


Questions d'équilibre

Les grands réseaux de transport adoptent *HVDC Light*®
Jiuping Pan, Reynaldo Nuqui, Bertil Berggren, Stefan Thorburn, Björn Jacobson



Vous êtes-vous jamais demandé comment un funambule parvenait à déambuler sur son fil ? Il doit non seulement garder l'équilibre mais aussi tenir compte des oscillations de la ligne engendrées par le moindre de ses mouvements. Une façon de résoudre ce dilemme est d'avancer très lentement de sorte que ces oscillations ne dépassent jamais un niveau critique. Une méthode plus perfectionnée consisterait pour notre acrobate à jongler avec ces phénomènes oscillatoires ou à les contrebalancer pour maintenir sa stabilité et progresser mieux et plus vite. Une plus grande souplesse de réaction autorise en effet un meilleur usage de la dynamique globale du système.

Quel rapport, direz-vous, avec la conduite d'un réseau électrique ? Le transport d'électricité est lui aussi confronté à de gros problèmes de stabilité. Pour y remédier, la parade consiste traditionnellement à maintenir la charge en dessous des niveaux prescrits pour éviter, à l'image de notre funambule, tout risque de déséquilibre. Or l'ouverture des marchés de l'électricité et l'essor des énergies renouvelables (EnR) changent la donne en allongeant les distances de transport. Grâce à la solution *HVDC Light*® d'ABB, il est désormais possible d'améliorer la capacité de transit mais aussi d'amortir en dynamique les oscillations du réseau pour le stabiliser.

Transport et distribution électriques

De tout temps, les réseaux électriques ont été majoritairement conçus et bâtis pour acheminer l'électricité délivrée par les centrales aux clients de la région. Ces groupes de production étaient donc souvent implantés en périphérie des grandes villes, l'architecture du réseau reflétant fidèlement cette géographie. Aujourd'hui, de plus en plus d'électricité est produite loin des agglomérations et donc contrainte de parcourir de grandes distances. Cette évolution a de nombreuses causes, l'une d'elles étant l'usage accru des EnR qui sont souvent produites dans des lieux reculés. Elle est aussi due à la libéralisation des marchés énergétiques, qui favorise le recours aux unités de production ayant le coût différentiel le plus faible. Les réseaux à haute tension (HT) se heurtent alors aux exigences du « grand transport » et leurs gestionnaires cherchent les moyens de lever les obstacles entre les lieux de production éloignés et les centres de consommation.

L'exploitation de ces réseaux HT s'écartant de plus en plus de leurs règles de conception, certains couloirs d'énergie doivent acheminer davantage de puissance et fonctionner toujours plus près de leurs limites de stabilité et de sécurité. Dans le cas des EnR, l'enjeu est dans la volatilité de la pro-

duction, due à l'intermittence intrinsèque de ces ressources, et l'imprévisibilité de la fourniture. De nouvelles technologies sont donc explorées pour combler ces lacunes tout en préservant la qualité de la conduite et la stabilité du réseau.

L'écoulement de puissance du réseau électrique, naturellement régi par les lois de la physique, obéit de plus en plus à des objectifs économiques. Outre les critères de fiabilité, le développement des futures infrastructures de transport doit aussi tenir compte des contraintes environnementales et des exigences de l'efficacité énergétique.

L'intégration de systèmes évolués HVDC Light^{®1)} dans les réseaux de transport régionaux ouvre de nouvelles perspectives aux applications électriques « intelligentes » à mesure que ces solutions améliorent la sécurité et la performance en facilitant le pilotage du système.

