

ABB

2 | 13

Actualités technologiques
du Groupe ABB

review

la
revue
ABB

Disjoncteur hybride CCHT 6

Une bouffée d'air frais dans la mine 35

Maintenance : à qui profite la CRIM ? 64

100 ans d'électronique de puissance 70

Technologies d'avenir



Power and productivity
for a better world™



Bâti en 1993 par la Turquie sur le mythique fleuve Euphrate, le barrage Atatürk se distingue par son impressionnante retenue d'eau (48,7 km³), véritable lac artificiel de 817 km². Sa centrale hydroélectrique aligne huit génératrices ABB de 300 mégawatts. ABB vient de moderniser les régulateurs de turbine et les systèmes d'excitation, et d'installer un nouveau système de téléconduite et une plate-forme d'automatisation étendue 800xA.

Cette photo témoigne du gigantisme de l'installation avec ses systèmes d'excitation qui viennent coiffer les turbo-alternateurs verticaux. Un autre ouvrage d'exception est en couverture de notre numéro : la centrale à cycle combiné *Sorgenia Bertónico-Turano Lodigiano* en Italie, qu'ABB a équipée de son système de contrôle-commande Symphony Plus.



Commutation

- 6 **Montée en charge**
Le disjoncteur hybride d'ABB fiabilise les réseaux en courant continu à haute tension
- 14 **Coupes claires**
Nouvelle génération de disjoncteurs haute tension ABB
- 19 **Une puce deux-en-un**
ABB présente son transistor BIGT
- 24 **Solution de facilité**
Réseaux à neutre compensé : le meilleur plan de protection contre les défauts à la terre
- 29 **Prise de contact**
ABB fait progresser la technologie des contacteurs

Intégration

- 35 **Du bon air sous terre**
ABB optimise la ventilation des mines souterraines
- 42 **Mécanique de précision**
Des outils de productivité pour l'industrie minière
- 48 **Une mine d'informations**
La percée d'ABB dans l'intégration de l'équipement mobile souterrain

Contrôle-commande

- 52 **Vingt mille lieues sur les mers**
Logiciel ABB de surveillance et d'aide à la navigation *OCTOPUS-Onboard*
- 54 **En rangs serrés**
ABB aligne *datacenters* et contrôle-commande industriel
- 59 **Tours de Babel**
Émuler les interfaces de communication du système de contrôle-commande distribué avec *SoftCI* d'ABB
- 64 **État critique**
Quelles stratégies de maintenance pour les sites industriels complexes ?

Consécration

- 70 **Cent ans de plénitude**
Des valves à vapeur de mercure au disjoncteur hybride, ABB fête un siècle d'électronique de puissance

De pionnier à leader



Prith Banerjee

Chers lecteurs,

L'interrupteur est le composant par excellence de tout système électrotechnique, de la logique intégrée des automatismes à micro-processeurs aux imposants disjoncteurs qui maîtrisent l'énergie électrique haute tension. Les appareils de connexion sous-tendent presque toutes les activités d'ABB, quand ce n'est pas toute la technologie. En ne cessant d'améliorer leurs performances en commutation, ABB ouvre de nouveaux champs d'action. S'il s'agit le plus souvent de repousser les frontières de l'existant, il arrive aussi que des innovations « de rupture » rebattent les cartes du marché ; le disjoncteur à courant continu (CC) hybride est de celles-là.

Depuis des décennies, ABB fait figure de précurseur du courant continu à haute tension (CCHT) pour le transport électrique sur de longues distances, qui se caractérise par de faibles pertes et une grande souplesse de commande. Défiant les limites d'une technologie longtemps cantonnée aux liaisons point à point, le Groupe y voit la clé de voûte des réseaux de demain. Comme en courant alternatif, un réseau CC a besoin de disjoncteurs, notamment pour isoler en toute sécurité des tronçons de ligne en défaut, sans paralyser tout le système. Grandes sont pourtant les différences entre interrompre un courant alternatif et un courant continu, qui ne peuvent être gommées en modifiant ou en adaptant les solutions CA en présence. ABB relève ces défis avec son disjoncteur hybride qui marie commutation traditionnelle et semi-conducteurs. Tout juste promu par le magazine du prestigieux MIT au « top 10 » des meilleures innovations 2012, il inaugure ce numéro de la *Revue ABB*.

Dans la même veine, plusieurs pages sont consacrées à d'autres appareils de connexion qui couvrent une grande variété d'applications et de puissances, du courant alternatif à

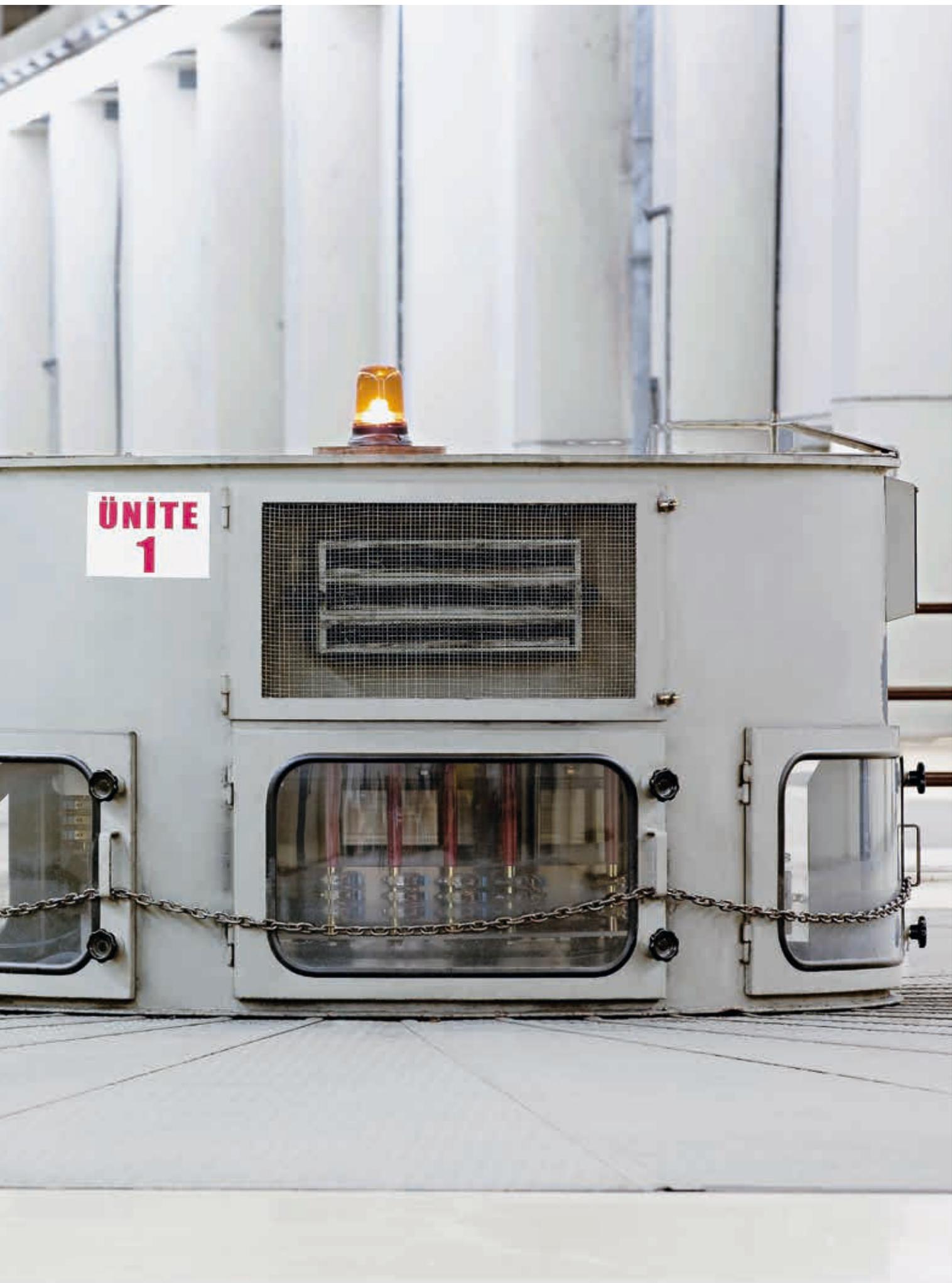
haute tension à la commande de moteurs, jusqu'au dernier-né des semi-conducteurs de puissance ABB, dénommé BIGT (*Bimode Insulated Gate Transistor*), que l'on retrouve justement dans notre disjoncteur hybride. Or toute innovation se nourrit d'un patrimoine technologique : la *Revue* revient sur cent ans de réussites ABB en électronique de puissance, en commençant par les composants avant de traiter leur volet applicatif dans un prochain numéro.

D'autres sujets sont au sommaire comme les équipements miniers, le transport maritime de lourdes charges, les centres de traitement de données ou *datacenters*, la simulation des grands complexes industriels et la planification de la maintenance.

Mais les réseaux et appareils électriques ne sont pas les seuls à « opérer une conversion ». La *Revue* aussi ! À commencer par son titre, qui devient *ABB Review* pour rassembler sous une même bannière linguistique tous les lecteurs de la planète. Autre nouveauté : une newsletter électronique qui permettra à nos lecteurs assidus de ne pas perdre le fil de l'actualité technologique ABB (bulletin d'abonnement à l'intérieur). D'autres évolutions seront annoncées dans les prochains numéros, sans jamais déroger à nos exigences de qualité rédactionnelle.

Ce numéro est aussi le dernier dont je signerai l'éditorial en tant que Directeur des technologies. Avant de refermer la page, je vous remercie de votre fidélité et vous souhaite une bonne lecture... pour les cent ans à venir !

Prith Banerjee
Directeur des technologies ABB







Montée en charge

Le nouveau disjoncteur hybride d'ABB fiabilise les réseaux en courant continu à haute tension

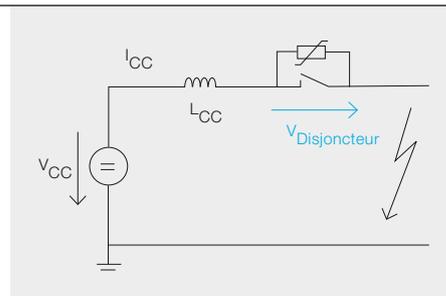
MAGNUS CALLAVIK, ANDERS BLOMBERG, JÜRGEN HÄFNER, BJÖRN JACOBSON – Le groupe ABB et ses sociétés d'origine ont été les pionniers du transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) sur de longues distances avec de faibles pertes. Or toutes les lignes CCHT sont à ce jour des liaisons point à point. Pour élargir le champ d'application de la technologie, il ne s'agit plus de relier deux stations de conversion mais de développer d'authentiques réseaux CCHT. L'absence de disjoncteur adapté aux tensions et vitesses de commutation requises, avec des pertes acceptables, a jusque-là freiné l'essor d'autres topologies CCHT. Le lancement du disjoncteur hybride CCHT d'ABB fait sauter les derniers verrous technologiques.

Photo

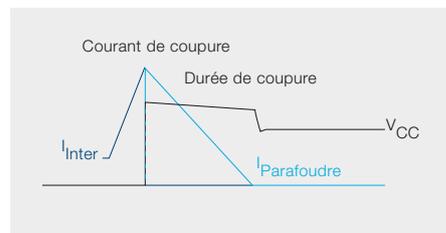
Disjoncteur CCHT hybride d'ABB : une percée majeure dans l'histoire du Groupe, qui fait du rêve d'Edison une réalité.



1a Stations de conversion (points bleus)



1b Disjoncteur CCHT



1c Principe de fonctionnement

Les lignes CCHT conjuguent deux avantages sur les réseaux en courant alternatif (CA) à haute tension : des pertes par conduction de puissance active relativement faibles, des pertes liées à la puissance réactive nulles. D'où l'intérêt porté au CCHT pour le transport électrique longue distance, encore accentué par la rapide croissance de la production d'origine renouvelable [1].

Pour autant, le disjoncteur hybride n'a pas besoin d'attendre le plein essor des réseaux CCHT pour s'imposer de lui-même. Aujourd'hui, qui dit transport CCHT implique majoritairement des liaisons point à point, sur lesquelles ce type de disjoncteur a aussi son rôle à jouer. Au-delà de la conversion de puissance, les stations terminales CCHT contribuent à la stabilité du réseau alternatif en régulant la puissance réactive : si le convertisseur est rapidement déconnecté de la ligne CCHT en cas de défaut, la station peut directement passer en fonctionnement îloté, tel un compensateur statique (STATCOM), et continuer ainsi à soutenir le réseau CA.

On demande beaucoup au disjoncteur CCHT ! Sa durée de coupure de courant est plus courte que celle d'une application comparable en alternatif, à cause de

la plus faible impédance des lignes qui accroît la vitesse de propagation de la chute de tension consécutive au défaut. D'habitude, un défaut de court-circuit est éliminé en 5 ms pour ne pas perturber les stations de conversion situées dans un rayon de 200 km. Ces équipements s'appuyant sur une tension conti-

Écourter la durée d'élimination d'un défaut diminue les exigences de dissipation d'énergie dans le parafoudre, mais oblige à augmenter son niveau de tension.

nue d'au moins 80 % de sa valeur nominale pour garantir un fonctionnement normal, les défauts doivent disparaître en quelques millisecondes.

Certes, un disjoncteur CCHT mécanique est capable de déconnecter une ligne en plusieurs dizaines de millisecondes, mais ce temps de manœuvre est trop long pour satisfaire aux exigences de fiabilité d'un réseau CCHT [2]. Il peut néanmoins éteindre les courants de défaut, par

exemple. Autres travers : il a besoin de composants supplémentaires pour assurer le passage par zéro du courant et, donc, l'arrêt de la conduction.

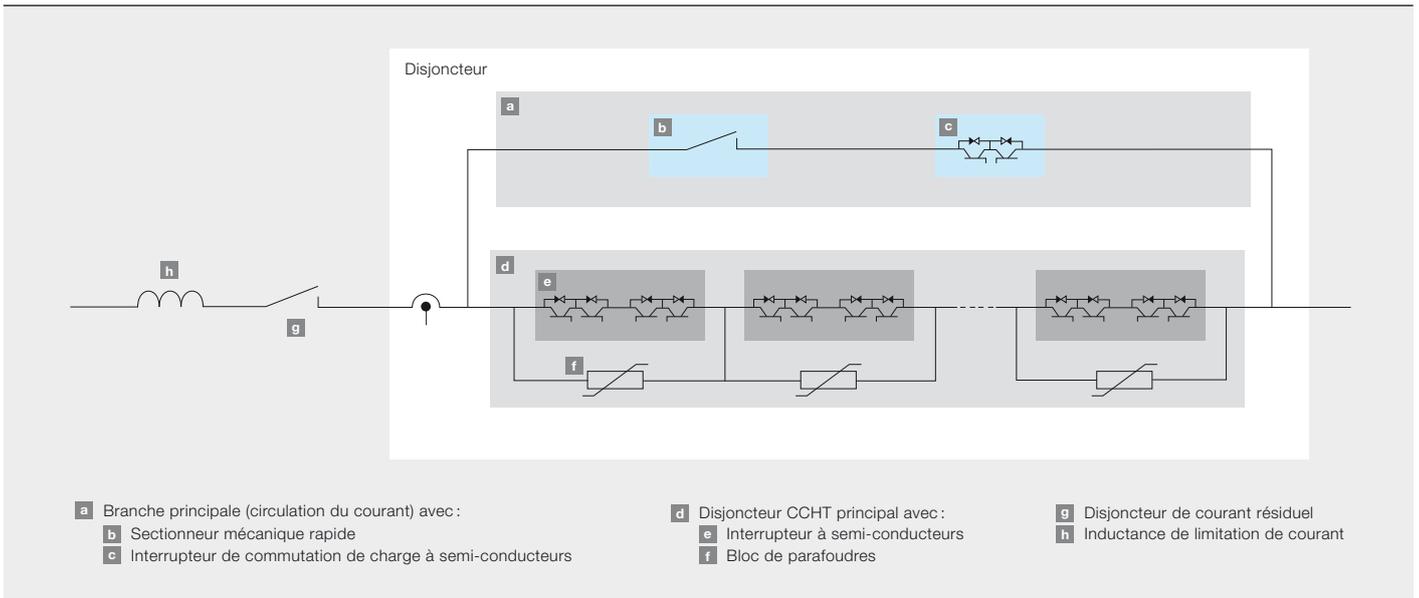
Si les disjoncteurs électroniques s'affranchissent aisément de ces limitations de vitesse, ils engendrent des pertes par conduction (soit environ 30 % des pertes de la station de conversion) car leurs semi-conducteurs sont en permanence sur le parcours du courant.

Voyons un exemple de réseau CCHT → 1a et de circuit constitué d'un disjoncteur CCHT mécanique et d'un parafoudre → 1b, dont la manœuvre provoque des transitoires → 1c. Sur apparition du défaut, le courant grimpe à une vitesse donnée par l'inductance de ligne. À l'ouverture du contact, il commute sur le parafoudre et commence à décroître. Le courant de défaut dans le parafoudre établit une tension inverse qui le ramène à zéro par dissipation de l'énergie emmagasinée à la fois dans l'inductance CCHT et le parcours du courant.

Le temps total d'élimination du défaut se décompose en

- temps de montée du courant, avant commutation ;
- temps de baisse consécutive, pendant coupure de la ligne.

Ces deux durées sont des critères décisifs de conception et de coût du disjoncteur CCHT et de l'inductance de ligne.



La durée de coupure est fonction du temps de réponse de la protection et du temps de manœuvre de l'interrupteur CCHT. Plus longue, elle implique un pouvoir de coupure maximal de l'interrupteur plus élevé, ce qui augmente également l'énergie écoulee par le parafoudre et majore d'autant le coût du disjoncteur. Il est donc primordial de la minimiser. Quand durée et pouvoir de coupure maxi sont déterminés, le seul paramètre sur lequel on peut encore jouer est l'inductance CCHT qui dicte la vitesse de montée en courant. La taille de la bobine est à son tour limitée par des facteurs comme le coût et la stabilité du réseau CCHT.

La durée admise d'élimination du défaut influe sur le niveau de tension requis du parafoudre et de la protection de tension de pôle ; la réduire diminue les exigences de dissipation d'énergie dans le parafoudre mais oblige à augmenter sa tenue en tension. Il s'ensuit une tension entre pôles plus élevée, qui renchérit le coût du disjoncteur CCHT.

Un exemple illustrera dans les grandes lignes l'interdépendance de ces paramètres. Supposons une durée de coupure de 2 ms (cas des interrupteurs CCHT à semi-conducteurs) et un défaut de ligne au voisinage du poste CCHT : l'élévation maximale du courant de défaut est de 3,5 kA/ms pour une inductance de 100 mH dans un réseau CCHT à 320 kV acceptant une surtension maxi de 10%. Pour un courant assigné de ligne de 2 kA,

le pouvoir de coupure minimal du disjoncteur CCHT est de 9 kA.

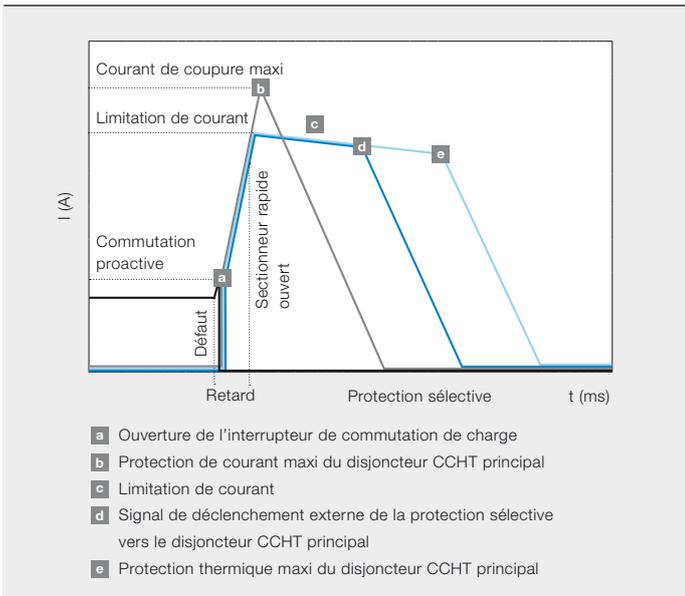
La voie hybride

Le disjoncteur CCHT hybride → 2 reprend le schéma → 1b en lui ajoutant une branche supplémentaire → 2a constituée d'un interrupteur de commutation de charge à semi-conducteurs → 2c en série avec un sectionneur mécanique rapide → 2b.

En régime normal, le courant circule uniquement dans le circuit *bypass* → 2a. Sur apparition d'un défaut CCHT, l'interrupteur → 2c le bascule immédiatement sur le disjoncteur CCHT principal → 2d. La branche → 2a ne véhiculant plus de courant, le sectionneur → 2b s'ouvre, protégeant l'interrupteur de la tension primaire qui augmente aux bornes du disjoncteur CCHT principal. La tension assignée de l'interrupteur de commutation de charge est donc nettement réduite par rapport à celle d'un composant restant sur le parcours principal du courant tout au long du cycle de commutation ; elle doit seulement être supérieure à la tension en charge du disjoncteur principal, de l'ordre du kV pour un disjoncteur CCHT de 320 kV. Compte tenu de cette faible tension de blocage, la tension à l'état passant de l'interrupteur ne dépasse pas quelques volts. Les pertes en conduction du disjoncteur CCHT hybride sont donc réduites à un pourcentage des pertes induites par un disjoncteur électronique classique, soit 0,01 % de la puissance transitée.

Les stations de conversion CCHT contribuent à la stabilité du réseau CC en régulant la puissance réactive.

3 Commande du disjoncteur CCHT hybride



Le disjoncteur CCHT principal → 2d se compose de plusieurs cellules, dotées chacune d'un bloc de parafoudres → 2f calibrés pour une tension et un pouvoir de coupure de courant maximum. Après élimination du défaut, un disjoncteur-sectionneur → 2g interrompt le courant résiduel et isole la ligne en défaut du réseau CCHT pour protéger les parafoudres de la surcharge thermique.

L'interrupteur mécanique → 2b s'ouvrant au zéro de courant et sous un faible gradient de tension, il peut faire fonction de sectionneur rapide à système de contacts léger qui ne sera pas exposé à la tension entre pôles maximale, telle que définie par le niveau de protection des parafoudres, tant qu'il n'est pas en position ouvert. Des mécanismes de commande Thomson [4] garantissent un appareil compact à ouverture rapide et isolation dans l'hexafluorure de soufre (SF₆).

Proactif, le disjoncteur CCHT hybride compense le retard du sectionneur rapide si le temps d'ouverture de ce dernier est inférieur au temps nécessaire à la protection sélective. Cette commutation proactive est amorcée par la protection à maximum de courant intégrée du disjoncteur, dès que le courant de ligne CCHT dépasse une surintensité donnée → 3a. Le disjoncteur principal retarde la coupure jusqu'à ce qu'il reçoive un signal de déclenchement ou que le courant de la ligne en défaut avoisine le courant de coupure maximal du disjoncteur principal → 3b.

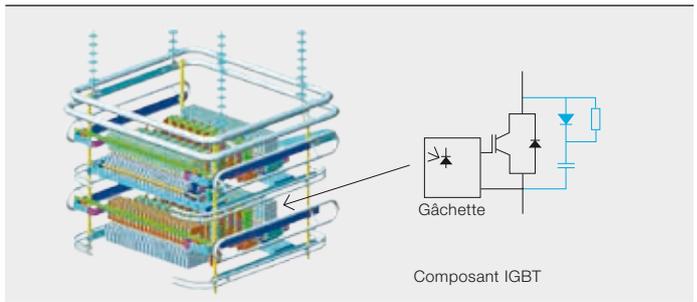
Pour allonger cette durée précédant le déclenchement du disjoncteur hybride par sa fonction d'autoprotection, le disjoncteur principal peut fonctionner en mode limitation de courant → 3c avant la coupure. Il contrôle la chute de tension à zéro aux bornes de l'inductance CCHT pour éviter une autre élévation du courant de ligne. La durée maximale de

La proactivité du disjoncteur CCHT hybride permet de compenser le retard du sectionneur rapide si le temps d'ouverture de ce dernier est inférieur au temps nécessaire à la protection sélective.

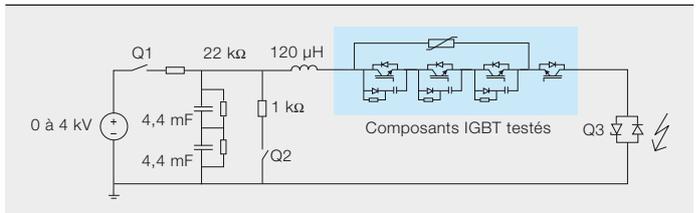
cette limitation de courant dépend de la capacité de dissipation d'énergie des parafoudres → 3d.

La protection de secours rapide des disjoncteurs électroniques est également envisageable pour les disjoncteurs hybrides des postes CCHT. Les surintensités sur la ligne ou la protection amont du poste peuvent activer le transfert du courant du *bypass* au disjoncteur CCHT principal ou aux éventuels disjoncteurs de secours, avant le signal de déclenchement de la protection. En cas de défaillance d'un disjoncteur, ces secours

4 Cellule disjoncteur CCHT principal 80 kV



5 Circuit d'essai



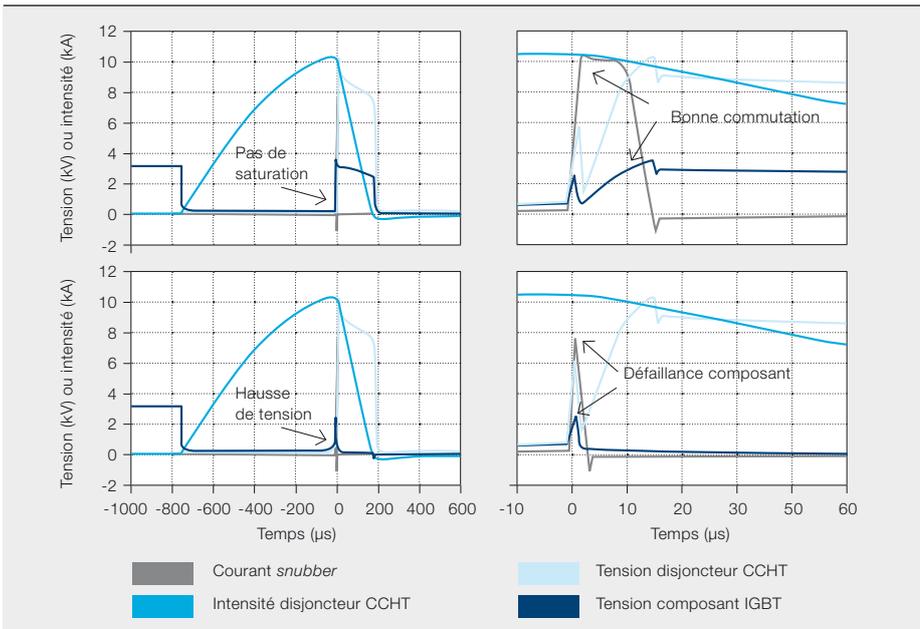
sont activés quasi instantanément (en moins de 0,2 ms), évitant par là-même de graves perturbations du réseau CCHT et maintenant leur pouvoir de coupure à des valeurs raisonnables.

Prototype

Le prototype de disjoncteur CCHT hybride est calibré pour interrompre 9 kA dans un réseau de transport CCHT fonctionnant à une tension et un courant assignés de 320 kV et 2 kA. Ce pouvoir de coupure maximal est indépendant de l'intensité nominale, suivant la conception du disjoncteur CCHT principal uniquement. Le section-

neur rapide et le disjoncteur CCHT principal sont conçus pour des tensions de commutation dépassant 1,5 p.u., compte tenu des transitoires de tension rapides pendant la coupure de courant.

Le disjoncteur CCHT principal aligne plusieurs cellules de disjoncteurs CCHT, dont les parafoudres limitent en coupure la tension maximale les traversant → 2f à un niveau donné. Une cellule contient quatre empilements de disjoncteurs CCHT → 4 (deux par sens du courant).



Chaque empilement totalise au maximum 20 emplacements de disjoncteurs CCHT à transistors IGBT en série. Du fait des fortes variations de courant di/dt en coupure, une exécution mécanique à faibles inductances parasites fut adoptée. L'emploi de modules IGBT en boîtier pressé de tension nominale 4,5 kV [6] garantit un empilement compact et un mode de défaillance en court-circuit stable, en cas de défaut d'un composant. Un circuit de protection *snubber* de type RCD (résistance-condensateur-diode) aux bornes de chaque module IGBT assure une répartition égale de la tension pendant la coupure. Des commandes de gâchette à déclenchement optique autorisent le fonctionnement du disjoncteur CCHT à IGBT indépendamment des caractéristiques de courant et de tension

satisfaire aux caractéristiques assignées de tension. La mise en parallèle des modules IGBT augmente le courant assigné du disjoncteur CCHT hybride. La redondance des disjoncteurs CCHT à IGBT en série renforce la fiabilité de l'interrupteur. Le montage retenu pour notre prototype est une matrice de 3×3 emplacements d'IGBT pour chaque sens du courant. Exposé en permanence au courant de ligne, l'interrupteur doit être refroidi.

Procédure d'essais

Un prototype à échelle réduite de la cellule disjoncteur principal à trois modules IGBT en série et bloc de parafoudres commun servit à tester le pouvoir de coupure des IGBT en boîtier pressé StakPak [6] de 4,5 kV dans le premier

circuit d'essai → 5; un quatrième module fut raccordé dans le sens opposé du courant primaire pour vérifier le bon fonctionnement de la diode antiparallèle intégrée. La

décharge d'une batterie de condensateurs par un thyristor, seulement limitée par une faible inductance CC, reproduisit les défauts phase-terre du réseau CCHT.

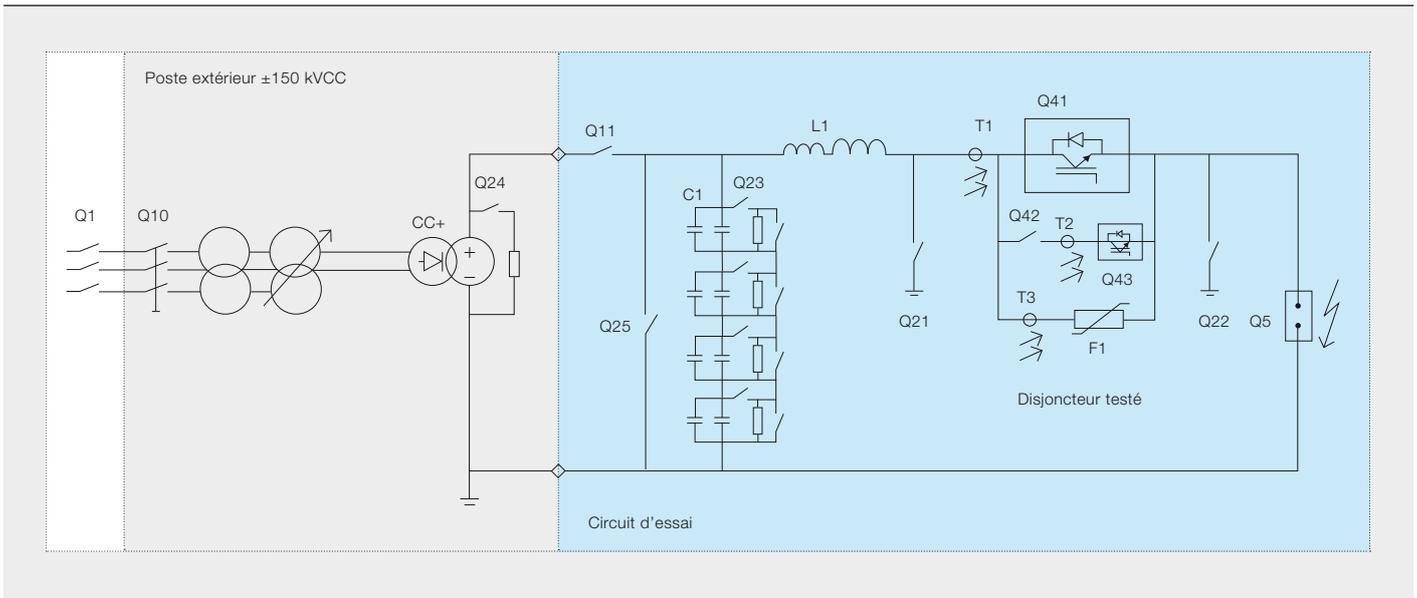
Le pouvoir de coupure maximal de la cellule disjoncteur CCHT à IGBT est donné par le courant de saturation des modules IGBT → 6 (plutôt que l'aire de sécurité,

Chaque module de disjoncteur CCHT aligne jusqu'à 20 emplacements de transistors IGBT en série.

du réseau CCHT. Les cellules du disjoncteur CCHT principal n'étant pas exposées en temps normal au courant de ligne, les assemblages d'IGBT n'ont pas besoin de système de refroidissement.

L'interrupteur de commutation de charge → 2c se résume à un seul disjoncteur à IGBT par sens du courant pour

L'interrupteur mécanique s'ouvrant au zéro de courant et sous un faible gradient de tension, il peut faire fonction de sectionneur rapide à système de contacts léger.



Des essais concluants et un démonstrateur ABB confirment la performance du disjoncteur CCHT hybride et de ses composants.

comme c'est le cas des convertisseurs à source de tension). Les IGBT en série peuvent commuter le courant de ligne sur les circuits de protection (snubber) en à peine 2 μ s, limitant la vitesse de montée en tension de ces modules à 300 V/ μ s. La commutation à tension nulle réduit les pertes instantanées et garantit une répartition égale de la tension, quelles que soient les tolérances des caractéristiques de commutation des modules IGBT concernés.

Le courant de ligne bascule du circuit de protection au parcours des parafoudres dès que la tension commune aux bornes des IGBT atteint le niveau de protection du bloc de parafoudres.

Les IGBT du disjoncteur CCHT réussirent les essais sous contraintes pour des courants de coupure inférieurs à 10 kA. À des intensités plus élevées, le courant de saturation des IGBT provoque une chute de tension immédiate aux bornes des modules. Un essai destructif montra que la dissipation thermique dans le module détruisait les puces IGBT encapsulées. On y remédia avec des IGBT en boîtier pressé qui créent un court-circuit fiable, sans destruction mécanique du module. Un seul des trois modules IGBT ayant échoué au test, le défaut peut encore être éliminé par les deux autres.

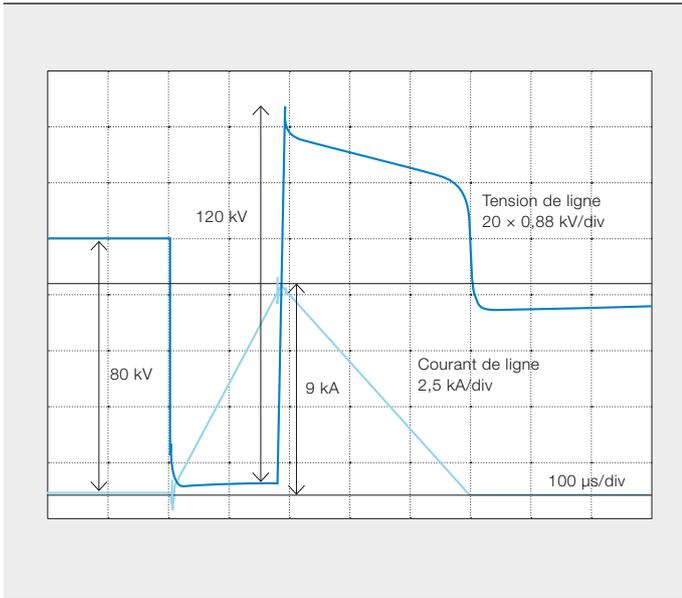
La tension CCHT nominale par cellule disjoncteur à IGBT est de 80 kV : une tension élevée qui impose un second montage d'essai beaucoup plus volumi-

neux → 7. On augmente le niveau de tension CCHT souhaitée en chargeant la batterie de condensateurs *C1*. La bobine d'inductance *L1* est choisie de façon à obtenir la dérivée de courant *di/dt* escomptée pendant un défaut en court-circuit, lequel est amorcé par l'éclateur déclenché *Q5*.

