



Des réseaux électriques plus fluides

FACTS : une réponse innovante et flexible aux besoins de transit de puissance

Rolf Grünbaum, Johan Ulleryd

Les pannes de courant qui ont frappé les Etats-Unis et l'Europe ont sensibilisé les pouvoirs publics, les médias et les populations à la nécessité de sécuriser et de fiabiliser l'approvisionnement en électricité et au sous-investissement dont souffrent d'innombrables réseaux électriques. Qui plus est, l'incertitude quant aux rôles et aux règles qui s'imposent aux différents acteurs de la filière électrique dans un contexte de dérégulation n'a fait qu'exacerber le problème. Enfin, la pénétration rapide de l'éolien dans les réseaux électriques de nombreuses régions du monde risquant de déstabiliser ces derniers, leur robustesse devient un enjeu majeur.

Traditionnellement, le renforcement des ouvrages de transport impliquait la construction de nouvelles lignes électriques, solution souvent coûteuse et impopulaire.

A ce jour, il ne fait plus aucun doute que la capacité de transit du réseau électrique dans les meilleures conditions de sûreté repose sur la stabilité angulaire et de la tension plutôt que sur ses limites physiques. Ainsi, au lieu de construire de nouvelles lignes, les exploitants de réseaux privilégient le développement de technologies ou de dispositifs visant à concilier deux objectifs : renforcer la capacité de transit des ouvrages existants tout en maintenant, voire améliorant, leur stabilité.

L'appellation FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) rassemble des appareils qui répondent à ces besoins de capacité tout en offrant plus de flexibilité.

En théorie, la puissance transmissible sur une ligne électrique est limitée par l'échauffement maximal de ses conducteurs. Dans la pratique, toutefois, avant d'atteindre cette limite thermique, le réseau est le plus souvent confronté à des problèmes de stabilité, de variations de tension et de transits en boucle.

Les variations de tension dans les réseaux de transport en courant alternatif

Flexibilité

(c.a.) ne peuvent sortir d'une fourchette de 5 à 10%. La stabilité est maintenue lorsque les défauts majeurs qui apparaissent dans le système électrique ne remettent pas en cause la capacité de transit du réseau de transport.

Les transits en boucle surviennent souvent dans un système électrique comptant plusieurs lignes d'interconnexion du fait des lois élémentaires qui définissent les flux de courant par l'impédance plutôt que par la capacité de transit des lignes. En d'autres termes, le transit de puissance entre les points A et B d'un réseau n'emprunte pas forcément le trajet le plus court et le plus direct; au contraire, il est incontrôlable, cherchant à suivre tous les chemins électriques possibles du réseau et surchargeant les lignes avec des niveaux de tension et d'échauffement problématiques.

Toutes ces contraintes font qu'une ligne de 400 kV, par exemple, n'est en général pas nécessaire pour acheminer plus de 450–500 MW sur une distance «raisonnable» sans actions de sécurité spécifiques. Toutefois, d'un point de vue purement thermique, la ligne est surdimensionnée pour transporter cette quantité d'énergie.

Renforcer la flexibilité des réseaux

Les dispositifs FACTS sont précisément conçus pour s'affranchir rapidement et «intelligemment» de ces contraintes et permettre aux planificateurs, investisseurs et opérateurs d'atteindre leurs objectifs sans suréquiper le réseau.

Les FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins – répartition de puissances, compensation de puissance réactive, transits en boucle – ou réaliser des fonctions auxiliaires comme l'amortissement des oscillations. Ils sont montés en shunt ou en série et, dans certains cas, combinent un montage shunt-série. Parmi les dispositifs shunt, citons les compensateurs statiques de puissance réactive (SVC) et les SVC Light® (ou STATCOM). Les dispositifs en série incluent les condensateurs série fixes (CS) et les condensateurs série commandés par thyristors (TCSC).

Tous constituent une solution très économique pour tirer le meilleur

parti de la capacité de transit des lignes électriques avec un maximum de disponibilité et un minimum de pertes en ligne et d'impact environnemental.

Amélioration de la qualité de l'énergie électrique

Les phénomènes qui nuisent à la qualité de l'énergie électrique sont de différentes natures: creux de tension, claquages, pollution harmonique, papillotement (*flicker*), fluctuations, etc. Les creux de tension, par exemple, sont le fait de défauts sur le réseau provoqués par les coups de foudre, le claquage d'isolant ou des arcs électriques. Quelle que soit l'origine de ces perturbations, il est primordial de maintenir ou d'améliorer la qualité de l'électricité qui transite sur les réseaux de transport et de distribution. Sur ce plan, les FACTS ont amplement fait leurs preuves comme le montre l'exemple suivant.

