

La compensation active de puissance réactive - Une solution efficace aux problèmes associés à la puissance réactive

1.0 Introduction

C'est une pratique universelle et courante d'utiliser des condensateurs comme source de puissance réactive pour neutraliser les charges inductives. Les méthodes classiques utilisées pour commuter ces condensateurs peuvent cependant générer d'importants transitoires préjudiciables à d'autres charges électriques sensibles sur le réseau. Rajoutée à l'incapacité de ces systèmes classiques de mesurer avec précision les contraintes de la charge ainsi que d'y répondre, cette préoccupation de la qualité de l'onde rend cette approche conventionnelle de commutation inadéquate dans le cas des applications comportant des fluctuations de puissance réactive.

Au moment où la déréglementation transforme l'industrie de l'électricité, la gestion de la puissance réactive revêt plus d'importance que jamais. On s'attend à ce qu'elle pousse les forces du marché à établir une tarification telle que les clients ayant un facteur de puissance médiocre devront payer pour leur puissance réactive aussi bien que pour leur consommation de puissance active. Les redevances associées au transport d'électricité devront couvrir la puissance apparente (en kVA) étant donné que la capacité et les pertes de transport seront fonction des kVA et pas seulement des kW. Les préoccupations croissantes concernant la qualité de l'onde, liées aux « charges problématiques » instables, auront également pour conséquence de créer un besoin pour des solutions efficaces dans le domaine de la gestion de la puissance réactive.

2.0 Les principes de base du fonctionnement du compensateur actif de puissance réactive (CAPR)

Au cœur du CAPR, un contrôleur articulé autour d'un microprocesseur prélève en continu les valeurs des tensions de phase et des courants de ligne ou de charge, et met à jour au besoin la séquence des commutations des condensateurs à chaque période de l'onde. En mesurant l'amplitude crête de la composante inductive du courant (à partir de la valeur instantanée de l'onde de la tension phase-neutre correspondante lors de son passage à zéro), le contrôleur détermine la compensation capacitive devant être branchée à chaque phase afin de maintenir le mode d'opération choisi. Le contrôleur filtre toutes les harmoniques présentes sur les formes d'onde de référence de tension ou de courant afin que la compensation soit établie uniquement en fonction des composantes fondamentales ou 60 Hz. Un niveau adéquat de puissance réactive est alors fourni au système durant la période suivante, ce qui donne un temps maximum de réponse égal à une période, soit 16,6 millisecondes, pour un réseau à 60 Hz. La compensation de puissance réactive est réalisée en fonction des valeurs phase-neutre; le contrôle et l'opération sont ainsi indépendants du décalage angulaire et conviennent parfaitement pour satisfaire aux exigences dynamiques de systèmes déséquilibrés. De plus, puisque le CAPR supervise les courants de charge circulant au nœud même du compensateur, il fonctionne uniquement quand des courants de charge sont détectés. De cette façon, on évite les surtensions ou l'auto-excitation.

Cette méthode de compensation réactive garantit une réponse rapide et un maximum de flexibilité au contrôle par échelons de l'écoulement de la puissance réactive dans tout le circuit d'alimentation. Chaque condensateur est pré-charge à la tension crête de l'alimentation et le demeure jusqu'à ce qu'un signal d'amorçage soit appliqué au commutateur à semi-conducteur (thyristor). Les signaux d'amorçage sont synchronisés de telle façon que les commutateurs s'amorcent seulement quand la tension du système atteint son maximum. À cet instant (qui correspond au passage à zéro du courant dans le condensateur), la tension aux bornes du commutateur est presque nulle. Grâce à cette technique, le fonctionnement du CAPR ne génère aucune harmonique et ne produit aucun

par A. Jefferson,

Trench Ltee.

Over the past ten years, thyristor switched capacitor systems have proven their ability to deal with the reactive power management demands of dynamic loads. This article covers the basics of Adaptive VAR Compensation systems, focussing on a Trench pioneered technology.