Un transport vieillissant

De plus en plus encombrés, les réseaux de transport ne favorisent guère les interactions et échanges d'énergie entre marchés voisins ou l'optimisation des moyens de production. Il y a « congestion » quand les flux de puissance réels ou programmés, transitant

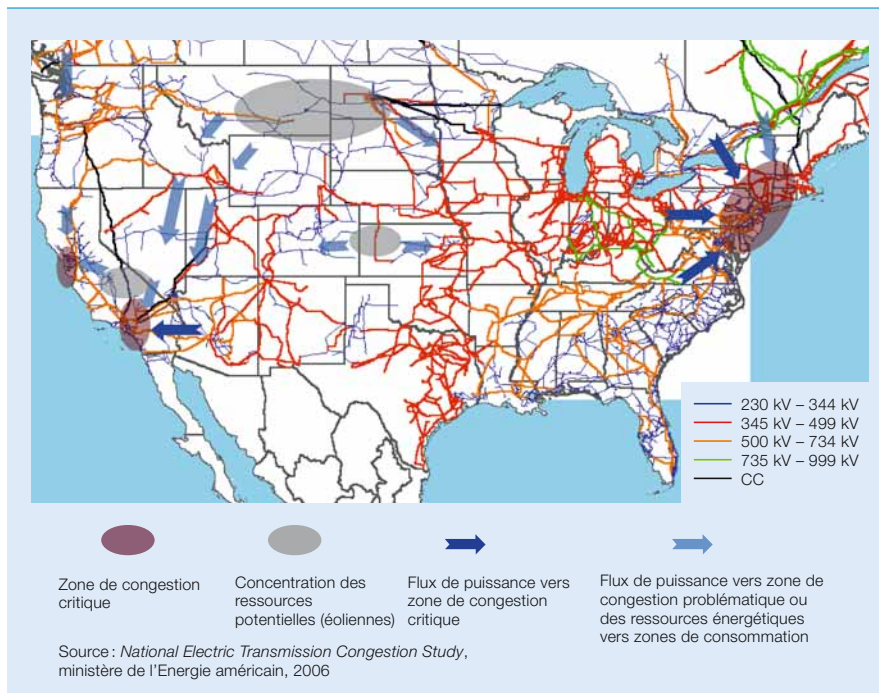
sur des axes stratégiques, passent en dessous des niveaux souhaités, à cause des restrictions de capacité ou de sécurité. Lorsque ces contraintes limitent la quantité d'énergie fournie aux consommateurs par les unités de production les plus souhaitables, les opérateurs de réseau doivent faire appel à des groupes plus chers ou moins efficaces.

Qui plus est, les réseaux électriques sont approvisionnés par un nombre croissant d'EnR à grande échelle. L'intégration de ces sources aléatoires et fluctuantes, aggravée par la faiblesse des interconnexions dans les zones « historiques » de production, pose de nouveaux défis à la gestion sécuritaire du réseau. L'Europe, notamment, compte plusieurs projets bien avancés de mégaparcs éoliens marins impliquant un transit d'énergie fiable et robuste pour rejoindre le littoral. Aux Etats-Unis, le transport électrique est désormais reconnu comme le premier obstacle à une percée de l'éolien et à son objectif d'assurer 20% de la fourniture électrique du pays, à l'horizon 2025 **■** : la modernisation de ce réseau vétuste est donc le préalable au développement d'une énergie durable.

HVDC Light, robuste et économique

L'augmentation des capacités de fourniture d'énergie par l'ajout de lignes en courant alternatif (CA) est de plus en plus problématique sur les réseaux CA maillés, déjà fortement chargés. En l'occurrence, la question des nuisances environnementales et paysagères soulève une contrainte majeure qui rend souvent le déploiement du réseau de lignes aériennes impossible. En outre, il n'est pas rare que les possibilités d'extension CA, en aérien comme en souterrain, soient entravées par les problèmes d'instabilité transitoire ou de tension, le risque d'accroissement des niveaux de court-circuit, la faible réactivité du réseau et la présence de flux parallèles inacceptables. Autre obstacle, le coût de l'emprise au sol des nouveaux couloirs de lignes traversant les zones urbaines. Sans oublier la contrainte forte d'adapter efficace-

■ Aux Etats-Unis, la congestion des lignes de transport est le premier frein à l'expansion de l'éolien.



Note

¹⁾ Nom commercial du système de transport CCHT d'ABB reposant sur des convertisseurs à source de tension.

ment le transport à la variabilité de la consommation et à l'intermittence de la production. Depuis son lancement en 1997, HVDC Light s'impose de plus en plus comme une solution de choix **2** pour accroître les puissances transitées et fiabiliser l'intégration des EnR à grande échelle, tout en levant les verrous environnementaux et techniques.