Un résultat d'essai type → 8 confirme un courant de coupure maxi supérieur à 9 kA ; la tension aux bornes de la cellule disjoncteur CCHT dépasse 120 kV pendant la commutation. Le pouvoir de cou-

Le transistor BIGT doublera le pouvoir de coupure de courant des modules IGBT en boîtier pressé.

pure d'une seule cellule 80 kV est donc supérieur à 1 GVA. Qui plus est, la répartition égale de la tension avec une chute maximale de 3,3 kV et une propagation inférieure à 10 % n'est observée que pour chaque emplacement d'IGBT dans la cellule disjoncteur CCHT.



Validation

Ce montage d'essai de disjoncteur principal fut agrandi pour valider le concept de disjoncteur CCHT hybride. On installa une seconde batterie de condensateurs et de grosses inductances pour limiter la vitesse d'élévation du courant de ligne aux valeurs caractéristiques d'un réseau CCHT. Le sectionneur rapide et l'interrupteur de commutation de charge faisaient partie de la configuration.

Les essais confirmèrent la performance du dispositif et de ses composants. Le disjoncteur CCHT hybride complet a depuis été testé dans un démonstrateur ABB → 9 qui reproduit une coupure avec un courant crête de 9 kA et un retard à l'ouverture du sectionneur rapide (branche parallèle au disjoncteur principal) de 2 ms. Le courant de défaut maxi assigné de 9 kA est la limite pour les dispositifs à semi-conducteurs actuels; la prochaine génération autorisera 16 kA. Ces essais avaient pour but de vérifier les performances de commutation de l'électronique (composants de puissance) et la vitesse d'ouverture de la mécanique (sectionneur rapide). Le montage se composait d'une seule cellule de disjoncteur principal unidirectionnel de 80 kV, d'un sectionneur ultrarapide et d'un interrupteur de commutation de charge. On augmenta la tension assignée en raccordant plusieurs cellules de disjoncteur principal en série. Le but était de reproduire des coupures de courant normales mais aussi des défaillances de composants dans le disjoncteur.

Le meilleur est à venir

L'avènement du transistor BIGT (*Bimode Insulated Gate Transistor*) [7], qui intègre la fonction de diode en conduction inverse sur les puces IGBT, doublera le pouvoir de coupure de courant des modules en boîtier pressé (*lire p. 19–23*).

Des disjoncteurs CCHT rapides, fiables et quasiment sans pertes, ainsi que des limiteurs de courant basés sur le concept de disjoncteur CCHT hybride ont été testés avec succès, aux niveaux composants et système, pour des tensions CCHT atteignant 320 kV et des courants assignés de 2 kA. Voilà franchi un obstacle de taille à la réalisation des réseaux CCHT. Dernière ligne droite: les essais sur une liaison CCHT.

Magnus Callavik

ABB Grid Systems
Västerås (Suède)
magnus.callavik@se.abb.com

Anders Blomberg

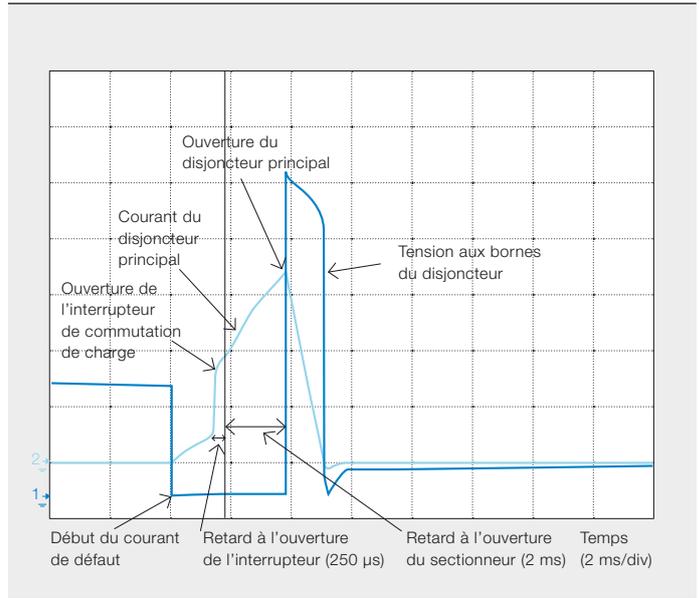
Ancien collaborateur ABB Grid Systems

Jürgen Häfner

ABB Grid Systems
Ludvika (Suède)
jurgen.hafner@se.abb.com

Björn Jacobson

ABB Grid Systems
Beijing (Chine)
bjorn.jacobson@cn.abb.com



Bibliographie

- [1] Koldby, E., Hyttinen, M., "Challenges on the Road to an Offshore HVDC Grid", *Nordic Wind Power Conference*, Bornholm, septembre 2009.
- [2] Ekström, Å., Härtel, H., Lips, H. P., Schultz, W., "Design and testing of an HVDC circuit breaker", *Cigré session 1976*, communication 13-06.
- [3] Franck, C. M., "HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, p. 998–1007, avril 2011.
- [4] Magnusson, J., Hammar, O., Engdahl, G., "Modelling and Experimental Assessment of Thomson Coil Actuator System for Ultra Fast Mechanical Switches for Commutation of Load Currents", *International Conference on New Actuators and Drive Systems*, Brème, 14–16 juin 2010.
- [5] Asplund, G., *HVDC switch for current limitation in a HVDC transmission with voltage source converters*, brevet européen EP0867998B1.
- [6] Eicher, S., Rahimo, M., Tsyplakov, E., Schneider, D., Kopta, A., Schlapbach, U., Caroll, E., "4.5 kV Press Pack IGBT Designed for Ruggedness and Reliability", *IAS*, Seattle, octobre 2004.
- [7] Rahimo, M., Kopta, A., Schlapbach, U., Vobecky, J., Schnell, R., Klaka, S., "The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT), a potential technology for higher power applications", *21th International Symposium on Power Semiconductor Devices*, p. 283–286, 2009.
- [8] Häfner, J., Jacobson, B., "Proactive Hybrid HVDC Breakers – A key innovation for reliable HVDC grids", *The electrical power system of the future*, *Cigré*, communication n° 264, Bologne, septembre 2011.

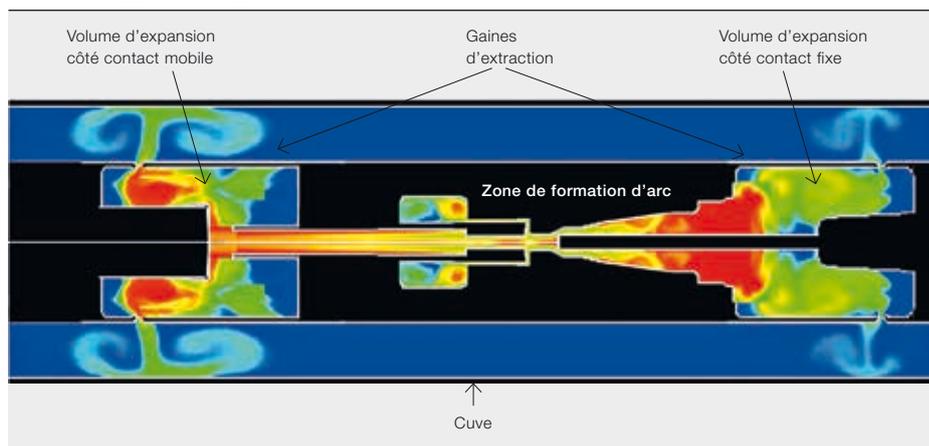


Coupes claires

Une nouvelle génération de disjoncteurs haute tension ABB

HELMUT HEIERMEIER, RETO KARRER – Les réseaux électriques qui quadrillent nos régions et nos villes sont en perpétuelle évolution. Leur tension de fonctionnement, en particulier, augmente pour minimiser les pertes en ligne, mettant à rude épreuve les équipements stratégiques de conduite et de protection que sont les disjoncteurs. La chambre de coupure, siège de la commutation physique, en est la pièce maîtresse. Avec l'évolution de la technologie et des marchés, et l'avènement de normes internationales, une nouvelle génération de chambre de coupure s'impose.

1 Exemple de simulation numérique des écoulements dans un disjoncteur à enveloppe métallique



Nos réseaux électriques sont exploités à des tensions de plus en plus élevées pour minimiser leurs pertes et leur empreinte écologique. Ces niveaux de tension, couplés à d'autres exigences, nécessitent de faire évoluer le disjoncteur, rouage essentiel de la protection et de la conduite de réseau. Sa disponibilité est primordiale car elle a un impact direct sur la fiabilité du réseau lui-même.

Diminuer le nombre d'éléments constitutifs du disjoncteur et son énergie de manœuvre réduit le risque de pannes intempestives, la taille et le coût de l'appareil.

C'est ce constat qui a conduit ABB à développer un nouveau disjoncteur à une seule chambre, destiné aux réseaux 420 kV, avec pour objectif la conformité aux dernières normes CEI et ANSI/IEEE, ainsi qu'aux exigences connues des divers marchés dans le monde. Les courants nominaux et de court-circuit que doit interrompre le disjoncteur étant appelés à augmenter, ABB vise un courant assigné de 5 kA et un courant de court-circuit assigné de 63 kA à 50 Hz et 60 Hz. Parmi les autres exigences, citons :

- Une cellule de petite taille (tenant intégralement dans une armoire standard) ;

- Un pouvoir de coupure complet de défauts proches en ligne, sans condensateur phase-terre ;
- Un volume de gaz SF₆ réduit ;
- Des forces de réaction minimales (impact sur les bâtiments et fondations) ;
- Un actionneur standard de petite taille ;
- Une durée de coupure sur deux cycles.

Une sentinelle des réseaux

Le disjoncteur est un équipement remarquable. Il doit gérer des courants compris entre 1 A et plusieurs dizaines de kA, et résister à des scénarios très divers, comme des hausses de tension très rapides ou des contraintes prolongées de courant alternatif. Il lui faut aussi bien effectuer de simples manœuvres de fermeture-ouverture que couper sans délai des courants de court-circuit. Il peut rester longtemps inactif tout en étant capable d'interrompre un défaut en quelques millisecondes.

Repenser le disjoncteur

De nombreux facteurs entrent en compte dans la conception d'un appareil de connexion et le choix d'une technologie de coupure.

Pouvoir de coupure de courants capacitifs

Cette fonction se caractérise par des courants relativement faibles mais une tension élevée entre les contacts du

disjoncteur ; la résistance dynamique de l'appareil aux surtensions doit donc être supérieure à la hausse de la tension réseau pendant la manœuvre d'ouverture. Une véritable course contre la montre entre l'ouverture des contacts et la montée de la tension transitoire, que le disjoncteur se doit de gagner ! En effet, il faut absolument éviter tout claquage risquant de provoquer une montée en tension dommageable pour les équipements de postes électriques et les lignes aériennes. En d'autres termes, le nouveau disjoncteur doit pouvoir rapidement déplacer ses contacts afin d'assurer une

Moins de composants et une énergie de manœuvre plus faible réduisent le risque de pannes intempestives. Plus petit, le disjoncteur est aussi moins cher et moins encombrant !

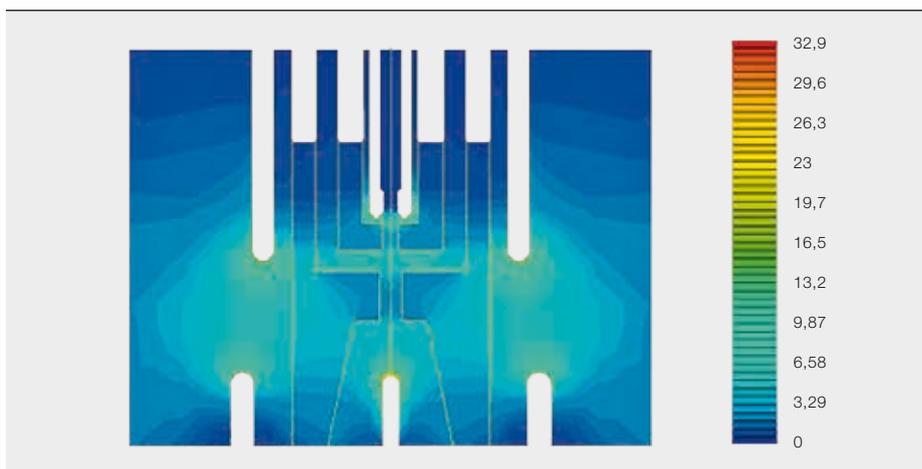
excellente résistance diélectrique dans un très court laps de temps. Les normes internationales décrivent à cette fin un programme d'essais complet, accompagné d'une procédure très détaillée.

Photo p. 14

La tension monte dans les lignes électriques ? Voilà de nouveaux défis technologiques à relever pour les disjoncteurs modernes.

Le disjoncteur ABB à une chambre de coupure pour réseaux de 420 kV affiche un courant assigné de 5 kA, un courant de court-circuit assigné de 63 kA à 60 Hz, sans condensateur phase-terre.

2 Exemple de simulation de champ électrique dans la zone d'arc



Plein pouvoir de coupure de défauts proches en ligne

Ce pouvoir nécessite une pression élevée du gaz entre les contacts du disjon-

fraction (7 à 30%) du courant assigné de court-circuit est présente et que la tension de rétablissement (qui apparaît aux bornes après coupure du courant)

s'élève très rapidement. Pour résister à une telle contrainte, le disjoncteur doit avoir une excellente tenue dynamique de la tension, très vite après coupure du courant. Autrement dit, le gaz chaud présent entre les contacts d'arc sera

De nouveaux matériaux et méthodes de fabrication ont été évalués pour aboutir à un produit d'un coût comparable à celui des solutions classiques.

teur pour que le refroidissement suffise à éteindre l'arc et à couper le courant. Cette montée en pression est, entre autres facteurs, déterminante pour éliminer rapidement les défauts et interrompre de forts courants de court-circuit avec une seule chambre de coupure.

Pouvoir de coupure de défauts aux bornes

L'une des conditions de notre nouveau disjoncteur étant de conserver un temps de coupure sur deux cycles, la durée d'ouverture doit être brève, ce qui entraîne des niveaux d'asymétrie supérieurs à ceux des anciennes générations d'appareils. La coupure impose une forte montée en pression à l'actionneur, aux buses et au volume d'expansion. Le nouveau disjoncteur doit pouvoir gérer en toute sécurité cet afflux d'énergie dans la zone d'arc et le volume d'expansion.

Défaut limité par un transformateur

Cette exigence, spécifique à certains sites, doit être respectée quand une

remplacé par du gaz froid le plus rapidement possible.

Choix de la technique de coupure

Il existe divers types de disjoncteurs, ayant chacun leurs mérites :

- Disjoncteurs à soufflage forcé ;
- Disjoncteurs à soufflage forcé de nouvelle génération ;
- Disjoncteurs à autosoufflage et soufflage forcé ;
- Disjoncteurs à autosoufflage pur ;
- Disjoncteurs à autosoufflage et double déplacement linéaire des contacts ;
- Disjoncteurs à autosoufflage et double déplacement non linéaire des contacts.

Plusieurs de ces techniques ont été combinées au sein du nouvel appareil ABB pour donner un disjoncteur à soufflage forcé de nouvelle génération à double déplacement non linéaire. Ce choix présente les avantages suivants :

- Vitesse des contacts élevée et réglable ;

3 Le disjoncteur a été entièrement testé en laboratoire.

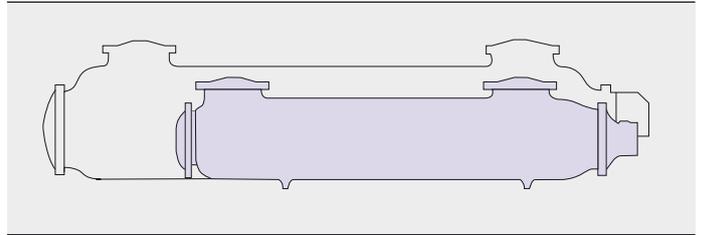


- Faible masse en mouvement (donc faibles forces de réaction) ;
- Ouverture rapide (par mécanisme classique à ressorts hydraulique de faible énergie) ;
- Faible rapport entre élévation de la pression à vide et élévation de la pression maximale (donc basse température du gaz d'extinction en coupure) ;

Les forces de réaction sont plus faibles que dans n'importe quelle autre solution, diminuant le coût de l'infrastructure.

- Faibles sollicitations mécaniques des pièces mobiles (vitesse de déplacement réduite) ;
- Pas de contrainte mécanique excessive exercée par la montée en pression sur les contacts d'arc puisqu'il est possible

4 Réduction notable de volume



5 Première installation en Suisse : le nouveau disjoncteur (gauche) et l'ancien (droite)



de limiter la pression maximale générée, même à des niveaux élevés d'asymétrie.

L'équipe de développement s'est largement appuyée sur des logiciels de simulation pour reproduire différents phénomènes physiques comme les écoulements, la montée en pression et les champs électriques en coupure → 1, 2.

L'étude mécanique a été complétée par des outils de calcul par éléments finis. Des appareils d'essai instrumentés ont fourni des données pour améliorer et valider la simulation. Des tests supplémentaires ont permis de déterminer les limites de l'appareil d'essai. Parallèlement au développement, de nouveaux matériaux et des méthodes de fabrication avancées ont été évalués pour aboutir à un produit d'un coût comparable à celui des solutions classiques → 3.

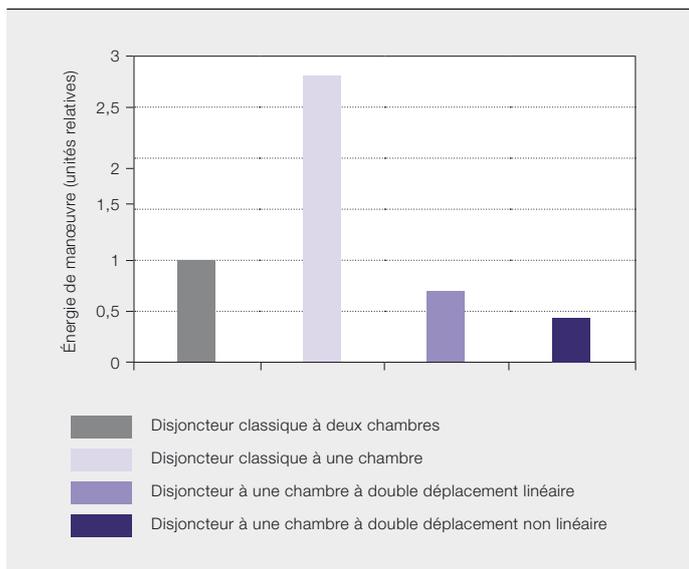
Bilan

Ce développement a atteint, voire dépassé ses objectifs :

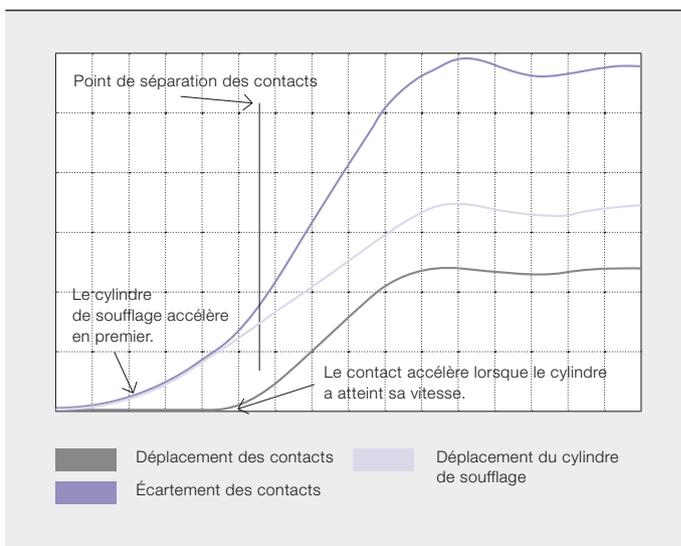
- Réduction de 50 % de l'énergie de manœuvre ;
- Réduction de 30 % du volume de SF₆ → 4 ;

L'énergie de manœuvre a fondu de 50 %, le volume de la cellule de SF₆ de 50 % et celui du SF₆ de 30 % !

6 Comparaison de l'énergie de manœuvre des différents disjoncteurs



7 Courbes de commutation (axes des unités relatives) conformes aux dernières normes CEI et IEEE



Les développeurs ont fait appel à la simulation pour reproduire les écoulements, la montée en pression et les champs électriques en coupure. Des outils de calcul par éléments finis ont parachevé l'étude mécanique.

- Réduction de moitié du volume de la cellule accueillant l'appareillage d'interruption à isolation gazeuse (301 ELK 3-2, 147 ELK 3-1) → 5. L'utilisation de pièces spécialement adaptées à ce type d'appareils permettra de réduire encore l'encombrement de la cellule. Cette dernière tiendra dans un conteneur standard, tant pour le transport que pour servir d'appoint dans un poste extérieur (comme exposée à la foire de Hanovre 2012).

Notre disjoncteur à double déplacement non linéaire utilise deux fois moins d'énergie de manœuvre qu'un appareil classique à deux chambres et cinq fois

moins qu'un appareil à une chambre, avec un seul côté mobile! → 6. La masse en mouvement par chambre (simple ou double) est à peu près identique, même si les tiges et les leviers alourdissent légèrement le système à double déplacement.

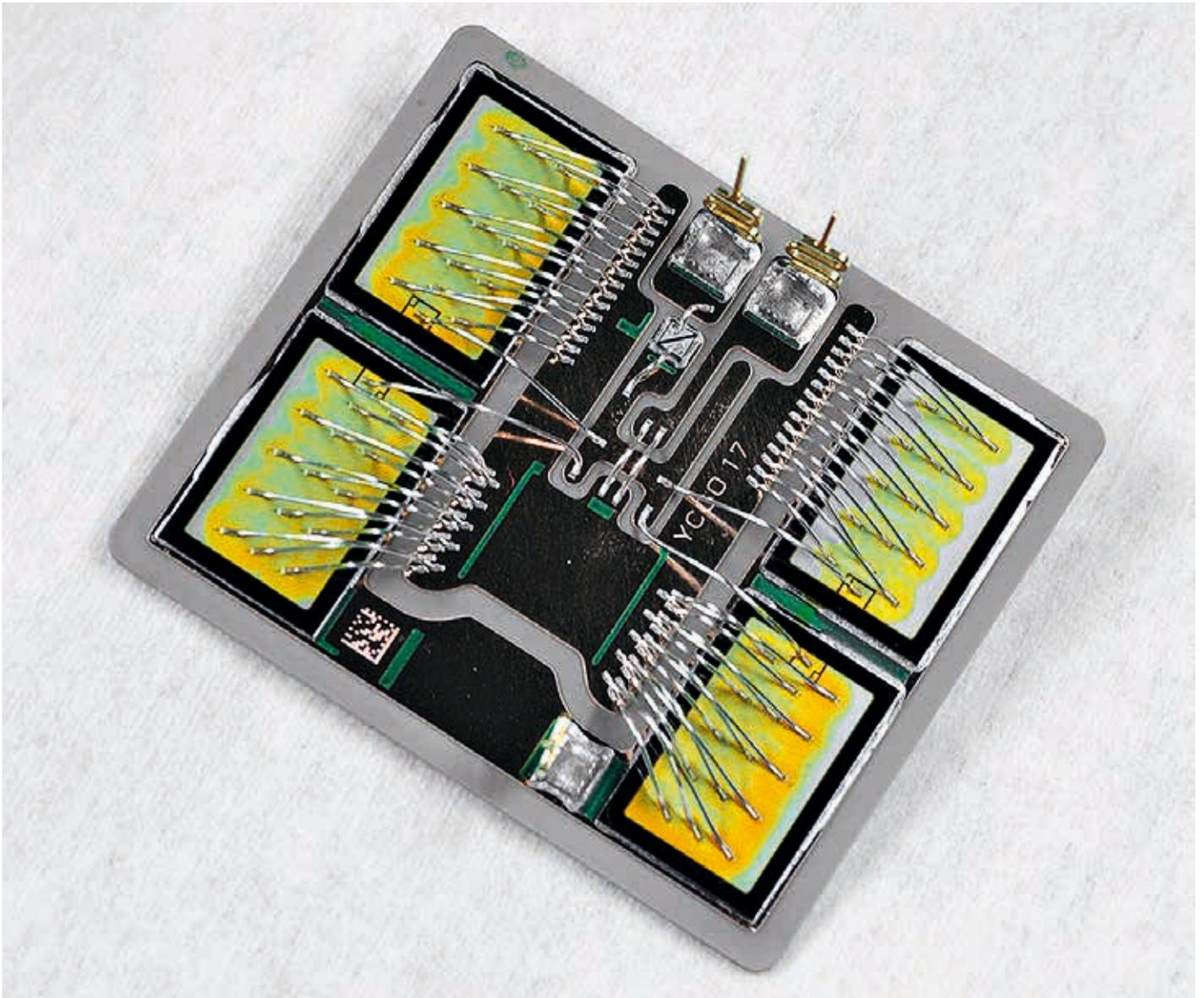
Les forces de réaction sont plus faibles que dans n'importe quelle autre solution, diminuant le coût de l'infrastructure. De plus, l'accélération de la masse en mouvement peut se faire par échelon et le déplacement de la tige être réduit, allégeant d'autant la consommation d'énergie → 7.

Le nouveau disjoncteur, utilisable dans des applications de disjoncteur à cuve mise à la terre, de système de coupure et de connexion PASS ou encore d'appareillage à isolation gazeuse, satisfait à tous les grands objectifs définis. Il en résulte un disjoncteur moderne et compétitif, conforme aux toutes dernières normes internationales. Preuve de sa performance: la puissance de court-circuit qu'une seule chambre est capable de commuter avoisine 23 gigawatts, soit la puissance nominale d'une quinzaine de centrales nucléaires !

Helmut Heiermeier

Reto Karrer

ABB Power Products, High Voltage Products
Baden (Suisse)
helmut.heiermeier@ch.abb.com
reto.karrer@ch.abb.com

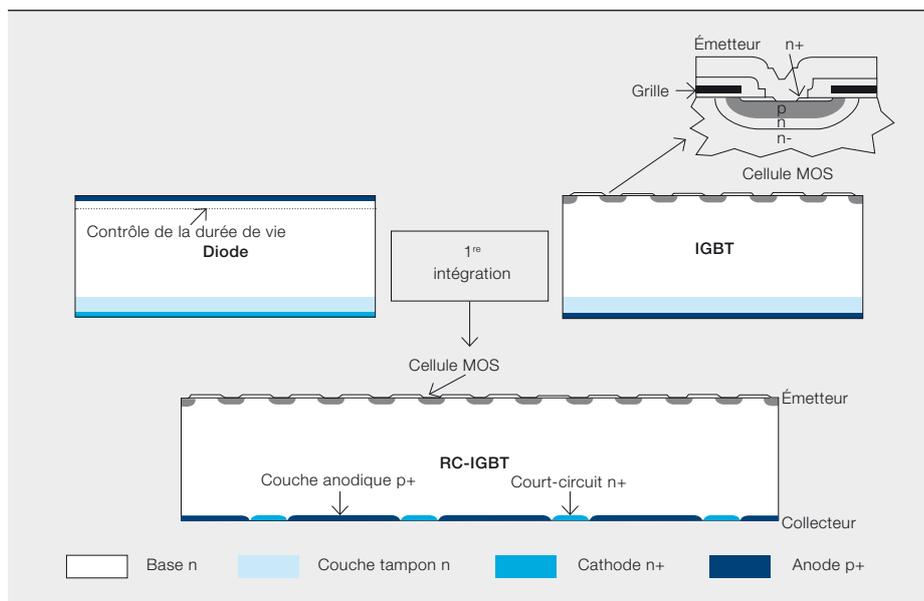


Une puce deux-en-un

ABB présente son nouveau transistor BIGT

MUNAF RAHIMO, LIUTAUROS STORASTA, CHIARA CORVASCE, ARNOST KOPTA – Les dispositifs à semi-conducteurs de puissance des convertisseurs à source de tension ne laissent généralement circuler le courant que dans un sens. Or les topologies de convertisseurs à charges inductives associent habituellement des interrupteurs à un sens de conduction à des diodes de roue libre qui conduisent dans l'autre sens (conduction inverse ou antiparallèle). Depuis longtemps, les fabricants de semi-conducteurs cherchent à intégrer totalement ces deux fonctions dans un même dispositif et, dans l'idéal, sur une

seule et même puce de silicium. Pareille intégration ouvre la voie à des densités de puissance supérieures et à des systèmes plus compacts et plus simples à fabriquer. Dans la technologie IGBT (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*)¹, les interrupteurs en conduction inverse monopuce ont le plus souvent été cantonnés aux faibles puissances et aux applications spéciales. Avec son nouveau transistor BIGT (*Bimode Insulated-Gate Transistor*), ABB réussit une percée majeure en intégrant une diode de roue libre à l'interrupteur et en obtenant des performances opérationnelles réservées jusqu'ici aux fortes puissances.



Ces dernières années, les difficultés techniques inhérentes à l'intégration des diodes antiparallèles aux dispositifs de commutation ont réservé ce concept aux composants de faible puissance comme les IGBT et les MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*)² ainsi qu'aux applications spéciales. Dans le cas des dispositifs bipolaires de grande surface, comme les IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*)³, l'intégration monolithique était privilégiée en utilisant toutefois des substrats silicium totalement distinct pour l'IGCT et la diode.

Les récents travaux de développement d'ABB visaient à intégrer sur une même puce un IGBT de forte puissance et une diode avec, comme principale application ciblée, les onduleurs classiques à commutation dure⁴. Les premiers prototypes de transistor BIGT, de plus de 3300 V de tension nominale, affichaient des densités de puissance supérieures à celles des puces traditionnelles et de meilleures performances globales. La conception du BIGT reprend celle des derniers IGBT tout en intégrant, dans la

même structure, une diode antiparallèle optimisée. Outre l'impact en termes de puissance et de taille, le BIGT offre de multiples avantages: extinction plus douce dans les deux modes de fonctionnement (IGBT et diode), résistance aux températures de service élevées, meilleure tenue aux défauts en cas de court-circuit de l'IGBT et aux courants de surcharge⁵ de la diode, répartition plus homogène du courant lorsque les dispositifs fonctionnent en parallèle. De plus, en utilisant le même volume

Le défi de l'intégration

Dans les applications modernes à modules d'IGBT, la diode est le maillon faible en raison de ses pertes, de ses performances limitées et de sa tenue imparfaite aux courants de surcharge. Ces faiblesses résultent de la surface limitée traditionnellement réservée à la diode, le rapport de surface moyen IGBT/diode étant de l'ordre de 2:1. Cette limitation a été imposée par les IGBT modernes à faibles pertes. Augmenter la surface de la diode n'est pas une solution privilégiée par les concepteurs; dans tous les cas, elle est tributaire de la taille des boîtiers. Les besoins de densités de puissance accrues des IGBT et des diodes ont donc poussé à l'intégration de ces

Plusieurs technologies anciennes et nouvelles ont été utilisées pour intégrer des fonctionnalités IGBT et diode dans le BIGT.

de silicium disponible dans les deux modes, le BIGT procure de meilleures propriétés thermiques du fait de l'absence de périodes de fonctionnement inactives et, donc, une plus grande fiabilité.

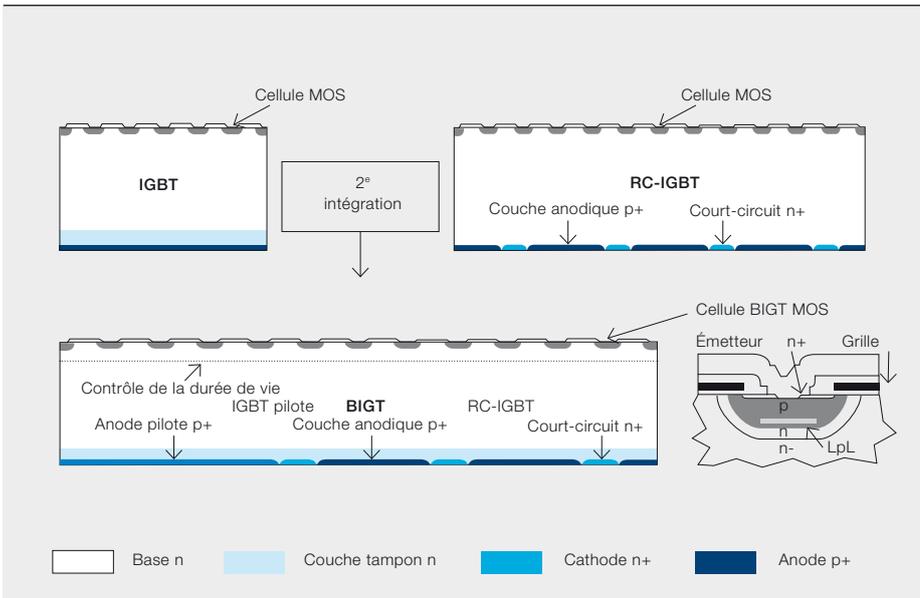
La technologie BIGT monopuce est une solution potentielle pour les futures applications haute tension qui nécessitent des systèmes compacts et plus puissants, en particulier ceux exigeant des courants de diode élevés mais irréalisables avec le concept standard bipuce.

composants, sous la forme de solutions désignées le plus souvent RC-IGBT (*Reverse-Conducting IGBT*).

Jusqu'à une date récente, l'utilisation des RC-IGBT se limitait à des tensions inférieures à 1200 V pour des applications spéciales de commutation douce, avec de moindres exigences pour les diodes. Classiquement, la réalisation d'un tel dispositif pour les applications de haute tension et de commutation dure a toujours été bridée par des problèmes de conception et de fabrication, aboutissant à un certain nombre de

Photo p. 19

Le nouveau transistor BIGT d'ABB intègre sur la même puce une fonction de diode de conduction inverse.



Les récents travaux de développement ABB ciblent l'intégration sur une même puce d'un IGBT de forte puissance et d'une diode.

contre-performances et d'arbitrages, notamment :

- Retournement de tension⁶ (*snapback*) dans la caractéristique $I(V)$ à l'état passant de l'IGBT (effet court-circuitant du MOSFET) ;
- Arbitrage entre les pertes à l'état passant de l'IGBT et les pertes au recouvrement inverse de la diode (effet de mise en forme du plasma) ;
- Arbitrage entre le comportement doux de l'IGBT et celui de la diode (conception du silicium) ;
- Aire de sécurité (uniformité de la charge).

Ces dernières années, les efforts de développement au sein d'ABB pour résoudre ces problèmes ont débouché sur un concept avancé de RC-IGBT : le transistor BIGT.

Transistor BIGT

L'intégration du BIGT se fait en deux étapes. Premièrement, l'IGBT et la diode partagent une même structure → 1. Côté collecteur, des zones dopées n+ alternées sont introduites dans une couche anodique p+ de l'IGBT. Elles agissent alors comme un contact de cathode pour le mode de fonctionnement en diode interne. Le rapport de surface entre l'anode de l'IGBT (zones p+) et la cathode de la diode (zones n+) détermine la partie de la surface du collecteur disponible respectivement en mode IGBT ou diode. Pendant la conduction en mode diode, les zones p+ sont inactives et n'influencent pas directement

les performances en conduction de la diode. Par contre, les zones n+ agissent comme des courts-circuits d'anode en mode IGBT, influençant fortement sa conduction.