Au cours de la dernière décennie, les systèmes de condensateurs commutés par thyristor ont démontré leur capacité à subvenir aux demandes des charges dynamiques en termes de puissance réactive. Cet article vous fournira les rudiments des systèmes de compensation active de la puissance réactive, en se basant sur une technologie conçue par « Trench ».

transitoire de commutation. Divers algorithmes de contrôle sont disponibles selon le type et la nature de la charge. L'algorithme optimal et l'agencement des commutateurs sont déterminés en fonction de l'application, du profil de puissance réactive de la charge et des caractéristiques de réponse recherchées.

3.0 Composantes principales

Les principales composantes de puissance à l'intérieur du CAPR sont les éléments capacitifs, les réactances de désynchronisation et les commutateurs à semi-conducteur (figure 1).

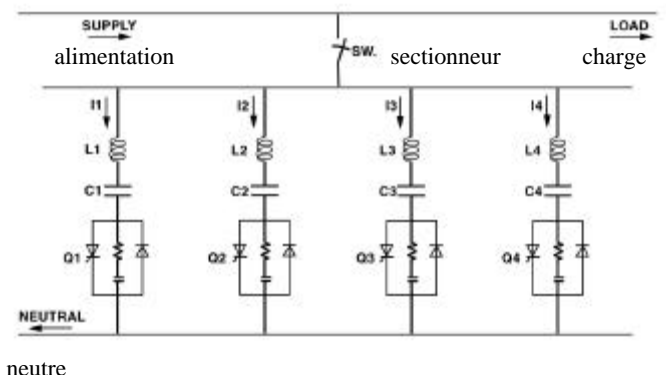


Figure 1 : Schéma unifilaire simplifié d'un CAPR

Les incréments capacitifs du CAPR sont échelonnés selon un paramètre de conception contrôlé que l'on désigne sous le nom de "résolution" (en kVAR). On définit la résolution comme la plus petite puissance réactive que l'on peut extraire du système d'alimentation ou y réinjecter quand le CAPR fonctionne dans ses limites nominales en kVAR. La résolution en kVAR est égale à la moitié de la valeur de l'étage le plus bas (Q1).

Fournie par le CAPR, la puissance de compensation réactive par phase est répartie dans un nombre déterminé d'étages faisant appel à des incré-

ments binaires : par exemple, $Q1*(20,21,22,23)$ pour un CAPR à quatre étages, où $Q1$ est la puissance réactive générée par le premier étage de condensateur. Le nombre d'étages et la valeur de $Q1$ sont établis en fonction des contraintes de l'application. La puissance réactive totale est donnée par $3*Q1*(20 + 21 + 22 + 23)$. Chaque étage de condensateur est muni d'une résistance de décharge qui dissipe l'énergie emmagasinée, réduisant ainsi la tension aux bornes des condensateurs à 50 volts, une minute après le débranchement.

Chaque étage de condensateurs est commandé par un jeu de commutateurs à semi-conducteur qui comprennent chacun un thyristor ainsi qu'une diode connectée en parallèle mais en polarité inversée. C'est par cette diode que les condensateurs de chaque étage restent chargés à la tension de crête de l'alimentation et que circule l'alternance négative du courant du condensateur. Durant la mise sous tension, quand la tension d'alimentation passe par zéro, les diodes sont en conduction permettant ainsi aux condensateurs de se charger à la valeur crête de la tension d'alimentation. À cet instant précis, le courant du CAPR change de sens et les diodes se bloquent. Tous les condensateurs sont alors pré-chargeés et le demeurent jusqu'à ce qu'un signal commande aux thyristors de passer en mode de conduction.

Le CAPR s'acquitte de la compensation réactive tout en réalisant le filtrage des harmoniques qui s'impose sur le réseau avoisinant. Au besoin, chaque étage du CAPR subit une syntonisation appropriée, à l'aide d'une réactance branchée en série, et se trouve ainsi protégé contre tout dommage pouvant résulter de conditions de résonance.