Fondements technologiques

HVDC Light est une nouvelle génération de liaison en courant continu à haute tension (CCHT), qui s'appuie sur des convertisseurs électroniques à source de tension commandés en modulation de largeur d'impulsions (MLI) haute fréquence à l'aide de transistors bipolaires à grille isolée « IGBT » [1]. Ce dispositif garantit un réglage rapide et indépendant des puissances active et réactive. Les systèmes HVDC Light s'accommodent de liaisons longue distance, tant souterraines que sous-marines. Nombreuses sont leurs vertus écologiques: lignes invisibles (car enfouies), champs électromagnétiques

neutres (nettement inférieurs au champ terrestre) ou statiques (non rayonnants), câbles secs (absence d'huile) et stations de conversion compactes. Leurs plages de puissance ont vite progressé pour atteindre aujourd'hui 1 200 MVA, en configuration symétrique unipolaire sur liaisons câblées **3**, et jusqu'à 2 400 MVA, en bipolaire sur lignes aériennes [2]. Autre attrait: on inverse le transit de puissance en changeant le sens du courant et non la polarité de la tension, ce qui permet de multiplier facilement les stations d'extrémité. Ces dernières peuvent se raccorder en différents points d'un seul ou de plusieurs réseaux alternatifs: on obtient ainsi un système HVDC Light à extrémités multiples, de topologie radiale, bouclée ou maillée **4**.

En bonne intelligence

HVDC Light est idéal pour les applications intégrées sur réseaux CA maillés. Parmi ses spécificités, citons la souplesse de réglage du flux de puissance et le maintien dynamique de la tension

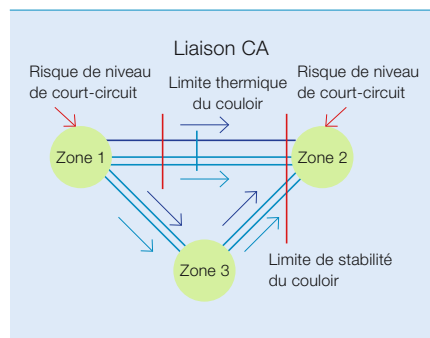
sur les réseaux CA environnants. Associés à des stratégies de conduite avancées, ces avantages peuvent nettement accroître l'« intelligence » et les performances du réseau en régimes établi et dynamique [3].

Améliorer les interconnexions régionales pour le négoce d'énergie

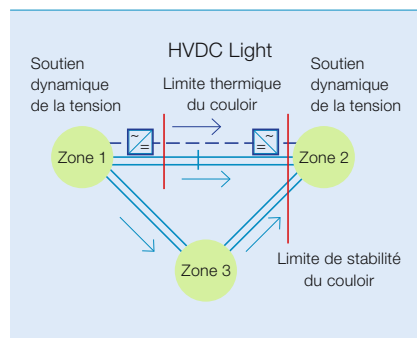
En exploitation normale, il est d'ores et déjà possible de planifier les écoulements de puissance sur les liaisons HVDC Light en fonction de critères économiques et de sécurité. Mieux, ces flux peuvent être répartis en temps réel. Ce réglage fin et rapide du transfert d'énergie permet aux exploitants de réseau d'utiliser des sources de production plus économiques et moins polluantes, de réaliser des transactions bilatérales favorables aux échanges et de mettre en œuvre des stratégies efficaces de gestion des congestions. De plus, les liaisons HVDC Light peuvent

2 HVDC Light améliore la souplesse et la précision de conduite des réseaux.

a L'ajout d'une liaison CA entre la zone 1 et la zone 2 allège quelque peu le transfert, mais ne décharge pas totalement la zone 3.