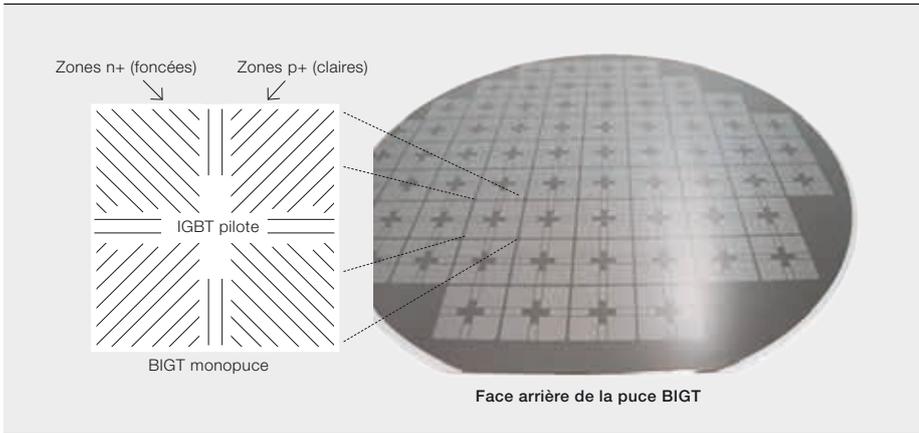
Une des conséquences des courts-circuits d'anode est le retournement de tension précité, qui prend la forme d'une zone de résistance négative dans la caractéristique $I(V)$ du dispositif en mode IGBT ; un inconvénient lorsque les dispositifs sont connectés en parallèle, surtout aux basses températures. Pour y remédier, une seconde étape d'intégration est nécessaire. On a démontré que l'effet de retournement initial pouvait être contrôlé et éliminé en introduisant de larges zones p+ dans le dispositif, également appelé « IGBT pilote ». Cette approche a débouché sur le concept BIGT qui, dans son principe, est une structure hybride regroupant sur une seule puce un RC-IGBT et un IGBT standard → 2.

La zone pilote est centrée sur la puce pour une meilleure répartition thermique et une moindre hétérogénéité des courants. Elle est également conçue pour étendre au maximum sa portée fonctionnelle tout en garantissant une large zone RC-IGBT. Les zones p+ et n+ alternées ont une structure rayée avec une disposition radiale optimisée pour garantir une transition en douceur et rapide en mode de conduction IGBT de la zone pilote vers le reste de la puce → 3.

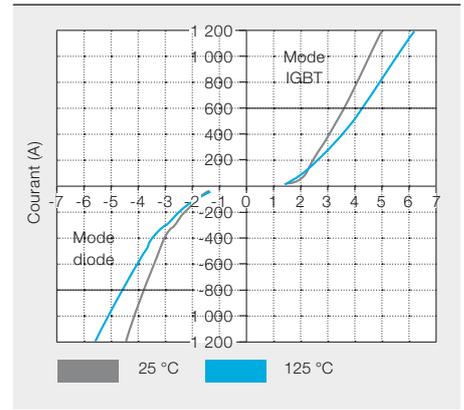
Notes

- 1 Transistor bipolaire à grille isolée : semi-conducteur commandé en tension largement utilisé en électronique de puissance.
- 2 Transistor à effet de champ à grille métal-oxyde : semi-conducteur utilisé à la fois dans les applications de commutation (de moindre puissance que les IGBT) et d'amplification.
- 3 Thyristor intégré commuté par la gâchette : thyristor blocable par la gâchette de type GTO (*Gate Turn-Off thyristor*) optimisé pour la commutation dure. Pour en savoir plus sur les différents semi-conducteurs, lire « Cent ans de plénitude », p. 70.
- 4 Conduction/coupage du courant avec dv/dt et di/dt élevés pendant la commutation.
- 5 Aptitude d'un dispositif à résister sans dommages à un brusque pic de courant de courte durée (très supérieur à sa valeur nominale de courant).
- 6 Effet observé dans les IGBT où la tension à l'état passant peut présenter un court pic à l'amorçage (également illustré en figure 9.)

3 Face arrière de la puce BIGT



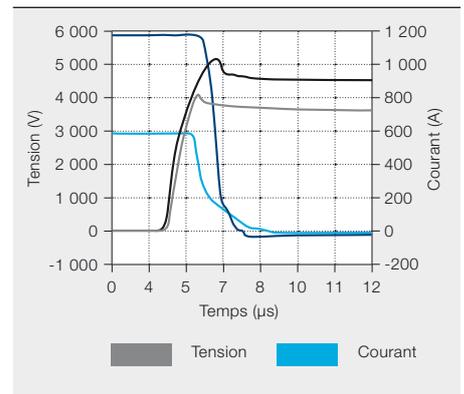
5 Caractéristiques à l'état passant du BIGT HiPak 1 de 6,5 kV/600 A



4 BIGT HiPak 1 de 6,5 kV/600 A



6 Formes d'onde au blocage en mode IGBT du BIGT HiPak 1 de 6,5 kV/600 A



La technologie BIGT sera d'abord développée pour la haute tension, avec des modules testés à des tensions nominales de 3,3 à 6,5 kV.

Plusieurs technologies anciennes et nouvelles ont été utilisées pour l'intégration des fonctionnalités IGBT et diode dans le BIGT. Pour commencer, il faut savoir que les technologies employées par ABB, comme les concepts SPT (*Soft-Punch-Through*) haute tension et de structure planar améliorée des cellules⁷, ont été les principaux moteurs de cette intégration. Réputés robustes et à faibles pertes, le profil de dopage optimal SPT contribue à réduire sensiblement l'effet de retournement alors que la structure planar améliorée et miniaturisée joue un rôle important dans la réduction des pertes en conduction et en commutation de la diode sans dégrader les performances de l'IGBT. Le contrôle axial standard de la durée de vie a été renforcé par un processus LPL (*Local P-well Lifetime*) → 2 pour un meilleur arbitrage entre pertes à l'état passant de l'IGBT et pertes au recouvrement inverse de la diode. Pour finir, du fait des courts-circuits d'anode, le BIGT a hérité d'un certain nombre de propriétés donnant des performances avantageuses dans les deux modes de fonctionnement : commutation douce en régimes extrêmes

et courants de fuite très faibles pour l'exploitation à des températures de jonction maximales plus élevées.

Performances du BIGT

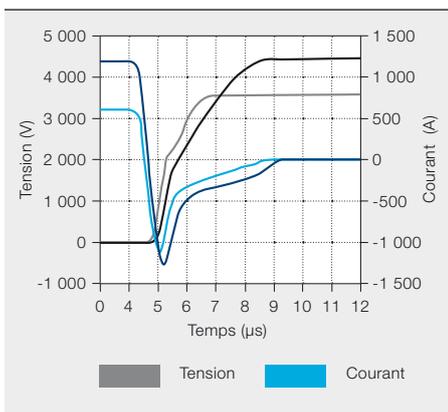
La technologie BIGT sera d'abord développée pour les dispositifs haute tension, avec des modules testés à des tensions nominales entre 3,3 et 6,5 kV. Les essais dont les résultats sont présentés ici ont été menés avec des modules HiPak récents de 6,5 kV de dimensions standards (140 × 130 mm), à un courant nominal de 600 A → 4.

Alors qu'un substrat IGBT/diodes classique regroupe normalement quatre IGBT et deux diodes, le nouveau substrat peut accueillir six puces BIGT fonctionnant toutes en mode IGBT ou diode. L'avantage du BIGT est ici manifeste avec le module HiPak 1 à quatre substrats qui totalise 24 puces BIGT et pourrait quasiment remplacer le plus gros module IGBT HiPak 2 (140 × 190 mm) contenant normalement six substrats à 24 IGBT et 12 diodes. L'autre inconvénient du gros module IGBT standard est de réserver une surface beaucoup

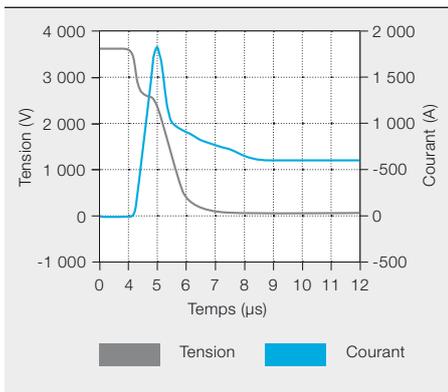
Note

⁷ Lire « IGBT : la course aux performances », *Revue ABB*, 3/2008, p.19-24.

7 Formes d'onde de recouvrement inverse en mode diode du BIGT HiPak 1 de 6,5 kV/600 A



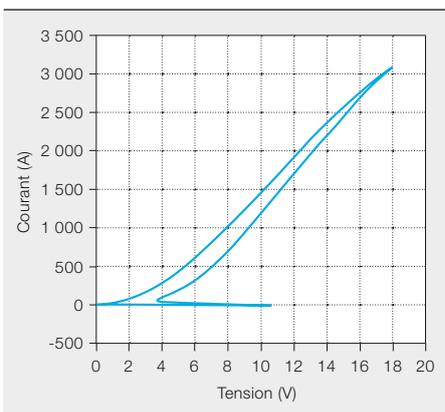
8 Formes d'onde en conduction et mode IGBT du BIGT HiPak 1 de 6,5 kV/600 A



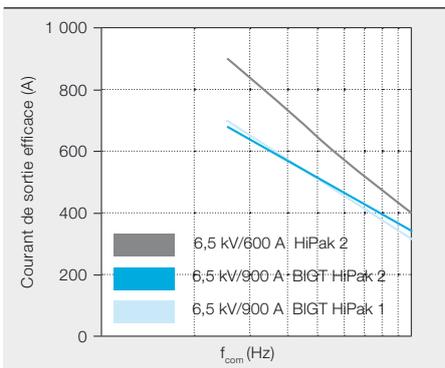
plus petite à la diode, facteur de limitation en mode redresseur et pour la tenue aux courants de surcharge. Par ailleurs, un gros module BIGT HiPak 2 pourrait renfermer 36 puces BIGT pour un courant nominal potentiel maxi de 900 A.

Les modules BIGT HiPak 1 ont été testés en régimes statique et dynamique, ana-

9 Tenue aux courants de surcharge en mode diode du substrat BIGT de 6,5 kV/600 A



10 Tenue aux courants de sortie des modules HiPak 1 et HiPak 2 de 6,5 kV/600 A en modes onduleur



pérature positif élevé dans les deux modes, même aux courants très faibles. Ce coefficient tient à l'efficacité d'injection optimale de l'émetteur et au contrôle de la durée de vie utilisé dans la structure BIGT.

Pour les mesures dynamiques en régime nominal, la tension du bus CC a été réglée à 3600 V, puis portée à 4500 V pour caractériser l'aire de sécurité.

Toutes les mesures ont été réalisées à 125 °C avec une résistance de grille fixe de 2,2 Ω, une capacité à

l'émetteur de grille de 220 nF et une inductance parasite de 300 nH. Les figures → 6 et → 7 montrent la forme d'onde au blocage des modules d'IGBT et de diodes respectivement sous régime nominal et à aire de sécurité. La forme d'onde au blocage des BIGT a toujours été plus régulière que celle des modules IGBT/diodes standards. Le BIGT n'a jamais donné lieu à des oscillations ou

présenté un comportement brusque dans aucun régime. La figure → 8 montre également le comportement à l'amorçage du BIGT en régime nominal. Les pertes de commutation totales des IGBT et diodes des modules testés étaient de l'ordre de 10 Joules, soit équivalentes à celles mesurées pour le module IGBT HiPak 2 de 6,5 kV/600 A standard.

La figure → 9 reprend la dernière mesure de la tenue aux courants de surcharge en mode diode du BIGT pour un substrat (calibré à 150 A) atteignant 3000 A. À l'évidence, le module BIGT HiPak 1 offre la même très bonne tenue aux courants de surcharge qu'un module correspondant IGBT/diodes HiPak 2; celle du module BIGT HiPak 2 est encore meilleure. Enfin, les modules et les puces BIGT ont réussi les essais standards de fiabilité et de fonctionnement en fréquence.

Au vu de ces résultats, les performances du BIGT devraient être supérieures à celles des plus récents IGBT et diodes en régimes de commutation à la fois douce et dure. Il en va de même de sa robustesse qui s'acquitte des strictes obligations normatives aujourd'hui imposées aux composants de puissance. La figure → 10 compare la tenue simulée au courant de sortie en mode onduleur des modules BIGT HiPak 1 et HiPak 2 de 6,5 kV à celle des modules IGBT HiPak 2 actuels à 125 °C. Les simulations du courant de sortie en mode redresseur donneront des valeurs encore supérieures du fait de la grande surface disponible pour la diode dans le module BIGT. La technologie BIGT ouvre la voie aux prochaines générations de systèmes en autorisant des densités de puissance supérieures et des performances globales exceptionnelles sans aucune des limitations imposées par les diodes.

Munaf Rahimo

Liutauras Storasta

Chiara Corvasce

Arnost Kopta

ABB Semiconductors

Lenzbourg (Suisse)

munaf.rahimo@ch.abb.com

liutauras.storasta@ch.abb.com

chiara.corvasce@ch.abb.com

arnost.kopta@ch.abb.com

Un gros module BIGT HiPak 2 peut renfermer 36 puces BIGT pour un courant nominal potentiel maxi de 900 A.

logues à ceux appliqués aux modules IGBT de dernière génération. Les caractéristiques à l'état passant du BIGT en modes IGBT et diode figurent en → 5. Une tension à l'état passant d'environ 4,2 V à 125 °C apparaît au courant nominal de 600 A pour les deux modes de fonctionnement. De plus, étayant la sécurité de la mise en parallèle, les courbes montrent un coefficient de tem-

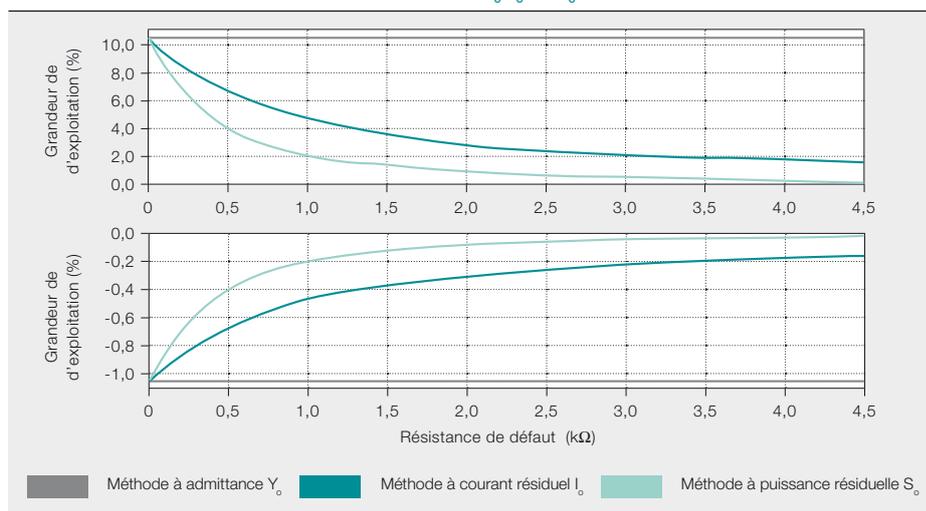


Solution de facilité

Réseaux à neutre compensé : le meilleur plan de protection contre les défauts à la terre

ARI WAHLROOS, JANNE ALTONEN, PRZEMYSŁAW BALCEREK, MAREK FULCZYK – Un réseau est « compensé » quand son point neutre est mis à la terre par une bobine de compensation. Cette pratique ramène les courants de défaut capacitifs produits par le réseau au voisinage du zéro et facilite l'auto-extinction des défauts à la terre sans avoir à déclencher de disjoncteurs ni à priver la clientèle d'alimentation. C'est pourquoi de plus en plus de réseaux de distribution moyenne tension (MT) adoptent ce régime de neutre. Par contre, les faibles courants de défaut de ces réseaux compensés bousculent les grands principes de la protection contre les défauts terre. Une autre technique simple mais ingénieuse, basée sur l'admittance de neutre mesurée, fut développée au début des années 1980 en Pologne. Ses multiples avantages sur les méthodes traditionnelles en font une solution adaptée à tous les types de réseaux non reliés à la terre et compensés, dont les départs avec compensation distribuée. ABB l'a adoptée pour ses relais REF615 et REF630 de la gamme Relion®.

1 Méthodes de protection contre les défauts à la terre montrant l'ampleur de la grandeur de fonctionnement, en pourcentage de la valeur nominale de Y_0 , I_0 ou S_0 par rapport à la résistance de défaut



Au début du XX^e siècle, un ingénieur AEG, Waldemar Petersen, découvre que la connexion d'une inductance au point neutre du transformateur d'alimentation ramène pratiquement à zéro le courant de défaut à la terre capacitif produit par le réseau, la majorité des défauts d'arc à la terre devenant par là-même auto-extincteurs : c'est l'invention de la « bobine Petersen », couramment appelée « réactance de compensation » ou « bobine d'extinction ».

Les défauts à la terre temporaires sont à l'origine de la majorité des coupures électriques. L'emploi de réactances de compensation peut considérablement en diminuer la fréquence, améliorant la fiabilité et la qualité de la fourniture. La compensation maintient également la continuité de service du réseau pendant un défaut franc à la terre, sous réserve de respecter les valeurs normatives et réglementaires de tension dangereuses.

C'est pourquoi les bobines de compensation se généralisent dans les réseaux MT du monde entier.

Plans de protection dans les réseaux compensés

Même si le régime de neutre compensé a ses avantages, la protection contre les

défauts à la terre du réseau se complique avec les niveaux extrêmement bas de courants de défaut résultant de la compensation réalisée par la bobine Petersen. Souvent, ces courants ne sont qu'une fraction du courant de charge normal, trop faible pour déclencher les traditionnels relais de surintensité.

Responsables de la majorité des coupures, les défauts à la terre temporaires peuvent être considérablement réduits par des bobines de compensation, améliorant la fiabilité et la qualité de la fourniture.

Sur les réseaux à régime de neutre compensé, la protection contre les défauts terre se base habituellement sur la composante active du courant résiduel (principe *locosphi*, par exemple) ou de la puissance résiduelle (mesure wattmétrique). Une autre méthode, née au début des années 1980 en Pologne, est devenue une exigence fonctionnelle des entreprises d'électricité du pays : l'admittance de neutre mesurée.

Protection d'admittance de neutre

La protection d'admittance de neutre, comme les autres méthodes de protection contre les défauts terre, est basée sur les composantes de fréquence fondamentale du courant résiduel I_0 et de la tension résiduelle \underline{U}_0 . Mais au lieu d'exploiter des grandeurs comme le courant ou la puissance résiduels ($S_0 = \underline{U}_0 \cdot I_0$), elle repose sur la surveillance de la valeur de l'admittance de neutre mesurée Y_0 , définie comme le quotient des phaseurs de courant et de tension résiduels :

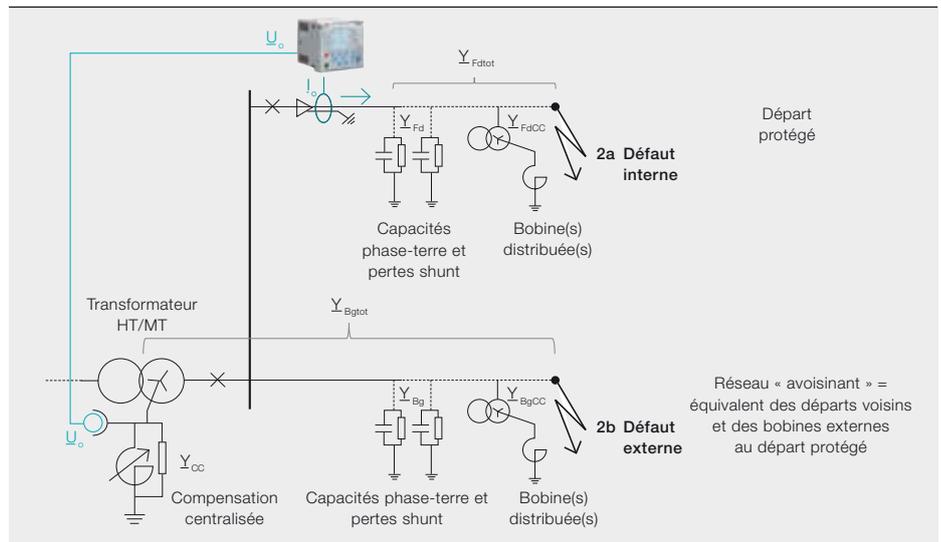
$$Y_0 = \frac{I_0}{U_0} = G + j \cdot B$$

G étant la conductance et B la susceptance. L'admittance mesurée est directement liée aux paramètres réseau connus, à savoir les résistances, capacités et inductances shunt ; la composante résistive de l'admittance de neutre (conductance G) correspond aux résistances shunt et aux pertes du réseau, et la composante imaginaire (susceptance B) aux capacités et inductances shunt. Ces valeurs, fondamentales pour l'étude de la protection du réseau contre les défauts terre, sont toujours disponibles et stockées dans les systèmes de gestion de la distribution électrique.

Photo p. 24

Les réseaux à régime de neutre compensé fiabilisent la fourniture électrique mais compliquent la mise en œuvre de la protection contre les défauts à la terre. Comment une méthode inventée dans les années 1980 résout aujourd'hui l'équation ?

2 Circuit monophasé équivalent simplifié d'un réseau compensé avec défaut terre dans le départ protégé (2a) et dans le réseau avoisinant (2b)



Principal avantage de cette surveillance du rapport I_0 sur U_0 , ou admittance de neutre : dans l'idéal, ce ratio reste constant sans modifier la résistance de défaut puisque I_0 comme U_0 décroissent avec l'augmentation de la résistance de défaut [1]. C'est à l'opposé des plans de protection traditionnels où l'amplitude de la grandeur d'exploitation basée, rappelons-le, sur le courant ou la puissance

rée correspond aux pertes shunt résistives du départ et aux pertes des bobines distribuées dans le départ protégé ; la composante imaginaire est proportionnelle à la somme des capacités phase-terre du départ et des inductances des bobines distribuées → 2.

En cas de défaut interne au départ protégé, la protection devant fonctionner, l'ad-

mittance mesurée est égale à l'admittance de neutre totale du réseau avoisinant, Y_{Bgtot} . C'est la somme des admittances totales des conducteurs de phase de tous les autres départs du poste, Y_{Bg} , et des

Principal avantage de la surveillance I_0/U_0 (admittance) : le résultat n'est pas affecté par la résistance de défaut au lieu du défaut.

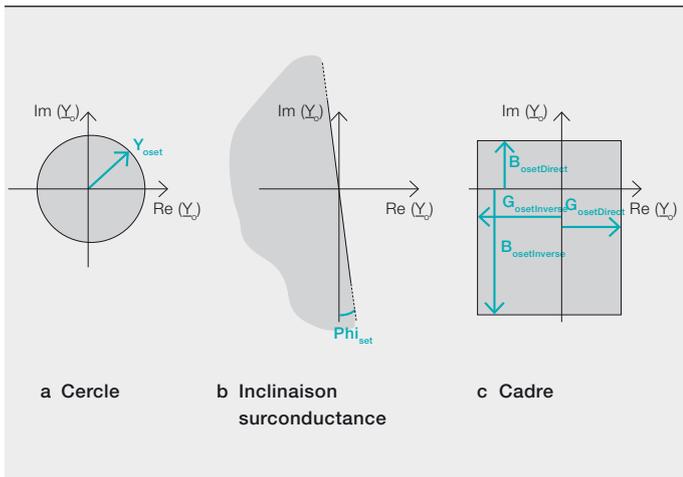
résiduels, est nettement diminuée par la résistance de défaut. Cette caractéristique augmente la sensibilité de la protection et la discrimination entre situations de défaut et hors défaut, surtout à des valeurs de résistances de défaut plus élevées → 1.

L'essentiel

Dans le cas d'un défaut externe au départ protégé, l'admittance mesurée est égale à la valeur négative de l'admittance de neutre totale du départ, soit $-Y_{Fdtot}$. C'est la somme des admittances totales des conducteurs de phase du départ protégé Y_{Fd} et, le cas échéant, des admittances des bobines de compensation Y_{FdCC} équipant le départ. La composante résistive de l'admittance mesu-

admittances des bobines de compensation situées à l'extérieur du départ, dans le poste, Y_{CC} , ou les postes avoisinants, Y_{BgCC} . Si sa composante réelle est toujours positive, le signe de sa composante imaginaire (susceptance) dépend de l'accord de la bobine. Normalement, la protection est réglée pour fonctionner avec la composante de courant résistif supplémentaire introduite par la résistance parallèle de la bobine. Dans la mesure d'admittance, l'augmentation du courant résistif est directement mesurée dans la composante réelle de l'admittance, à savoir sa conductance.

3 Exemples de graphes d'admittance réelle (Re) et imaginaire (Im)



En grisé = zone de non-fonctionnement
La protection fonctionne quand l'admittance calculée sort des limites.

La protection contre les défauts à la terre basée sur l'admittance repose sur le principe de discrimination entre les admittances de neutre résultant des défauts internes et externes: elle fonctionne (déclenchement du disjoncteur) quand c'est l'admittance de défaut interne qui est mesurée et non celle de défaut externe. Cette condition se caractérise par un graphe d'exploitation qui peut prendre la forme d'un cercle ou se composer d'une ou de plusieurs lignes: la protection fonctionne quand le point d'admittance calculée déborde du cercle ou du cadre → 3.

Ce principe assez souple vaut pour tous les types de réseaux mis à la terre à haute impédance, non mis à la terre

La méthode d'admittance de neutre vaut pour tous les types de réseau mis à la terre à haute impédance, y compris les départs à compensation distribuée.

et compensés, y compris les départs à compensation distribuée. Ces derniers se généralisent avec l'enfouissement des

lignes aériennes vulnérables aux phénomènes atmosphériques. Les câbles multiplient en effet le courant de défaut à la terre produit par ces départs qui demandent une compensation locale moyennant des bobines distribuées. Celles-ci peuvent poser des problèmes aux protections traditionnelles en raison de leurs caractéristiques difficilement adaptables, par exemple si la configuration du départ évolue beaucoup.

La flexibilité du principe garantit également une protection accrue pendant les défauts réamorçants, assurant une plus grande marge de manœuvre avant un déclenchement intempestif [2].

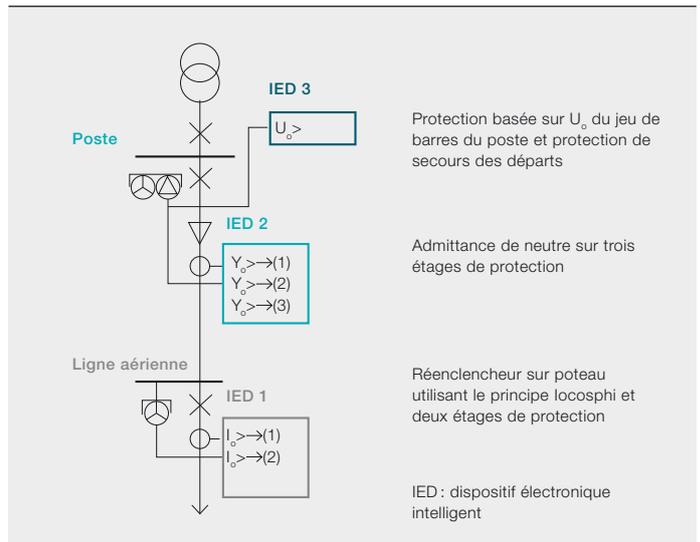
Compatibilité totale

À l'instar de la protection traditionnelle contre les défauts terre, le principe d'admittance de neutre s'appuie avant tout sur la surtension résiduelle pour définir la sensibilité de la protection: une base commune pratique quand plusieurs méthodes de protection coexistent dans une même zone de distribution de poste → 4.

Améliorations en vue

Traditionnellement, la protection contre les défauts à la terre se base sur des phaseurs de courant/tension résiduels qui sont calculés dès que le défaut est détecté. Dans un réseau principalement aérien, il peut y avoir une tension résiduelle de forte amplitude et saine, due à des conducteurs de phase non transposés. Cette asymétrie du réseau affecte les grandeurs d'exploitation de

4 Exemple de schéma de protection de départ moyenne tension associant méthode traditionnelle et admittance de neutre



IED 3
 $U_o >$
Protection basée sur U_o du jeu de barres du poste et protection de secours des départs

IED 2
 $Y_o > \rightarrow (1)$
 $Y_o > \rightarrow (2)$
 $Y_o > \rightarrow (3)$
Admittance de neutre sur trois étages de protection

IED 1
 $I_o > \rightarrow (1)$
 $I_o > \rightarrow (2)$
Réenclencheur sur poteau utilisant le principe locosphi et deux étages de protection

IED: dispositif électronique intelligent

Le principe permet de retrancher l'asymétrie de réseau des résultats des mesures.

Les harmoniques peuvent tourner à l'avantage de la protection !

sorte que le résultat du calcul dépend, par exemple, de la phase en défaut. La dépendance augmente avec la résistance de défaut et peut dégrader la sensibilité de la protection. Le principe d'admittance de neutre permet de retrancher l'effet de l'asymétrie du réseau des résultats des mesures, à l'aide de « grands delta » : les valeurs de prédéfaut des phaseurs de courant/tension résiduels sont déduites des mesures pendant le défaut, avant calcul de l'admittance de neutre. Les algorithmes *ad hoc* peuvent facilement être mis en œuvre dans les dispositifs électroniques intelligents modernes [1].

D'un inconvénient, un avantage

Les réseaux MT sont de plus en plus le siège de composantes harmoniques de rang élevé, dues au nombre croissant de charges polluantes et non linéaires. Conséquence : le courant de défaut comporte beaucoup plus d'harmoniques pendant un simple défaut phase-terre.

La bobine ne compensant que la composante de fréquence fondamentale du courant de défaut capacitif, subsistent alors les autres composantes de fréquence, toujours considérées comme des perturbations devant être filtrées. Par contre, la protection basée sur l'admittance de neutre tire profit des harmoniques pour améliorer la discrimination entre fonctionnement en défaut et hors défaut [3]. Dans les dispositifs électroniques intelligents modernes, les admittances d'harmoniques peuvent être facilement calculées et ajoutées à l'admittance de fréquence fondamentale dans le format du phaseur, rendant la discrimination encore plus nette.

Des années d'expérience concluante

Depuis son invention polonaise, la protection contre les défauts à la terre basée sur l'admittance de neutre a gagné d'autres pays européens. Elle s'applique à la protection directionnelle classique mais aussi à la détection de défauts terre très impédants et intermittents. ABB et ses partenaires énergéticiens finnois ont récemment accompli des progrès dans ce domaine. Des essais sur site poussés confirment que la technique offre une sensibilité supérieure à celle des principes de protection classiques. Des réglages adéquats et des mesures précises permettent de détecter des défauts avec des résistances de terre atteignant 10 k Ω [2].

Cette protection se singularise par sa meilleure sensibilité et sa plus grande sécurité face aux défauts terre permanents et réamorçants. Mieux : son universalité, y compris dans des réseaux à compensation distribuée, en fait un principe sûr pour les futures applications de réseaux électriques intelligents. En somme, les réglages de protection sont facilement déduits des données système de base, permettant une optimisation simple et pratique des caractéristiques de fonctionnement.

Ari Wahlroos

Janne Altonen

Marek Fulczyk

ABB Medium Voltage Products

Vaasa (Finlande)

ari.wahlroos@fi.abb.com

janne.altonen@fi.abb.com

marek.fulczyk@fi.abb.com

Przemyslaw Balcerek

ABB Corporate Research

Cracovie (Pologne)

przemyslaw.balcerek@pl.abb.com

Bibliographie

- [1] Wahlroos, A., Altonen, J., « Performance of novel neutral admittance criterion in MV-feeder earth-fault protection », *CIREC*, Prague, 2009.
- [2] Wahlroos, A., Altonen, J., « Practical application and performance of novel admittance-based earth-fault protection in compensated MV-networks », *CIREC*, Francfort, 2011.
- [3] Wahlroos, A., Altonen, J., « Compensated networks and admittance-based earth-fault protection », séminaire *Methods and Techniques for Earth Fault Detection, Indication and Location*, Espoo, Finlande, 2011.



Prise de contact

ABB fait progresser la technologie des contacteurs

GUNNAR JOHANSSON – L'invention du contacteur électrique remonte aux premiers temps de l'électrotechnique, comme l'atteste la fabrication par ABB de matériels basse tension depuis plus d'un siècle. L'innovation et le progrès technologique insufflent aujourd'hui une nouvelle jeunesse aux contacteurs, supprimant des problèmes qui ont de tout temps entravé le développement de cette « cheville ouvrière » de l'appareillage électrique. Avec sa nouvelle génération de contacteurs AF, ABB montre la voie.



Les nouveaux contacteurs ABB utilisent un logiciel et un circuit électronique combinés à un aimant spécialement conçu pour appliquer rapidement une forte pression de contact.

mobiles se déplacent sous l'action de ressorts qui les maintiennent également en position fermée. Ces ressorts sont eux-mêmes comprimés par un électro-aimant excité par une bobine.

Simplicité de conception

Les contacteurs ABB de fort calibre se distinguent essentiellement des produits concurrents par le montage à l'arrière du circuit de puissance et de ses gros câbles rigides. Lancée il y a près de

Un contacteur est un appareil de connexion comparable à un relais, mais pour des courants plus élevés. Contrairement au disjoncteur, autre dispositif de connexion, il ne peut pas couper les courants de court-circuit. Pour autant, il remplit bien d'autres fonctions, au premier chef le démarrage et l'arrêt de machines électriques. Le type le plus répandu est le contacteur triphasé servant à établir, à conduire et interrompre des courants dans un système triphasé.

Un contacteur → 1 comporte un système de contacts reliés au circuit principal et une chambre de coupure dont les différents constituants améliorent les performances en coupure. Les contacts

Le circuit placé à l'arrière simplifie le montage avec d'autres appareils de connexion, principalement les disjoncteurs, et facilite l'accès au contacteur.

10 ans, cette configuration s'est imposée sur le marché car elle simplifie le montage avec d'autres appareils de connexion, principalement les disjoncteurs, tout en facilitant l'accès au contacteur → 2.

La baisse du coût des composants électroniques a ramené le prix des contacteurs à microprocesseur au niveau de celui des produits traditionnels. Enfin, les coûts d'assemblage sont faibles car le module électronique s'encliquette aisément sur le contacteur.

Photo p. 29

Dès les premières applications de l'électrotechnique dans l'industrie, les contacteurs ont joué un rôle essentiel. Une nouvelle génération d'appareils arrive sur le marché, qui s'est affranchie des traditionnels points faibles.



2a Contacteur avec circuit à l'avant



2b Contacteur avec circuit et câbles à l'arrière

Le prix des contacteurs à microprocesseur est désormais comparable à celui des produits traditionnels.