L'expérience en cours d'exploitation et les avantages de cette technologie sont à l'étude dans trois cas concrets; dans chacune de ces applications, on a utilisé avec succès la technologie de CAPR afin de pallier un problème important et bien déterminé de qualité de l'onde. Ces trois applications sont :

- une application de soudage par résistance causant un ennuyeux papillotement de tension;
- une installation portuaire de manutention de conteneurs, subissant une facturation considérablement accrues en raison des fluctuations de charge des entraînements à vitesse variable dont sont dotées ses grues;
- un appel extrêmement élevé de puissance réactive de moteurs à induction linéaire (MIL) de nouvelle génération, servant à propulser des montagnes russes.

4.0 CAS 1 - Soudage par résistance

4.1 Le problème

Les charges associées au soudage par résistance sont parmi les plus difficiles à compenser. Dans cet exemple de problème, une vaste usine utilise deux soudeuses automatisées de 350 kW alimentées en triphasé pour fabriquer des systèmes de rangement en fil d'acier. Les opérations typiques de soudage comprennent la mise en place des fils d'acier des étagères, le crampage et le soudage (figure 2). Une chaîne d'assemblage fait avancer l'étagère et tout le procédé complet est répété environ une fois par seconde. Le cycle de chaleur de la soudure est réglé en fonction du type et des dimensions du matériau à souder. Le réglage se fait en changeant de prise sur le transformateur de la soudeuse et en réglant le circuit d'amorçage des thyristors. Même si chaque soudeuse fonctionne indépendamment, les mesures ont confirmé que toutes deux se chevauchent souvent et soudent en même temps.

Les soudeuses sont branchées phase à phase sur le jeu de barres 480 V et sont amorcées simultanément pendant quelques périodes électriques (de trois à cinq selon le matériau à souder). L'intervalle entre les soudages dure de une à dix secondes environ. Le pire cas d'appel de puissance réactive se présente quand les deux soudeuses se « chevauchent ». Étant donné que la puissance nominale des soudeuses représente une part très importante de l'appel de puissance total, le jeu de barres d'alimentation est le siège d'inflexions de tension considérables et répétées (figure 2). Du côté haute tension, ou point de raccordement commun (PRC), l'entreprise de distribution d'électricité

Figure 2: Les soudeuses automatisées produisent fréquemment des inflexions de tension ainsi que des variations de charge réactive. Cela peut résulter en papillotement, réduction de la qualité des soudures et défaillances de l'équipement de contrôle du procédé. La CAPR atténue à la fois la charge réactive et les inflexions de tension, ce qui améliore la production et prévient les pénalités associées au facteur de puissance.



alimente d'autres clients, qui se plaignent du papillotement de tension.

Même si cette application visait essentiellement à réduire le papillotement de tension, la qualité du processus de soudage constituait également un facteur clé. On se doutait en effet que les inflexions de tension à répétition compromettaient la qualité du soudage et contribuaient à augmenter les coûts de maintenance connexes des soudeuses.

4.2 La solution

Pour satisfaire aux exigences dynamiques de la charge, on a branché un CAPR de 980 kVAR et 480 V au secondaire du transformateur principal, sur le jeu de barres 480 V (Figure 3). On a dimensionné le CAPR en fonction du « chevauchement » des soudeuses, de façon à répondre à l'appel de puissance réactive de ces dernières et atténuer ainsi le papillotement sur le circuit d'alimentation.