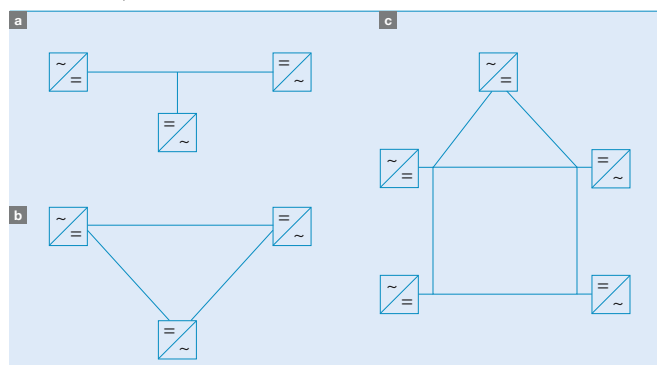
b HVDC Light reporte la charge sur la liaison CCHT, soulageant les autres lignes.



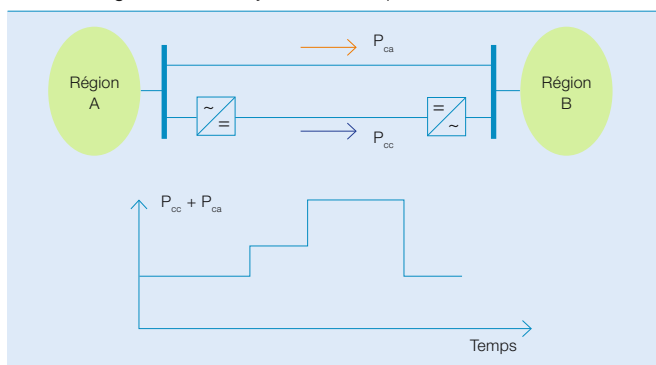
3 Station de conversion HVDC Light et plages de puissance en configuration symétrique unipolaire sur liaisons câblées

Tension CC	580 A	1 140 A	1 740 A
± 80 kV	100 MVA	200 MVA	300 MVA
± 150 kV	190 MVA	370 MVA	540 MVA
± 320 kV	400 MVA	790 MVA	1 210 MVA

4 Les trois topologies d'un système HVDC Light à extrémités multiples: radiale **a**, bouclée **b** et maillée **c**.



5 Par son contrôle strict et contractuel des flux de puissance régionaux, HVDC Light stabilise le système électrique.



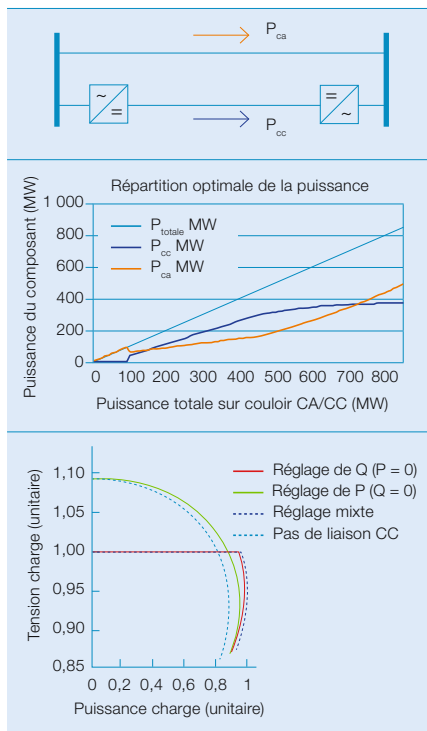
Transport et distribution électriques

être exploitées comme des capacités de transport « négociables », à l'instar des sources de production. Ce contrôle précis et contractuel du flux de charge sur HVDC Light simplifie la tarification et la facturation des transferts tout en évitant les transits indésirables 5.