Recherche ABB

Lorsque les contacteurs établissent ou interrompent des courants forts, des arcs électriques apparaissent qui érodent le matériau des contacts et affectent la durée de vie des appareils. Le coût élevé de l'argent, principal constituant des alliages, exclut d'augmenter la masse des contacts pour accroître cette longévité. ABB a donc consacré beaucoup d'efforts de recherche pour trouver d'autres moyens de l'améliorer. Plusieurs pistes ont été identifiées :

- Accélérer le mouvement des contacts au moyen d'un circuit de commande électronique ;
- Réduire l'usure des contacts au moyen de fonctions logicielles ;
- Concevoir de nouveaux aimants avec des forces de contact supérieures ;
- Développer de nouvelles chambres de coupure qui améliorent la contraction et l'extinction de l'arc ;
- Améliorer la fabrication et la composition du matériau des contacts pour renforcer leur dureté.

Fermeture des contacts

À la fermeture, les contacts font parfois de petits rebonds de courte durée avant de se stabiliser en position fermée. Le courant étant faible, ces rebonds donnent lieu à de petits arcs peu érosifs. L'érosion des contacts est beaucoup plus importante en cas d'écartement.

L'écartement des contacts intervient quelques instants plus tard lorsque le courant est élevé → 3. Alors que ces contacts se trouvent correctement positionnés, des facteurs comme un fort

courant de commutation peuvent entraîner leur séparation et la formation d'un arc ; des courants élevés circulant, l'érosion des contacts est importante → 4. De même, l'interaction des vibrations induites par la fermeture de l'électroaimant du contacteur et des forces de séparation écarte les contacts. Par conséquent, ils doivent être maintenus fermement serrés pour résister à ces éventuelles forces. Pour ce faire, les nouveaux contacteurs ABB utilisent un logiciel et un circuit électronique combinés à un aimant spécialement conçu pour appliquer rapidement une pression de contact importante. Le circuit garantit également des déplacements mesurés et contrôlés qui minimisent les vibrations. L'écartement des contacts est rare avec une érosion minimale à l'établissement du courant.

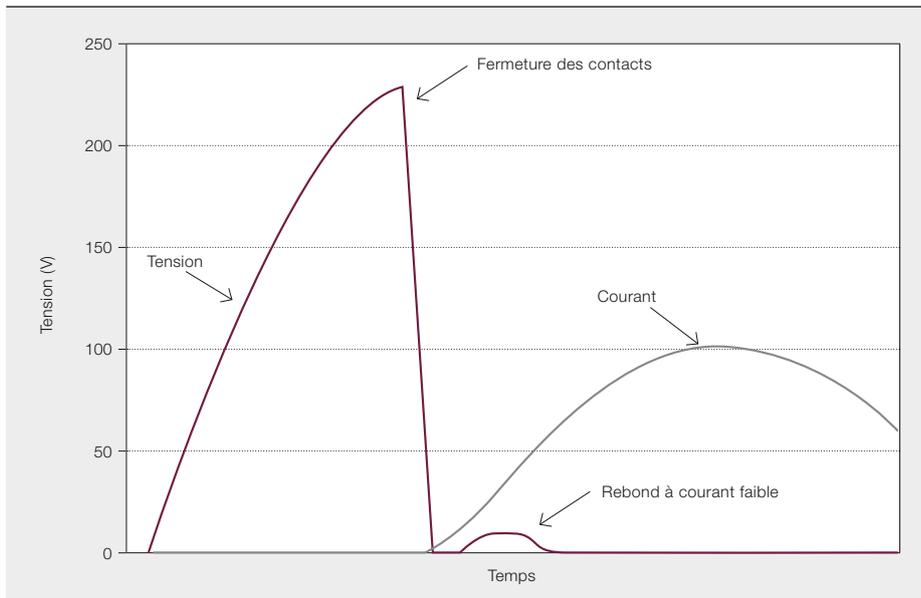
Ouverture des contacts

Lors de la coupure de courants élevés (> 100 A), l'arc doit rapidement être chassé loin des contacts argentés afin de limiter leur érosion. Celle-ci doit également être répartie aussi uniformément que possible entre les différentes phases.

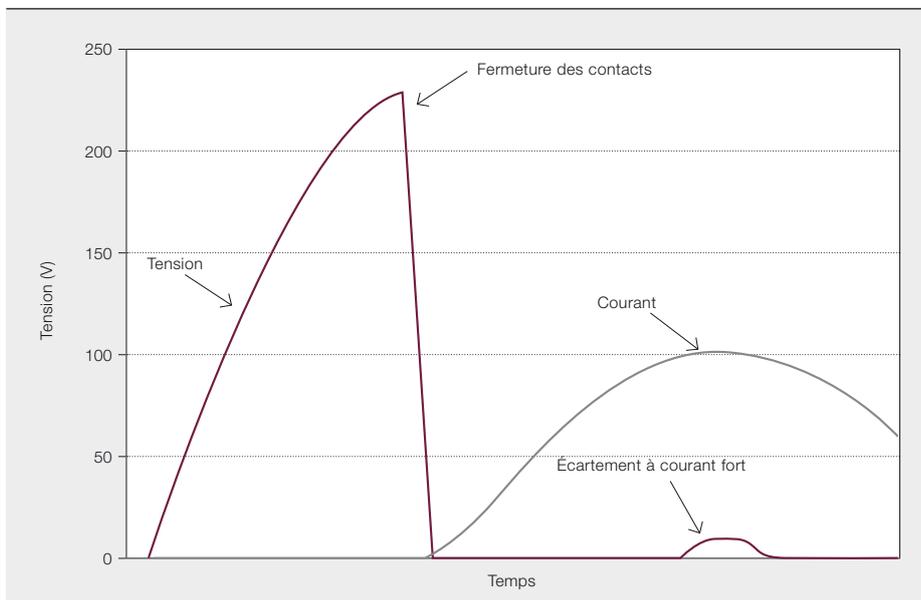
On utilise pour cela une technologie traditionnelle. Une pastille d'acier entoure le contact et repousse l'arc. Différentes configurations sont aujourd'hui minutieusement calculées et optimisées au moyen d'outils de simulation. Quelques vieux principes ont été remis en cause et réfutés, alors que d'autres ont été pleinement exploités.

Un mélange argent-oxyde d'étain, avec des dopants, est un bon matériau pour les contacteurs.

3 Rebond et écartement des contacts



3a Le rebond se produit généralement à des courants faibles, sans poser de problème.



3b L'écartement intervient à des courants élevés et peut entraîner une importante érosion.

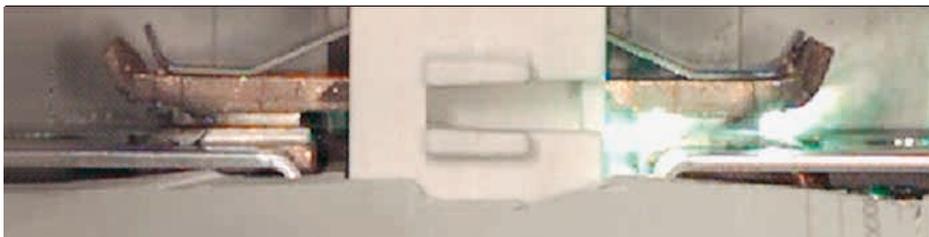
Le circuit de commande ainsi que la bobine et l'aimant peuvent malheureusement causer une distribution inégale de la charge entre les phases du contacteur. En effet, la tension aux bornes du circuit de commande est souvent liée au circuit de puissance et il peut y avoir une certaine synchronisation entre le moment de la commutation et la phase de tension. La charge est alors mal répartie entre les phases du contacteur et la phase la plus utilisée connaît une usure précoce qui pénalise la durée de vie du dispositif complet. Il est donc préférable de répartir uniformément la charge entre les phases et d'équilibrer l'érosion des contacts. En supprimant cette synchronisation, le logiciel et le cir-

cuit électronique ABB prolongent considérablement la durée de vie de l'appareil. La méthode fait actuellement l'objet d'une demande de brevet.

Matériau des contacts

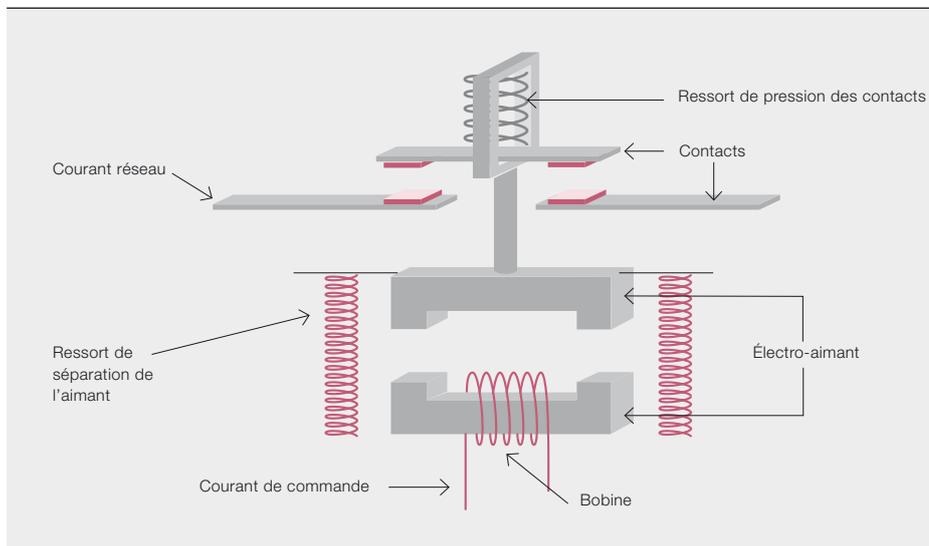
Le matériau des contacts et son mode de fabrication ont un fort impact sur l'érosion. Dans le passé, des alliages argent-cadmium offraient de très bonnes performances, mais l'utilisation du cadmium est depuis plusieurs années interdite. Des contacts en argent pur constitueraient une excellente solution si ce n'était leur propension à la soudure et à l'érosion rapide. Un mélange argent-oxyde d'étain, avec des dopants, est un bon matériau pour les contacteurs.

4 Écartement des contacts à l'établissement du courant : l'arc érode le matériau des contacts.



Le circuit garantit des déplacements mesurés et contrôlés qui minimisent les vibrations.

5 Circuit de commande classique aux performances éprouvées



Sa qualité étant décisive, ABB apporte beaucoup de soin à l'élaboration du mélange et utilise les procédés de fabrication les plus modernes.

Gros plan sur la fiabilité

Pour les clients, la fiabilité des contacteurs est primordiale. ABB y a consacré d'importants travaux et a testé ses pro-

Circuits de commande classiques

Le circuit de commande d'un contacteur se compose d'un électro-aimant en deux parties et d'un mécanisme à ressorts. Lorsque la bobine est parcourue par un courant électrique, les deux parties de l'aimant sont attirées l'une vers l'autre. Cette attraction provoque la fermeture des contacts par l'intermédiaire des

ressorts qui fournissent également la force de pression pour leur maintien en position fermée. La désexcitation de l'aimant entraîne son ouverture et celle des contacts, ce qui coupe le courant réseau → 5 : un principe immuable depuis plus d'un siècle. ABB et ses principaux concurrents utilisent cette

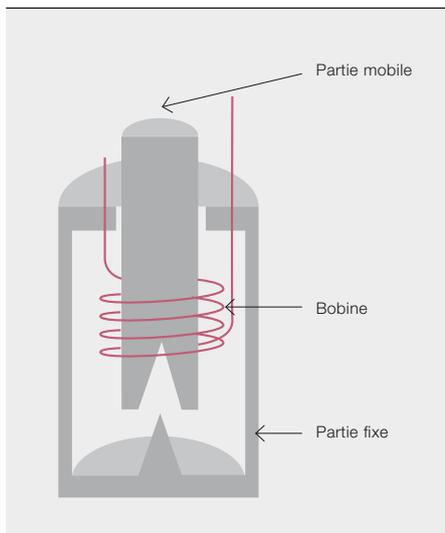
Les nouveaux contacteurs AF d'ABB utilisent un circuit électronique et des algorithmes brevetés qui maintiennent toujours le courant de bobine au niveau adéquat, indépendamment des fluctuations de tension.

duits pour qu'ils répondent aux exigences de fiabilité les plus fortes. À cet égard, la qualité du circuit de commande est déterminante.

solution simple, éprouvée et fiable pour établir, conduire et interrompre des courants forts.

Le logiciel et le circuit électronique ABB répartissent uniformément la charge entre phases et équilibrent l'érosion des contacts.

6 Vue en coupe d'un aimant cylindrique



Elle présente toutefois des inconvénients :

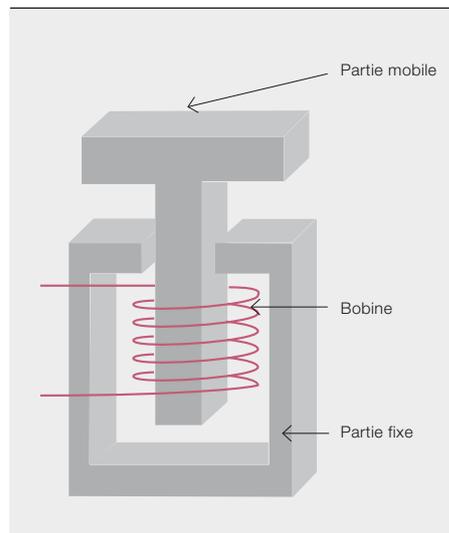
- Elle est sensible aux fluctuations de la tension d'alimentation qui font varier le courant de la bobine avec un effet quadratique sur la force magnétique. Dans le pire des cas, les contacts s'ouvrent et se referment brusquement, entraînant la défaillance de l'appareil ;
- La majorité des utilisateurs veut une alimentation en tension de commande alternative (230 V à 50 Hz, par exemple), obligeant à recourir à un aimant encombrant et complexe pour maintenir l'énergie lors des passages par zéro de la tension de commande ;
- Le circuit est gros consommateur d'énergie, en particulier lorsqu'il est alimenté en tension alternative ;
- Les tolérances à la surface des pôles de l'aimant sont extrêmement élevées. En service intensif, les dimensions peuvent changer, réduisant la force magnétique.

Ces inconvénients sont aujourd'hui levés par une conception innovante et des technologies modernes.

Circuits de commande innovants

Les nouveaux contacteurs AF d'ABB utilisent un circuit électronique et des algorithmes brevetés qui maintiennent toujours le courant de bobine au niveau adéquat, indépendamment des fluctuations de tension. Ainsi, à la fois le flux magnétique et la force de pression des contacts sont optimisés. Le circuit convertit également la tension alternative en tension continue, ce qui réduit les besoins de puissance, uniformise la force magnétique et dispense des passages par zéro. Enfin, il autorise un aimant plus petit, plus

7 Aimant à partie mobile en T



simple et plus fiable tout en minimisant l'usure mécanique et électrique.

La suppression des passages par zéro et le contrôle du courant de bobine permettent de réutiliser et d'exploiter pleinement les aimants d'anciennes conceptions qui ont largement fait leurs preuves, tout en s'émancipant de leurs inconvénients.

Dans les contacteurs AF de petit calibre, un aimant cylindrique à piston mobile est utilisé avec des surfaces de pôles coniques → 6, montage très compact et peu énergivore. Ses performances et sa sobriété énergétique sont telles que les contacteurs se contentent d'une source d'énergie très faible comme la sortie d'un transistor. Les plus gros calibres utilisent un aimant dont les parties mobile et fixe ont respectivement la forme d'un T et d'un U → 7. Il s'agit là d'une solution compacte qui consomme peu d'énergie. Les deux types d'aimant tirent avantage de la bobine alimentée exclusivement en courant continu.

L'innovation et le progrès technologique donnent un nouvel élan au développement des contacteurs. Ces appareils plus que centenaires, acteurs incontournables de la commutation électrique, devraient tirer profit d'une conception plus simple, d'une fiabilité accrue, d'une logistique améliorée et d'une maintenance optimisée.

Gunnar Johansson

ABB Low Voltage Products
Västerås (Suède)
gunnar.c.johansson@se.abb.com



Du bon air sous terre

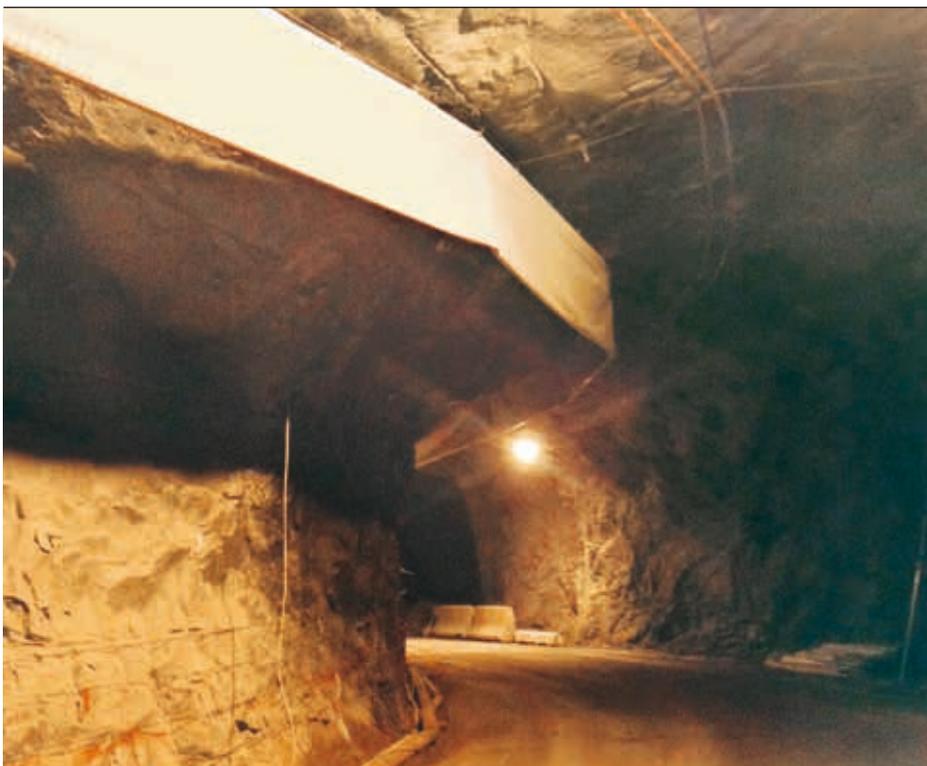
ABB optimise la ventilation des mines souterraines

MICHAEL LUNDH, JAN NYQVIST, MATS MOLANDER – Août 2010 : trente-trois mineurs chiliens piégés par 700 m de fond, aux confins du désert d'Atacama, l'un des plus arides au monde, font la Une de la presse internationale. Ce drame nous ramène à l'essentiel : pour survivre dans les profondeurs de la Terre, les « 33 » avaient besoin d'eau, de nourriture ... et d'air ! À l'échelle de la planète, la flambée du prix des matières premières fait des ressources jusqu'ici inaccessibles un filon

économiquement viable. Hélas, l'argument de la rentabilité ne suffit pas à surmonter les obstacles pour extraire ces ressources du bout du monde. Les limites physiques, qui définissent le périmètre du possible, sans danger, demeurent. Certes, les techniques ne cessent de progresser pour lever ces verrous et atteindre de nouveaux gisements. Encore faut-il que les systèmes qui les sous-tendent évoluent au même rythme.

La ventilation est un poste très énergivore (environ 100 GWh/an) qui peut absorber 50 % de la consommation énergétique totale de la mine.

1 Conduit de ventilation dans une mine souterraine



De nos jours, les mines souterraines atteignent souvent -2500 m, voire -3600 m pour certaines mines d'or, soit l'équivalent de près de dix fois la hauteur de la tour Eiffel! La tendance est aux forages de plus en plus profonds, au milieu de nulle part. Rien d'étonnant à ce que l'industrie minière, pourtant très mécanisée et habituée aux terrains hostiles, cherche à s'automatiser pour répondre aux exigences de sécurité, de développement durable et de productivité.

Une mine souterraine est un lieu confiné où l'air ambiant est vicié par l'utilisation d'engins à moteur diesel qui rejettent des gaz dangereux et nocifs (monoxyde et

est donc indispensable pour fournir de l'air frais aux lieux de travail (galeries, chantiers, ateliers) → 1 et garantir la santé et la sécurité du personnel. Cet « aérage » interagit fortement avec la production. C'est aussi un poste très énergivore (de l'ordre de 100 GWh/an) qui peut absorber 50 % de la consommation énergétique totale de la mine.

Dans les exploitations modernes, de gros ventilateurs de surface insufflent l'air frais qui est ensuite diffusé sous terre par des ventilateurs auxiliaires et/ou des régulateurs d'air. Selon la profondeur de la mine, l'air peut être chauffé ou rafraîchi. La ventilation « à la demande », qui consiste à n'alimenter que des en-

droits ciblés, selon la quantité appropriée et seulement pendant la durée nécessaire, est à la pointe des techniques de gestion de la ventilation, même si de nombreux sites miniers en sont dépourvus.

En plus de l'aérage servant à maintenir une atmosphère acceptable dans les chantiers d'extraction, on peut chauffer ou rafraîchir l'arrivée d'air.

dioxyde de carbone, oxydes d'azote), les sautages d'explosifs, la présence naturelle de radon (rayonnements ionisants) et le dégagement de méthane (grisou des mines de charbon). Une bonne ventilation

On lui reproche toutefois l'absence de commande en boucle fermée (rétroaction) et une modélisation complexe ou peu performante du rapport ventilateurs/régulateurs.

Photo p. 35

Un tiers du cuivre mondial est extrait des mines du désert chilien d'Atacama.
Crédit photo : © 2013 Michael Vogel

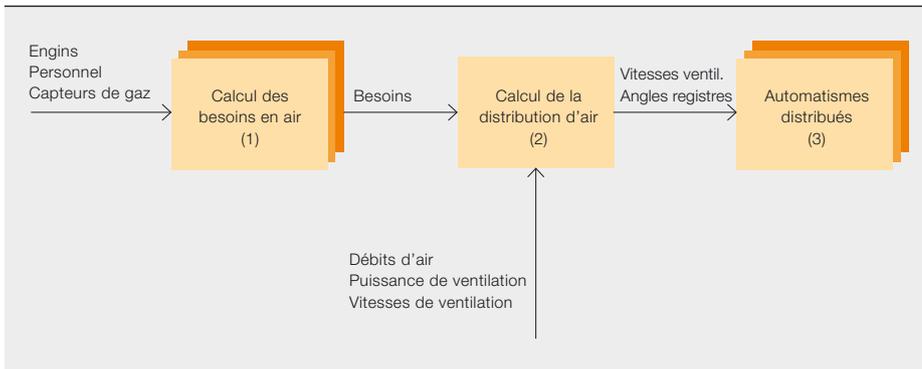


ABB propose aujourd'hui une méthode exclusive de régulation coordonnée des ventilateurs et régulateurs pour fournir automatiquement une quantité d'air suffisante, fiable et éco-énergétique à tous les chantiers de la mine. La solution s'appuie sur des modèles empiriques et des mesures de capteurs (température, débit, gaz, etc.). Des modèles multi-

du *process* est souvent affaire de compromis entre des objectifs contradictoires, un problème d'optimisation revient à trouver la meilleure solution. La création d'un modèle dynamique du site est donc capitale. Mais l'exercice est chronophage : dans les exemples classiques de commande avancée de procédés industriels, la construction d'un modèle

suffisamment performant est la partie la plus laborieuse de la stratégie de régulation. La modélisation passe normalement par une phase d'essais au cours de laquelle on sollicite les entrées du procédé pour exciter les sorties.

Les signaux résultants sont enregistrés puis traités pour obtenir un modèle mathématique du procédé. C'est l'étape d'« identification du système » [2].

Notre nouvelle méthode d'optimisation de la ventilation souterraine s'inspire de ce principe. Problème ? La mine évolue en permanence : des cavités sont percées quand d'autres sont fermées et abandonnées, des ventilateurs et conduits d'aérage sont ajoutés au fur et à mesure de l'avancement du front de taille... sans compter les modifications imprévues de la configuration du site, suite à un sautage, par exemple. Grâce à une identification automatisée du système s'appuyant sur des données opérationnelles ou des expériences déclenchées, le modèle dynamique peut aisément s'adapter à ces nouvelles conditions.

Grâce à une identification automatisée du système s'appuyant sur des données opérationnelles ou des expériences déclenchées, le modèle dynamique s'adapte aisément aux nouvelles conditions minières.

Des modèles multivariables décrivent la façon dont les variations de vitesse de ventilation influent à la fois sur les écoulements d'air et la pression sur les appareils.

variables décrivent la façon dont les modifications de vitesse des ventilateurs influent à la fois sur les écoulements d'air et la pression sur les appareils. En s'appuyant sur des paramètres obtenus par empirisme à partir de données opérationnelles, ces modèles s'adaptent sans peine aux nouvelles conditions d'exploitation.

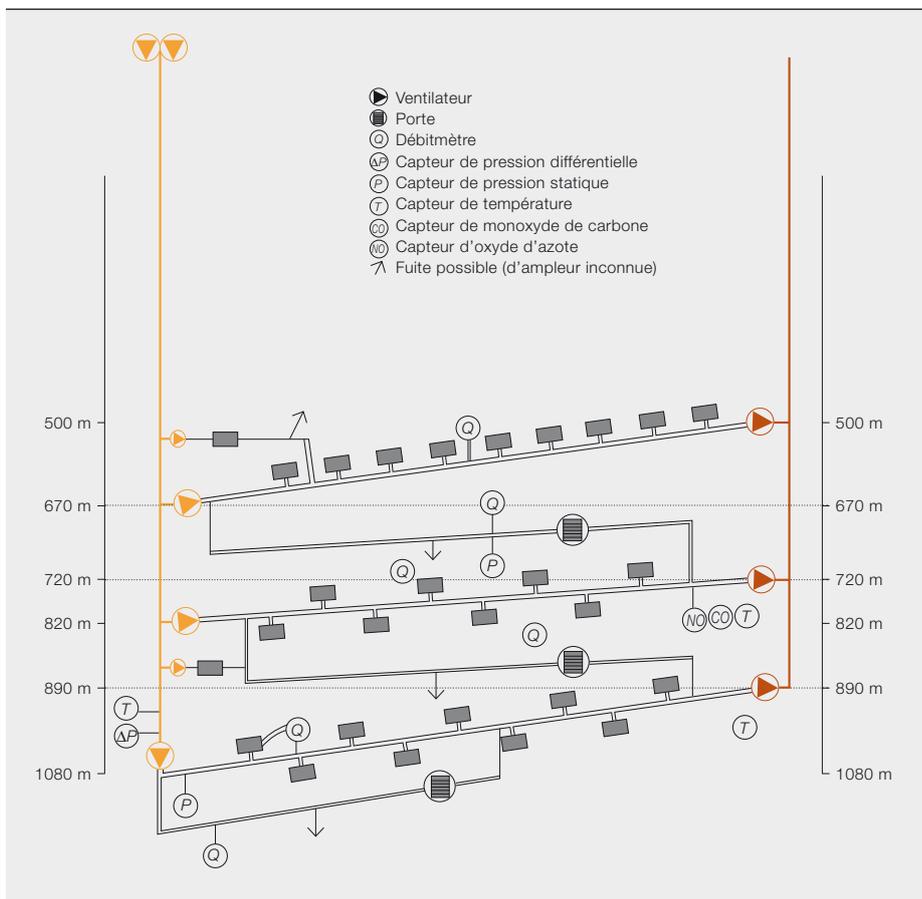
Prédire pour anticiper

La commande avancée fait recette dans de nombreux secteurs industriels, comme la chimie et le raffinage. La méthode la plus répandue est la « commande prédictive par modèle » [1], née dans les années 1970.

Un régulateur prédictif fait appel à un modèle explicite qui permet d'anticiper à tout moment l'évolution du procédé et, partant, de calculer la commande optimale pour obtenir les résultats souhaités. Sachant que le comportement désiré

La vitesse de ventilation optimale est calculée à partir des besoins en air dans plusieurs galeries, des caractéristiques des ventilateurs et de leurs moteurs.

3 Représentation schématique de la mine pour essais



Aperçu

Notre méthodologie de régulation de la ventilation minière s'apparente à la ventilation à la demande. Les deux solutions comportent trois niveaux fonctionnels → 2 :

1) Le premier calcule les besoins réels en air dans les différentes galeries, compte tenu des allers et venues de véhicules et de la présence de personnel sur certains chantiers. Ces besoins peuvent aussi être donnés par les capteurs qui mesurent les concentrations de gaz de l'atmosphère minière. Dans certaines galeries, on a intérêt à réduire au minimum le débit d'aérage pour contrôler celui des rampes d'accès, par exemple.

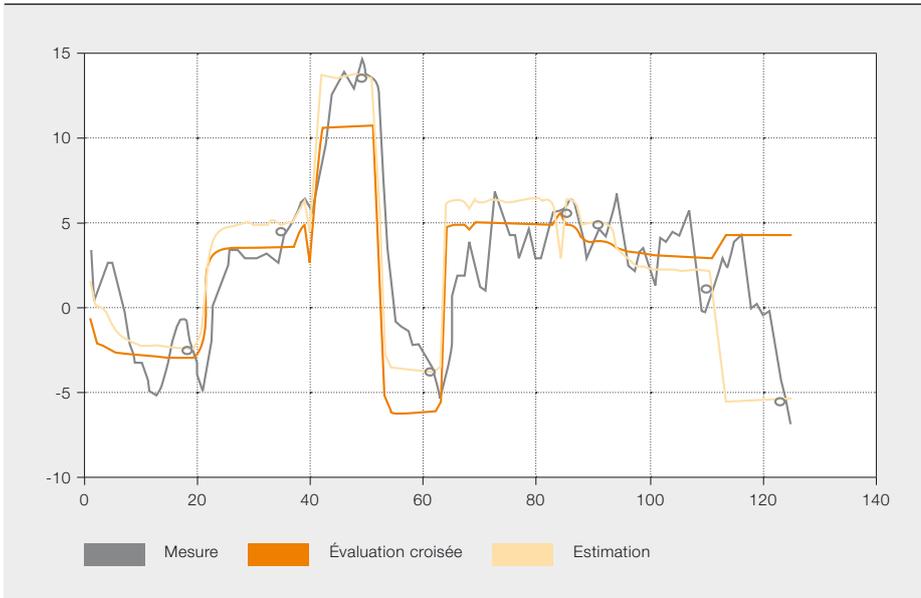
2) Le deuxième niveau de fonctionnalités détermine la distribution d'air en optimisant la vitesse des ventilateurs d'aérage. La vitesse optimale est calculée à partir des besoins en air de plusieurs galeries, des caractéristiques des ventilateurs et de leurs moteurs. On peut y ajouter les angles d'ouverture des registres d'air. Le calcul de ces deux paramètres sert à minimiser la puissance totale consommée par les ventilateurs. Cette minimisa-

tion se fonde sur un modèle qui établit le rapport entre les modifications de vitesse

Les paramètres de vitesses de ventilateurs et d'angles de registres d'air sont calculés pour minimiser la puissance totale réelle nécessaire à l'aérage.

des ventilateurs et les variations de débit d'air et de puissance absorbée réelle.

3) Les valeurs optimales des vitesses de ventilation et des angles de registres fournissent les consignes aux automatismes distribués.



Dans notre nouvelle solution de commande prédictive par modèle, la distribution d'air globale est optimisée au deuxième niveau.

Modéliser

La distribution d'air dans la mine dépend, nous l'avons vu, des vitesses de ventilation et, le cas échéant, des angles d'ouverture des registres, qui sont les actionneurs du système de contrôle-commande. Il y a interaction entre ces derniers et la circulation d'air dans toute la mine; en d'autres termes, tout changement de vitesse d'un ventilateur, par exemple, se répercute sur le débit d'air dans la galerie équipée du ventilateur en question, mais aussi dans les autres cavités de la mine. Cette interdépendance, qui complique le pilotage et l'optimisation des courants d'air minier, doit être prise en compte par le modèle.

Pour décrire la mine, il est possible de recourir à des modèles multivariables dynamiques, très utilisés notamment dans l'industrie du raffinage. Reste que leur construction est une lourde tâche qui ne va pas dans notre sens puisque le site minier évolue en permanence, le sautage d'explosifs pouvant ouvrir accidentellement de nouvelles voies d'air. Il n'est ni commode ni utile de passer des semaines à bâtir un nouveau modèle qui reflète systématiquement chaque modification de la mine.

Nous emploierons ici un modèle multivariable statique simple, capable de reproduire l'interaction et l'impact des changements survenus au niveau des

La régulation maintient l'aérage souhaité dans plusieurs galeries, tout en minimisant la puissance absorbée par les ventilateurs.

actionneurs. Ce modèle est décrit sous la forme incrémentale

$$\begin{aligned}\Delta Q &= H_q \Delta \beta \\ \Delta p &= H_p \Delta \beta \\ \Delta E &= H_e \Delta (\beta^3)\end{aligned}$$

avec Q = vecteur des débits d'air mesurés; p = vecteur des pressions sur les ventilateurs; β = vecteur des vitesses de ventilation; E = vecteurs des puissances de ventilation; Δ = delta entre deux échantillons. Les coefficients des matrices H_q , H_p et H_e sont déduits d'expériences simples ou de données opérationnelles normales qui permettent d'automatiser l'identification du système.

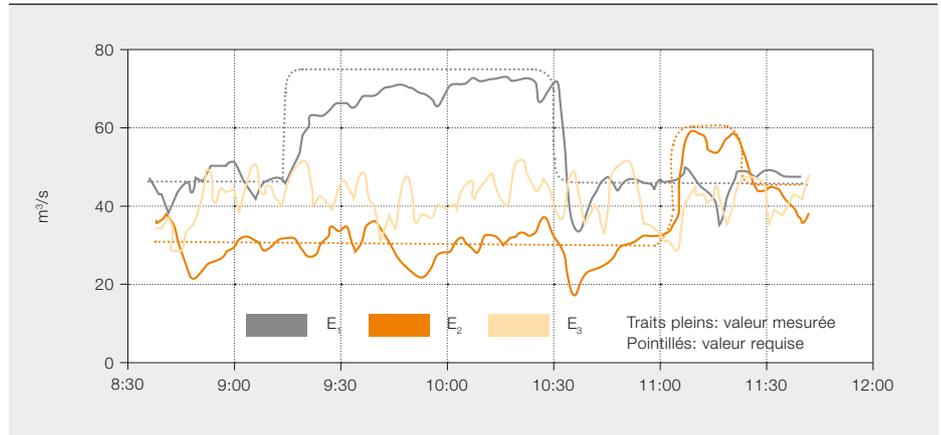
Mesurer

Pour identifier le modèle de réseau de ventilation minière et l'utiliser aux fins de commande, il faut mesurer les variables suivantes :

- Concentrations de gaz et/ou débits d'air en plusieurs endroits du site à piloter;
- Puissance des ventilateurs à commander;
- Vitesse des ventilateurs à commander;
- Pressions sur les ventilateurs.

Le va-et-vient des engins dans les zones d'activité fait varier les besoins d'aérage des galeries et oblige à modifier la vitesse des ventilateurs en conséquence.

5 Réglage du débit d'air en réponse à chaque échelon de la demande



L'automate ajuste la vitesse réelle des ventilateurs aux besoins en air du moment.

les valeurs filtrées des signaux de mesure.

Piloter

Rappelons que l'objectif recherché est de maintenir l'aérage souhaité dans plusieurs galeries tout en minimisant la puissance absorbée par les ventilateurs. Les galeries alimentant les lieux de travail doivent donc avoir un courant d'air supérieur au débit requis, tandis que les autres galeries sont amenées à réduire au minimum l'aérage.

Ce pilotage peut se formuler comme un problème d'optimisation visant à déterminer les nouvelles vitesses de ventila-

Tester

Notre méthode de gestion optimisée de la ventilation a été testée dans une mine souterraine en activité, déjà équipée d'un réseau ABB de ventilation à la demande reliant tous les ventilateurs et capteurs du site.

