

50 ans de transport d'énergie en

CCHT

PARTIE I

ABB – du rôle de pionnier à celui de leader mondial

Gunnar Asplund, Lennart Carlsson, Ove Tollerz



En 1954, à une époque où la plupart des pays européens s'activaient à développer leurs infrastructures de distribution électrique pour répondre à une demande en forte hausse, un événement passait presque inaperçu sur les rives de la mer Baltique qui marquerait à jamais le transport de l'électricité sur de longues distances. En effet, quatre ans plus tôt, l'Agence suédoise de l'énergie commandait la première liaison de transport en courant continu à haute tension (CCHT) au monde, à construire entre la côte suédoise et l'île baltique de Gotland. L'année 1954 voyait la mise en service de cette liaison CCHT.

Cinquante ans plus tard, ABB se flatte du bilan de ses nombreuses contributions à la technologie CCHT. Depuis la pose de ce premier câble sous-marin de 100 kV, 20 MW et 90 km de long, ABB est resté le leader incontesté du transport CCHT. Des quelque 70 000 MW de capacité de transport CCHT installés actuellement dans le monde, plus de la moitié a été fournie par ABB.

Depuis l'introduction de l'éclairage électrique dans les foyers et les usines d'Europe et des Etats-Unis vers la fin du 19^e siècle, la croissance soutenue de la demande en électricité exhortait les ingénieurs et les industriels à développer des moyens efficaces pour produire et transporter l'énergie. Alors que les pionniers de cette nouvelle technologie avaient déjà accompli certains progrès – le simple fait de transporter de l'électricité sur quelques kilomètres étant considéré comme extraordinaire – une solution à la demande croissante fut trouvée: l'énergie hydroélectrique.

Presque instantanément, on s'intéressa aux moyens d'acheminer cette énergie «bon marché» jusqu'aux consommateurs situés à des distances de plus en plus grandes.

Le continu s'efface devant l'alternatif

Les premières centrales électriques en Europe et aux Etats-Unis produisaient du courant continu (CC) à basse tension acheminé par des moyens à faible rendement du fait des pertes importantes dans les câbles. Le courant alternatif (CA) offrait des performances nettement supérieures car transportable à

des niveaux de tension plus élevés, avec beaucoup moins de pertes. Le terrain était ainsi propice au transport en courant alternatif à haute tension (CAHT) sur de longues distances.

En 1893, la technologie CAHT bénéficia d'un nouveau coup de pouce avec l'avènement du transport en triphasé. Il était désormais possible de garantir un écoulement stable et non pulsatoire de la puissance.

Même si le courant alternatif s'est imposé dès le départ dans la recherche d'un



Simulateur analogique utilisé pour la conception des premiers systèmes de transport CCHT

système de transport performant, les ingénieurs n'ont jamais complètement abandonné l'idée d'utiliser le courant continu. Certains tentèrent de construire un réseau de transport à haute tension avec des génératrices CC connectées en série à une extrémité et des moteurs CC également en série à l'autre extrémité – le tout couplé au même arbre. Malgré un fonctionnement satisfaisant, ce système n'a jamais connu de percée commerciale.

Le courant alternatif domine

Au fur et à mesure que les réseaux CA s'étendaient et que l'électricité était produite de plus en plus loin des centres de consommation, des lignes aériennes toujours plus longues étaient construites, transportant du courant alternatif à des tensions sans cesse plus élevées. De même, pour traverser de grandes étendues d'eau, des câbles sous-marins étaient développés.

Toutefois, aucun de ces moyens de transport n'était totalement satisfaisant. En particulier, la puissance réactive qui oscille entre les valeurs de capacité et d'inductance dans les réseaux posaient des problèmes. De ce fait, les planificateurs de systèmes électriques envisagè-

rent à nouveau la faisabilité du transport en courant continu.

Le retour du courant continu

Par le passé, le développement du transport CCHT avait été entravé, au premier chef, par la fiabilité médiocre et le coût élevé des valves utilisées pour convertir le CAHT en CCHT, et vice-versa.