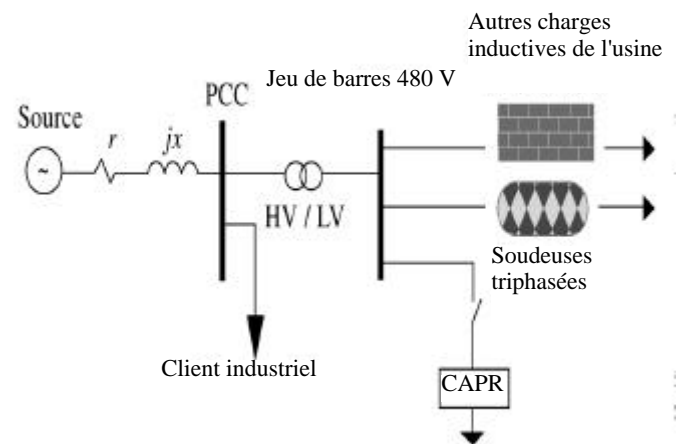


Figure 3 : Schéma unifilaire simplifié

Le CAPR fonctionne depuis mars 1995 et les plaintes concernant le papillotement ont cessé. Depuis sa mise en place, les tests indiquent que la chute de tension maximale a été réduite de 13,5 % à 1,8 % sur le 480 V et que l'amplitude du papillotement s'est limitée à un niveau PST inférieur à 1,0 au point de raccordement commun du fournisseur (tableau 1).

Tableau 1: Niveau de papillotement au point de raccordement commun

Niveau de papillotement de (P_{ST}) en p.u.	Phase A au PRC	Phase B au PRC	Phase C au PRC
Sans CAPR	1,132	1,113	1,132
Avec CAPR	0,897	0,667	0,768

5.0 CAS 2 - Le terminal maritime Seagirt

5.1 Le problème

Le terminal maritime Seagirt est une installation moderne qui a vu le jour en 1990 afin d'assurer la manutention de conteneurs. Alimenté par deux artères à 13,2 kV pouvant s'interconnecter, ce terminal utilise sept grues sur rail pour charger et décharger des navires porte-conteneurs au port de Baltimore, afin de transférer les conteneurs à destination (ou en provenance) des réseaux ferroviaires et routiers. Les moteurs à courant continu de ces grues sont actionnés par des commandes à vitesse variable pourvues de thyristors au silicium. Étant donné que ces sept grues constituent de loin les charges électriques les plus importantes du terminal, l'emploi de ces commandes à thyristors en courant continu dégrade grandement le facteur de puissance, souvent à un niveau inférieur à 40 %. De plus, les incessants départs et arrêts des grues entraînent des fluctuations rapides de la puissance, ce qui complique encore davantage les efforts visant à corriger le facteur de puissance médiocre. Enfin, la distorsion sévère causée par ces commandes à thyristors provoquent d'importants courants harmoniques lors d'appels de puissance élevés.

Comme le terminal Seagirt est un client alimenté à 13,2 kV, une part appréciable de sa facture mensuelle d'électricité est basée sur les plus hautes moyennes de 15 minutes de consommation, mesurées pendant la période de pointe et pendant la période hors pointe. La consommation de Seagirt est facturée selon la plus élevée de deux valeurs, soit la puissance active maximale (en kW) ou 90 % de la puissance apparente maximale (en kVA). Toute valeur de facteur de puissance inférieure à 90 % résulterait donc en frais de consommation additionnels pour le terminal. Pour fins de facturation, dans les pires cas de charge réactive, on a mesuré 4462 kVA, 1772 kW et 39,7 % pour le facteur de puissance. Des facteurs de puissances encore pires n'étaient pas chose rare à des charges plus basses.

5.2 La solution

Pour relever ce défi, la firme BGE s'est jointe à Trench afin de concevoir et d'installer au terminal maritime un système de correction du facteur de puissance par CAPR (figure 4). On a donc pu réaliser une compensation période par période et permettre à ce système de suivre les fluctuations de charge des grues, y compris les transitoires régénératifs provoqués par les opérations de levage et de descente du treuil. En plus de cette mesure correctrice dynamique, le CAPR a réalisé la compensation de charge réactive, sans amener de transitoires additionnels, et a assuré le filtrage des harmoniques essentiel au bon fonctionnement des autres installations branchées à proximité.