Sur le schéma simplifié → 3, la zone pilotée se compose de trois étages d'exploitation, situés entre -500 m et -1080 m. Elle compte deux ventilateurs de surface, relayés par un ventilateur en entrée et un ventilateur en sortie de chaque étage :

l'amenée d'air frais est représentée en orange, le retour d'air vicié, en ocre. À chaque étage et dans les rampes d'accès, la vitesse de l'air est mesurée

La mine peut naturellement évoluer sans baisse d'activité ou de performance.

pour minimiser la puissance réelle consommée.

Sont alors prises en compte les contraintes sur le débit d'air et les pressions différentielles :

$$Q_{lo} \leq Q(k) \leq Q_{hi}$$

$$\Delta p_{lo} \leq \Delta p(k) \leq \Delta p_{hi}$$

auxquelles s'ajoutent les limitations sur les vitesses de ventilation :

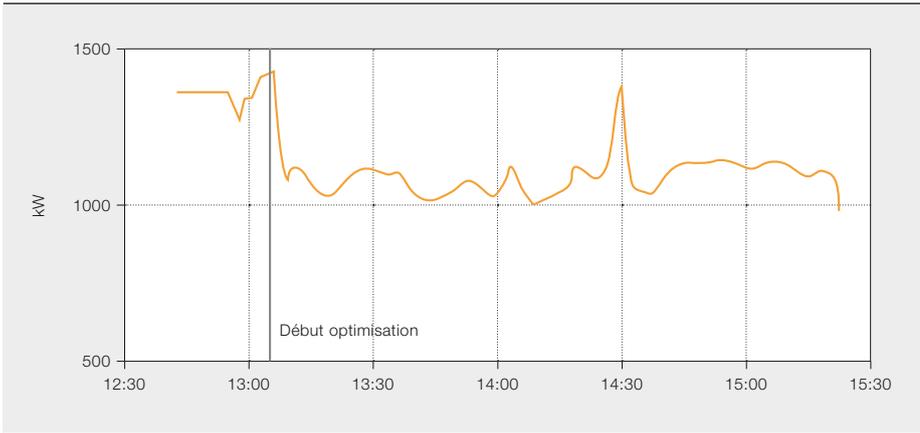
$$\beta_{lo} \leq \beta(k) \leq \beta_{hi}$$

Ce problème est résolu de façon cyclique avec le calcul des nouvelles vitesses de ventilation. Les valeurs initiales de chaque optimisation sont fournies par

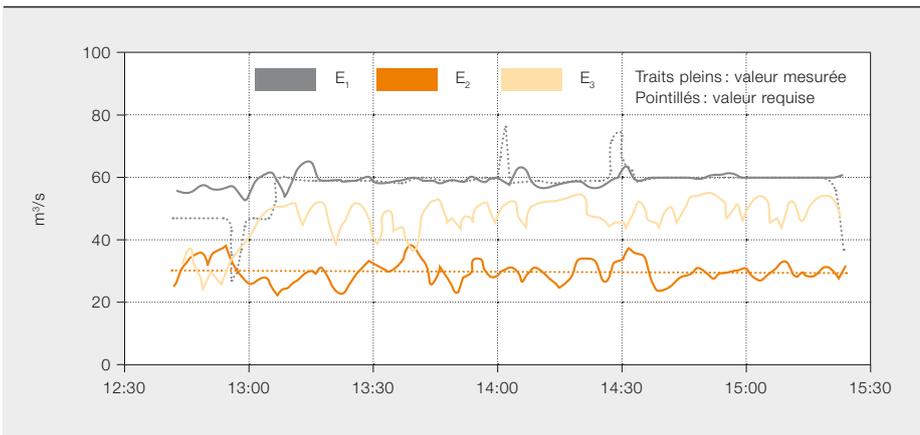
par des débitmètres à ultrasons, repérés par la lettre Q . L'augmentation de la pression statique est également mesurée pour chaque ventilateur.

Le va-et-vient incessant des engins dans les zones d'activité fait varier les besoins d'aérage des galeries et oblige le système de ventilation à la demande à modifier la vitesse des ventilateurs en conséquence. Ce contexte fournit l'excitation nécessaire pour identifier le modèle. Après un filtrage adéquat et la suppression des variations haute fréquence, les modèles statiques de la mine sont identifiés par simple ajustement selon la méthode des moindres carrés. Une évaluation de deux de ces modèles est illustrée en → 4 : l'un fut

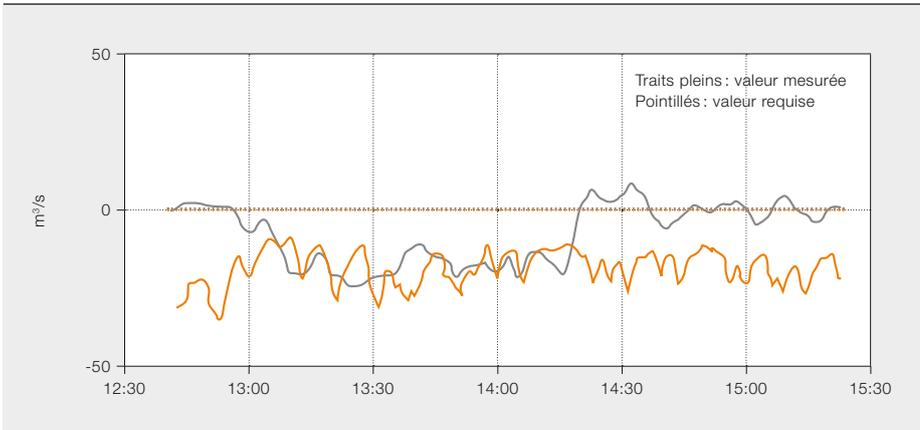
6 Tracé du modèle représentant la diminution de puissance de ventilation



6a Puissance totale



6b Débits des étages de production



6c Débits des rampes d'accès

identifié avec les mêmes données que les mesures tracées en jaune (« Estimation »), l'autre avec un jeu de données totalement différent (tracé orange « Évaluation croisée »).

Partant de ces modèles, l'optimiseur de ventilation fut testé pendant deux jours, aux étages de production qu'il pilotait. L'enregistrement d'essais 800xA → 5 montre comment le système règle le débit d'air du 1^{er} étage E_1 (trait plein gris) et du 2^e étage E_2 (trait plein orange) en

réponse à chaque changement d'échelon de la demande réelle (pointillés gris et orange).

Un autre enregistrement → 6 effectué en exploitation prouve que l'optimiseur réduit nettement la puissance consommée par les ventilateurs (de 30 à 50 %) par rapport au système existant tout en conservant les mêmes débits d'air pour satisfaire aux besoins d'aéragé des galeries.

L'environnement de travail bénéficie d'un apport d'air frais de qualité optimale, en quantité adaptée à chaque activité.

Valider

Il ressort de ces essais que la mise en œuvre de modèles empiriques simples dans un réseau de ventilation souterrain permet

- de gérer automatiquement la qualité et la quantité d'air requise dans l'environnement de travail ;
- de s'adapter aux nouvelles conditions d'exploitation liées à l'avancement de la mine ;
- de réduire sensiblement la puissance de ventilation en optimisant les charges réparties sur les ventilateurs ;
- de renforcer et de fiabiliser la gestion de la ventilation par une commande en boucle fermée.

Ces modèles d'optimisation dynamique de la ventilation présentent bien des avantages : l'exploitant voit baisser ses coûts de fonctionnement et l'atmosphère minière gagne en qualité en recevant exactement la quantité d'air requise par l'activité. Le modèle s'accorde à la nature évolutive de la mine, garantissant une optimisation continue de l'aéragé, même dans les conditions extrêmes des sites les plus reculés.

Michael Lundh

Jan Nyqvist

Mats Molander

ABB Corporate R&D

Västerås (Suède)

michael.lundh@se.abb.com

jan.nyqvist@se.abb.com

mats.a.molander@se.abb.com

Bibliographie

- [1] Qin, S. J., Badgwell, T. A., *A survey of industrial model predictive control technology*, Control Engineering Practice 11, p. 733–764, 2003.
- [2] Ljung, L., *System Identification: Theory for the user*, Prentice Hall, 1999.



Mécanique de précision

Des outils de productivité pour l'industrie minière

LEN EROS, MIKE SMALE, DAVID KEECH – La forte demande mondiale de matières premières met l'industrie minière sous pression, poussant le secteur au gigantisme et aux gains de productivité. Mais comment produire plus dans des environnements particulièrement difficiles tout en contenant les coûts ? Une solution consiste à trouver un partenaire qui dispose non seulement de l'expertise technique mais aussi de produits innovants et robustes adaptés aux besoins spécifiques des mines. ABB propose un large choix de composants éprouvés pour les équipements miniers tels que convoyeurs à bande, treuils, broyeurs, engins de transport, ventilateurs, etc. Bon nombre nécessitent des organes de transmission mécanique dont les performances doivent contribuer à atteindre les objectifs de coût, de maintenance et de production.



Les progrès technologiques ont permis d'extraire des minerais de moindre qualité et de minéralogie plus complexe tout en minimisant la hausse des coûts.

L'industrie minière mondiale est colossale : fin 2012, les projets d'investissement dépassaient 400 milliards de dollars [1]. Dans ce secteur concurrentiel, la productivité joue un rôle clé. Au cours du siècle dernier, les gains de productivité ont majoritairement été le fait de procédés plus efficaces dans le traitement des matières minérales et d'équipements imposants. Ainsi, les progrès technologiques ont permis d'extraire des minerais de moindre qualité et de minéralogie plus complexe tout en minimisant la hausse des coûts.

Aujourd'hui, des entreprises comme ABB, capables de fournir à l'industrie minière des solutions techniques complètes, bénéficient d'un réel avantage : elles possèdent les compétences indispensables pour relever les défis liés à l'ampleur,

Photo

Dans le contexte actuel, les sociétés minières collaborent étroitement avec des partenaires qui disposent non seulement du savoir-faire technique mais aussi d'une offre de produits adaptée aux difficultés d'exploitation.

à la complexité et aux cadences élevées des opérations minières.

En plus de ces compétences, ABB dispose d'un large choix de produits qui répondent aux besoins d'efficacité, de fiabilité, de performance et de robustesse du secteur. Destinés à différents équipements (convoyeurs à bande, treuils, broyeurs et concasseurs, ventilateurs, machines et systèmes de chargement mobiles), ces produits s'accommodent de l'environnement contraignant de la mine.

La facture d'énergie pèse également sur les résultats des sociétés minières. Les produits doivent donc être des leviers

d'efficacité énergétique. En somme, les industriels ont tout à gagner d'un parte-

Sont avantagées les entreprises capables de fournir des solutions techniques complètes et dotées des compétences indispensables pour relever les défis du gigantisme, de la complexité et des cadences élevées des opérations minières.

naire capable de leur fournir des solutions électriques et mécaniques globales.

Réduire le coût global

L'offre ABB pour le secteur minier inclut un éventail complet de moteurs électriques, y compris des moteurs pour

La facture d'énergie pèse sur les résultats des sociétés minières. Les produits doivent donc être des leviers d'efficacité énergétique.

1 Système d'entraînement complet pré-assemblé avec réducteur CST Dodge, moteur Baldor-Reliance, volant d'inertie et coupleurs



atmosphères explosives, et de variateurs de vitesse basse et moyenne tension. Dans le domaine de la transmission mécanique, ABB propose des réducteurs de toutes tailles, des coupleurs, des paliers prémontés, des accouplements et des poulies et tambours. Enfin, ses solutions de conversion et de distribution électriques (tableaux, etc.) alimentent directement les équipements miniers.

ABB dispose du plus large choix de moteurs à courant alternatif (CA) de forte puissance et de moteurs conçus spé-

robuste des moteurs destinés aux applications minières résiste aux environnements d'exploitation les plus rudes; leurs organes de roulement et systèmes d'étanchéité prolongent la durée de vie des machines.

Enfin, les systèmes d'entraînement sans réducteur ABB pour les convoyeurs (moteur synchrone basse vitesse et convertisseur de fréquence) sont à la pointe de la technologie. Leur nombre réduit d'éléments constitutifs renforce la fiabilité des systèmes et simplifie la maintenance.

Le réducteur CST de Dodge® répartit et minimise les charges et les contraintes sur l'ensemble des composants du convoyeur.

cialement pour la mine. Les moteurs Baldor-Reliance®, disponibles sur stock ou fabriqués sur commande, peuvent atteindre 11 MW (15 000 hp) alors que la gamme de moteurs asynchrones et synchrones va jusqu'à 65 MW (87 000 hp). Cette offre couvre à la fois des moteurs normalisés NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) et CEI (*Commission Électrotechnique Internationale*), garantissant au client, dans chaque cas, le respect de ses obligations en termes de puissance, de protection et de cycle de service. L'enveloppe externe très

(*Controlled-Start Transmission*) et Magna-Gear XTR®, toutes deux conçues spécialement pour les applications minières.

Réducteur CST

Ce réducteur Dodge® répartit et minimise les charges et les contraintes sur l'ensemble des composants du convoyeur. Il s'agit essentiellement d'un réducteur « deux-en-un » qui intègre un engrenage planétaire et un système d'embrayage à huile. Lorsqu'il est accouplé à un moteur asynchrone CA, le réducteur CST convertit la vitesse élevée et le faible

Réducteurs

Dans les systèmes traditionnels à réducteur, la puissance des moteurs peut être transmise au convoyeur par différents types de réducteurs ABB, notamment les séries CST



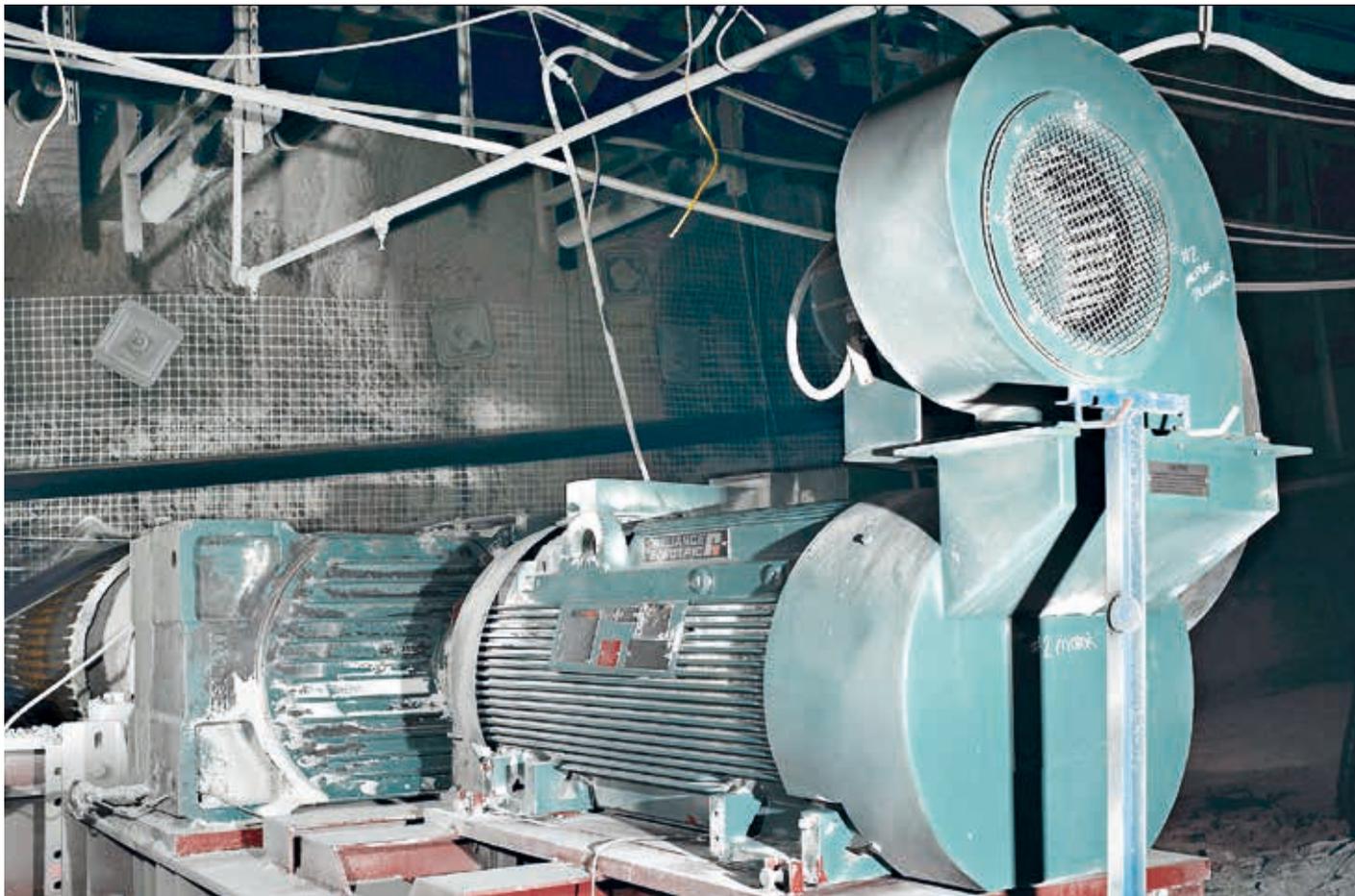
Le plus grand parc de réducteurs CST est en Chine.

couple du moteur en une vitesse faible et un fort couple. Le couple transmissible peut atteindre 400 kNm (3 500 000 lbf in). La puissance moteur maximale est disponible sur la plage de fonctionnement complète. L'embrayage absorbe les chocs et protège l'ensemble de la chaîne cinématique : moteur, réducteur, paliers et roulements, tambours, bandes transporteuses et raccords. Très robuste, le CST contrôle l'intégralité des charges de forte inertie les plus difficiles comme les convoyeurs à bande de grande longueur et les convoyeurs à entraînements multiples synchronisés → 1.

Le système d'embrayage à huile, intégré au réducteur côté sortie, permet au moteur de démarrer à vide. La commande enclenche progressivement l'embrayage, l'arbre de sortie commence à tourner et accélère sans à-coups jusqu'à la vitesse désirée dans le temps prééglé.

Très robuste, le réducteur CST contrôle l'intégralité des charges de forte inertie, comme les convoyeurs à bande de grande longueur et les convoyeurs à entraînements multiples synchronisés.

La maintenabilité est un autre critère de choix décisif des systèmes d'entraînement. Simples, le fonctionnement et la maintenance des réducteurs CST ne nécessitent aucune des compétences techniques requises par les systèmes plus complexes, un avantage important pour les sites isolés tributaires d'intervenants locaux pour le dépannage et la maintenance.



En 2012, plus de 3000 systèmes CST étaient opérationnels dans le monde. Six appareils sont en cours de montage dans une mine de cuivre d'Amérique du Sud. L'installation, située à 5000 m

finale, moins chère que le cahier des charges, est plus puissante que prévu. Avec trois entraînements de 1875 kW (2500 hp) et une bande transporteuse de près de 3,7 km, la mine produit jusqu'à

100 millions de tonnes de charbon par an.

Le réducteur MagnaGear XTR de Dodge est un autre produit innovant largement utilisé dans les applications de forts couples transmissibles (jusqu'à 240 kNm).

d'altitude, est l'une des complexes du genre. Elle comprend quatre systèmes CST de 2250 kW (3000 hp) et deux de 1400 kW (1900 hp) avec les embases et les freins rapides.

Pour un autre client, ABB a fourni une solution qui a réduit de 20 % le coût d'investissement de l'entraînement, sans compter les économies réalisées sur le système de convoyeurs. La solution

surface totale de 10000 km². Équipé d'une télésurveillance avancée, ce système affiche un taux de disponibilité de 98 %.

Réducteur MagnaGear XTR

Le réducteur de vitesse MagnaGear XTR de Dodge est un autre produit innovant, très utilisé dans les applications de forts couples transmissibles jusqu'à 240 kNm (2 100 000 lbf in) → 2, 3. Les modèles de

plus de 44 kNm (390 000 lbf in) intègrent un engrenage planétaire qui donne une solution compacte, durable et économique pour les applications à couple élevé. Ces réducteurs peuvent être utilisés avec un large choix de systèmes de démarrage et de commande, y compris les démarreurs progressifs électroniques, les variateurs de vitesse et les coupleurs hydrodynamiques.

La durée de vie des roulements des réducteurs MagnaGear XTR est au moins égale aux spécifications de l'AGMA (*American Gear Manufacturers Association*) et, dans tous les cas, plus du double de celle de nombreux produits concurrents. Par ailleurs, le système d'étanchéité tandem et le refroidissement efficace allègent la maintenance. La série MagnaGear s'accompagne d'accessoires offrant une grande polyvalence applicative : embases, paliers à rotule, carters tunnels, bras de couple, antidévireurs à cames à dégagement centrifuge, coupleurs et ventilateurs électriques.

Les paliers prémontés Dodge sont LA référence sur le marché. Les séries ISAF et ISN (cotes métriques) incluent le système écrou-circlips exclusif qui permet un montage-démontage en un temps record alors que l'attache à l'arbre par bague de concentricité supprime quasiment toute rouille de contact. Un palier à semelle à gros alésage de Dodge pour les applications importantes possède un système breveté de pose-dépose à assistance hydraulique. En plus d'être faciles à monter et démonter, ces produits sont assemblés en usine avec leurs joints d'étanchéité et lubrifiés. L'offre ABB d'organes de transmission mécanique est complétée par des poulies et tambours spéciaux et différents coupleurs.

Des produits et des compétences

Les sociétés minières étant souvent confrontées à un manque de compétences techniques, elles recherchent des partenaires capables de leur fournir non seulement les équipements adéquats, mais aussi un savoir-faire. Les spécialistes ABB et Baldor du secteur minier en comprennent les défis et savent quels produits et systèmes permettent d'élaborer les meilleures solutions.

Le système d'entraînement de convoyeur est un bon exemple de partenariat. Le but est ici de concevoir un convoyeur

capable d'acheminer le plus de matériaux possible avec le meilleur niveau de performance et de fiabilité. Les enjeux sont énormes : la tendance dans ce domaine est de transporter des charges toujours plus grosses sur des distances toujours plus longues. Un convoyeur peut acheminer jusqu'à 30 000 t/h sur 10 à 20 km, jour et nuit. Dès le début des études, les ingénieurs utilisent le programme *Belt Analyst* pour configurer le système d'entraînement en fonction de la puissance requise et pour optimiser le choix des moteurs, variateurs de vitesse, réducteurs, paliers et roulements, coupleurs et tambours de convoyeur.

ABB se maintient aux avant-postes de la technologie minière en collaborant avec des universités et des organismes professionnels à travers le monde. Le Groupe participe à des projets de recherche sur la modélisation des moteurs de prochaine génération ainsi que sur les échanges thermiques et le refroidissement des moteurs. Dans le domaine de la normalisation, nous sommes membres plusieurs comités techniques de la NEMA, la CEI et de la CEMA (*Conveyors Equipment Manufacturers Association*).

En s'appuyant sur son offre complète de produits et son expérience industrielle, ABB apporte une réponse à tous les problèmes de transmission de puissance de ses clients. Le Groupe n'a de cesse d'identifier et de développer des solutions applicatives pour le secteur minier avec des objectifs précis : réduire le coût global et prolonger la durée de vie des équipements, accroître la fiabilité et le taux de disponibilité, améliorer les rendements productifs et diminuer les coûts énergétiques.

Les réducteurs MagnaGear XTR s'utilisent avec un large choix de démarreurs progressifs électroniques, de variateurs de vitesse et de coupleurs hydrodynamiques.

Len Eros

ABB Motors and Generators
Littleton (Colorado, États-Unis)
len.eros@us.abb.com

David Keech

Mike Smale

Baldor (société du Groupe ABB)
Greenville (Caroline du Sud, États-Unis)
david.keech@baldor.abb.com
mike.smale@baldor.abb.com

Bibliographie

- [1] « Trends in the Mining & Metals Industry : Mining's Contribution to Sustainable Development », *International Council on Mining and Metals*, octobre 2012.

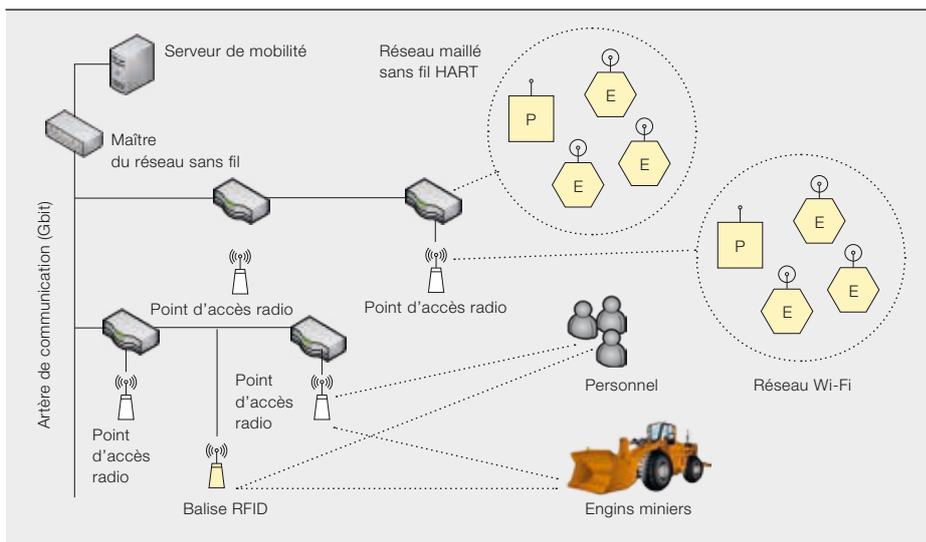


Une mine d'informations

La percée d'ABB dans l'intégration de l'équipement mobile souterrain

STEFAN L. SJOSTROM, KJELL G. CARLSTEN, KRISTER LANDERNAS, JONAS NEANDER – Il ne fait pas de doute que l'homme a déjà extrait une bonne part des ressources métallifères de la planète, obligeant les entreprises minières à creuser toujours plus profond. Mais il est un domaine technologique qui recèle encore d'importants *gisements* de performance et de rentabilité : l'automatisation et l'intégration des données. La mine n'étant pas encore l'objet des surenchères technologiques que connaissent les autres filières industrielles, l'optimisation de toute la chaîne de valeur, de l'extraction au traitement du minerai, reste un vœu pieux. Pour autant, les systèmes ABB permettent d'ores et déjà d'optimiser l'utilisation du parc de machines sous terre, d'accroître la productivité et d'alléger la facture énergétique de la mine.

1 Sur un réseau intégré, l'exploitant a une vue panoramique de toute l'activité minière (E = équipement de terrain ; P = passerelle).



L'exploitation du sous-sol date de la Préhistoire. Il y a près de 43 000 ans, l'*Homo sapiens* du Paléolithique extrayait déjà l'hématite (oxyde de fer) de la Grotte du Lion, au Swaziland, pour produire de l'ocre rouge ou les matériaux qui devaient lui permettre de forger ses premiers outils [1]. Certes, l'activité s'est fortement mécanisée au siècle dernier mais la technologie y progresse plus lentement que dans d'autres secteurs comme le pétrole, le gaz ou l'industrie papetière. Néanmoins, les difficultés croissantes auxquelles se heurte l'extraction minière accentuent le besoin d'automatisation et d'intégration des données.

Dans le même temps, il faut accroître la qualification du personnel pour faire progresser la technique, améliorer les produits et optimiser les procédés, planifier la maintenance et maîtriser l'impact des activités minières sur l'environnement. Bref, la tendance est à des effectifs réduits mais davantage spécialisés et pluridisciplinaires, sur toute la chaîne de valeur. Certains opérateurs seront sans doute à même de piloter plusieurs sites, assistés de capteurs et d'automatismes leur fournissant en temps réel, sur une artère de communication à haut débit, les informations nécessaires à la gestion de chaque produit et procédé → 1. La

plate-forme ABB d'automatisation étendue 800xA facilite cette intégration.

L'offre ABB permet en effet d'intégrer au système de contrôle-commande ouvert 800xA les données temps réel des équipements souterrains de différents types et constructeurs → 2. La visualisation et l'utilisation du parc en sont améliorées, grâce notamment à la géolocalisation et au suivi d'état des engins et machines, ainsi qu'à la transmission des conditions réelles d'exploitation. La conception et la mise en œuvre de ces systèmes avec, entre autres, l'acheminement sélectif d'informations pour piloter la performance opérationnelle, sont des avantages décisifs.

Automatisation

Si, en règle générale, de nombreuses opérations minières sont automatisées, leur intégration au sein d'un système fédérateur s'avère souvent insuffisante, voire inexistante. Le procédé est alors sous-optimisé et la production, hétérogène.

En cause? L'absence d'infrastructure de communication souple et évolutive, câblée ou non, qui complique l'obtention d'une vue d'ensemble et, *a fortiori*, la maîtrise globale des opérations. Impossible dans ces conditions d'optimiser la chaîne de valeur dans son intégralité, du carreau de la mine au concentrateur. La

raison en est que l'industrie minière, à l'inverse d'autres activités comparables, n'a pas encore subi la pression des coûts ni les contraintes d'optimisation de la production.

La situation n'en évolue pas moins rapidement, la meilleure piste de progrès étant de doter la mine d'un système de communication flexible et multiservice.

Communication

Cela fait belle lurette que les mineurs communiquent sous terre par radiofréquences UHF/VHF! Reste que ce mode de transmission n'est ni fonctionnel, ni évolutif. Un réseau local sans fil est une bien meilleure solution, que plusieurs groupes miniers

Les difficultés croissantes de l'extraction minière accentuent les besoins d'automatisation et d'intégration des données.

(dont les Suédois LKAB et Boliden) ont de fait adoptée. Ces réseaux, surtout utilisés pour la téléphonie et les transferts de données sur IP, assurent également la géolocalisation et la communication avec les équipements mobiles.

Photo p. 48

Si la mine a beaucoup évolué, elle doit encore creuser le filon de l'automatisation et de l'intégration des données.



La mise en place d'une infrastructure de communication souterraine et l'informatisation du parc ouvrent de nouvelles possibilités d'échanges de données.

Géolocalisation

Elle permet de localiser un téléphone mobile, un ordinateur portable, une balise RFID (*Radio-Frequency IDentification*) ou un dispositif embarqué. On utilise pour cela n'importe quel poste client du réseau sans fil, dont la position est calculée par rapport à un endroit fixe ou des nœuds d'ancrage (souvent des points d'accès radio) aux coordonnées connues. Cette position relative est ensuite transformée en un système de coordonnées absolues quadrillant toute la mine. En général, plus il y a de nœuds, meilleure est la précision du positionnement.

Pour que ce repérage soit fiable, il faut être attentif à la planification et au déploiement du réseau sans fil. En effet, l'environnement minier souterrain multiplie naturellement les obstacles à la propagation des ondes radio : topographie des galeries, composition géologique, affaiblissement du signal dans la roche et les matériaux de construction, rapport puissance/sécurité intrinsèque, perturbations électromagnétiques, etc. Pour tester et valider sa solution, ABB a mené plusieurs essais sous terre et réalisé des installations pilotes de géolocalisation des engins miniers.

Intégration

La mise en place d'une infrastructure de communication souterraine et l'informatisation du parc d'équipements mobiles ouvrent de nouvelles perspectives en matière d'échanges de données. Les plans de forage et de charge, par exemple, peuvent être fournis aux machines de production, qui renverront en ligne les résultats de leurs actions. L'intégration des équipements mobiles dans le sys-

tème de gestion de la production permet aussi

- de fournir au parc machines les résultats des étapes en amont de l'exploitation minière (prospection géologique, estimation des ressources minérales, étude et développement de la mine, planification de la production), dans un format utile ;
- de rapatrier les résultats des équipements mobiles (états et rapports de production en ligne, analyses et statistiques) pour les transmettre aux utilisateurs concernés ;
- de récupérer les statistiques d'exploitation et les données de maintenance des systèmes embarqués, à destination du contrôle-commande, pour les unes, ou de services comme la maintenance, pour les autres ;
- de suivre en ligne l'état de l'équipement mobile, dont son positionnement.

Les interfaces avec la gestion de production sont aux standards industriels ; OPC et ses déclinaisons OPC DA (*Data Access*), AE (*Alarms and Events*) et HDA (*Historical Data Access*) gèrent les échanges entre les engins mobiles et le système de contrôle-commande ouvert d'ABB.

Les jeux de données et leur désignation sont conformes à la norme internationale IREDES (*International Rock Excavation Data Exchange Standard*) qui régit les échanges entre équipements miniers et systèmes informatiques, et définit un langage électronique commun à tous les automatismes de la mine.

Ce codéveloppement est un excellent levier de progrès pour les deux partenaires. Chacun mettant en avant ses compétences métier, c'est l'occasion d'apporter une immense valeur ajoutée à l'exploitation minière souterraine.

« Nos futurs exploitants veulent un centre d'information résolument intégré pour optimiser l'utilisation de notre parc machines. Je suis convaincu que ce partenariat ABB-Atlas Copco fera avancer à grands pas l'optimisation des mines souterraines. »

David Shellhammer

Président de la division
Atlas Copco Underground Rock Excavation

Plusieurs groupes miniers ont installé sous terre des réseaux sans fil pour la téléphonie et le transfert de données sur IP, mais aussi la géolocalisation et la communication avec les équipements mobiles.

La mine en ligne

Les informations de position et autres données de l'équipement mobile sont acheminées sur le réseau sans fil. Après consolidation, elles peuvent s'afficher dans le système de contrôle-commande ouvert d'ABB. L'ensemble donne une représentation précise et directe des opérations et de l'avancement de la mine. Cette analyse ouvre à son tour des pistes d'optimisation :

- Au lieu de suivre un programme prédéfini, la régulation de la ventilation s'adaptera aux conditions et besoins réels déduits de l'état des engins mobiles ;
- La disponibilité de ces équipements sera améliorée par le recoupement des données machines et de l'environnement minier pour affiner la planification de la maintenance ;
- Le respect du planning des opérations par ces équipements sera suivi en ligne ; les écarts serviront de

de compiler et de transmettre ces informations d'état aux conducteurs de machines renforce la capacité de ces derniers à remédier aux fréquentes divergences entre planning et réalité du terrain.

Pilote de mine

ABB et la division *Underground Rock Excavation* du Suédois Atlas Copco ont mis au point un démonstrateur intégrant la plate-forme d'automatisation 800xA d'ABB et les machines du groupe minier. Validée en juin 2012, la solution est aujourd'hui opérationnelle sur le site d'essais Atlas Copco de Kvarntorp (Suède) → 3. Elle dotera les exploitants d'un contrôle-commande de procédé sans égal et de toutes les informations utiles pour piloter le site.

Le projet intègre les données importantes des engins de forage, chargeuses et camions-tombereaux d'Atlas Copco dans

le système 800xA d'ABB pour mieux localiser, scruter, visualiser et exploiter en direct le parc machines. De quoi aider les opérateurs à prendre les bonnes décisions au bon moment et à maintenir la régularité et l'homogénéité de la

production. En phase avec les exigences des clients et les besoins futurs de la filière, Atlas Copco et ABB poursuivront le développement et l'amélioration fonctionnelle de la solution.

La solution dotera les exploitants d'un contrôle-commande de procédé sans égal et d'une mine d'informations pour piloter le site !

données d'entrée pour recalculer les activités.

À l'avenir, la boucle de régulation pourrait être fermée pour rediriger ou replanifier automatiquement l'équipement mobile, si nécessaire. D'ores et déjà, le simple fait

Stefan L. Sjoström

ABB Process Automation
Umeå (Suède)
stefan.l.sjoström@se.abb.com

Kjell G. Carlsten

ABB Process Automation
Västerås (Suède)
kjell.g.carlsten@se.abb.com

Krister Landernas

Jonas Neander
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)
krister.landernas@se.abb.com
jonas.neander@se.abb.com

Bibliographie

[1] *Mine*, [http://fr.wikipedia.org/wiki/Mine_\(gisement\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mine_(gisement)), septembre 2012.