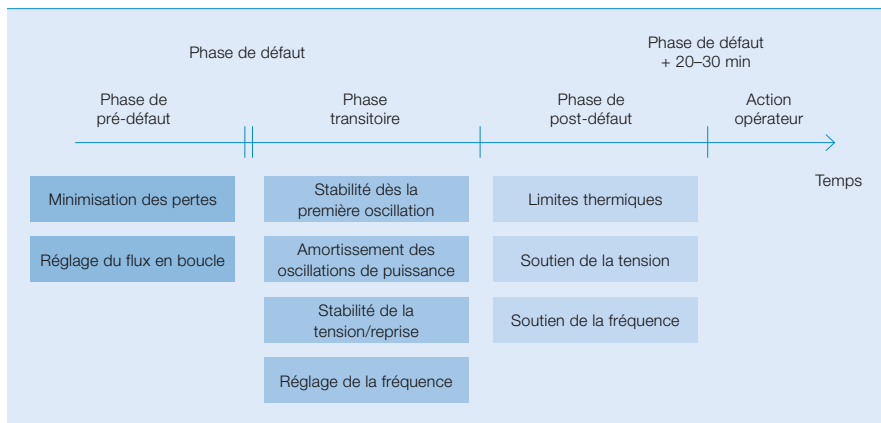
Optimiser un couloir de transport

Dans bien des cas, la capacité des lignes CA constituant un axe de transfert d'énergie ne peut pas être pleine-

6 Une liaison HVDC Light parallèle à une ligne CA permet de contrôler le couloir hybride CA/CC résultant et de trouver l'optimum entre performance du transport et maximisation des capacités de transit.



7 Fonctions de contrôle-commande avancées HVDC Light



ment exploitée, en raison des limites de stabilité transitoire ou de la tension. L'ajout d'une liaison HVDC Light parallèle aux lignes CA n'a pas seulement pour gros avantage de doper la capacité de transit ; des études ont prouvé que ce renfort permettait aussi de dépasser la puissance assignée du système HVDC Light, ce gain résultant d'un contrôle efficace de l'amortissement des oscillations et d'un soutien dynamique de la tension sur les lignes CA parallèles [4]. Il permet en outre de mettre en œuvre un principe optimal de partage de la puissance pour une large plage de niveaux de transfert afin de minimiser les pertes totales d'énergie du couloir hybride CA/CC. Dans sa stratégie de conduite, HVDC Light peut alors changer de priorité en préférant la maximisation du transfert de puissance à la minimisation des pertes ; cette commande adaptative offre un bon compromis entre performance du transport et optimisation des capacités de transit du couloir d'énergie 6.

Intégrer une production éolienne massive

HVDC Light autorise une exploitation efficace des câbles terrestres ou sous-marins longue distance pour insérer les mégaparc éoliens *offshore* dans les réseaux publics de transport 8. Voyons les principales caractéristiques du rapatriement HVDC Light de cette puissance éolienne :

- HVDC Light respecte à la lettre les codes du réseau.
- La conception des aérogénérateurs peut s'affranchir de ces règles et leur optimisation, se focaliser sur les facteurs coût, performance et robustesse.

- HVDC Light peut découpler le parc éolien du réseau CA ; les défauts survenant sur les lignes CA ne perturbent ni ne pénalisent les aérogénérateurs, tout comme les défauts se produisant dans le parc éolien ne dégradent pas les performances du réseau CA.
- HVDC Light assure le réglage de la tension et de la fréquence, et peut émuler l'inertie souhaitée pour renforcer la stabilité du réseau CA.

Améliorer la réponse aux fortes perturbations

Les systèmes HVDC Light intégrés peuvent efficacement améliorer la performance globale du réseau de transport pendant et après de graves perturbations. Des fonctions de contrôle-commande applicatif avancées permettent en effet de traiter différents problèmes transitoires et post-défaut 7.

Stabilité dès la première oscillation

Si une grave perturbation menace la stabilité du transport, HVDC Light contribue au maintien du synchronisme des activités du réseau en contrôlant l'augmentation ou la réduction rapide de puissance. En phase de défaut, le flux de puissance peut être suffisamment retardé par l'inversion immédiate du transfert HVDC Light pour limiter l'accélération du rotor. Autre possibilité : améliorer la stabilité transitoire en obligeant les convertisseurs HVDC Light à fournir un complément de réactif et à soutenir la tension après suppression du défaut.

Amortissement des oscillations de puissance

HVDC Light atténue les oscillations électromécaniques en modulant les puissances active et réactive. Un signal de mesure de la puissance active, par

8 HVDC Light optimise l'intégration des mégaparc éoliens dans le réseau électrique.



exemple, peut servir à gérer un plan de régulation d'amortissement supplémentaire. De même, la compensation statique de puissance réactive SVC²⁾ des stations de conversion se charge de cet amortissement en injectant des signaux de tension modulée dans le circuit de réglage de tension du convertisseur. En toute logique, les flux de puissance active et réactive (P et Q) peuvent être modulés simultanément pour améliorer l'efficacité de l'amortissement. Précisons que HVDC Light amortit des modes d'oscillations aussi bien locaux qu'interrégionaux **9**.

