGRE WG.14.30. "Guide to the specification and design evaluation of AC filters for HVDC systems", (1999).
- [4] A.E. Hammad. "Analysis of Second Harmonic Instability for the Chateauguay HVDC/SVC Scheme". (IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No.1, January 1992, pp.410-415).
- [5] CIGRE WG.B4.37. "Special Aspects of AC Filter Design for HVDC Systems", (2013).

- [6] J.Wang, M. Ibrahim, Z. Gajic, M.M. Saha. "Internal Failure Detection and Protection on Capacitor Banks". (13th International Conference on Development in PSP, Dec. 2016).
- [7] S. Gray, D. Haas, R. McDaniel. "CCVT Failures and Their Effects on Distance Relay". (IEEE, 2018).
- [8] P-A Chiasson, F. Guay, S. Tremblay, N. Verville, A. Pagioro, E. Bengtsson, R. Tanabe. "Madawaska HVDC Refurbishment Upgrade of Control and Protection Functionalities Using Real-time Simulator". (CIGRE, 2017).