Vingt mille lieues *sur* les mers

Logiciel ABB de surveillance et d'aide à la navigation *OCTOPUS-Onboard*

LEON ADEGEEST – De nos jours, des activités industrielles comme l'*offshore* pétrolier et gazier ont lieu sur de colossales unités de production flottantes qui nécessitent de lourds moyens de manutention et de levage. Concrètement, ce sont des milliers de tonnes dont il faut surveiller de près le transport sur de longues distances, anticiper la

réaction et protéger à tout moment des caprices de la météo et de la houle. Le système de surveillance et d'aide à la navigation *OCTOPUS-Onboard* d'ABB est sur le pont ! Il équipe le plus moderne des navires de transport lourd, fleuron de la compagnie Dockwise, le bien-nommé *Vanguard*.

1 Le nouveau colosse de Dockwise peut charger et convoier d'énormes structures, comme des plates-formes en mer ou des unités flottantes de production.



Long de 275 mètres pour une largeur de 75 mètres, ce mastodonte est capable de transporter 117 000 tonnes pour convoier en toute sécurité à travers le monde des plates-formes pétrolières, des unités de production et de stockage flottantes, ou encore des navires de forage → 1. Il peut

Les systèmes *OCTOPUS* améliorent la sécurité et l'efficacité des navires, abaissant notablement les coûts du client.

accueillir de grandes structures complètement assemblées, réduisant ainsi le temps de mise en service, mais aussi servir de cale sèche à d'autres bateaux de fort tonnage tels que les navires de servitude pour le forage.

C'est pour surveiller le transport de charges sur le *Dockwise Vanguard*, prédire son comportement et fournir à l'équipage une aide à la navigation par

gros temps qu'une société du Groupe ABB, Amarcon, a développé le système modulaire *OCTOPUS-Onboard*. Le système ABB de mesure de déplacement par trois capteurs en fait également partie, permettant de visualiser et de surveiller depuis le pont des zones critiques du navire, comme la charge. *OCTOPUS* renforce ainsi la sécurité et l'efficacité des navires, tout en allégeant considérablement la facture des clients. Il appartient aux solutions logicielles d'information et de commande de navigation

du centre d'excellence *VICO* d'ABB (*Vessel Information and Control*), qui propose un portefeuille complet de systèmes d'automatisation, de contrôle-commande et

d'assistance taillés pour le transport maritime et basés sur les technologies éprouvées ABB.

Près de 200 navires embarquent aujourd'hui *OCTOPUS* pour surveiller, mesurer et afficher en continu des informations pratiques d'aide à la navigation (déplacement, état et position, consommation énergétique et rendement, hydrodynamique et géolocalisation du navire), assorties de préconisations.

OCTOPUS-Onboard s'appuie sur des bulletins météorologiques pour maximiser l'efficacité opérationnelle du navire et guider l'équipage dans ses prises de déci-

OCTOPUS-Onboard surveille la charge transportée, prédit le comportement du navire et fournit une assistance à la navigation par gros temps.

sion en matière de transport et d'embarquement/débarquement de la charge. Il s'inscrit dans le sillage du programme de navire « intelligent » *Smart Marine* d'ABB pour offrir au secteur maritime l'expertise du Groupe en systèmes électriques, solutions de propulsion, automatismes et logiciels d'aide à la décision.

Photo

Le *Dockwise Vanguard* embarque le système modulaire de surveillance et d'aide à la navigation *OCTOPUS-Onboard* d'ABB.

Leon Adegeest

Amarcon (société du Groupe ABB)
Dalfsen (Pays-Bas)
leon.adegeest@nl.abb.com



En rangs serrés

ABB aligne *datacenters* et contrôle-commande industriel

MARINA THIRY, ERIC OLSON, BOB FESMIRE – Rares sont les secteurs industriels à faire face à une demande exponentielle comme les centres d'hébergement de données ou *datacenters*. Simples salles informatiques il y a 20 ans, ce sont aujourd'hui des installations autonomes à la pointe de la technologie, ultra-spécialisées, parfois plus grosses qu'une usine... mais particulièrement énergivores pour assouvir notre boulimie numérique. Si les nouvelles réalisations sont les vitrines technologiques de l'écoperformance, qu'en est-il des centaines de centres de taille moyenne, parfois disséminés sur de multiples sites, confrontés aux défis de l'efficacité opérationnelle et énergétique ? Souvent, les outils utilisés pour gérer ces installations ne sont pas à la hauteur des attentes. Tout plaide donc en faveur d'une surveillance et d'une gestion intégrées des *datacenters*. Pour y répondre, la solution Decathlon d'ABB est sur la ligne de départ.



La croissance fulgurante des datacenters, ces dernières décennies, a donné naissance à une industrie solide, tout entière consacrée à l'hébergement numérique.

En 20 ans, la croissance fulgurante des *datacenters* en taille, en nombre et en technicité a donné naissance à une industrie solide, entièrement dédiée à l'hébergement numérique [1]. À côté des géants du secteur, tels Google, Apple et Facebook qui monopolisent l'attention en investissant à tour de bras dans ces centrales de l'information, essaient des centaines, voire des milliers d'infocentres de taille moyenne en butte aux difficultés de la réduction des coûts d'exploitation, de la gestion d'un parc machines en perpétuelle évolution et de la surveillance multisite.

Mutation

Aux premiers temps de l'Internet, les centres de traitement informatiques échappaient plus ou moins à la surveillance de leurs exploitants; il n'y avait

Photo

Si de nombreux *datacenters* arborent les meilleures technologies de stockage, ils manquent cruellement de systèmes de gestion et de surveillance d'infrastructure. Comment la solution Decathlon d'ABB comble-t-elle cette lacune ?

aucun moyen de connaître la consommation énergétique du site, encore moins celle de chaque équipement, ni le taux d'occupation des serveurs. En fait, rien n'y obligeait : l'énergie était bon marché et la capacité au rendez-vous.

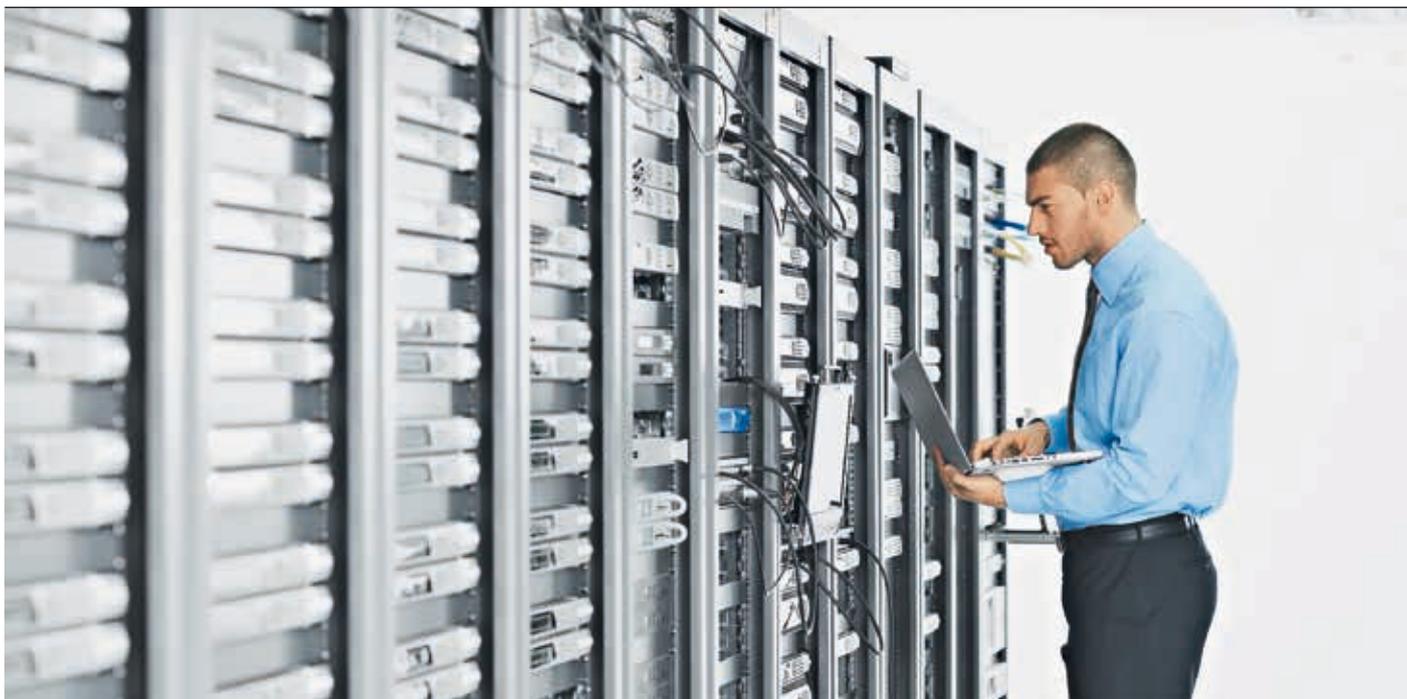
La montée en puissance des plateformes informatiques et du Web a fait exploser les besoins en capacités de stockage et la consommation énergétique. Il y a à peine cinq ans, un serveur type consommait 2,5 kW par baie; aujourd'hui, il en engloutit 8 à 30, avec d'énormes contraintes de refroidissement à la clé!

Pour minimiser les échanges thermiques, beaucoup de datacenters déploient, une alternance de couloirs chauds et froids. Mais la solution demeure passive. Quand il s'agit de surveillance et de commande actives, les systèmes en place déclarent souvent forfait. Des remèdes ponctuels existent, comme gérer la virtualisation des serveurs ou surveiller les usages énergétiques de toute l'installation, mais

ils souffrent d'un inconvénient majeur : l'absence d'intégration des systèmes qui ajoute à la complexité de l'ensemble et crée des « failles d'information ».

Dans certains domaines, les datacenters sont très en retard sur les autres filières industrielles. Un exemple : la gestion des actifs implique en général la surveillance systématique de l'état et de la performance de l'ensemble du parc pour mieux gérer la maintenance, alléger son budget et optimiser le site. Or, dans le monde des datacenters, elle s'est de tout temps résumée à consigner la date d'acquisition des équipements et leur emplacement physique.

Selon ABB, seuls 5 à 10% des datacenters disposent de systèmes de contrôle-commande pour le traitement informatique, la consommation énergétique et la gestion environnementale, 20 à 40% possèdent certaines de ces fonctions (pour les opérations de serveurs le plus souvent), et 40 à 65% en sont peu ou prou dépourvus → 1. La raison en est que



de nombreuses installations anciennes étaient traitées comme un espace de bureaux de plus (avec, certes, quelques besoins électriques inhabituels) et devaient se contenter de la gestion technique du bâtiment (GTB) du site pour régler la température et l'hygrométrie.

Place aux logiciels de gestion

Le besoin de surveillance et de gestion unifiées des datacenters saute aux yeux. Il faut une seule et unique interface utilisateur qui soit capable de lever la complexité d'une floraison d'interfaces naissant au gré des solutions mises en œuvre. Ce système intégré doit également gérer les opérations de serveurs, leur refroidissement, leur empreinte écologique et énergétique. Heureusement, les industries de transformation ont déjà réglé nombre de ces problématiques avec des solutions dont ils peuvent faire profiter l'industrie des datacenters pour ses propres réalisations : c'est la gestion intégrée des centres au jour le jour, plus connue sous l'abréviation anglo-saxonne « DCIM » (*Data Center Infrastructure Management*).

La stratégie DCIM consiste à aligner le datacenter sur les objectifs de l'entreprise et à en accroître la valeur par

- des informations sur l'énergie et la performance ;
- des décisions opérationnelles étayant la démarche de l'entreprise ;

- la fourniture de nouvelles applications et de services web offrant un maximum de fiabilité et d'efficacité.

Intégration DCIM

Plusieurs caractéristiques sont essentielles à cette gestion intégrée des infrastructures. Le taux d'engagement des installations étant un des paramètres clés, les systèmes DCIM doivent afficher une haute fiabilité mais également des fonctionnalités de gestion d'actifs qui vont bien au-delà d'un simple référencement des serveurs : la maintenance conditionnelle et les outils de diagnostic (pour identifier les serveurs fonctionnant en boucle, notamment) mettront ces fonctions en phase avec les autres activités capitalistiques de l'entreprise. Pour un nombre croissant de gestionnaires de datacenters, salles informatiques et fermes de serveurs répartis, une visibilité multisite des infrastructures devient un autre impératif des logiciels de DCIM.

En fin de compte, l'intégration DCIM procure la visibilité, l'aide à la décision et les technologies de contrôle-commande pour mieux gérer les opérations des datacenters dans toute l'entreprise, par une vue unifiée des systèmes mécaniques, électriques et informatiques. Les logiciels de DCIM promettent de fournir aux gestionnaires de datacenters des informations directement exploitables pour maximiser les performances, optimiser

les opérations, réduire les coûts et les risques. Les composantes de la solution Decathlon d'ABB relèvent ces défis en améliorant considérablement l'existant.

Gestion multiservice du site

Surveillance et pilotage de la climatisation, du traitement de l'air, des équipements mécaniques et matériels électriques, etc.

Gestion de la maintenance

Glissement d'une maintenance systématique, à date fixe, à une maintenance conditionnelle à l'aide de diagnostics et pronostics pour identifier et lever les difficultés avant qu'elles ne dégénèrent en problèmes.

Gestion de l'alimentation électrique

Suivi et pilotage des équipements de fourniture électrique, alimentations et compteurs (poste de transformation, micro-réseau et production locale d'énergie compris) pour sécuriser et fiabiliser la distribution et la consommation d'électricité.

Gestion de l'énergie

Corrélation des consommations temps réel avec les données contractuelles, l'indexation horaire sur les prix du marché de gros et la gestion des pointes de consommation (« réponse à la demande ») pour optimiser la dépense énergétique.

Les datacenters peuvent instantanément basculer leur « production » d'un site à l'autre pour exploiter les différentes offres tarifaires de l'énergie.

Gestion dynamique de la puissance énergétique

Services tiers à valeur ajoutée optimisant la chaîne de valeur énergétique et autorisant la participation aux marchés de l'énergie. Exemple: l'abonnement à la plate-forme logicielle « intelligente » *Global Energy Intelligence*[®] du spécialiste de l'optimisation des datacenters *Power Assure* accompagne la solution Decathlon d'ABB par des mesures de charge des serveurs, l'analyse et la planification des besoins en ressources informatiques, l'intégration aux marchés mondiaux de l'énergie, la réponse à la demande, les services système, la tarification et la prévision de l'énergie.

Planification des actifs et des capacités

Intégration dans Decathlon de la suite DCIM de l'éditeur *nlyte Software* pour optimiser l'espace, l'alimentation et le refroidissement par un aménagement judicieux des serveurs. Le logiciel crée également des scénarios par hypothèses, automatise et gère les flux, ressources et processus.

Diagnostic

Analyse des causes de défaillance et traitement des alarmes: le DCIM donne le détail précis de la performance de toutes les opérations du datacenter.

Contrôle-commande et automatisation

Optimisation des performances de l'installation et de l'outil informatique, aux niveaux équipement et système.

Télésurveillance temps réel globale du parc machines et des conditions climatiques.

Pièces à conviction

On constate donc un besoin criant de visibilité, d'aide à la décision et de contrôle-commande pour améliorer la dynamique et la réactivité des datacenters. L'offre DCIM complète avantageusement le puzzle des solutions décousues de bien des installations actuelles. La nouveauté du concept n'empêche pas l'émergence de principes directeurs pour guider le développement de ces systèmes.

Visibilité et contrôle-commande renforcés

Le DCIM se fonde sur un référentiel réaliste des usages énergétiques du datacenter, grâce à un suivi global temps réel qui permet aux décideurs de savoir quand, où et en quelle quantité l'énergie est consommée, et d'adopter en connaissance de cause des tactiques d'optimisation des ressources et de prévision des besoins.

Consolidation des ressources informatiques

Les outils DCIM s'appuient sur cette visibilité accrue des opérations et sur de puissants traitements analytiques pour consolider les ressources et éviter le gaspillage, maximisant la capacité existante. C'est autant d'économiser sur l'informatique (en réduisant le nombre de serveurs, par exemple), l'alimentation, le refroidissement, l'espace et l'empreinte carbone.

Optimisation des performances

Le DCIM affiche une photographie précise des opérations du centre, grâce à une visibilité et un contrôle-commande renforcés qui améliorent la disponibilité, maximisent la capacité d'alimentation, le refroidissement et l'espace, rationalisent les opérations et réduisent le risque dans toute l'entreprise.

Automatisation et informatisation

Les systèmes DCIM aident l'opérateur à déplacer la charge informatique, à procéder aux réglages thermiques et hygrométriques, et à suivre d'autres paramètres (vibrations dans les climatiseurs, par exemple) pour anticiper les défaillances.

Une mue progressive

Pour la grande majorité des installations dépourvues de ces systèmes et développements pointus, une amélioration par étapes est préconisée.

On commencera par une évaluation du site pour mettre en évidence les gisements de progrès immédiats (économies

d'énergie, par exemple). L'introduction d'un système DCIM sera d'autant plus facilitée que les exploitants savent ce qu'ils en attendent.

Les campagnes de modernisation peuvent débuter par des initiatives simples et vite rentabilisées (en moins d'un an pour certaines), comme l'augmentation de la température ambiante ou la commande en vitesse variable des ventilateurs de refroidissement.

L'un des points forts du DCIM réside dans sa capacité à déplacer automatiquement la charge de calcul d'un site à l'autre pour jongler avec les prix de l'électricité: une « délocalisation » instantanée qui ferait rêver plus d'un acteur de l'« ancienne économie »! Pareilles idées concourent au progrès du DCIM pour en tirer le meilleur et en faire une pièce maîtresse de tout datacenter dans l'industrie.

Marina Thiry

ABB Inc
Menlo Park (Californie, États-Unis)
marina.thiry@us.abb.com

Eric Olson

ABB Inc
Warminster (Pennsylvanie, États-Unis)
eric.olson@us.abb.com

Bob Fesmire

ABB Inc
Cary (Caroline du Nord, États-Unis)
bob.fesmire@us.abb.com

Bibliographie

[1] Datacenter Dynamics Inc, *Datacenter Dynamics Global Industry Census 2012*, [en ligne], disponible sur: <http://www.datacenterdynamics.com/focus/archive/2012/07/datacenterdynamics-industry-census-data-center-industry-robust>, juillet 2012.





Tours de Babel

Émuler les interfaces de communication du système de contrôle-commande distribué avec *SoftCI* d'ABB

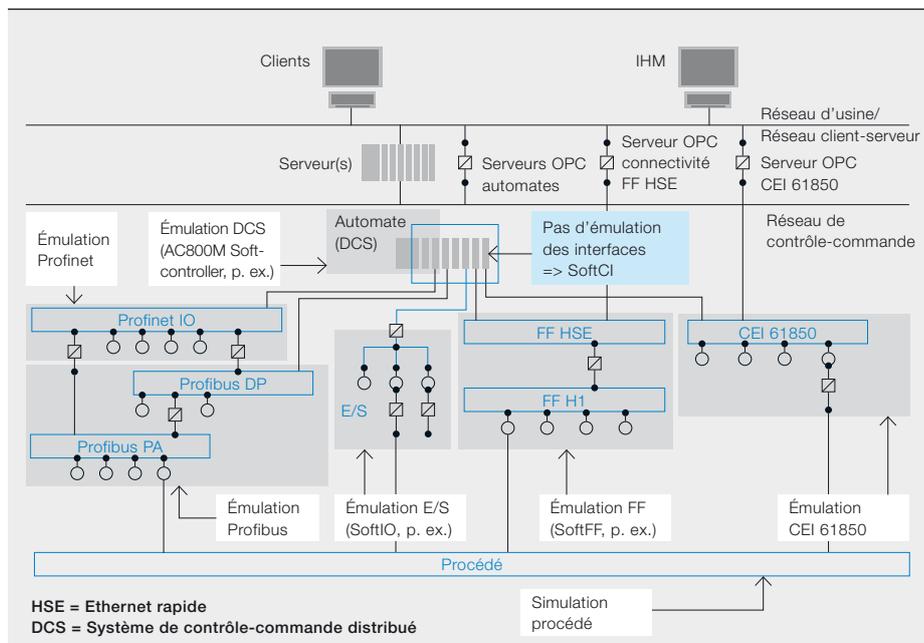
MARIO HOERNICKE, TRYGVE HARVEI – Les usines modernes sont d'une extraordinaire complexité : des centaines, voire des milliers de capteurs, compteurs, dispositifs électroniques intelligents et automatismes s'échangent des gigaoctets de données avec la précision d'un métronome. Construire un banc d'essai matériel complet au pied des machines est tout bonnement irréalisable ; il faut donc émuler par logiciel chaque sous-ensemble constitutif du système de contrôle-commande distribué. Au fil des ans, les émulateurs sont devenus ultraperfectionnés, mais sans jamais offrir le moyen de bien émuler les interfaces de communication entre le contrôle-commande et ses sous-systèmes. La solution *SoftCI* d'ABB vient combler cette lacune en se substituant aux interfaces de l'automate AC800M en phases d'intégration et de recette usine.

Photo

Émuler le matériel et le logiciel de contrôle-commande d'un complexe industriel, comme cette usine norvégienne de gaz naturel liquéfié, est un casse-tête. Aujourd'hui, un émulateur ABB imitant à la perfection les interfaces des sous-systèmes facilite grandement la tâche.

Encore aujourd'hui, il faut tester un à un chaque sous-système dans son contexte, au détriment des aspects système et communication.

1 Devant la multiplicité des émulateurs de matériels de contrôle-commande, SoftCI s'impose pour la communication entre composants d'automatismes



A l'évidence, il est impossible de reconstituer toute une unité de production en laboratoire pour tester les nouveaux systèmes d'automatisme. Les fonctionnalités tant matérielles que logicielles de l'outil industriel sont donc imitées, ou plutôt « émulées ». Si cette émulation est probante dans la majorité des cas, il n'en va pas de

systèmes existants ou de l'exécuter en autonome. Un simulateur ABB de bus Foundation Fieldbus, *SoftFF* [2], peut être utilisé pour vérifier l'intégrité de l'émulation.

Environnement SoftCI

En recette usine, la totalité du système doit être complètement émulée pour vérifier la cohérence du développement. Tout ce qui n'est pas exécuté sur un ordinateur classique l'est sur un émulateur. À différents sous-systèmes et bus de terrain correspondent différents

Les fonctions de communication des différents CI étant souvent similaires, un seul concept générique sert plusieurs types de CI.

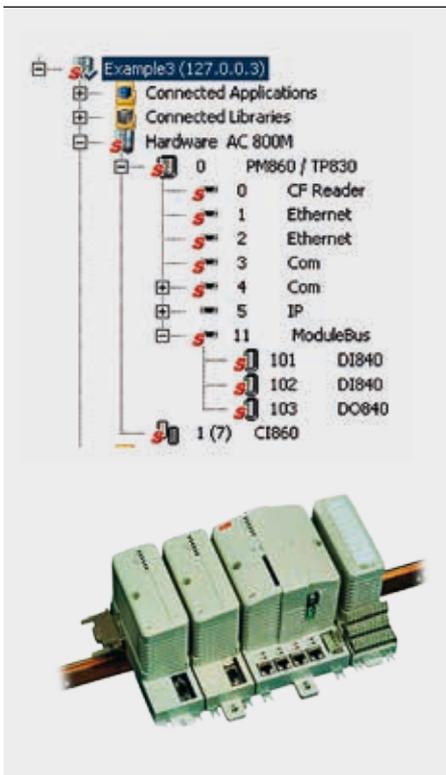
même de la communication entre l'émulateur du système de contrôle-commande distribué et celui des sous-systèmes. La prolifération des bus de terrain et des réseaux Ethernet industriel, tout comme l'importance accordée à l'infailibilité de la transmission, corsent la difficulté.

émulateurs → 1. Il existe, par exemple, un émulateur d'automatisme et de contrôle-commande distribué dédié aux langages normalisés CEI 61131-3 [3]. De nos jours, chaque système et sa communication doivent être testés à part, dans leur environnement propre.

L'initiative « NGFAT » (*Next Generation Factory Acceptance Test*) d'ABB [1] s'est emparée du problème, avec notamment l'objectif de développer une interface de communication automate générique, *SoftCI*. Les développeurs ABB ont pour cela réalisé un kit logiciel pour permettre à l'utilisateur d'intégrer l'émulation de l'interface dans les émulateurs de sous-

Tel est le contexte qui présida au développement de *SoftCI*. Celui-ci gère la communication verticale entre les émulations du contrôle-commande distribué et des sous-systèmes. En fait, si l'usine multiplie les sous-systèmes exécutant autant de tâches différentes, elle n'a en général qu'un seul type de système de contrôle-commande. Pour valider le

2 Configuration d'un automate AC800M et de son coupleur Foundation Fieldbus



3 Exemples de mise en correspondance des signaux Foundation Fieldbus (gauche) et CEI 61850 (droite) par les interfaces de communication (IC) du configurateur ABB Control Builder M

FF (interface de communication CI860)

Channel	Name	Type
QW1.0	FF Real Publish 0	RealIO
IW1.3072	FF Real Subscribe 0	RealIO

Variable	Protocol Info
Application_1.Program1.ToFF	ToFF
Application_1.Program1.FromFF	FromFF

CEI 61850 (interface de communication CI868)

Channel	Name	Type	Variable	Protocol Info
WS.2.1.1	MV1	RealIO	AutoM.G02.AA02.LED.CVMM1.L.SWV	
WS.2.1.2	MV2	RealIO		
WS.2.1.3	MV3	RealIO		
WS.2.1.4	MV4	RealIO		
WS.2.1.5	MV5	RealIO		
WS.2.1.6	IO1	BoolIO		
WS.2.1.6.1	Op	BoolIO	AutoM.G02.AA02.LED.CVMM1.L.SWV	
WS.2.1.6.2	Tr1	BoolIO		
WS.2.1.6.3	Tr2	BoolIO		
WS.2.1.6.4	Tr3	BoolIO		

Caractéristiques

- Une interface de communication pour les variables d'E/S
- Copie signaux FF <-> variables CEI 61131
- Correspondance configurée dans une seule table pour chaque interface de communication

- Une interface de communication pour les variables d'E/S
- Copie signaux CEI 61850 <-> variables CEI 61131
- Pour chaque IED du niveau terrain = une table de mise en correspondance distincte
- IED terrain = toujours des entrées
- AC800M traité comme un IED
- IED AC800M = toujours une sortie

concept SoftCI, ABB a choisi l'automate AC800M.

L'automate en vedette

L'AC800M d'ABB est constitué de modules d'entrées/sorties (E/S) mais aussi de coupleurs bus de terrain et sous-systèmes, appelés « CI » (*Communication Interfaces*) → 2.

Le coupleur CI860, par exemple, assure le transfert de données entre l'AC800M et un équipement du bus de terrain Foundation Fieldbus (FF). La « traduction » passe par une table mettant en correspondance les variables de l'application automate CEI 61131 et les signaux FF. La contrepartie FF aux variables CEI rattachées à l'application automate est le configurateur *FieldBus Builder FF* (FBB FF), qui lie les signaux FF à des blocs de fonction FF. En reliant le signal FF aux blocs FF et la variable CEI 61131 à l'application automate, puis en rapprochant signal et variable dans la table de correspondance, le développeur peut établir un échange de valeurs entre AC800M et FF.

Autre exemple de coupleur, cette fois pour les réseaux CEI 61850 de communication dans les postes électriques → 3 : le CI868. Sa structure est différente :

pour chaque dispositif électronique intelligent « IED » (*Intelligent Electronic Device*) relié à l'automate, le coupleur contient une table de correspondance distincte dans laquelle les signaux en provenance du sous-système sont mis en relation avec les variables automate, comme pour FF.

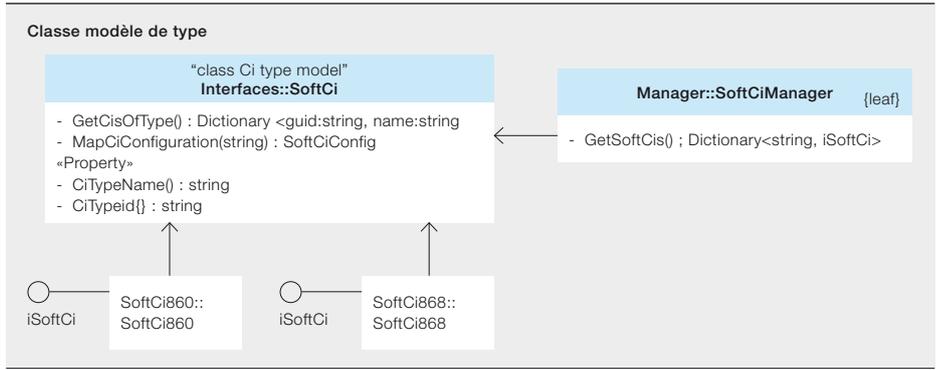
Hormis cette différence (une seule table pour FF, plusieurs pour CEI 61850), le couplage est identique.

Les fonctions de communication des différents CI étant souvent similaires, un seul concept de communication générique sert plusieurs types de CI. La plupart des CI, par exemple, se contente d'échanger des valeurs entre variables CEI 61131 et signaux des sous-systèmes, sans fonctionnalité complémentaire. Aussi peut-on modéliser un CI configuré sous forme de table de correspondance.

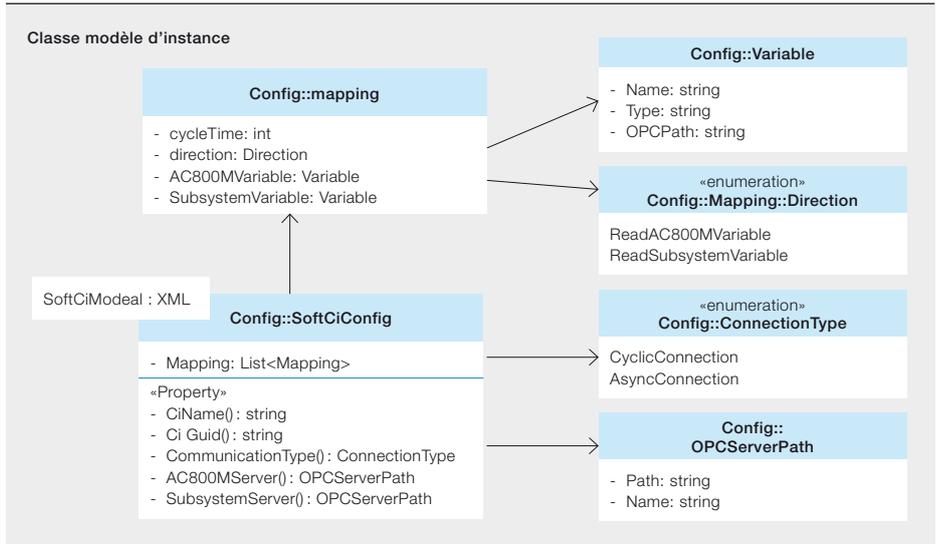
Ce modèle de CI n'est pas la seule partie à développer. En cours d'exécution, une méthode de communication générique doit échanger des valeurs avec l'AC800M, et ce pour chaque type de CI puisque ces derniers échangent toujours des données avec l'automate. Sur le terrain, une communication avec l'émulateur de

SoftCI gère la communication verticale entre les émulations du contrôle-commande distribué et des sous-systèmes.

4 Métamodèle de type de CI



5 Métamodèle d'instances de CI (XML)



sous-systèmes est nécessaire. L'émulation diffère selon le type de sous-système; elle peut être propre à ABB, libre (*open source*) ou d'origine tierce, mais encore ouverte ou verrouillée.

Les émulateurs *ouverts* autorisent l'ajout de fonctionnalités : SoftCI peut s'intégrer à l'émulateur de sous-systèmes et échanger directement les variables de ce dernier avec celles de l'AC800M. Le modèle de CI est exécuté dans l'émulation du sous-système.

Les émulateurs *verrouillés* ne permettent pas d'extensions fonctionnelles. Ils sont néanmoins utilisables avec SoftCI, obligeant de ce fait à évaluer une autre méthode standard de communication verticale, avec deux conséquences à la clé : SoftCI doit être capable d'exécuter des modèles de CI en autonome et, au cas où un modèle de CI est développé en manuel, être stocké sous une forme interprétable par l'être humain.

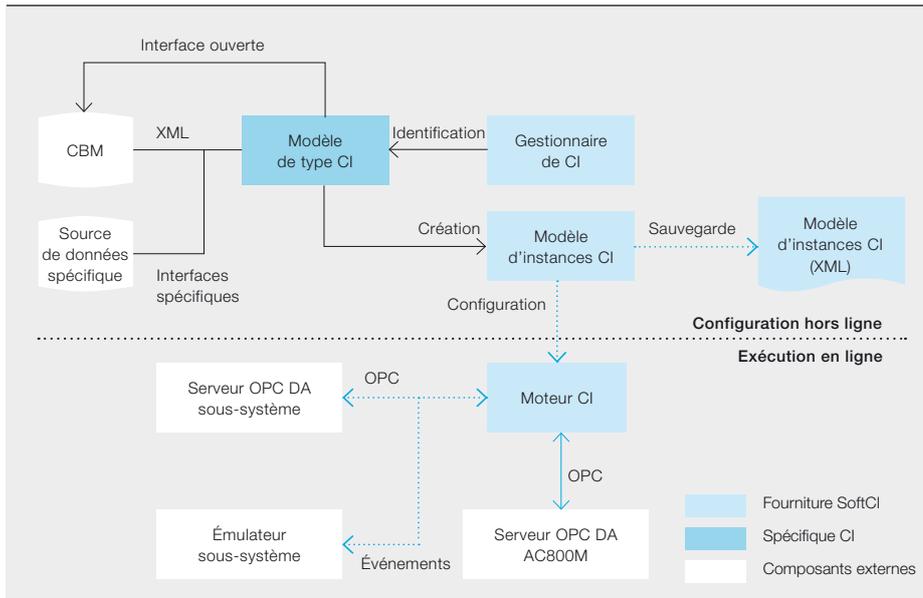
L'heure est au générique

Tout est en place pour le développement d'une fonctionnalité générique permettant d'émuler différents types de CI.

Modèles de CI

Un élément majeur de la fonctionnalité est la création de modèles de CI, en deux parties, l'une décrivant le « type de CI », et l'autre « l'instance de CI ». La première, identique pour toutes les instances, n'est développée qu'une fois; la seconde est créée pour chaque instance.

Le métamodèle d'un type de CI revêt la forme d'une interface .NET, exécutable dans une classe → 4. Il se compose essentiellement des descriptif, nom et identifiant du type de CI, et d'une méthode d'obtention des instances du type décrit, à partir de l'environnement de développement 800xA. Si l'on veut créer automatiquement des modèles d'instances, une méthode de création du modèle peut être mise en œuvre. Le cas échéant, SoftCI est capable d'identifier les instances et de créer les



modèles correspondants sans intervention humaine.

Le métamodèle d'instances est fourni sous la forme de classes .NET, enregistrables au format XML → 5. Il n'utilise pas de méthodes mais des propriétés de données uniquement pour décrire l'instance spécifique. En règle générale, c'est la représentation de la table de correspondance du configurateur d'automatismes *Control Builder M* (CBM) d'ABB.