Pour réaliser le système de gestion de puissance réactive requis, on a installé deux éléments de 2400 kVAR. Comme les deux artères d'arrivée de la BGE alimentaient chacune sensiblement la moitié des charges du terminal, les deux CAPR ont été branchés sur les côtés opposés de l'interconnexion, par l'entremise de transformateurs 13,2kV/600V, entre les armoires de mesure pour la facturation et les artères de distribution de départ. Les CAPR fonctionnent en tant que systèmes de compensation séparés mais, puisqu'ils réalisent cette compensation au moyen de paramètres situées en aval, il peuvent fonctionner en mode parallèle lorsque l'interconnexion est fermée.

Figure 4 : Réalisée en collaboration, cette installation d'un CAPR fait épargner grosso modo 220 000 \$US annuellement en frais de consommation et de facteur de puissance au terminal maritime Seagirt à Baltimore et libère, par la même occasion, de la capacité de distribution pour son fournisseur, la Baltimore Gas & Electric. (On aperçoit sur la photo l'ingénieur de projet Ed Wilson qui œuvre chez Constellation Energy Source, une division « Énergie en prime » de la BGE).



Les CAPR ont été mis en place au terminal maritime Seagirt en janvier 1997. Le projet a connu un grand succès grâce aux économies annuelles de plus de 200 000 \$US réalisées par le client. Des exemples de mesures (en mode compensé et en mode non compensé) nous montrent les résultats apportés par la compensation active de la puissance réactive (figure 5).

Puissance apparente et puissance active, sans compensation

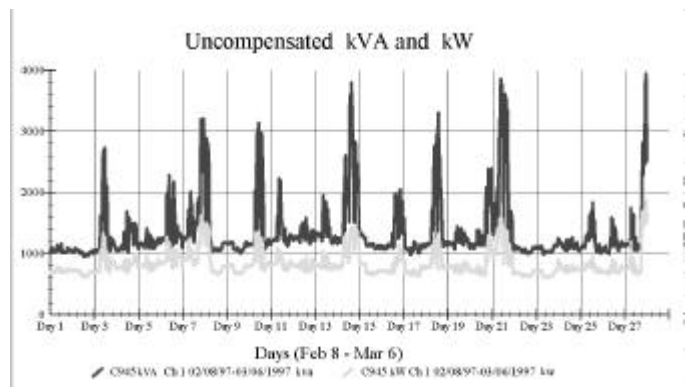
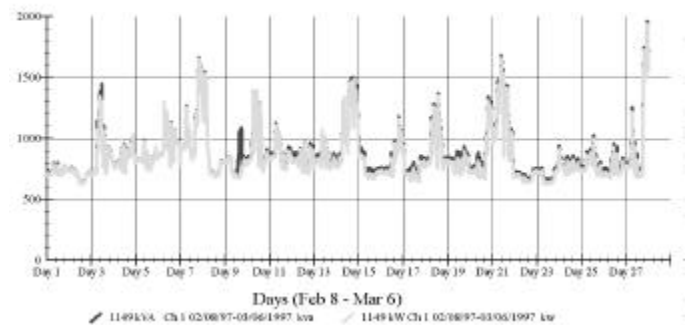


Figure 5: Puissance apparente et puissance active, avec et sans compensation

6.0 CAS 3 - Le parc d'attractions « Six Flags America »

6.1 6.1 Le problème

Les nouvelles générations de montagnes russes s'appuient sur des lanceurs à moteurs à induction linéaire (MIL) pour obtenir des vitesses plus grandes et des sensations encore plus fortes. Dans les montagnes russes classiques, un entraînement à chaîne hisse lentement le train jusqu'au sommet pour lui faire acquérir de l'énergie potentielle. Une fois le plus haut point franchi, c'est la force de la pesanteur qui accélère les voitures. Dans le but d'atteindre des vitesses encore plus grandes sans être obligé d'ériger des structures plus hautes, d'autres systèmes de lancement ont été mis au point; cependant, les systèmes à MIL sont plus simples et présentent des avantages importants pour la commande du train. La flexibilité incontestable des MIL repose sur le fait que ces moteurs exercent une force sans contact physique, ce qui permet d'ajouter de la poussée ou de freiner à n'importe quel point du parcours.