La valve à vapeur de mercure offrit, pendant longtemps, les meilleures perspectives de développement. Depuis la fin des années 20, lorsque l'entreprise suédoise ASEA – une des sociétés à l'origine du Groupe ABB – commença à fabriquer des convertisseurs statiques et des valves à vapeur de mercure supportant des tensions proches de 1000 V, la conception de valves pour des tensions encore supérieures ne cessa d'être étudiée.

Dans ce contexte, de nouveaux domaines devaient être envisagés dans lesquels seule une petite partie du savoir-faire technique existant pouvait être réutilisé. En fait, pendant plusieurs années, on s'est demandé si tous les problèmes pourraient être résolus. Lorsque finalement le transport CCHT confirma

sa faisabilité technique, il restait à lever les incertitudes sur son aptitude à concurrencer le transport CAHT.

Alors que les machines électriques tournantes et les transformateurs peuvent être conçus très précisément par la formulation mathématique des lois de la physique, la conception des valves à vapeur de mercure s'appuie pour une grande part sur des connaissances empiriques. Résultat, les tentatives d'élévation de la tension dans le tube rempli de vapeur de mercure en augmentant l'entrefer entre l'anode et la cathode étaient invariablement vouées à l'échec!

Le problème fut résolu en 1929 en proposant d'insérer des électrodes de répartition de potentiel entre l'anode et la cathode. Brevetée ultérieurement, cette solution innovante peut, en quelque sorte, être considérée comme la pierre angulaire de tous les travaux de développement ultérieurs sur la valve à vapeur de mercure haute tension. C'est à cette époque que le Dr Uno Lamm, qui dirigeait les travaux, gagna sa réputation de «père du CCHT».

La liaison de Gotland

Le moment était venu pour des essais en service à des puissances plus élevées. Avec l'Agence suédoise de l'énergie, l'entreprise créa, en 1950, une station d'essais à Trollhättan où une importante centrale de production pouvait fournir l'énergie nécessaire. Une ligne de transport de 50 km fut également mise à disposition.

Les expériences menées au cours des années suivantes débouchèrent, en 1954, sur une commande de l'Agence suédoise de l'énergie pour la réalisation de la première ligne de transport d'énergie CCHT au monde. Celle-ci devait être construite entre l'île de Gotland en mer Baltique et la côte suédoise.

Suite à cette commande, l'entreprise intensifia ses efforts de développement sur les valves à vapeur de mercure et entreprit des travaux de conception sur d'autres matériels des stations de conversion, notamment les transforma-



Première valve à vapeur de mercure pour le transport d'énergie en CCHT

teurs, les inductances, l'appareillage ainsi que les équipements de commande et de protection.

Seule une partie de la technologie des systèmes CA existants était réexploitable pour le nouveau système CC. Une technologie totalement innovante s'imposait donc. Les spécialistes du laboratoire de Ludvika, avec à leur tête les Dr Erich Uhlmann et Harry Forsell, se mirent au travail pour résoudre les nombreux problèmes qu'elle soulevait. Enfin, un concept fut élaboré pour la liaison de Gotland qui s'est avéré si performant qu'il est resté à peu près inchangé à ce jour.

Gotland étant une île, la liaison exigeait de fabriquer un câble sous-marin capable d'acheminer le courant continu. Le câble «classique» à isolation au papier imprégné utilisé depuis 1895 pour le transport CA à 10 kV offrait un bon potentiel et servit de point de départ au développement d'un câble capable d'acheminer 100 kV CC.

Enfin, en 1954, après quatre années d'effort et d'innovation, la liaison CCHT

de Gotland de 20 MW, 200 A et 100 kV était mise en exploitation; un nouveau cap était franchi dans le domaine du transport de l'énergie électrique.

Après 28 années de bons et loyaux services, la liaison de Gotland d'origine fut mise hors service en 1986, remplacée par deux nouvelles liaisons de puissances supérieures construites entre l'île et le continent suédois, la première en 1983 et la seconde en 1987.