En plus de cette table sont décrits le nom et l'identifiant de l'instance de CI, qui permettent à SoftCI de renseigner l'utilisateur sur les instances en cours mais aussi sur son mode de transmission de l'instance de CI, acyclique ou cyclique suivant la méthode de communication du sous-système. Les deux modes sont panachables.

Communication CI

Nous l'avons dit, il faut trouver une méthode de communication avec le logiciel automate AC800M *SoftController* et, donc, modéliser les paramètres de communication d'une instance.

La méthode retenue par ABB est *OLE for Process Control Data Access* (OPC DA) qui est prise en charge par AC800M *Softcontroller* et préconfigurée pour le matériel et le système de production ; la reconfiguration de l'émulation n'est donc pas nécessaire. Sachant que le système de contrôle-commande du procédé peut avoir plusieurs serveurs OPC, le chemin d'accès et le nom du serveur OPC

AC800M pour l'instance automate spécifique doivent figurer dans le modèle d'instance.

Modules SoftCI

Notre kit de développement se compose de plusieurs modules logiciels → 6. Outre le modèle, un gestionnaire de CI est fourni pour identifier les modèles de type de CI. Il se peut que le système de contrôle-commande d'une usine en compte plusieurs. Ce gestionnaire est alors à même de les identifier et de créer automatiquement pour chacun des modèles d'instances, sans intervention humaine.

Les modules inclus dans le kit sont des bibliothèques de classes qui servent à créer rapidement une émulation de CI dans les émulateurs de sous-systèmes. Est également fournie une très petite interface utilisateur simple permettant d'exécuter l'émulation en autonome.

Période d'essai

Notre concept, testé par une émulation de CI pour FF, a donné des résultats concluants, corroborés par une émulation CEI 61850. Le CI868 a été exécuté dans une version prototype pour l'échange de valeurs entre l'émulation CEI 61850 et le logiciel automate AC800M.

Tremplin vers l'usine virtuelle ?

En dotant les interfaces de communication AC800M d'une fonction d'émulation générique, le kit de développement logiciel SoftCI comble un vide dans le paysage de l'émulation. Sans prétendre

Le coupleur CI860 transfère les données entre automate AC800M d'ABB et équipement Foundation Fieldbus.

à l'universalité, il est capable de gérer la majorité des types de CI. D'ores et déjà implanté dans SoftFF, le CI860 est prêt pour les essais d'intégration et de recette usine, une première installation pilote étant en cours.

SoftCI marque ainsi une nouvelle étape vers la mise en service complète et virtuelle du système d'automatisation étendue 800xA d'ABB.

Mario Hoernicke

ABB Corporate Research
Ladenburg (Allemagne)
mario.hoernicke@de.abb.com

Trygve Harvei

ABB Process Automation
Oslo (Norvège)
trygve.harvei@no.abb.com

Bibliographie

- [1] Hoernicke, M., Greifeneder, J., "Next Generation Factory Acceptance Test", *Annual Report ABB Corporate Research Germany*, p. 83–89, 2011.
- [2] Hoernicke, M., Weemes, P., Hanking, H., « Le bus quitte le terrain pour la voie rapide : simuler le bus Foundation Fieldbus par logiciel ABB SoftFF », *Revue ABB*, 1/2012, p. 47–52.
- [3] *CEI 61131-3 : Automates programmables – Partie 3 : langages de programmation*, Édition 2.0, 2003.
- [4] *CEI 61850 – Réseaux et systèmes de communication dans les postes*, 2003.



État critique

Quelles stratégies de maintenance pour les sites industriels complexes ?

KARI SAARINEN, SHIVA SANDER TAVALLAEY, PATRIK M. WESTERLUND – Passer d'une stratégie de maintenance réactive à une stratégie préventive peut s'avérer payant pour bon nombre de secteurs industriels. Pour autant, l'industrie des procédés compte des installations avec des milliers d'équipements pour lesquels il est difficile, voire impossible, de mettre en œuvre des actions purement préventives. Dans ce cas, quelles méthodes adopter pour optimiser la maintenance de ces sites ? La méthodologie analytique CRIM (*CRI*ticality-*analysis-based Maintenance*) d'ABB permet d'identifier rapidement les équipements critiques et de planifier de manière opportune les tâches de maintenance au vu des contraintes d'environnement et d'exploitation. Elle détermine la criticité des équipements de l'usine avant d'analyser leur coût global.



La méthodologie CRIM d'ABB privilégie une stratégie de maintenance financièrement avantageuse pour l'ensemble d'un site industriel par une analyse systématique de la criticité des équipements, une analyse de coût global et une estimation de la durée de vie.

Les méthodes d'optimisation de la maintenance vont des plus simples, basées sur le retour d'expérience et l'empirisme, aux plus complexes. Parmi les premières, citons la stratégie «non-interventionniste» qui consiste à exploiter jusqu'à la défaillance des équipements redondants et à très faible taux de panne ; la maintenance à échéance fixe, des plus efficaces lorsque la remise en état ou le remplacement périodique d'un équipement coûte

moins cher que les conséquences de sa défaillance et qu'un seul mode de défaillance connu prédomine ; enfin, la maintenance conditionnelle, la plus économique pour les équipements critiques.

Les méthodes plus complexes incluent la maintenance basée sur la fiabilité, très exhaustive pour fixer la meilleure politique de maintenance proactive et s'assurer une fiabilité élevée des systèmes, ou encore la topomaintenance (*total productive maintenance*) qui associe qualité totale et maintenance proactive afin de maximiser le rendement productif. La première est

assez lourde à mettre en œuvre et la deuxième se focalise sur la productivité des machines ; aucune n'est donc adaptée au contexte du process. La méthodologie CRIM d'ABB, par contre, y trouve

Les facteurs de criticité sont identifiés avec les spécialistes de la maintenance et du process.

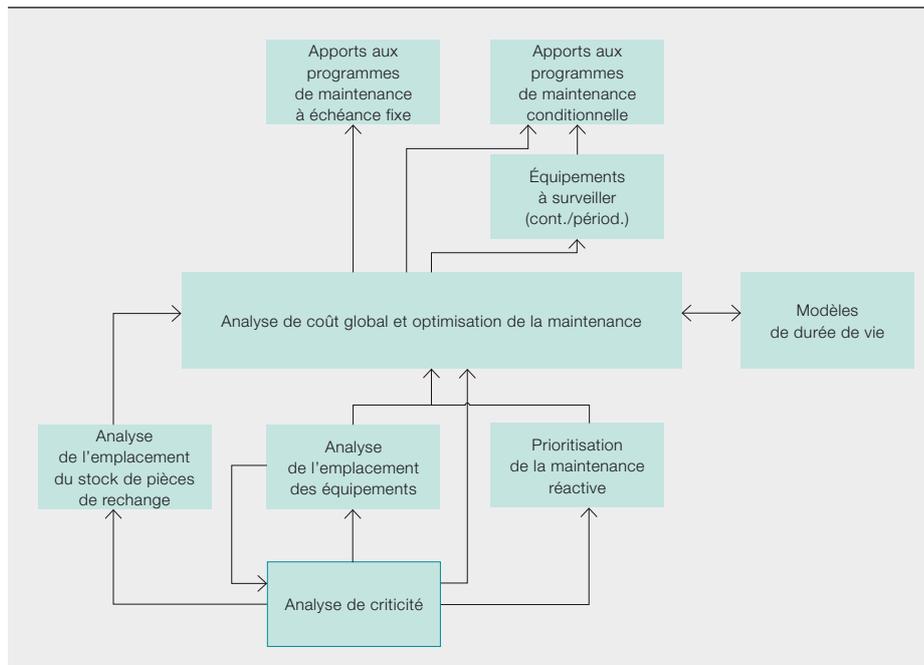
parfaitement sa place car elle privilégie une stratégie de maintenance financièrement avantageuse pour l'ensemble d'un site industriel. Ses trois volets sont une analyse systématique de la criticité des

Photo

Adopter les bonnes stratégies de maintenance pour un site regroupant plusieurs milliers d'équipements (comme cette installation de pelletisation de minerai de fer) n'est pas chose aisée. La méthode CRIM d'ABB aide à identifier les stratégies les plus efficaces.

L'analyse de criticité suppose une analyse quantitative des événements et défauts, ainsi que leur hiérarchisation afin d'établir la gravité de leurs conséquences.

1 Synoptique de la méthodologie CRIM



équipements, une analyse de coût global et une estimation de la durée de vie.

Méthode analytique CRIM

Point de départ de la méthode CRIM, l'analyse de criticité → 1 est au cœur de toute politique de maintenance et de fiabilité. Elle consiste à déterminer l'indice de criticité d'un équipement et son impact sur la sécurité des personnes, l'environnement et le procédé de production. Elle établit également le niveau d'attention requis par l'équipement en termes de stratégie et de tactique de maintenance.

L'étape suivante est une analyse de coût global des actifs identifiés comme critiques afin de démontrer les avantages

elle suppose une analyse quantitative des événements et défauts, ainsi que leur hiérarchisation afin d'établir la gravité de leurs conséquences. En d'autres termes, seules les conséquences des défaillances sont ici évaluées. Les probabilités de défaillance sont prises en compte ultérieurement lors de l'analyse de coût global.

Une méthode rigoureuse et des outils *ad hoc* permettent d'analyser la criticité de milliers d'équipements à un coût raisonnable.

Avant de démarrer l'analyse, l'animateur ABB du groupe de travail demande au client de dresser la liste de tous les équipements

L'animateur ABB du groupe de travail pose une série de questions sur chaque équipement et, partant des réponses, attribue des indices de criticité.

de stratégies de maintenance spécifiques pour ces actifs.

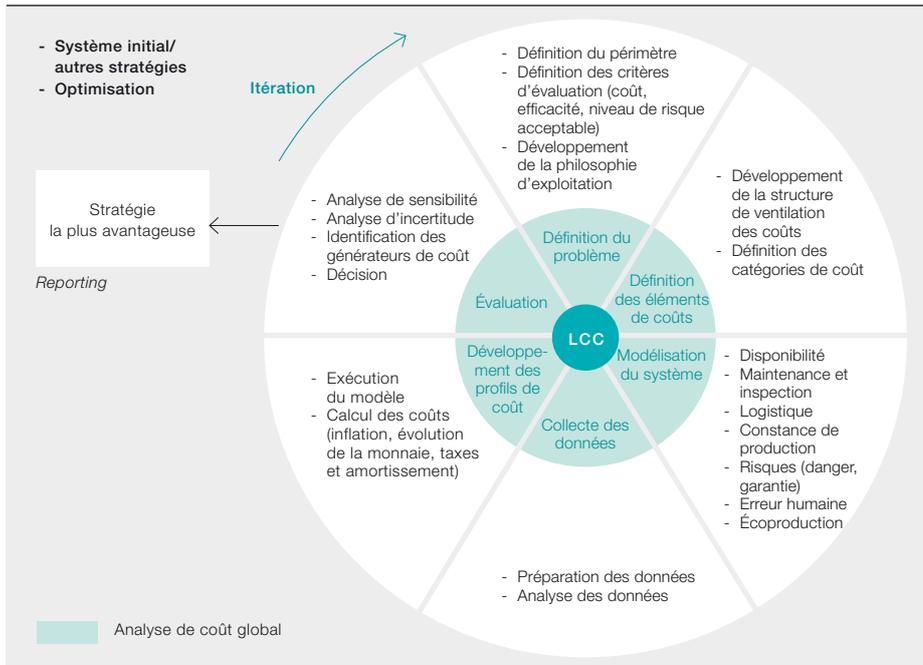
Analyse de criticité

La criticité est une mesure relative des conséquences d'une défaillance. De fait,

concernés. Lors de la réunion, il pose une série de questions très précises sur chaque équipement et, partant des réponses, attribue des indices de criticité spécifiques à chacun des facteurs de criticité de la liste. Ces derniers

auront été préalablement identifiés lors d'échanges avec les spécialistes de la maintenance et du process. L'indice de criticité final, automatiquement établi pour chaque actif, tient compte de très nombreuses variables : temps d'indispo-

2 Analyse de coût global [1]



La différence entre les pertes de production résultant de la défaillance de l'équipement et celles dues à l'arrêt pour maintenance préventive est l'élément clé de l'analyse.

L'analyse de coût global prend en compte la somme des dépenses sur tout le cycle de vie d'un équipement.

abilité, temps de réactivité de la production, capacité, qualité, environnement, risques sécuritaires et pertes d'énergie engendrés par la défaillance de l'équipement et effets secondaires ultérieurs. Un rapport d'analyse de criticité est ensuite élaboré.

Analyse de coût global

L'analyse de coût global prend en compte la somme des dépenses tout au long de la vie d'un équipement (recherche et développement, fabrication, exploitation, maintenance et fin de vie). Elle débute par la définition du problème → 2 et procède dans le sens horaire de manière itérative jusqu'à remplir tous les critères définis au début.

Avec la méthode CRIM, il s'agit de déterminer les dépenses de maintenance moyennes minimales sur le long terme par unité de temps, calculées pour trois stratégies de maintenance : réactive, à échéance fixe et conditionnelle.

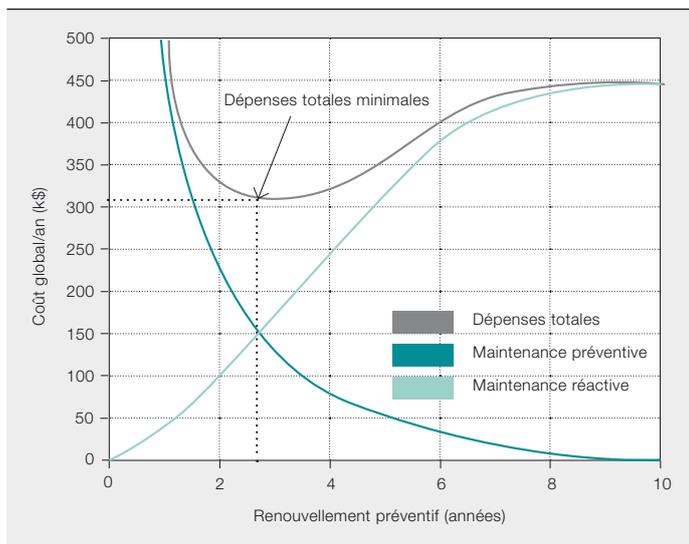
Dans le cas présent, on ne tient compte que des dépenses liées à la stratégie sélectionnée pour l'équipement en question, soit les dépenses en capital pour sa maintenance conditionnelle. Aucune dépense en capital n'est donc liée à sa maintenance réactive. Les dépenses d'exploitation se décomposent en charges fixes annuelles et en dépenses pour des tâches de maintenance réactive ou préventive. Les charges fixes annuelles n'incluent que les dépenses pour la surveillance d'état.

La différence entre les pertes de production résultant de la défaillance de l'équipement et celles dues à l'arrêt pour maintenance préventive est l'élément clé de l'analyse.

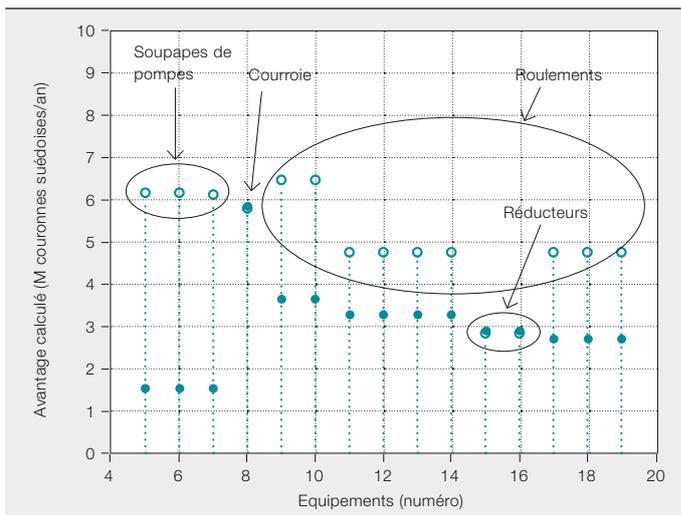
Une action proactive ou préventive est engagée sur la base des besoins prévisionnels de maintenance, sa définition excluant l'étape du diagnostic. Si elle est parfaitement préparée et anticipée, l'arrêt de production doit être beaucoup plus court que pour une action réactive. De même, tout matériel nécessaire peut être commandé avant que ne survienne la défaillance et être ainsi disponible au moment opportun.

Le coût moyen d'une action de maintenance au cours d'une période donnée est la somme des différentes dépenses de maintenance, chacune pondérée par la fréquence de l'intervention. La fré-

3 Coût global d'un actif renouvelé après un certain nombre d'années ou après défaillance



4 Avantage d'une maintenance à échéance fixe (cercles pleins) ou d'une surveillance d'état (cercles vides), calculé pour des équipements d'indice de criticité 4 ou 5



La méthode CRIM détermine les dépenses de maintenance moyennes minimales sur le long terme par unité de temps, calculées pour trois stratégies de maintenance : réactive, à échéance fixe et conditionnelle.

quence et le nombre total d'actions dépendent de la stratégie de maintenance sélectionnée. Cette fréquence est évaluée par des modèles de durée de vie qui intègrent les différentes conditions d'exploitation des actifs concernés : température, saleté, niveau de charge, etc. Celles-ci sont déterminées au cours de l'analyse des équipements critiques (cf. *supra*).

Étape suivante : utiliser les modèles de durée de vie et de coûts pour élaborer le modèle de coût global de chacune des stratégies de maintenance. Dans un exemple concret de maintenance à échéance fixe, où l'équipement fut changé après avoir atteint l'âge de remplacement préventif ou au moment de sa défaillance (à la première de ces deux conditions), l'intervalle de remplacement optimal fut estimé à 2,8 années pour un coût global annuel de 310 000 dollars → 3.

L'analyse de coût global peut également servir à optimiser les stocks de pièces de rechange en calculant le coût global de différents emplacements de stockage.

Les effets de tout changement de variables d'entrée sur les résultats sont examinés par une analyse de sensibilité et d'incertitude. Un changement dans une plage donnée peut montrer l'impact des facteurs majeurs et des arbitrages sur le coût.

Cas de figure

Une analyse de criticité de 2 jours au sein d'un site client pilote fut menée sur 698 équipements de 2 lignes de procédé.

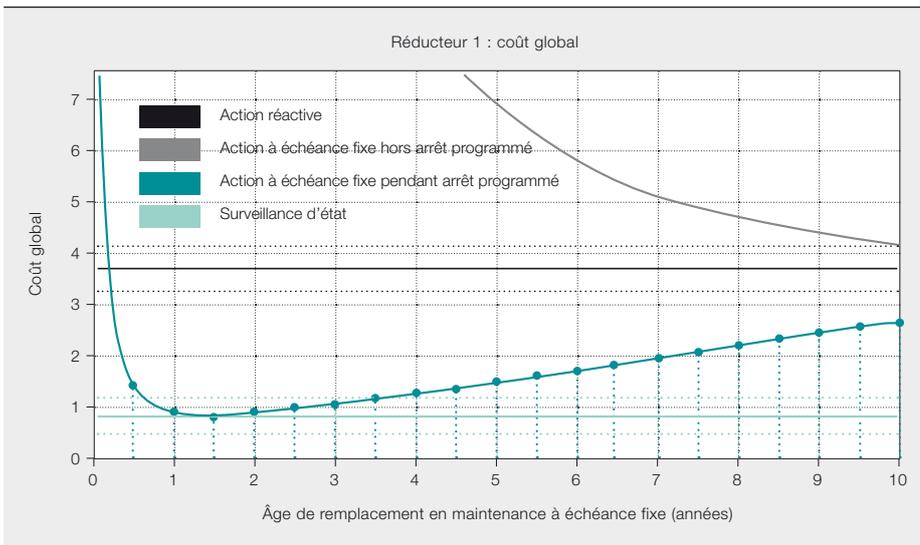
La phase de préparation et de saisie des données se déroula sur une matinée, les 100 premiers équipements furent analysés durant le reste de la journée, puis 50 à 100 équipements par heure le lendemain. L'analyse de criticité alimente l'analyse de coût global et l'outil CRIM calcule le coût global des composants critiques identifiés → 4.

Tous les coûts globaux calculés pour un actif (réducteur, par exemple) figurent en → 5. Les pointillés indiquent les incertitudes des différentes analyses de coût global. Dans ce cas précis, la maintenance à échéance fixe présente un intervalle économique optimal par rapport aux stratégies correspondantes de maintenance conditionnelle. On voit également qu'une action de maintenance à échéance fixe qui n'est pas réalisée au cours des arrêts programmés n'a pas de coût minimal et revient plus cher qu'une maintenance réactive. Une analyse de sensibilité est généralement réalisée pour calculer l'impact d'un petit changement positif ou négatif de chaque variable sur les résultats du coût global.

La liste de pièces de rechange générée par l'outil d'analyse de criticité sert à optimiser encore plus leur emplacement en utilisant l'analyse de coût global.

Une comparaison du coût global calculé d'une série d'actifs avec deux hypothèses différentes pour l'emplacement des pièces de rechange (délais d'approvisionnement supérieurs à un jour comparés à une heure) montre que, dans

5 Coût global de l'exemple « réducteur 1 » en fonction de l'âge de remplacement, compte tenu de 10 % d'incertitude (pointillés) dans les variables du modèle de durée de vie



6 Impact de la baisse de l'indice de criticité sur le coût global suite au changement d'emplacement des pièces de rechange

Type d'équipements	Indice de criticité	Évolution du coût global (k\$/an)	Coût des pièces de rechange (k\$)
Interrupteurs	5 → 2	350	31
Soupapes de pompes	5 → 3	512	15
Ventilateurs de refroidissement	3 → 1	113	3
Capteurs	3 → 1	77	3

certain cas, le coût global peut être considérablement réduit en rapprochant tout simplement les pièces de rechange de l'équipement ou en améliorant leur disponibilité.

De plus, ce changement d'emplacement peut avoir un impact direct sur l'indice de criticité calculé par CRIM ; dans le tableau → 6, l'indice concernant des interrupteurs est passé de la valeur maximale (5) à la valeur non critique (2).

Le tableau montre l'effet de la baisse de l'indice de criticité sur le coût global. Le coût correspondant de la pièce de rechange utilisé dans le calcul ne représente plus qu'une infime partie du coût global.

Solution CRIM

La solution CRIM aide l'industriel à panacher de manière optimale ses stratégies de maintenance prédictive, préventive et non-interventionniste pour les milliers d'équipements de l'usine. Dans notre exemple du site pilote, la mise en place d'une stratégie appropriée de maintenance conditionnelle et l'utilisation de moyens adéquats de surveillance d'état des soupapes de pompes et des roule-

ments identifiés comme critiques ont permis de réduire le coût global de 620 000 dollars par an.

Une des conclusions majeures de l'étude pilote est qu'il serait opportun d'effectuer une analyse CRIM dès le stade de conception d'un site ou lors des essais de réception. De même, la participation d'experts pluridisciplinaires est essentielle.

Ce sont peut-être les propos du client lui-même qui constituent l'argument le plus fort en faveur de l'analyse CRIM : « *Avons-nous le choix de ne pas passer toute l'usine au crible de l'analyse CRIM ?* »

Kari Saarinen

Shiva Sander Tavallaey

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

kari.saarinen@se.abb.com

shiva.sander-tavallaey@se.abb.com

Patrik M. Westerlund

ABB AB, Process Automation, Mining

Umeå (Suède)

patrik.m.westerlund@se.abb.com

Bibliographie

- [1] Kawauchi, Y., Rausand, M., « *Life cycle cost analysis in oil and chemical process industries* », [en ligne], disponible sur : <http://www.ntnu.no/ross/reports/lcc.pdf>, 1999.

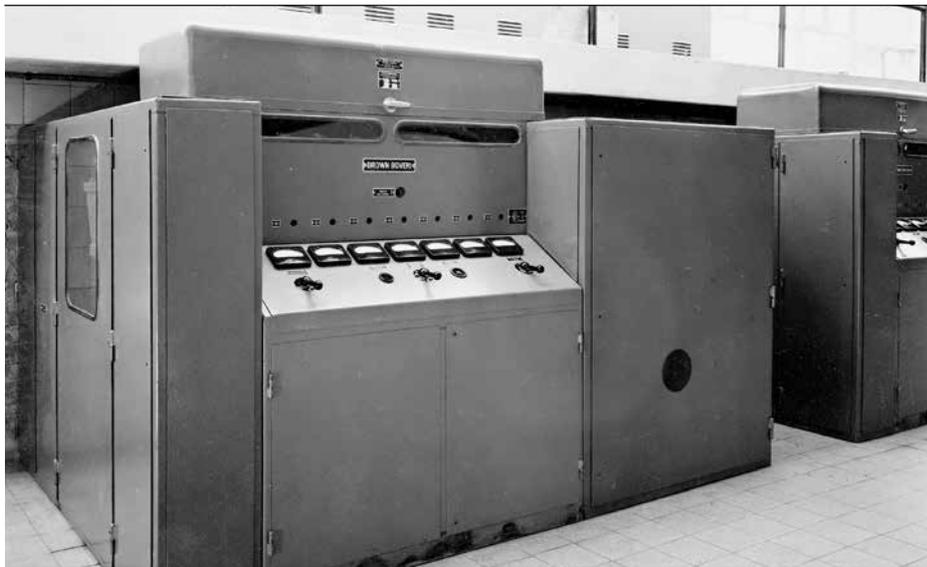


Cent ans de plénitude

Des valves à vapeur de mercure au disjoncteur hybride

ANDREAS MOGLESTUE – Depuis plus d'un siècle, l'électronique de puissance est indissociable de l'innovation ABB et de ses sociétés d'origine. Née avec l'invention des valves à vapeur de mercure, elle s'invite aujourd'hui partout, des imposantes installations en courant continu à haute tension (CCHT), qui transportent des gigawatts sur des milliers de kilomètres, aux appareils électroménagers du quotidien. En fait, elle est présente chaque fois qu'il faut maîtriser et convertir l'énergie électrique, en modifier

la fréquence ou le niveau de tension, par exemple, sans passer par des composants électromécaniques, qui sont sujets à l'usure et demandent un entretien soigneux. Aux redresseurs à vapeur de mercure des premiers convertisseurs succédèrent, dans les années 1950 et 1960, les composants à semi-conducteurs de puissance. La *Revue ABB* retrace ici un siècle de découvertes, d'inventions et d'applications, au cours duquel ABB a fait œuvre de pionnier et d'innovateur.



La fée électricité voit le jour sur fond de « bataille des courants » entre les partisans du continu, avec Thomas Edison, et les défenseurs de l'alternatif prôné par Tesla ; ce dernier en sorti vainqueur. Si le courant alternatif (CA) se prête à de nombreuses applications, le courant continu (CC) reste indispensable et réclame forcément une conversion CA-CC. En témoignent l'électrolyse de l'aluminium, la charge de batteries, les transmissions sans fil et l'électrification des tramways, des métros et de certains chemins de fer, etc. Ces domaines constituent toujours une part importante de l'activité d'ABB. Et la liste n'en finit pas de s'allonger avec des applications plus récentes comme les centres de données informatiques (*datacenters*) et le transport électrique CCHT.

Dès l'ébauche des premiers systèmes électriques, les inventeurs s'attaquèrent à deux grands défis : convertir le courant alternatif en courant continu (principe du redresseur) et vice versa (onduleur), faire varier une sortie à partir d'une grandeur d'entrée fixe (variation électronique de vitesse, par exemple). Encore aujourd'hui, la plupart des usages de l'électronique de puissance relève de l'une de ces deux fonctions.

Le « moteur-générateur » (moteur et générateur accouplés sur un arbre mécanique commun) est un précurseur de la conversion CA-CC. Le principe pouvait tout aussi bien s'inverser pour transformer du continu en alternatif (CC-CA) ou convertir deux fréquences alternatives, comme ce fut souvent le cas en traction électrique pour passer du 50 Hz au 16,7 Hz du réseau ferroviaire de plusieurs pays européens (soit le tiers de la fréquence industrielle). Le tandem moteur-générateur pouvait même étendre son emploi à des applications de commande variable. Deux exemples : le groupe Ward-Léonard, qui utilise l'excitation de sa génératrice à courant continu pour faire varier sa tension de sortie, autorisant un réglage souple et robuste de la vitesse des moteurs de laminoirs et d'ascenseurs dans les mines ou les grands édifices, par exemple ; la machine Scherbius, qui permet le raccordement de réseaux CA non rigoureusement synchronisés avec un léger glissement de phase.

Les moteurs-générateurs ont l'avantage d'être insensibles aux défauts réseau ; les courtes interruptions d'alimentation sont en effet compensées par l'énergie cinétique de la masse en rotation. Notons que cette fonction de stockage tampon de l'énergie se retrouve aujourd'hui dans

les condensateurs du bus CC de nos convertisseurs électroniques de puissance.

Les convertisseurs mécaniques ont pourtant deux inconvénients : la maintenance des pièces en mouvement (lubrifi-

Les convertisseurs à contacts demandaient beaucoup d'entretien, alors que l'électronique de puissance promettait les mêmes résultats mais sans travail mécanique.

cation et changement des balais) et les fortes sollicitations mécaniques imposées au montage et aux fixations.

Commutation

Si les moteurs-générateurs assurent une isolation galvanique complète de l'entrée et de la sortie, l'électronique de puissance effectue la conversion en modifiant le parcours du courant à des moments précis de la commutation. Sous sa forme la plus simple, c'est le principe que l'on observe dans le moteur CC où un collecteur inverse le sens du courant circulant dans l'enroulement rotorique, en fonction de sa position, l'action étant déclenchée par un signal

Photo p. 70

Diode pour applications de traction (années 1980)

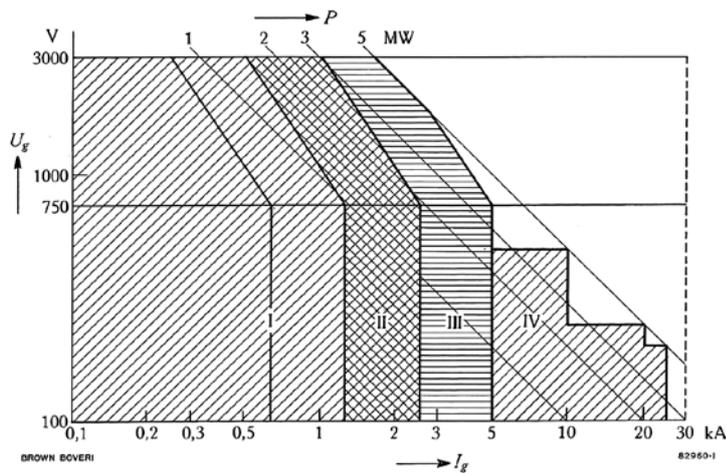
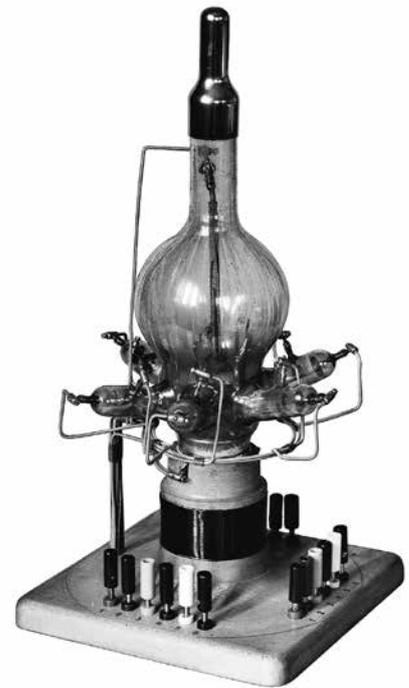


Fig. 10 — Graphical representation of load capacity of new Brown Boveri mutator range

U_g = D. C. voltage
 I_g = Direct current
 P = Output
 I = Air-cooled, pumpless multi-anode mutators
 II = Air-cooled, pumped multi-anode mutators
 III = Water-cooled single-anode mutators
 IV = Contact converters

D'après T. Wasserrab, Mutator Meeting at Baden in 1955, conférence inaugurale (actes publiés par BBC)



En 1954, ASEA construit la première liaison CCHT commerciale au monde pour relier l'île suédoise de Gotland au continent.

externe. Autre exemple, le convertisseur à contacts mécaniques rapides à commande externe → 1 (en fait, un pont en H constitué d'interrupteurs mécaniques au lieu de valves). Son point faible ? Une sortie CA dont la forme d'onde est rectangulaire et non sinusoïdale comme celle des groupes moteurs-générateurs. Un problème partagé par bien des circuits d'électronique de puissance et assorti de contraintes de maintenance, dont la résolution (cf. *infra*) sera l'un des grands desseins de l'électronique de puissance moderne : parvenir aux mêmes résultats mais sans travail mécanique.

Malgré leurs défauts manifestes, les convertisseurs à contacts commutaient des courants bien supérieurs à ceux des valves à vapeur de mercure → 2 ; leur

production se poursuit jusqu'à l'avènement des convertisseurs statiques.

Premières « soupapes électriques »

À l'aube du XIX^e siècle, Sir Humphry Davy, chimiste et inventeur réputé, démontre que l'on peut établir un arc électrique en faisant circuler un courant entre deux tiges mises en contact, puis écartées ; la rupture du circuit entraîne la formation d'un gaz ionisé ou « plasma » conducteur de courant dans l'espace entre électrodes. La recombinaison des particules ionisées du plasma provoque l'émission de lumière tandis que la chaleur dégagée crée de nouveaux ions (excitation) et entretient l'arc. Notons que les principes de physique sur lesquels se fondent aujourd'hui les interrupteurs à semi-conducteurs mettent toujours en jeu les phénomènes d'excitation, de déplacement d'électrons et de recombinaison de porteurs de charges.

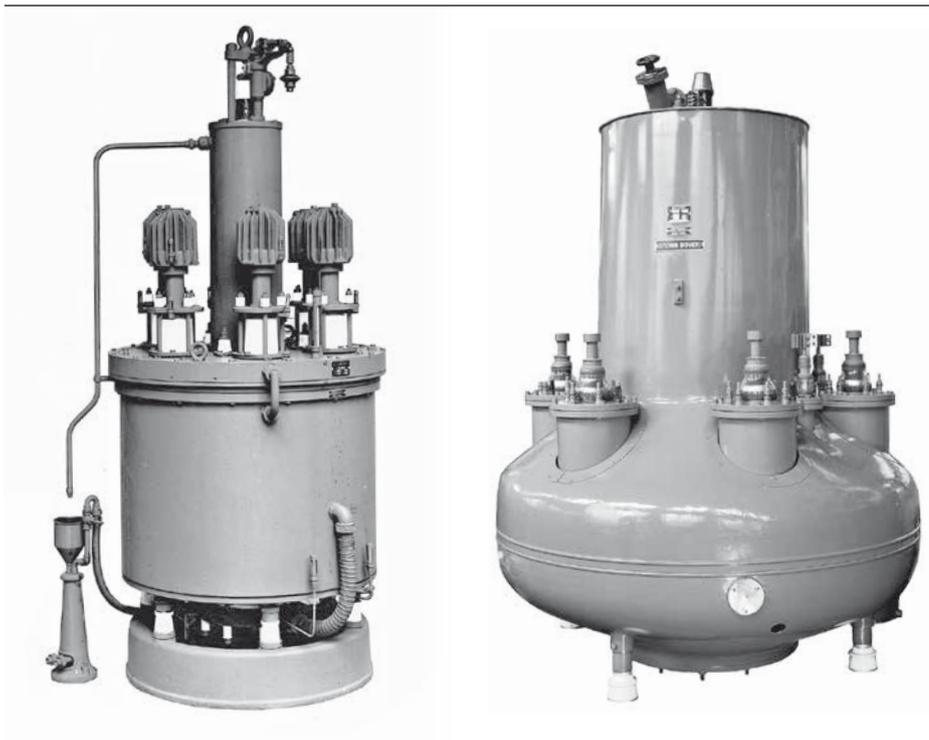
En 1902, l'inventeur américain Peter Cooper Hewitt réalise un montage de deux électrodes, l'une de mercure (cathode), l'autre de fer ou, ultérieurement, de graphite (anode), confinées dans une ampoule de verre vide d'air renfermant du mercure. Il constate que le flux d'électrons est à sens unique, du fer au mercure (anode-cathode). Si la cuvette de mercure est rapidement

émettrice d'électrons dès que s'amorce l'arc, ce n'est pas le cas de l'anode réceptrice qui n'émet pas de particules (dans la plage de température de service), si ce n'est des électrons secondaires, trop lents pour remonter jusqu'à la cathode. La vapeur de mercure est ionisée par l'arc et le bombardement d'ions de mercure sur la cathode produit assez de chaleur pour entretenir l'émission d'électrons. La valve à vapeur de mercure était née, portant en elle les germes de l'électronique de puissance.