Stabilité et soutien de la tension

Un système HVDC Light a plusieurs moyens de stabiliser le profil de tension. L'exploitation du convertisseur en SVC ou STATCOM³⁾, pendant et après le défaut, renforce la stabilisation dynamique de la tension et en minimise les fluctuations. Cela facilite considérablement le rétablissement du réseau après une perturbation et diminue les conséquences sur les charges sensibles. HVDC Light contre les mécanismes d'instabilité transitoire et de la tension à plus long terme : la modulation rapide du réactif assure son soutien dynamique pour la stabilité transitoire de la tension. En cas d'instabilités de longue durée, qui mettent en action les régleurs de prises et les réponses du système d'excitation, HVDC Light peut aider à préve-

nir l'écroulement de tension par une modulation progressive de P et Q **10**, dont la réduction du transfert de puissance active pour accroître le réactif aux stations d'extrémité.

Réglage et soutien de la fréquence

Si le redresseur et l'onduleur sont raccordés à deux systèmes électriques asynchrones, le premier peut contribuer à la stabilisation de la fréquence du second, grâce à une fonction de modulation. Dans ce mode, HVDC Light ajoute ou retire sa participation à la demande de puissance planifiée, proportionnellement à l'écart de fréquence. De même, le soutien de la fréquence peut accélérer la reconstitution des réseaux îlotés à la suite d'une coupure du système. HVDC Light fournit la puissance réactive de secours nécessaire pour faciliter le réglage de fréquence d'un îlot voisin. Parallèlement, il joue le rôle de charge supplémentaire pour l'autre îlot, autorisant un démarrage en temps utile de ses générateurs. Réglage et soutien de la fréquence HVDC Light peuvent être coordonnés avec les délestages en sous-fréquence existants pour limiter la chute de fréquence en régime très perturbé.

Reprise de service après incident généralisé

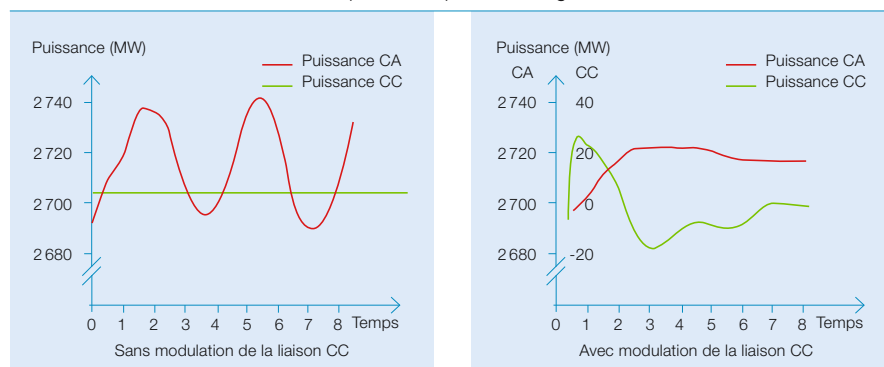
HVDC Light contribue à la reconstitution du réseau en combinant un temps

de démarrage court, sans solliciter de puissance de court-circuit du réseau, une aptitude à fonctionner en mode «SVC pur» pour régler la tension et une aide à la stabilisation de la fréquence durant la remise en charge. Dans une centrale électrique, il faut normalement augmenter la production de vapeur, avant de connecter la charge, pour pallier la «reprise de charge froide⁴⁾». Toutefois, grâce à la puissance disponible à distance et à la commande dédiée HVDC Light, on peut grandement améliorer la reconstitution du réseau et éviter ce phénomène **11**. La rapidité et la robustesse de ce dispositif sont ici primordiales car les conséquences et les coûts d'une panne générale augmentent notablement avec sa durée.