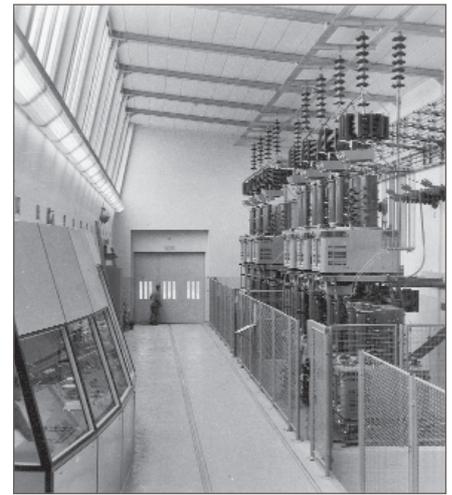
Premiers projets de transport d'énergie en CCHT

Au début des années 50, la France et la Grande-Bretagne décidèrent la construction d'une ligne d'interconnexion transmanche. La technologie CCHT fut retenue et l'entreprise remporta sa deuxième commande, cette fois pour une liaison de 160 km.

La réussite de ces premiers projets suscita un intérêt considérable dans le monde entier. Au cours des années 60, plusieurs liaisons CCHT furent construites: Konti-Skan entre la Suède et le Danemark, Sakuma au Japon (avec des convertisseurs de fréquence 50/60 Hz), la liaison néo-zélandaise entre les îles du sud et du nord, la liaison Italie-Sardaigne et la liaison avec l'île de Vancouver au Canada.

La plus importante liaison CCHT dotée de valves à vapeur de mercure jamais construite par l'entreprise fut l'interconnexion Pacific Intertie [1] aux Etats-Unis. Dimensionnée dans un premier temps pour une capacité de transport de 1440 MW et renforcée ultérieurement à 1600 MW sous ± 400 kV, sa station terminale nord se situe à The Dalles (Oregon) et sa station terminale sud à Sylmar, à l'extrémité nord de la cuvette de Los Angeles. Cette liaison, réalisée conjointement avec General Electric, fut mise en exploitation en 1970.

Au total, huit systèmes CCHT à valves à vapeur de mercure furent installés par



Valves à vapeur de mercure de la première liaison de Gotland (1954)

l'entreprise pour une puissance de 3400 MW. Même si beaucoup de ces installations ont depuis été remplacées ou renforcées avec des valves à thyristors, certaines sont encore en exploitation, après 30 à 35 années de service !

Partie II : 50 ans de transport en CCHT – Les semi-conducteurs prennent le relais ➡ page 10

Bibliographie

[1] L. Engström: Installations TCCHT pour l'approvisionnement en électricité de Los Angeles. Revue ABB 1/88, 3-10.

Le transport CCHT sillonne les mers

Dans toute liaison de transport en courant alternatif (CA) de grande longueur, l'écoulement de puissance réactive, en raison de la capacité élevée du câble, limite la distance maximale de transport. Par conséquent, sur une longueur d'environ 40 km de câble sous-marin CA, le courant de charge transmis depuis la côte monopolise le câble, au détriment du transit de puissance active. En courant continu (CC), cette limitation n'existe pas. C'est pourquoi, pour les longues distances, le transport CCHT est la seule solution technique viable. Autre bonne raison d'utiliser un câble CCHT: il est beaucoup moins cher que son homologue alternatif.

Dans un système CCHT, l'énergie électrique est prélevée en un point d'un réseau CA triphasé, convertie en CC dans une station de conversion, acheminée au point de destination par câble sous-marin, puis reconverte en CA dans une autre station de conversion avant d'être injectée dans le réseau CA de destination. Les câbles de transport CCHT peuvent présenter différentes configurations.