Les années suivantes virent de nombreux inventeurs et entreprises à vouloir améliorer et commercialiser cet effet redresseur.

Fabrication des redresseurs à vapeur de mercure

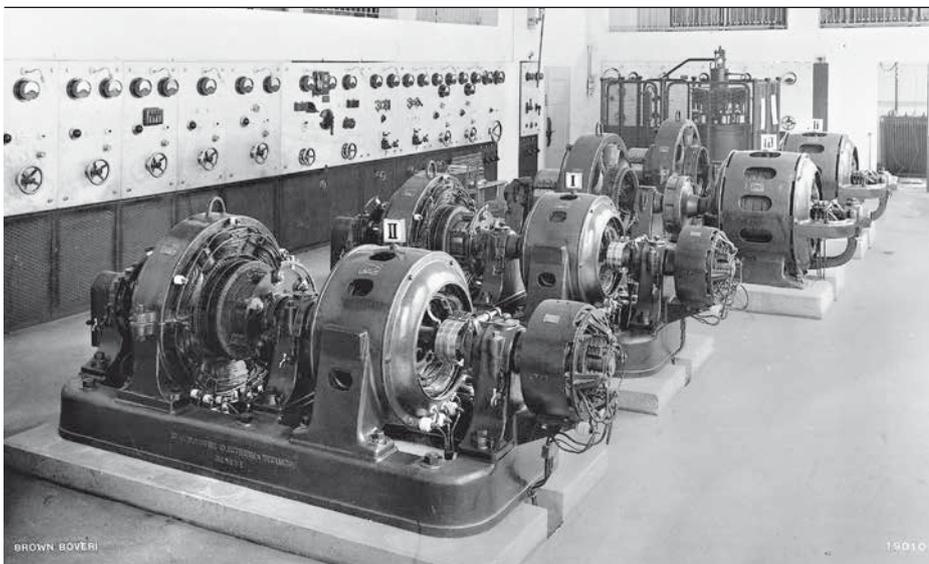
En 1908, l'ingénieur hongrois Béla B. Schäfer entreprend des recherches sur les valves à vapeur de mercure pour le compte d'un spécialiste de l'instrumentation scientifique de Francfort, Hartmann & Braun (H&B). Un an plus tard, il brevète une solution pour introduire les fils métalliques dans le verre sans détériorer l'isolation ni l'étanchéité à l'air ; c'est là le premier d'une longue série de brevets. En 1911, H&B est la première entreprise allemande à livrer un redresseur, notamment à une fonderie de Francfort. Peu



4a Redresseur HG 5/6 de 1923 (420 A, 650 kW, 1550 V, 1700 kg) ayant servi à l'électrification de Zweilütschinen (Suisse) → 5.

4b Imposant redresseur des années 1950 (2500 A, 2000 kW, 1235 kg, > 3 m de haut)

5 Électrification du chemin de fer de l'Oberland bernois [2]



On doit à BBC l'électrification en 1550 V continu du chemin de fer de l'Oberland (canton suisse de Berne), en 1913. Le redressement était alors assuré par des moteurs-générateurs alimentés en CC par batterie. En 1920, BBC monte un redresseur à vapeur de mercure en parallèle avec le groupe moteur-générateur pour tester sa solution. Ce démonstrateur fait sensation par son efficacité et sa fiabilité, et reste à demeure durant plus de deux ans. Il est remplacé par une installation permanente en 1923.

Notre photographie de 1924 montre la station de conversion avec, au premier plan, deux moteurs-générateurs principaux de 220 kW précédés des deux génératrices auxiliaires de 48 kW à excitation commandable et, en arrière-plan, un seul redresseur à vapeur de mercure de 650 kW, bien moins volumineux.

[2] Source: « Redresseurs à vapeur de mercure de la sous-station de Zweilütschinen, Chemins de fer de l'Oberland bernois », *BROWN BOVERI Review*, p. 214, octobre 1925.

Si l'histoire de la physique des semi-conducteurs remonte à 1833, quand Michael Faraday remarque le pouvoir conducteur du sulfure d'argent, la parfaite compréhension du phénomène ne date que du début des années 1930.

versé dans le domaine des courants forts industriels, H&B crée en 1913 une co-entreprise avec le Suisse Brown, Boveri & Cie (BBC), la société GELAG (*Gleichrichter AG*) qui s'établit à Glarus, en Suisse. GELAG se concentre sur la recherche-développement tandis que BBC fabrique les valves à Baden (Suisse) mais aussi à Mannheim (Allemagne), à partir de 1916. En 1921, la production allemande investit le site plus spacieux de Lampertheim, puis accueille la même année une acquisition de BBC, la société berlinoise Gleichrichter GmbH, fondée en 1919.

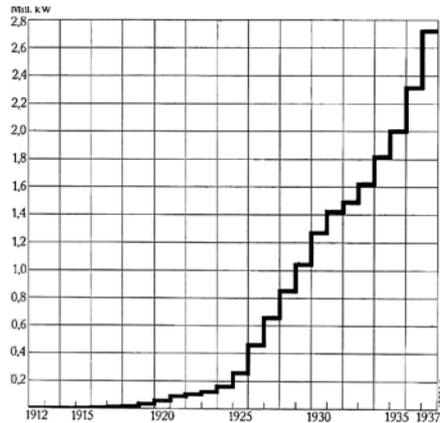
Dans les années 1920, BBC reprend les parts de H&B dans GELAG, dont il absorbe les activités et qu'il dissout en 1939. En 1995, H&B est acquise par Elsig Bailey, laquelle passe sous le giron d'ABB en 1999.

Schäfer quitte GELAG en 1921 pour ouvrir un cabinet de conseil. En 1927, il vend la conception de ses valves au groupe de génie électrique suédois ASEA (*Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget*), qui les produit dès lors à Ludvika. Ce sont donc trois entreprises à l'origine d'ABB qui ont hérité de l'ingéniosité experte de l'inventeur hongrois.

Conception et mise en œuvre

La faible conductivité thermique du verre fait que les niveaux de puissance d'une valve, toujours plus élevés, sont limités

6 Progression exponentielle de la production de mutateurs BBC



par la surface de la lampe → 3. Les concepteurs optent alors pour des cuves métalliques à électrodes isolées → 4. Le marché des redresseurs à vapeur de mercure est en pleine ascension → 5; la production de BBC suit → 6 et hisse l'entreprise au rang de chef de file de la technologie.

Arrêtons-nous sur le circuit d'un redresseur → 7: il s'apparente à un pont en H dans lequel une enceinte abritant six anodes remplit la fonction de six diodes à semi-conducteurs.

Cette valve était capable de fonctionner tant que la température de service restait dans les limites fixées et que l'on empêchait l'extinction complète de l'arc, mais en l'absence de plasma, elle ne pouvait démarrer sans aide. Il lui fallait une électrode auxiliaire à laquelle on appliquait une impulsion à haute tension pour amorcer l'arc. La capacité à déclencher la conduction arbitrairement, en tout point de la forme d'onde, présentait l'intérêt évident de pouvoir commuter de manière sélective; un avantage sur les valves décrites jusqu'ici, qui étaient toutes des diodes. Le développement de ces valves commutables, autorisant des commandes amorcées par phase (à l'image des thyristors actuels), débute en 1930. Une fois déclenchée par une impulsion positive sur l'électrode de commande, la conduction dure jusqu'au prochain passage par zéro du courant. En connectant plusieurs valves suivant un schéma en H, on obtient un convertisseur à commutation par le réseau. En

1934, BBC forge le terme de « mutateur » qu'il préfère à « redresseur » pour désigner ces nouvelles applications.

Les fonctions de redresseur et de convertisseur étant désormais réalisables, BBC profite de l'Exposition Nationale Suisse de 1939, à Zurich, pour présenter en démonstration publique la première ligne de transport CCHT. Cette liaison temporaire de 500 kW 50 kV, terminée à chaque extrémité par une station de conversion, relie la ville de Wetztingen au stand BBC → 8, à l'aide d'un câble unipolaire de 25 km, le retour se faisant par la terre. C'est le précurseur de la technologie CCHT.

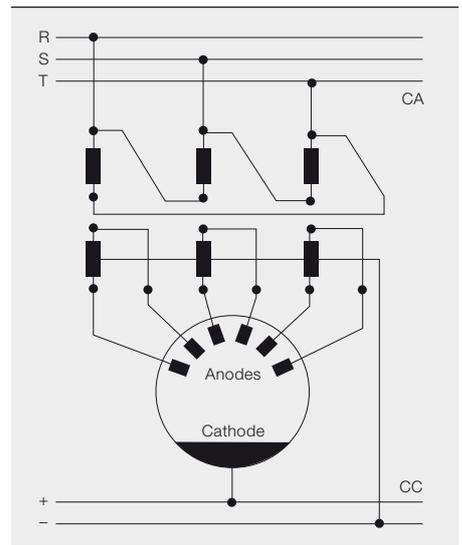
Il faudra néanmoins patienter quinze ans pour voir ASEA réaliser la première liaison CCHT permanente, entre l'île de Gotland et la côte suédoise → 9.

La fabrication des redresseurs à vapeur de mercure se poursuit jusqu'au milieu des années 1960, laissant place à une autre « révolution » électronique: les semi-conducteurs. Ces derniers ont pour avantages une plus grande vitesse et densité de puissance, une moindre masse et de faibles pertes, sans la toxicité du mercure.

Matériaux et composants semi-conducteurs

Les éléments du tableau périodique ou *table de Mendeleïev* sont généralement classés en métaux et non-métaux. À l'état pur, les métaux sont conducteurs d'électricité, quand les non-métaux sont

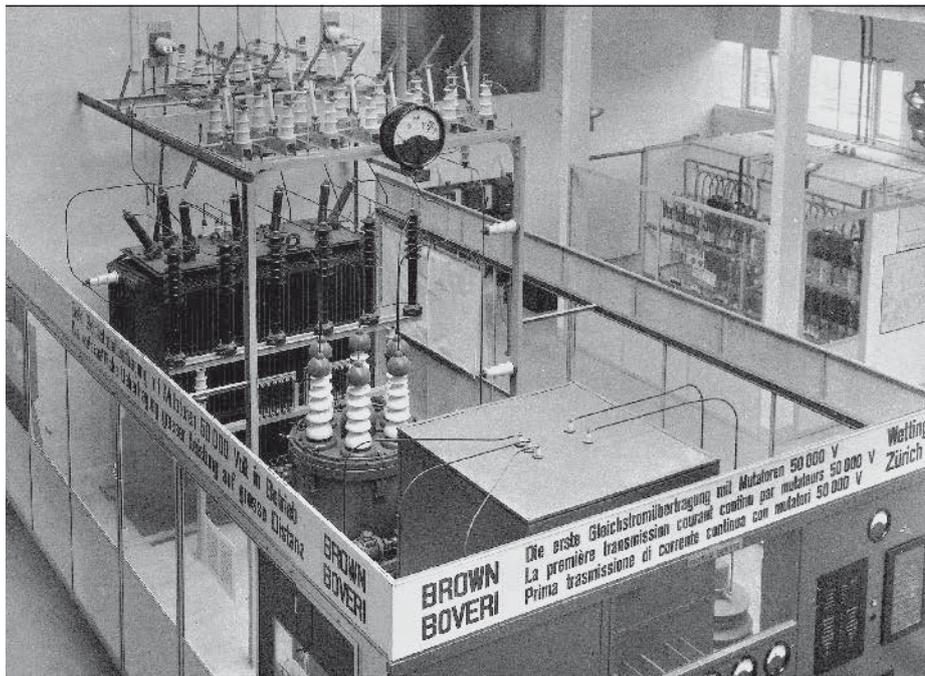
7 Principe du redressement CA triphasé



pour la plupart isolants. Un groupe de non-métaux présente néanmoins une conductivité intermédiaire: ce sont les « semi-conducteurs », au premier rang desquels figurent des éléments simples comme le germanium et le silicium, et des composés tels l'arséniure de gallium et le carbure de silicium.

Si l'histoire de la physique des semi-conducteurs commence en 1833 avec le savant anglais Michael Faraday, qui observe que le pouvoir conducteur d'un corps (en l'occurrence, du sulfate d'argent) varie avec sa température, il faut attendre le début des années 1930 pour comprendre et expliquer le phénomène à l'aide de la théorie des bandes d'énergie.

On augmente la conductivité des matériaux semi-conducteurs en implantant des atomes correctement sélectionnés ou « impurétés » dans le réseau cristallin. Si ces atomes ont plus d'électrons sur leur couche périphérique, appelée « bande de valence », que dans le matériau de base (semi-conducteur « intrinsèque »), les électrons libres migrent dans le cristal, augmentent sa densité en charges négatives et accroissent sa conductivité: c'est le « dopage de type N ». À l'inverse, quand les atomes diffusés ont moins d'électrons de valence, le dopage augmente le nombre de trous (type P) dans le semi-conducteur intrinsèque. Ces places vacantes sont alors comblées par les électrons arrachés des atomes voisins, déplaçant les trous qui se comportent comme des porteurs positifs et augmentent aussi la conductivité du matériau.



Prenons par exemple le plus simple élément de la famille des semi-conducteurs, la diode. La mise en contact d'un semi-conducteur dopé P et d'un semi-conducteur dopé N au sein d'un même cristal forme une « jonction P-N » dans laquelle le courant circule de la zone P à la zone N : si l'on applique une tension positive dans la région P, les porteurs positifs (trous) sont repoussés et les porteurs négatifs du côté N attirés ; arrivés à la jonction, les porteurs se recombinaient, chaque électron tombant dans un trou. Invertissons la tension : les porteurs des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant le passage du courant ; la conduction cesse.

Pour créer des valves commutables, il fallait une méthode de déclenchement externe de la conduction. Inventé par les laboratoires Bell en 1947, le transistor bipolaire utilise un champ électrique pour contrôler les charges négatives et positives dans un monocristal de germanium ; autrement dit, le passage du courant est tributaire d'une tension de commande. Cette découverte de l'« effet transistor » et ses prolongements retentissants sur les sciences et les techniques ont bouleversé l'univers des télécoms et de l'informatique. Elle s'est accompagnée d'une révolution sans doute plus discrète mais tout aussi remarquable : la possibilité de transformer, de convertir et de maîtriser l'électricité comme on pouvait difficilement l'imaginer quelques décennies

auparavant. Que seraient aujourd'hui l'informatique en nuage, les réseaux sociaux, les microprocesseurs, les data-centers ou services en ligne, par exemple, sans circuits électroniques de puissance pour alimenter, commuter, recharger, commander, etc. ? Et que dire de l'essor des énergies renouvelables et leurs promesses de réduction de la pollution, sans convertisseurs de puissance capables de fiabiliser au meilleur coût leur raccordement aux grands réseaux électriques ?

Il aura fallu des décennies de progrès pour concrétiser ces ambitions. Vers 1954, BBC et ASEA ouvrent la marche ; les premières diodes redresseuses 100 V/100 A de BBC sont commercialisées en 1956. Le matériau de prédilection de l'époque, le germanium¹, est pourtant jugé inadapté aux applications de puissance du fait de ses contraintes en termes de tension de blocage et de température. Il est vite supplanté par le silicium.

Thyristor

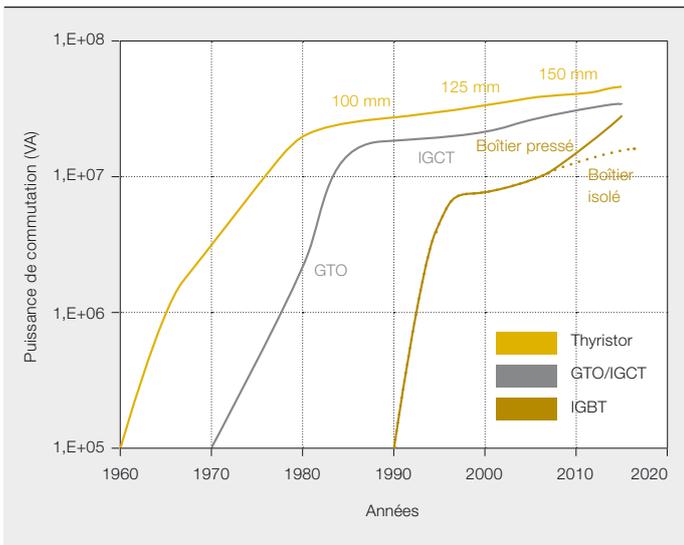
L'utilisation du transistor dans les amplificateurs analogiques des transmissions radio et télécoms, par exemple, est monnaie courante. Mais l'électronique de puissance a d'autres exigences : dans l'idéal, un interrupteur doit commuter à l'état passant ou à l'état bloqué, le plus

Note

1 D'autres fabricants lui préféraient le sélénium.

1913	BBC commence la production de redresseurs à vapeur de mercure, à Baden (Suisse).
1915	BBC équipe le tramway zurichois (Limmattal Strassenbahn) de redresseurs stationnaires.
1921	Lancement de la production BBC à Lampertheim (Allemagne)
1924	Publication de la théorie de la commutation par deux ingénieurs BBC, W. Dällenbach et E. Gerecke
1928	ASEA commence la production de redresseurs à vapeur de mercure, à Ludvika (Suède).
1938	BBC équipe une locomotive d'un redresseur, dans le cadre de l'électrification expérimentale allemande en 50 Hz, à Mannheim.
1939	BBC fait la démonstration du transport CC 50 kV entre Wettingen et Zurich → 8
1954	Première diode au germanium BBC
1954	Première liaison CCHT, entre l'île baltique de Gotland et la côte suédoise (ASEA)
1960	Premier thyristor BBC
1961	Liaison CCHT transmanche entre la Grande-Bretagne et la France (ASEA)
1964	Première locomotive BBC embarquant un redresseur à diodes au silicium pour le chemin de fer suisse du Lötschberg
1967	Première locomotive ASEA embarquant un redresseur à thyristors pour les chemins de fer suédois
1970	Liaison CCHT <i>Pacific Intertie</i> entre Celilo (Oregon) et Sylmar (Californie du sud), dernier grand projet mettant en œuvre des valves à vapeur de mercure
1971	BBC commence la fabrication de semi-conducteurs à Lampertheim.
1973	Inauguration d'un centre de recherche BBC à Dättwil (Suisse)
1979	Liaison CCHT entre Cabora Bassa (Mozambique) et Johannesburg (Afrique du sud) dans le cadre d'un partenariat BBC-AEG-Siemens
1981	BBC commence la fabrication de semi-conducteurs à Lenzbourg (Suisse).
1984	Liaison CCHT Itaipu-São Paulo, au Brésil (ASEA)
1987	Premières locomotives BBC à convertisseurs GTO pour les entreprises ferroviaires suisses BT et SZU
1988	Fusion BBC-ASEA et création d'ABB
1993	Début du développement des transistors BIMOS
1996	Lancement de la production d'IGCT
1998	Ouverture d'une usine BiMOS à Lenzbourg
2004	Liaison CCHT des Trois-Gorges (Chine)
2010	Acquisition du Tchèque Polovodice
2010	Nouvelle usine de semi-conducteurs à Lenzbourg
2012	Lancement de la plate-forme BIGT
2012	Annnonce du disjoncteur hybride ABB
2013	Lancement de la construction d'un nouveau site de recherche sur les semi-conducteurs à Dättwil
2013	ABB fête 100 ans d'électronique de puissance.

10 Évolution de la puissance de commutation des trois principaux semi-conducteurs de puissance



11 Le site suisse de Lenzbourg, fief de la fabrication de semi-conducteurs ABB ; à droite, la nouvelle usine dédiée aux BiMOS

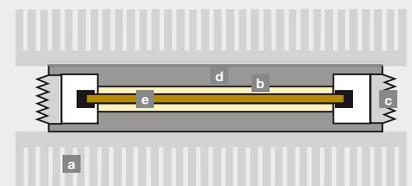


12 Salle blanche ABB à Lenzbourg



13 Vue en coupe d'un boîtier pressé

Dans ce type de boîtier, le courant de charge pénètre par une surface **d** et est évacué par le côté opposé. Les faibles résistances électrique et thermique des contacts sont garanties par la forte pression mécanique exercée sur les deux surfaces.



- | | |
|--------------------------------|--------------------------|
| a Radiateur | d Cuivre |
| b Compensation CDT (Mo) | e Semi-conducteur |
| c Boîtier (céramique) | |

vite possible. On sait en effet que les pertes dans le dispositif et, par conséquent, la chaleur dissipée, sont le produit du courant et de la tension, ce qui oblige à rapprocher l'une ou l'autre de ces grandeurs de zéro, à la fois pour améliorer l'efficacité énergétique et empêcher la dégradation thermique du composant.

L'un des premiers semi-conducteurs de puissance commutables est le thyristor, dont on doit le principe à William Shockley, en 1950. C'est fondamentalement l'équivalent d'une diode PN (cf. *supra*) dans laquelle on a intercalé deux autres couches semi-conductrices qui empêchent en temps normal la conduction. Pourtant, l'injection de courant dans une troisième électrode appelée « gâchette » inonde cette zone de porteurs de charges, autorisant le flux d'électrons dans le

sens direct si l'on applique une tension entre l'anode et la cathode. Une fois déclenché, cet effet d'avalanche s'auto-entretient et le courant d'amorçage peut être supprimé. Le thyristor reste conducteur tant que le courant ne descend pas en-dessous d'une valeur critique. Il peut alors servir à la conversion commutée par le réseau mais pas à l'auto-commutation, sauf à utiliser des composants externes pour forcer artificiellement le passage à zéro de la tension.

De 1960 à 1980, la tension de blocage et la puissance maximales par composant grimpent presque linéairement : de quasi nulles avant 1960, elles atteignent 6000 V/600 kW vingt ans après → 10.

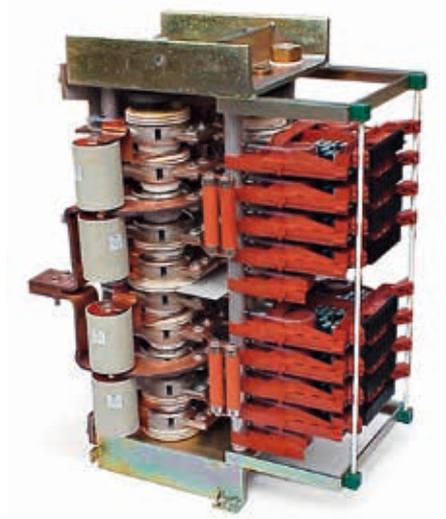
Thyristors GTO

La production des GTO (*Gate Turn-Off thyristors*) débute au milieu des années 1980. Le GTO est un thyristor commandable également à l'extinction, par un signal de gâchette de polarité inverse à celle nécessaire à l'amorçage. Ce composant blocable sans passage artificiel par le zéro de courant élargit le champ d'application des semi-conducteurs de puissance en permettant de réaliser, par exemple, des convertisseurs continu-continu et des onduleurs auto-commutés. En outre, ses multiples cycles de commutation au cours d'une demi-alternance atténuent la forme d'onde rectangulaire de la sortie CA. La largeur des impulsions de courant varie pour moduler l'onde et obtenir la forme souhaitée, réduisant les harmoniques.

14 GTO de différents diamètres

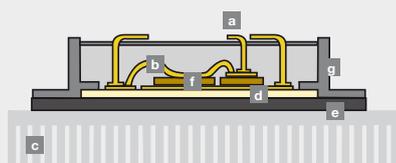


15 Empilement de GTO avec leurs commandes de gâchette et unités de refroidissement



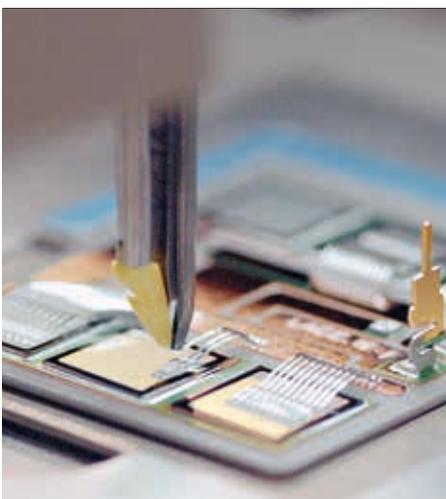
16 Vue en coupe d'un boîtier isolé

Dans ce type de boîtier, le semi-conducteur **f** est isolé galvaniquement du radiateur **c**. Les contacts électriques dans le module sont réalisés par fils de métallisation.



- | | |
|---|--------------------------------------|
| a Bornes de puissance et de commande | d Céramique (en général, AlN) |
| b Fil de métallisation | e Semelle (en général, AISiC) |
| c Radiateur | f Semi-conducteur |
| | g Boîtier |

17 Soudage de contacts sur IGBT



Production

Les premiers semi-conducteurs BBC sont fabriqués à Ennetbaden (Suisse). À la fin des années 1960, l'industriel bâtit une usine ultramoderne à Lampertheim (Allemagne) pour y regrouper toute sa fabrication. Une petite partie de la production d'Ennetbaden, mais aussi le développement et la présérie sont transférés sur le site de Birr pour s'installer en 1981 dans la nouvelle usine de Lenzbourg, toujours en Suisse.

En 1988, la fusion d'ASEA et de BBC en « ABB » entraîne la vente de Lampertheim à l'Américain IXYS, la fermeture de l'usine suédoise d'ASEA à Västerås et le regroupement de toute la production à Lenzbourg. ASEA est alors le champion des thyristors et des composants redresseurs taillés en biseau négatif, et BBC

des diodes, GTO et thyristors. Des gammes de produits qui, outre quelques chevauchements, étaient à l'époque largement complémentaires.

Pour autant, la fabrication des semi-conducteurs n'est pas reconnue comme une activité à part entière d'ABB, mais davantage comme une entité de soutien aux autres lignes de produits comme les variateurs de vitesse ou le CCHT. Développement des produits et investissements sont alors pour beaucoup tributaires des besoins des autres pôles de compétence ABB. La situation change du tout au tout avec le charismatique Anders Nilarp. À la tête d'ABB Semiconductors, il en fait une activité autonome qui concurrence directement les autres acteurs du marché. Il entame également un véritable changement de

culture à Lenzbourg, motivant et responsabilisant sans relâche le personnel. Ces efforts portent leurs fruits : finaliste du *European Quality Award* en 1995, le site est sacré l'année suivante « Fournisseur de l'année » par General Electric.

Transistors IGBT

La plus grande réussite de Nilarp est sans nul doute l'usine de composants BiMOS, inaugurée à Lenzbourg en 1998 pour fabriquer tout spécialement des transistors bipolaires à grille isolée (*Insulated-Gate Bipolar Transistors*). Leur avènement accentue la complexité de la fabrication des semi-conducteurs de puissance mais représente aussi un nouveau palier technique de performance et de capacité. Un IGBT est, commandé en tension et non en courant. Cette caractéristique diminue les exigences de puis-



sance et d'espace de la commande de gâchette qui déclenche l'amorçage ou l'extinction, et permet de réaliser des convertisseurs plus compacts et plus légers. L'IGBT surpasse également le GTO par sa stabilité intrinsèque, qui l'affranchit des circuits de protection, et sa commutation rapide à des fréquences plus élevées.

Thyristors IGCT

Pour assurer la commutation « dure » que réclament les fortes puissances, ABB lance au milieu des années 1990 le thyristor intégré commuté par la gâchette (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*). Partant d'un GTO, ce dispositif commute beaucoup plus vite que son aîné, grâce à une commande de gâchette de faible inductance. C'est un formidable progrès à une époque où d'autres fabricants renoncent au développement du GTO, décrétant la technologie sans avenir.

En 2010, ABB consolide sa présence sur le marché avec l'acquisition du Tchèque Polovodice qui lui procure un deuxième site de production, à Prague, tandis que Lenzbourg renforce ses capacités en se dotant d'une autre usine → 11.

Conception et fabrication

La fabrication des semi-conducteurs est des plus délicates. Le substrat de silicium doit être absolument pur et l'opération de dopage (P ou N) respecter scrupuleusement les contraintes de durée et de température. C'est pourquoi la fabrication se déroule dans des « salles blanches » sous atmosphère contrôlée pour minimiser la contamination → 12.

La plupart des gros semi-conducteurs de puissance (thyristors, GTO et IGCT) se caractérise par un boîtier « flottant ». La tranche de silicium est scellée dans une coque céramique avec les contacts de cuivre → 13, 14. Ces contacts sont plaqués sur le silicium par pression externe pour assurer une conductivité électrique et thermique optimale. À cette fin, les composants sont empilés → 15, et les unités de refroidissement habituellement intercalées dans la même pile. Ils sont conçus pour court-circuiter en cas de défaillance. Un empilement de composants en série offre donc une certaine redondance pour continuer à fonctionner normalement jusqu'à la prochaine échéance de maintenance.

L'IGBT rompt avec cette pratique. Plutôt que d'être implantés sur de grandes tranches, les modules IGBT alignent une multitude de petits circuits sur lesquels sont directement soudés les fils de contact → 16–18. Cela évite d'avoir à empiler les composants et simplifie le montage du convertisseur tout en gagnant en légèreté, en compacité et en facilité de remplacement de chaque module en maintenance. Les IGBT existent également en boîtier pressé StakPak → 19 pour les applications nécessitant ce type de montage, comme le CCHT.

BIGT

Le dernier-né de la famille des IGBT est le transistor bimode à grille isolée « BIGT » (*Bimode Insulated-Gate Transistor*), qui intègre la diode en conduction inverse dans un volume très réduit (lire p. 19–23). Ce transistor va de pair avec l'une des plus grandes percées technologiques

ABB de ces dernières décennies, le disjoncteur hybride (p. 6–13).

Les semi-conducteurs trouvent ici un nouveau champ d'action qui confirme l'inexorable avancée de l'électronique de puissance, dans des domaines encore inimaginables il y a quelques années.

Ont contribué à cet article : Björn Backlund, Jürgen Bernauer, Christoph Holtmann, Norbert Lang, Munaf Rahimo, Marco Rossinelli et Adriaan Welleman. Qu'ils en soient vivement remerciés.

Andreas Moglestue

ABB Review
Zurich (Suisse)
andreas.moglestue@ch.abb.com

Lectures complémentaires

Zeller, H. R., « Puces savantes : ABB et les semi-conducteurs de puissance, une révolution silencieuse », *Revue ABB*, 3/2008, p. 72–78.
Linder, S., « Semi-conducteurs de puissance – 1^{re} partie : fondements et domaines d'application », *Revue ABB*, 4/2006, p. 34–39.
Linder, S., « Semi-conducteurs de puissance – 2^e partie : boîtiers et matériaux du futur », *Revue ABB*, 1/2007, p. 62–66.
Anwand, E., Kloss, A., « 75 Jahre BBC-Leistungselektronik », *Elektroniker*, 11/1988.
Wetzel, R., *Die Geschichte des Quecksilberdampfgleichrichters bei BBC Deutschland 1913-1963*, thèse de doctorat de l'université de Stuttgart, 2001.
Haglöf, L., Danfors, P., *HVDC Veterans Presentation*, Visby Gotland, 2004.
Schiesser, *25 Jahre Brown Boveri Mutorator*, Brown Boveri Mitteilungen 5/6, 1938.

Rédaction

Prith Banerjee

Chief Technology Officer and
Executive Vice President

Clarissa Haller

Head of Corporate Communications

Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

Eero Jaaskela

Head of Group Account Management

Andreas Moglestue

Chief Editor, *ABB Review*
andreas.moglestue@ch.abb.com

Édition

La *ABB Review* est publiée par la direction *R&D and Technology* du Groupe ABB.

ABB Technology Ltd.
ABB Review/REV
Affolternstrasse 44
CH-8050 Zurich (Suisse)

La *ABB Review* paraît quatre fois par an en anglais, français, allemand, espagnol et chinois.

Elle est diffusée gratuitement à tous ceux et celles qui s'intéressent à la technologie et à la stratégie d'ABB. Pour vous abonner, contactez votre correspondant ABB ou directement la Rédaction.

La reproduction partielle d'articles est autorisée sous réserve d'en indiquer l'origine. La reproduction d'articles complets requiert l'autorisation écrite de l'éditeur.

Édition et droits d'auteur ©2013
ABB Technology Ltd.
CH- Zurich (Suisse)

Impression

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn (Autriche)

Maquette

DAVILLA AG
Zurich (Suisse)

Traduction française

Dominique Helies
dhelies@wanadoo.fr

Avertissement

Les avis exprimés dans la présente publication n'engagent que leurs auteurs et sont donnés uniquement pour information. Le lecteur ne devra en aucun cas agir sur la base de ces écrits sans consulter un professionnel. Il est entendu que les auteurs ne fournissent aucun conseil ou point de vue technique ou professionnel sur aucun fait ni sujet spécifique, et déclinent toute responsabilité sur leur utilisation. Les entreprises du Groupe ABB n'apportent aucune caution ou garantie, ni ne prennent aucun engagement, formel ou implicite, concernant le contenu ou l'exactitude des opinions exprimées dans la présente publication.

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview



Dans le numéro 3|13

La simulation avance ses pions

La technicité et l'interaction croissantes des systèmes, équipements et composants industriels compliquent énormément les essais physiques. Même si la simulation numérique ne peut pas totalement les remplacer, nombreux sont les cas où elle fait gagner du temps et de l'argent, tout en évitant les situations périlleuses. Elle affine également la compréhension des procédés et les optimise. Bref, grâce aux progrès du calcul haute performance et de l'algorithmique, l'industrie simule toujours plus. Outil de conception et de validation, la simulation forme également les opérateurs et analyse des hypothèses.

Ce thème central du numéro 3/2013 d'*ABB Review* montrera comment ABB exploite et déploie la simulation pour améliorer la fourniture, en temps et en heure, de systèmes et solutions éprouvés à ses clients.

Une de perdue, dix de retrouvées ...

Il vous manque un numéro de la *ABB Review* ? Pour être informé de chaque parution (ou dossier spécial), abonnez-vous à la liste de diffusion sur <http://www.abb.com/abbreview>.





Réduire de 260 millions de tonnes les émissions de CO₂ par an ?

Pour la seule année 2011, les économies d'énergie réalisées par les variateurs de vitesse basse tension installés par ABB ont permis de réduire de 260 millions de tonnes les émissions de CO₂. Ce système intelligent de commande de moteur électrique, qui ajuste la vitesse et réduit la quantité d'énergie utilisée par des équipements motorisés, est une des nombreuses solutions d'énergie et d'automation proposées par ABB. Celles-ci gèrent la consommation énergétique de manière efficace, diminuent les émissions de carbone et réduisent les coûts de nos clients. www.abb.ch/betterworld

Absolument.