Prenons une région ou un pays qui décide de construire une aciérie indispensable à son développement, le choix de sa localisation étant fonction du potentiel de croissance économique et de l'emploi. Or, comme souvent, ce choix fait abstraction de la capacité du réseau électrique à satisfaire les besoins du site industriel. Le réseau est alors fragilisé avec des perturbations qui se propagent et affectent d'autres sites qui lui sont raccordés.

Dans ce cas, les FACTS peuvent confiner ou neutraliser les perturbations électriques comme les creux et les variations de tension, le flicker, la pollution harmonique et le déséquilibre de phases dans les systèmes triphasés. De surcroît, les performances économiques du ou des procédés industriels en question seront améliorées.

Transport c.a. sur de longues distances

Pour le transport c.a. sur de longues distances, le synchronisme de même que la stabilité de la tension, surtout lors des défauts sur le réseau, doivent impérativement être maintenus. Grâce à la compensation série, le transport massif et sûr de c.a. sur des distances supérieures à 1000 km est désormais réalité. Avec l'avènement de la compensation TCSC, les réseaux alternatifs

ont énormément gagné en capacité et en flexibilité.

Les compensateurs TCSC sont particulièrement efficaces lorsque des axes de transfert longs et fragiles interconnectent des pays ou des régions très distantes au sein d'un pays; la capacité de transit y est restreinte du fait de la limitation de la stabilité dynamique des liaisons. Dans un réseau de transport, les compensateurs TCSC:

- répartissent les transits de puissance;
- améliorent la stabilité dès la première oscillation suite à un défaut, l'amortissement des oscillations de puissance et la stabilité de la tension;
- suppriment les risques de résonance hypodynamique.

Compensation série commandable

Un condensateur série inséré sur un réseau introduit une inductance inverse à celle de l'inductance de ligne, diminuant l'inductance de transport équivalente et augmentant la capacité de transit en régime établi.

Avec un TCSC, il est possible de faire varier le degré de compensation de la ligne à la fréquence réseau (50/60 Hz). La vitesse de variation n'est limitée que par le temps de réponse de l'électronique utilisée dans le compensateur TCSC. Cela signifie que les compensateurs TCSC peuvent aujourd'hui être utilisés dans des applications auparavant exclues, notamment la répartition des transits de puissance après incident et l'amortissement des oscillations de puissance active.

Les TCSC associent des selfs commandées en parallèle avec les gradins d'une batterie de condensateurs ■. Cette association autorise une régulation sans à-coups de l'inductance capacitive de la fréquence fondamentale sur une large plage. La batterie de condensateurs de chaque phase est montée sur une plate-forme assurant une isolation complète à la terre. La valve à thyristors comprend des thyristors haute puissance raccordés en série. L'inductance est une inductance dans l'air alors qu'une varistance métal-oxyde (MOV) est raccordée au condensateur pour prévenir les surtensions.

Amortissement des oscillations de puissance en Inde

En Inde, deux compensateurs TCSC ont été insérés sur une ligne d'interconnexion à deux circuits 400 kV entre les régions orientale et occidentale du réseau national. La ligne d'interconnexion c.a., longue de 412 km, permet d'acheminer l'excédent d'énergie électrique de la région orientale vers la région occidentale du pays en régime normal de fonctionnement et en régimes perturbés.

Les TCSC amortissent les oscillations de puissance inter-zones entre les deux régions. Sans ces dispositifs, le transit de puissance sur la ligne d'interconnexion serait très probablement limité. Des simulations dynamiques, visant à démontrer l'efficacité des TCSC dans l'amortissement des oscillations de puissance, furent réalisées en phase de conception, efficacité confirmée ultérieurement lors des phases de mise en service et d'essais. La photo de la page 21 illustre le site d'installation des TCSC.

Compensation statique de puissance réactive

Un compensateur statique de puissance réactive (SVC) est constitué d'inductances commandées par thyristors (TCR), de condensateurs commutés par thyristors (TSC) et/ou de condensateurs fixes accordés sur des filtres. Deux configurations types très répandues sont illustrées en 2a et 2b.

Un TCR associe une inductance fixe en série à une valve à thyristors bidirectionnelle. Les inductances du TCR sont, par principe, des inductances dans l'air isolées dans la fibre de verre et imprégnées de résine époxyde.