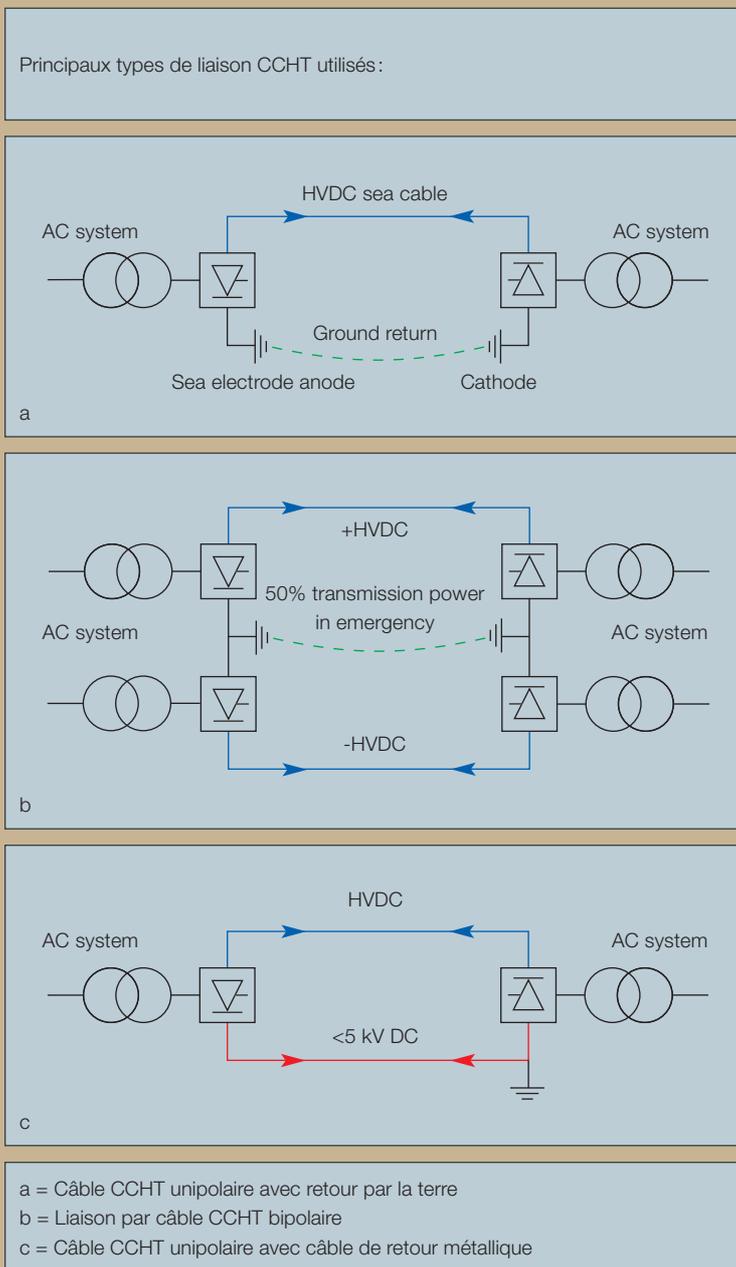
Le transport CCHT par câble se fait principalement par câble unipolaire qui utilise la terre et la mer pour le retour du courant. Le retour par la mer réduit le coût de l'interconnexion puisqu'un seul câble suffit entre les deux stations de conversion. De même, les pertes sont minimisées car la section du circuit de retour est particulièrement importante, ren-

dant la résistance négligeable. Les seules pertes sont le fait des chutes de tension à l'anode et à la cathode. Les électrodes doivent être suffisamment éloignées des stations de conversion et du câble CCHT principal pour éviter la corrosion des conduites

ou autres structures métalliques à proximité ainsi que l'injection de courant continu dans le neutre des transformateurs. La bonne conductivité de la terre et de l'eau de mer facilite la conception des électrodes; de plus, le transport en unipolaire jouit d'un excellent retour d'expérience.

Ce mode de transport a été perfectionné avec la configuration bipolaire. Il s'agit en fait de la combinaison de deux systèmes unipolaires, l'un ayant une polarité positive et l'autre une polarité négative par rapport à la terre. Chaque système unipolaire peut fonctionner indépendamment avec retour par la terre; cependant, si le courant aux deux pôles est égal, le courant de terre de chaque pôle s'annule. Dans cette situation, le circuit de terre sert, sur de courtes périodes, à des fins d'urgence lorsqu'un pôle est hors service.

Dans un système unipolaire avec retour métallique, le courant de retour s'écoule dans un conducteur identique à un câble MT, ce qui permet d'éviter les problèmes liés au courant de retour par la terre.



