

ABB

1 | 14
fr

review



Florilège d'innovations 6

La mesure lumineuse 13

Co-simulations 45

Une prise de courant chargeur USB 55

La revue
technologique
du Groupe ABB



Innovation

Power and productivity
for a better world™



En cette année de centenaire, *ABB review* reviendra sur son passé, tout en regardant l'avenir. La perspective historique permet de mieux comprendre le présent et l'impact des innovations sur le Groupe ABB, le marché et la société.

Témoin de ce siècle de progrès technologique, le robot de notre couverture s'affaire à la fabrication d'appareillages ABB à Beijing (Chine) tout comme s'appliquaient ces ouvrières, dans les années 1940, au montage des moteurs Strömberg à Vaasa (Finlande).



Innover pour mieux . . .

- 6 Perspectives 2014**
Les innovations ABB qui marqueront l'année

Surveiller

- 13 Pleins feux**
Un capteur de courant optique dans un disjoncteur haute tension
- 18 Experts à la manœuvre**
Pour une gestion intégrée de la performance industrielle

Transformer

- 24 Le vent tourne**
Conception et essai d'un système aérogénérateur de 7 MW
- 28 Freiner pour accélérer**
La récupération d'énergie de freinage dope la traction ferroviaire en courant continu

Simuler

- 34 Direct temps réel**
L'électronique de puissance sur la voie de la simulation temps réel
- 40 Turbomachines**
ACTUS, le nouveau logiciel de simulation ABB pour les gros moteurs à combustion turbosalimentés
- 45 Ligne modèle**
Des simulations mécaniques et électromagnétiques pour mieux concevoir les systèmes d'entraînement
- 50 Modélisation en chaîne**
De nouvelles techniques de simulation pour la conception et l'optimisation des disjoncteurs

Évoluer

- 55 Ubiquité USB**
Rechargez vos appareils sur une prise de courant USB!
- 59 Double jeu**
PCS100 RPC d'ABB : au-delà de la compensation de puissance réactive

Perfectionner

- 65 En harmonie**
L'évolution parallèle des redresseurs de forte puissance ABB et des semi-conducteurs

Des innovations séculaires



Claes Ryttoft

Chères lectrices, chers lecteurs,

2014 est une année particulière pour *ABB review* : il y a cent ans paraissait le premier exemplaire de *Brown Boveri review*, prédécesseur de notre magazine. Témoin de son temps, notre publication garde la fabuleuse trace d'un siècle de progrès ininterrompus. Tout au long de cette année commémorative, nous vous invitons à revisiter le passé, à l'aune des développements présents mais aussi futurs.

C'est donc sur le thème de l'innovation que s'ouvre notre premier rendez-vous de l'année, avec notamment un article sur une mesure novatrice du courant, inspirée d'une découverte datant de... 1845 : l'effet des champs magnétiques sur la polarité de la lumière, observé par Michael Faraday. D'un phénomène longtemps jugé sans grand intérêt technologique, ABB en fait aujourd'hui un outil de mesure précise et sans contact du courant.

ABB connaît bien ses clients et leurs attentes. Il sait que les techniques les plus évoluées du moment ne suffisent pas à leur réussite : il leur faut aussi des garanties d'exploitation fiable, économique et pérenne. Un article sur la gestion de la performance des actifs industriels explique l'essor du domaine et comment ABB y apporte sa valeur ajoutée.

L'an dernier, plusieurs articles d'*ABB review* ont mis en lumière la contribution de la simulation numérique au perfectionnement de nos offres produits. Dans la même veine, quatre articles en exposent ici les applications concrètes, des disjoncteurs aux turbocompres-

seurs. Toujours au chapitre de l'innovation, un article est consacré à la conception et aux essais d'un aérogénérateur.

Si l'on peut se féliciter de l'omniprésence des dispositifs à connecteur USB, force est de regretter que leur chargeur encombre nos bagages et notre quotidien. Vous rêvez d'un moyen plus pratique et plus rapide de recharger vos appareils ? Nous avons la solution : une prise de courant à port USB intégré.