Toujours plus

A l'aide de télémesures, les systèmes HVDC Light peuvent efficacement lan-

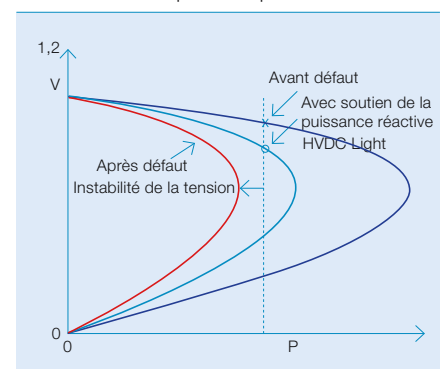
9 Amortissement des oscillations de puissance par HVDC Light



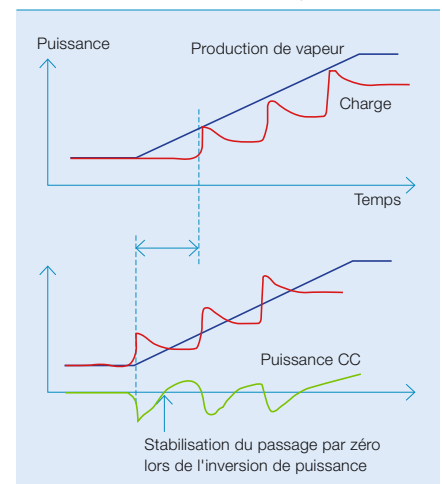
Notes

- ²⁾ Dispositif basé sur la technologie des condensateurs commutés par thyristors et des filtres d'harmoniques, qui fournit et absorbe du réactif pour améliorer la stabilité de la tension.
- ³⁾ Compensateur synchrone statique, de fonction identique à un SVC mais basé sur des onduleurs à source de tension.
- ⁴⁾ Anomalie se produisant au retour du courant après une panne prolongée : la charge est souvent supérieure à son niveau antérieur au défaut, par les effets conjugués de l'équipement (courants d'appel des condensateurs, courants magnétisants des transformateurs...) et du redémarrage des machines ou procédés à l'arrêt.

10 L'aptitude de HVDC Light à moduler la puissance réactive permet de rétablir la stabilité de la tension après une perturbation.

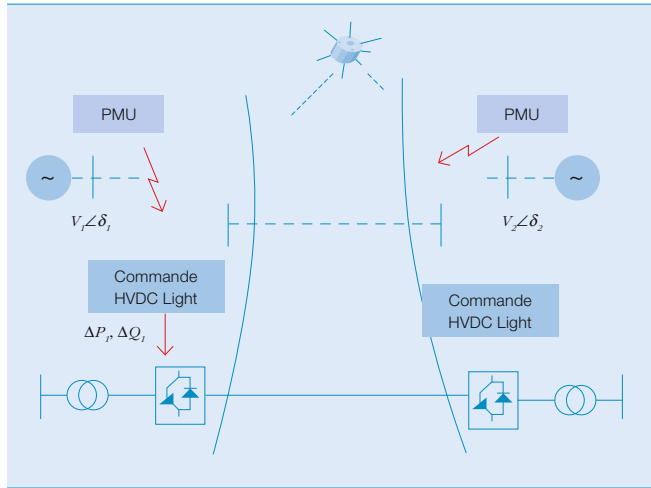


11 Contribution HVDC Light à la reconstitution du réseau après une panne générale

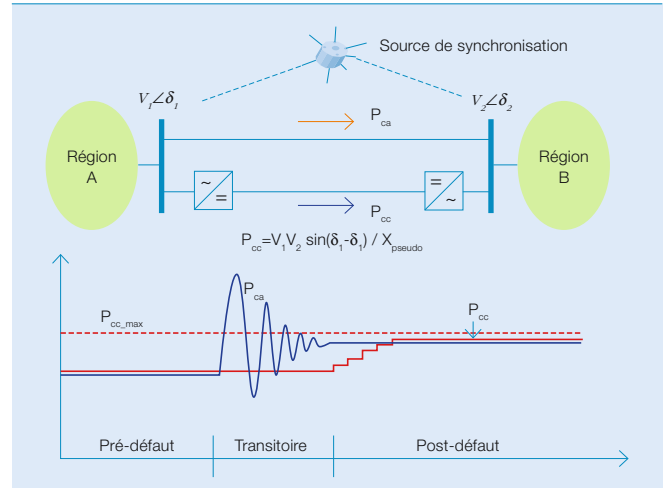


Transport et distribution électriques

12 Relayé par des systèmes de surveillance et de conduite à grande échelle (WAMS/WACS), HVDC Light renforce la stabilité du réseau et l'efficacité du transport.