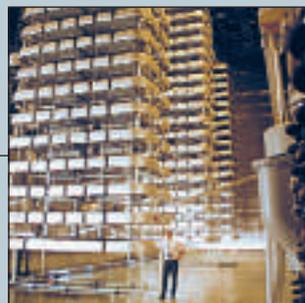
50 ans de transport d'énergie en

CCHT

PARTIE II

Les semi-conducteurs prennent le relais

Gunnar Asplund, Lennart Carlsson, Ove Tollerz



La technologie du transport CCHT à valves à vapeur de mercure avait beaucoup progressé en quelques années, mais elle présentait encore des faiblesses, notamment la difficulté à anticiper le comportement des valves elles-mêmes. En effet, ne pouvant pas toujours absorber la tension inverse, des retours d'arc survenaient. Par ailleurs, les valves à vapeur de mercure nécessitaient une maintenance régulière, avec des spécifications de propreté des plus strictes. Une valve ne présentant pas ces inconvénients devenait indispensable.

L'invention des thyristors en 1957, offrant de nouvelles perspectives aux industriels, notamment avec le transport d'énergie en CCHT comme domaine d'application prometteur, marque le début d'une ère nouvelle.

Pendant la première moitié des années 60, au vu de l'immense intérêt suscité par les applications des semi-conducteurs, l'entreprise ne cessa de travailler à la conception de valves à thyristors haute tension comme solution de remplacement aux valves à vapeur de mercure. Au printemps 1967, une des valves à vapeur de mercure de la liaison CCHT de Gotland fut remplacée par une valve à thyristors. Il s'agissait de la première valve de ce type exploitée commercialement pour une ligne de transport CCHT. Après une période d'essai d'un an, l'Agence suédoise de l'énergie commanda un ensemble complet de valves à thyristors pour chaque station de conversion,

augmentant du même coup la capacité de transit de 50%.

A la même époque, des essais furent effectués sur le câble sous-marin de Gotland, qui fonctionnait parfaitement sous 100 kV, pour voir si sa tension pouvait être augmentée à 150 kV – niveau requis pour transiter la puissance supérieure. Les essais furent concluants et le câble fut par la suite exploité sous un gradient électrique de 28 kV/mm, ce qui reste à ce jour la référence mondiale pour les grands projets de transport CCHT par câble.

Les nouveaux ensembles de valves furent connectés en série aux deux

groupes de valves à vapeur de mercure existants, faisant passer ainsi la tension de transport de 100 à 150 kV. Ce système plus puissant mis en service au printemps 1970 constitua une autre première mondiale pour la ligne de transport de Gotland.

Les valves à thyristors, qui ont permis de simplifier les stations de conversion, équipent depuis cette époque toutes les liaisons CCHT. D'autres acteurs se lancèrent sur le marché. Brown Boveri (BBC) – qui fusionna plus tard avec ASEA pour créer ABB – s'associa à Siemens et AEG au milieu des années 70 pour construire la liaison CCHT de Cahora Bassa de 1920 MW entre le Mo-



Extension de Gotland 1 avec les premières valves à thyristors CCHT au monde

zambique et l'Afrique du Sud. Le même groupement construisit ensuite la liaison Nelson River 2 de 2000 MW au Canada, premier projet à utiliser des valves CCHT refroidies par eau.

La fin des années 70 vit également l'achèvement d'autres projets: la liaison Skagerrak entre la Norvège et le Danemark, la liaison Inga-Shaba au Congo et le projet CU aux Etats-Unis.

L'interconnexion Pacific Intertie a été renforcée par deux fois dans les années 80, chaque fois avec des convertisseurs à thyristors, pour accroître sa capacité à 3100 MW sous ± 500 kV. (ABB procède actuellement à la modernisation de la station terminale de Sylmar avec les technologies les plus récentes).

Itaipu – nouvelle référence en matière de transport d'énergie en CCHT

Le contrat pour le plus grand projet de transport CCHT jamais constitué à ce jour, la liaison CCHT de 6300 MW d'Itaipu au Brésil, fut adjugé en 1979 au consortium ASEA-PROMON. Cette liaison, réalisée et mise en exploitation en plusieurs étapes entre 1984 et 1987, joue un rôle clé dans l'alimentation en énergie électrique du Brésil, fournissant une part importante de l'électricité à la ville de São Paulo.

Par sa taille et sa complexité technique, le projet d'Itaipu représentait un défi majeur et le point de départ de l'ère moderne de la technologie CCHT. Le retour d'expérience lié à ce projet explique pour beaucoup les nombreuses commandes qu'ABB a reçues au cours des années qui suivirent.