Un TSC comprend une batterie de condensateurs en série avec une valve

à thyristors bidirectionnelle et une inductance d'amortissement qui fait également fonction de désaccordeur de circuit pour éviter toute résonance parallèle avec le réseau. Le thyristor connecte et déconnecte la batterie de condensateurs pour un nombre entier de demi-périodes de tension appliquées. Le TSC n'est pas commandé en phase et ne génère donc aucune distorsion harmonique.

Un compensateur SVC complet, constitué d'un TCR et d'un TSC peut être conçu de différentes manières pour satisfaire des critères et besoins spécifiques du réseau. Par ailleurs, une compensation lente de puissance réactive (au moyen de condensateurs commutés mécaniquement) peut aisément être intégrée au dispositif si nécessaire.

La compensation rapide de puissance réactive des SVC en fait un dispositif parfaitement adapté à :

- *la stabilisation statique et dynamique de la tension*, augmentant la capacité de transit de puissance et réduisant les variations de tension ;
- *l'amélioration de la stabilité synchrone* donnant une stabilité accrue aux transitoires et un meilleur amortissement du système électrique ;
- *l'équilibrage dynamique des charges asymétriques*.

Exemple d'application d'un SVC pour le réglage de tension d'un centre de charge

Dans les centres de charge, les compensateurs SVC servent principale-

ment à atténuer les effets des perturbations du réseau (ex., courts-circuits et/ou perte de lignes importantes) sur les charges sensibles. Ces centres de charge peuvent être situés à l'extrémité d'un réseau radial ou maillé. Dans les deux cas, ils sont éloignés des grosses centrales de production. Ainsi, par exemple, un SVC est inséré sur un réseau maillé à proximité d'Oslo, au sud de la Norvège. D'une puissance de ± 160 MVAR, il est raccordé à une ligne 420 kV dans un poste au sud-ouest de la ville.

En cas d'incident sur le réseau de transport, le SVC détecte la chute de tension qui s'ensuit sur la ligne 420 kV. Pendant et après le défaut, le SVC veille à ce que les charges dans la capitale norvégienne ne subissent pratiquement aucune variation de tension. En d'autres termes, le SVC protège la ville des conséquences des défauts distants sur le réseau.

SVC Light®

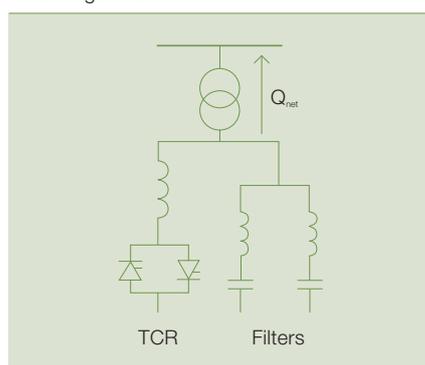
SVC Light® est un compensateur statique de type STATCOM. Concrétisant le mariage de la technologie des convertisseurs à source de tension et celle des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), il optimise la qualité de l'énergie électrique et le transit de puissance sur les sous-réseaux de transport et de distribution. Ses atouts sont nombreux : faible encombrement, réponse dynamique très rapide et aptitude à filtrer activement les déséquilibres de phase et les harmoniques indésirables.

Un SVC est une source de tension entièrement commandable qui adapte

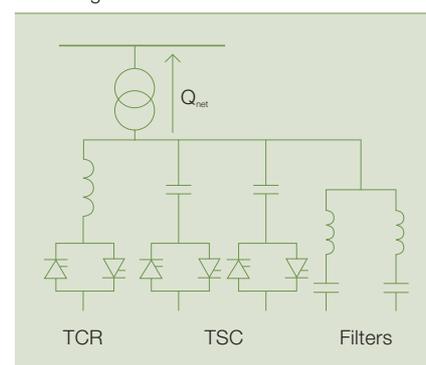
2 Configurations de SVC pour la répartition de puissance réactive dans les réseaux électriques