Six Flags America, un parc d'attractions situé à Largo dans le Maryland, s'est doté d'un nouveau manège de montagnes russes entraîné par des MIL, le « Joker's Jinx »MC. Cette application (figure 6) utilise 43 paires de MIL fixés le long de 200 pieds (près de 61 m) de rails horizontaux. Les voitures sont munies d'ailettes légères en aluminium qui jouent le rôle des plaques de réaction d'un moteur. L'accélération qui en résulte est écrasante : de zéro à 60 milles à l'heure (100 km/h) en à peine plus de trois secondes.

Figure 6: Les CAPR procurent la puissance réactive supplémentaire dont a besoin la nouvelle génération de manèges propulsés par des moteurs à induction linéaire, comme ceux que l'on voit ici au parc d'attractions Six Flags.



Ces performances grisantes s'obtiennent au détriment du système d'alimentation électrique, car la pointe d'appel estimée des puissances active et réactive est de 3500 kW et 4100 kVAR respectivement, avec une puissance moyenne de 2400 kW et 2800 kVAR sur une période de seulement 3,77 secondes. Sans compensation réactive dynamique, ces chutes de tensions démesurées dégraderaient la performance du manège et l'on dépasserait les critères de papillotement chez les clients adjacents sur le réseau.

De plus, compte tenu de leurs caractéristiques de rendement en marche, les MIL requièrent au moins 480 V à leurs bornes pour produire une poussée suffisante. Comme la puissance vaut $P=V^2/R$, la puissance fournie par les MIL est proportionnelle au carré de la tension. C'est ainsi qu'une réduction de la tension de 10 % entraîne une baisse de puissance à 81 % de sa valeur nominale. L'incapacité de produire assez de poussée occasionnera une vitesse insuffisante et les passagers se retrouveront pris dans un creux du parcours, les voitures étant incapables de grimper la montée suivante.

6.2 La solution

Trench s'est jointe à Constellation Energy Source pour relever ce défi en aménageant un CAPR de 4100 kVAR et 520 V afin de neutraliser les charges réactives du manège, ainsi qu'un CAPR additionnel de 2400 kVAR (en équipement séparé) pour fournir l'apport nécessaire en tension transitoire sur l'artère de la BGE.

Le CAPR de 4100 kVAR du manège a été branché au secondaire du transformateur l'alimentation de la BGE et on a déterminé sa capacité en fonction de la puissance réactive crête, spécifiée par le fabricant du manège. On a dimensionné le CAPR de 2400 kVAR destiné à l'artère de

façon à ce qu'il puisse maintenir dynamiquement la tension de celle-ci et neutraliser une partie de la chute de puissance active sur la ligne de distribution de la BGE. Les deux éléments fonctionnent en tandem pour soutenir la tension appliquée au manège et en limiter la papillotement.

Ces deux CAPR ont été mis en place en avril dernier et ont fait leurs preuves eux aussi. La tension adéquatement stabilisée a permis l'opération très satisfaisante du manège et on s'est libéré du papillotement indésirable. Parallèlement, l'effet bénéfique sur ce papillotement a pu être confirmé d'une manière tout à fait empirique. En effet, lors de la toute première journée d'essais sur les MIL, aucun des deux CAPR n'avait encore été complètement mis en route et plusieurs abonnés situés à proximité se sont plaints de papillotement. À la fin de la journée cependant, les deux CAPR fonctionnaient et aucune autre plainte n'a été relevée.