Après Itaipu, le projet CCHT le plus ambitieux fut sans conteste l'interconnexion Québec-Nouvelle Angleterre de 2000 MW, première liaison multitermi-

nale CCHT importante construite dans le monde.

Les câbles CCHT ne sont pas en reste

Alors que les caractéristiques assignées des stations de conversion ne cessaient d'augmenter, il en allait de même des puissances et des niveaux de tension que les câbles CCHT devaient acheminer.

Les plus gros câbles CCHT sous-marins installés à ce jour transitent 600 MW sous 450 kV. Les plus longs sont le câble de 230 km de la Baltique reliant la Suède et l'Allemagne, et le câble de 260 km de la liaison SwePol entre la Suède et la Pologne.

La technologie CCHT aujourd'hui

La majorité des stations de conversion CCHT construites aujourd'hui continue de s'appuyer sur les principes qui ont fait le succès de la première liaison de Gotland dès 1954. La conception de ces stations a connu son premier grand bouleversement avec l'arrivée des valves à thyristors au début des années 70. Les premières valves étaient refroidies par air et conçues pour être utilisées à l'intérieur; les valves refroidies par huile, isolées dans l'huile et conçues pour des installations extérieures firent rapidement leur apparition. Aujourd'hui, toutes les valves CCHT sont refroidies par eau [1].



Station de conversion de Foz do Iguaçu avec la centrale électrique de 12 600 MW d'Itaipu en arrière-plan



Station de conversion de la liaison CCHT par câble de la Baltique

Exemple type de liaison CCHT moderne pour le transport massif d'énergie, les liaisons qu'ABB construit actuellement dans le cadre du projet de la centrale hydroélectrique des Trois Gorges en Chine (cf. article page 14).

En 1995, ABB présentait une nouvelle génération de station de conversion CCHT: «HVDC 2000» [2]. Le concept HVDC 2000 répond à des exigences plus strictes en termes de perturbations électriques et de stabilité dynamique lorsque la capacité de court-circuit est

insuffisante, de même qu'en termes de réduction de l'encombrement et des délais de livraison.

Un élément clé de la solution HVDC 2000 fut l'introduction des convertisseurs commutés par condensateurs (CCC). En réalité, il s'agit de la première modification fondamentale apportée à la technologie de base des systèmes CCHT depuis 1954!

Le système HVDC 2000 inclut également d'autres innovations ABB comme les filtres CA syntonisés en continu (ConTune), les filtres CC actifs, les valves CCHT externes isolées dans l'air et le système de contrôle-commande entièrement numérique MACH2™.

Le premier projet à mettre en œuvre le système HVDC 2000 avec CCC et valves externes fut la station de conversion dos-à-dos Garabi de 2200 MW de l'interconnexion CCHT Brésil-Argentine.

HVDC Light™

En 50 ans, la technologie CCHT est parvenue à maturité et constitue un mode de transport fiable de fortes puissances sur de longues distances avec des pertes minimales. La question est maintenant de savoir quelle direction prendront les travaux de développement dans les prochaines années.

On pensait qu'ils suivraient, encore une fois, l'évolution des entraînements industriels. Ici, les thyristors ont été remplacés il y a déjà longtemps par des convertisseurs à source de tension avec des semi-conducteurs à la fois blocables et amorçables. Ces derniers offraient de très nombreux avantages pour la commande des systèmes d'entraînement industriels, que l'on pensait pouvoir transposer aux systèmes de transport d'énergie électrique. Adapter la technologie des convertisseurs à source de tension au CCHT n'est, toutefois, pas chose aisée. C'est toute la technologie qui doit être revue, pas simplement les valves.

En phase de développement de son convertisseur à source de tension, ABB comprit que le transistor bipolaire à grille isolée IGBT offrait les meilleures perspectives par rapport aux autres composants semi-conducteurs. Avant toute chose, la commande de l'IGBT nécessite très peu d'énergie, rendant possible sa mise en série. Cependant, pour le CCHT, un grand nombre d'IGBT doit être mis en série, ce qui n'est pas le cas des entraînements industriels.