Q_{net} = Transit net de puissance réactive sur le réseau

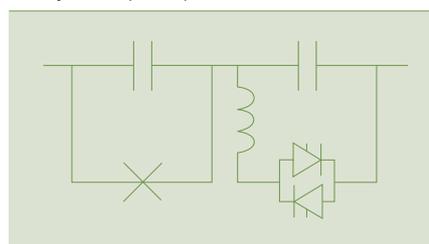
a Configuration TCR



b Configuration TCR-TSC



1 Condensateur série commandé par thyristors (TCSC)

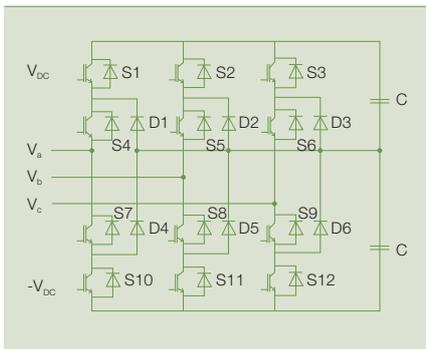


Flexibilité

la tension du réseau en phase et en fréquence. Son amplitude peut être commandée instantanément et de façon continue, ce qui permet de l'utiliser pour la répartition de puissance réactive. Le SVC est connecté au bus

3 Configuration de base d'un SVC à trois niveaux

S1-12 = empilage d'IGBT
D1-6 = empilage de diodes



4 Valves du système SVC Light®



5 Dispositif SVC Light® de ±95 MVar de la centrale de Austin Energy (Texas)



du système par l'intermédiaire d'une petite inductance.

Un compensateur SVC à trois niveaux est illustré en 3. Un côté du SVC est raccordé à une batterie de condensateurs qui fait fonction de source de tension continue. Le convertisseur délivre en sortie une tension alternative variable en connectant le pôle positif, le neutre ou le pôle négatif de la batterie de condensateurs directement sur une des sorties du convertisseur.

La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet d'obtenir une tension alternative quasi sinusoïdale sans filtrage des harmoniques, conférant non seulement un dispositif plus compact, mais également robuste face à la pollution harmonique.

Chaque bras du convertisseur intègre quatre valves à IGBT et deux valves à diodes. Ces valves sont construites par empilage des composants avec radiateurs intercalés et par application d'une pression externe sur chaque empilage 4.

SVC Light® : l'atout flexibilité des réseaux

L'opérateur américain *Austin Energy* projetait de démanteler une ancienne centrale au fioul et au gaz à proximité du centre-ville d'Austin au Texas. La centrale à quatre tranches de Holly était maintenue en fonctionnement pour stabiliser la tension sur le réseau de transport et produire de l'électricité. Toutefois, sa mise hors service sans source dynamique et fiable de puissance réactive aurait dégradé la stabilité de la tension du réseau de transport. Une solution devait être trouvée pour contrer ce problème tout en satisfaisant d'autres exigences : rétablir rapidement le fonctionnement sur creux de tension aux basses tensions, pallier les inconvénients du site, réduire le niveau de champ électromagnétique et de nuisance sonore.

La technologie FACTS fut une des solutions envisagées.

Une première étude montra que ces exigences pouvaient être satisfaites par un STATCOM compact, dispositif particulièrement bien adapté à une

compensation totale du courant aux très basses tensions (ex., lors d'un creux de tension) et des déséquilibres. De surcroît, il s'agit d'un équipement peu encombrant et relativement simple à blinder. Au bout du compte, un dispositif SVC Light® de ±95 MVar 5 s'avéra la meilleure solution.

Le système de commande du SVC Light® est par nature capable de connecter et déconnecter trois batteries de condensateurs fixes raccordées à une ligne 138 kV du voisinage. Ces batteries constituent donc la principale source de puissance réactive pendant les variations lentes de régime, laissant le SVC Light® prêt à réagir rapidement pour une compensation dynamique de puissance réactive lors des perturbations réseau.

Le système SVC Light® a pleinement prouvé son efficacité au cours des violents orages qui frappèrent la région est du Texas en novembre 2004. Plusieurs événements entraînèrent de fortes chutes de tension dans le réseau, obligeant le SVC Light® à fonctionner à ses limites de puissance et contribuant pour beaucoup à rétablir la tension du système.

Les solutions FACTS permettent aux exploitants de réseaux électriques d'augmenter la capacité de transit de leurs ouvrages existants tout en maintenant ou en améliorant les marges d'exploitation indispensables à la stabilité des réseaux. En conséquence, une quantité maximale d'électricité peut parvenir aux consommateurs avec un impact minimal sur l'environnement; les projets sont plus rapides à mettre en œuvre et moins coûteux que la construction de nouvelles lignes de transport ou centrales de production. Les FACTS répondent aux besoins de flexibilité en agissant rapidement et simultanément sur plusieurs paramètres du réseau comme la répartition des puissances active et réactive.

Rolf Grünbaum

Johan Ulleryd

ABB Power Technologies AB
Västerås (Suède)
rolf.grunbaum@se.abb.com
johan.ulleryd@se.abb.com