Cette réussite est d'autant plus remarquable que la puissance réactive nécessitée par le manège s'est avérée très supérieure aux 4100 kVAR prévus par le manufacturier. En fait, la charge réactive crête était plutôt de l'ordre de 5300 kVAR. Par conséquent, la chute de tension maximale a été légèrement plus élevée que prévu pour une période. En dépit de ce contretemps de dernière minute, la moyenne des écarts de tension durant le lancement du manège se situe en deçà de 2 %, écartant tout papillotement observable chez les abonnés de l'entourage.

7.0 Conclusion

Ces trois cas sont des exemples d'applications au sein du marché de la distribution d'électricité qui ont bénéficié de la compensation active de puissance réactive. Certains de ces segments de marché ont effectivement établi des normes sur l'utilisation de cette technologie (figure 7) afin de maintenir des niveaux optimaux de performance et de qualité de l'onde. Avec plus de 50 applications en Amérique du Nord, la technologie de la compensation active s'est avérée une solution fiable et rentable aux problèmes de qualité de l'onde reliés à la puissance réactive.

Les interrupteurs à semi-conducteur

Les thyristors réagissent instantanément aux commandes du microprocesseur, ce qui permet de réaliser la compensation à chaque période.

Les condensateurs

Dimensionnées selon une échelle binaire, les batteries de condensateurs sont assemblées sur mesure et comportent une résolution en concordance avec les profils de charge.

Le microprocesseur

Celui-ci capte les valeurs de la charge à chaque demi-période. Des condensateurs pré-chargés sont commutés en conduction au moment du passage à zéro du courant qui y circule.

Les réactances à noyau de fer

Ces réactances sont utilisées pour atténuer les harmoniques et éliminer les problèmes reliés à la résonance



Figure 7 : Vue en transparence de la technologie de CAPR

8.0 Lectures complémentaires

- [1]. M.A. El-Sharkawi, M. Dong, T. Huang et A. Szofran. « Development and Field Testing of a 15kV Class Adaptive VAR Compensator », Travaux de l'IEEE sur la distribution d'énergie, vol. 10 no. 4, octobre 1995.
- [2]. E. Wilson, A. Jefferson. « Power Factor Correction using the Adaptive VAR Compensator », Actes de la conférence sur la qualité de l'onde et le coût de l'énergie - conférence PQA, septembre 1997.
- [3]. A. Castanheira, A. Del Rio. « Compensation for Fast Changing

Reactive Loads », septembre 1992.

- [4]. L. Conrad, J. Jatskevich, O. Wasynczu. « A Method for Evaluating Flicker- Reduction Strategies in Power Systems », travaux de l'IEEE sur la distribution d'énergie, publication PE-310-PWRD-0-1-1998, 16 janvier 1998.

À propos de l'auteur

Tony Jefferson est titulaire d'un diplôme en technologie du génie électrique (à George Brown) et d'un diplôme de deuxième cycle en gestion (à l'université d'Athabaska). Il est technologue agréé en génie dans la province d'Ontario et il termine actuellement un MBA pour gens d'affaires.



Au cours de ses 12 années de travail dans le domaine de l'électricité, M. Jefferson a œuvré dans divers champs, soit le génie des réalisations électriques, la qualité de l'onde, la gestion des produits et la commercialisation. Il est gestionnaire des ventes et de la commercialisation à la division des produits de la qualité de l'onde de la société Trench Limitée, où il est responsable de l'élaboration d'un ensemble de solutions à des problèmes reliés à la qualité de l'onde, y compris le compensateur actif de puissance réactive.

M. Jefferson aime passer le plus de temps possible en compagnie de sa femme et de leurs trois jeunes enfants, chez lui à Markham, en Ontario. Il occupe ses temps libres à la lecture, au jardinage, au camping et à la pêche. Il est membre associé de l'IEEE depuis 1990.