En 1994, ABB concentra ses travaux de développement sur les convertisseurs à source de tension dans un projet destiné à exploiter deux convertisseurs à IGBT dans un système CCHT de petite taille. Une ligne CA de 10 km de long au centre de la Suède fut mise à disposition pour le projet.

Fin 1996, après un programme complet d'essais synthétiques, le matériel fut installé et testé en conditions réelles d'exploitation. En 1997, le premier système de transport CCHT à convertisseurs à source de tension, baptisé HVDC Light™ [3], commençait à acheminer l'électricité entre Hellsjön et Grängesberg en Suède.

Depuis, sept systèmes de ce type ont été commandés, dont six sont exploités commercialement en Suède, au Danemark, aux Etats-Unis et en Australie. HVDC Light est maintenant disponible pour des puissances jusqu'à 350 MW sous ± 150 kV.



Câble sous-marin de la liaison CCHT Baltique de 600 MW entre l'Allemagne et la Suède



Station de Shoreham de la liaison HVDC Light de 330 MW de Cross Sound Cable aux Etats-Unis



Câbles terrestres de la solution HVDC Light

ABB est à ce jour la seule entreprise à développer et construire des systèmes de transport CCHT à convertisseurs à source de tension [4].

Un avantage de la technologie HVDC Light est qu'elle permet d'améliorer la stabilité et la régulation de la puissance réactive à chaque extrémité du réseau. De plus, elle peut opérer à des niveaux de puissance de court-circuit très faibles et offre même des fonctionnalités de démarrage sur défaut. Le câble de la solution HVDC Light™ est en matériau polymère, ce qui le rend particulièrement résistant et robuste. On peut ainsi poser des câbles CCHT dans des environnements agressifs sans risques de détérioration. Le câble extrudé permet également la viabilité économique de longues lignes de transport CCHT terrestres par câbles. Comme exemple, citons l'interconnexion HVDC Light™ de Murraylink en Australie qui fait 180 km de long.

Et les 50 prochaines années ?

La technologie CCHT a fait son chemin depuis la première liaison Gotland. Mais que nous réserve l'avenir ?

Le transport massif d'énergie s'appuiera probablement sur la technologie des thyristors pour de nombreuses années encore car elle est fiable, bon marché et ses pertes sont faibles. En augmentant la tension, on peut transporter des puissances très supérieures et accroître la longueur des liaisons.

La technologie HVDC Light offre un bon potentiel de développement. On peut également envisager d'augmenter les niveaux de tension et de puissance; des puissances inférieures et des tensions relativement élevées sont également possibles pour les systèmes destinés à des générateurs et des charges plus petites.

Le développement du câble HVDC Light a permis d'interconnecter des réseaux sé-

parés par des étendues d'eau profondes, ce qui était au préalable impensable.

Les perspectives les plus intéressantes pour la technologie HVDC Light se situent, toutefois, dans le domaine des liaisons multiterminales. A long terme, elle pourrait constituer une réelle alternative au transport CA qui, à ce jour, domine complètement ce secteur.

Gunnar Asplund
Lennart Carlsson

ABB Power Technologies
Ludvika/Suède
gunnar.asplund@se.abb.com
lennart.k.carlsson@se.abb.com

Ove Tollerz

ABB Power Technologies
Karlskrona/Suède
ove.tollerz@se.abb.com

Bibliographie

- [1] **B. Sheng, H. O. Bjarna:** Des performances prouvées – Un circuit d'essais synthétiques pour valider la conception des valves à thyristors. Revue ABB 2/2003, 25–29.
- [2] **B. Aernlöf:** HVDC 2000 – une nouvelle génération d'installations CCHT. Revue ABB 3/1996, 10–17.
- [3] **G. Asplund, et al:** Liaison CCHT légère fondée sur des convertisseurs à circuit intermédiaire de tension. Revue ABB 1/1998, 4–9.
- [4] **T. Nestli, et al:** Des technologies de l'énergie innovantes pour la plate-forme offshore de Troll. Revue ABB 2/2003, 15–19.

Pour en savoir plus sur le transport d'énergie en CCHT, consultez notre site www.abb.ca/hvdc.