13 Emulation HVDC Light d'une liaison CA en situation de post-défaut : un mode utile pour atténuer le risque de surcharge des lignes CA voisines.



cer un contrôle-commande individuel ou global pour améliorer la capacité de transfert et contrer les perturbations, comme les oscillations de puissance. Ces mesures à distance peuvent provenir d'un système de surveillance des grands réseaux de transport « WAMS » (*Wide Area Measurement System*) constitué d'appareils de mesures de phaseurs « PMU » (*Phasor Measurement Unit*) de tension et de courant déployés en divers endroits du réseau électrique. Ces mesures synchronisées par GPS, de même que la fréquence et les signaux binaires sont collectés et traités par un concentrateur. Un système de conduite à grande échelle ou « WACS » (*Wide Area Control System*) les utilise pour fournir des commandes auxiliaires aux équipements du réseau. Le domaine d'action des applications WAMS/WACS s'étend de la surveillance (estimation d'état et contrôle sécuritaire de la tension) à la commande étendue (amortissement des oscillations de puissance...). Le tandem WAMS/WACS doit permettre d'améliorer encore les performances des réseaux de transport par la coordination des systèmes HVDC Light **12**.

Emuler le transport alternatif

Dans certains cas, il est avantageux d'utiliser la liaison CC pour émuler les performances de son homologue alternative (en termes de réponse du flux de puissance aux contingences). Les caractéristiques souhaitées du transport en alternatif permettent à la liaison CC de hisser le transfert de puissance à son niveau maximal ou d'abaisser automatiquement la puissance transitée en période de post-défaut, atténuant le risque de surcharge des lignes CA voisines **13**.

Un système HVDC Light intégré peut être piloté en autonome comme une « pseudo-ligne CA » n'obligeant pas l'opérateur du système à prendre de fréquentes décisions de planification. Ce mode de conduite vaut pour des situations où une répartition centralisée de la liaison HVDC Light n'est pas impérative. Le réglage des consignes de la liaison CC fait partie de la planification des opérations à court terme, qui détermine la puissance désirée entre deux points de raccordement.

Le réseau du futur

Gageons que l'infrastructure de transport électrique évolue vers des réseaux hybrides CA/CC. Dans cette perspective, le système HVDC Light intégré, associé à des systèmes de mesure WAMS et de conduite WACS à grande échelle, est appelé à booster l'intelligence du grand transport.

Jiuping Pan

Reynaldo Nuqui

ABB Corporate Research
Raleigh, NC (Etats-Unis)
jiuping.pan@us.abb.com
reynaldo.nuqui@us.abb.com

Bertil Berggren

Stefan Thorburn

ABB Corporate Research
Västerås (Suède)
bertil.berggren@se.abb.com
stefan.thorburn@se.abb.com

Björn Jacobson

ABB Power Systems
Ludvika (Suède)
bjorn.jacobson@se.abb.com

Bibliographie

- [1] *It's time to connect, Technical description of HVDC Light® technology*, ABB Power Technologies AB, 2008, <http://www.abb.com/hvdc>
- [2] **Asplund, G.**, *Electric Transmission System in Change*, Key Notes, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Grèce, juin 2008
- [3] **Pan, J., Nuqui, R., Srivastava, K., Jonsson, T., Holmberg, P., Hafnert, Y. J.**, Nov. 2008, *AC Grid with Embedded VSC-HVDC for Secure and Efficient Power Delivery*, IEEE Energy 2030, Atlanta, Etats-Unis
- [4] **Johansson, S. G, Asplund, G., Jansson, E., Rudervall, R.**, *Power System Stability Benefits with VSC DC-Transmission Systems*, CIGRE Conference, Paris, 2004