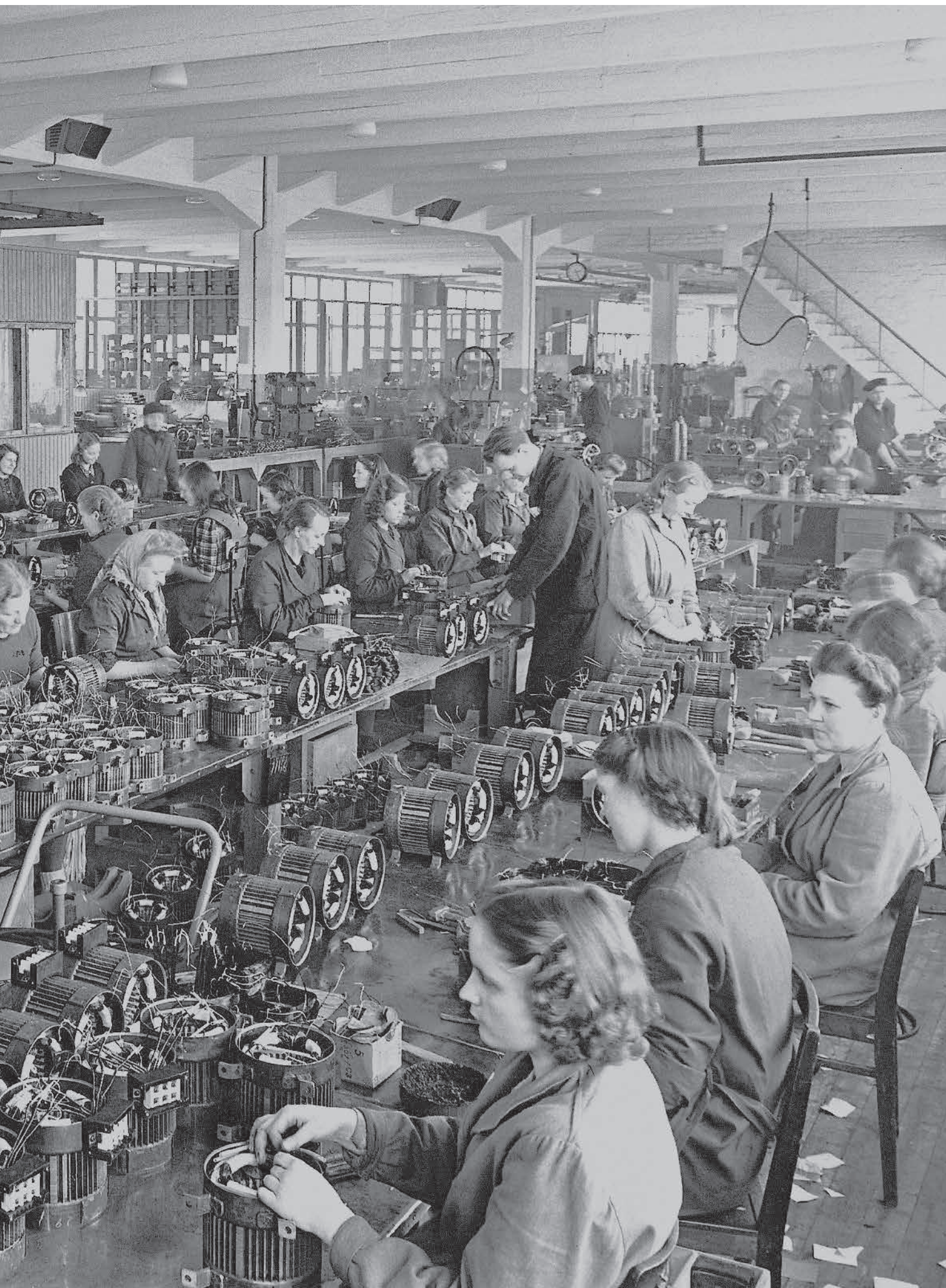
Notre édition s'achèvera par quelques pages d'histoire. Le numéro 2/2013 d'*ABB review* retraçait cent ans d'électronique de puissance ABB en donnant la vedette aux dispositifs de commutation, qu'il s'agisse de valves à vapeur de mercure ou de composants semi-conducteurs. Nous vous convions au même parcours, cette fois sur le terrain des redresseurs.

Enfin, je profite de l'occasion pour vous rappeler qu'*ABB review*, en plus de l'édition papier, peut aussi être consultée sur votre tablette, votre mobile et sur le Net en PDF. Pour en bénéficier, une adresse : www.abb.com/abbreview.

Bonne lecture,

Claes Ryttoft
Directeur des technologies
et Directeur général adjoint
du Groupe ABB





Perspectives 2014

Les innovations ABB qui marqueront l'année

ABB n'a de cesse d'enrichir son offre de produits, de créer de nouvelles technologies et d'inventer l'avenir.

Voici un florilège des percées technologiques du Groupe; si certaines s'invitent dans les colonnes de ce premier numéro 2014, d'autres seront abordées dans nos prochaines éditions.

Longue vie

ABB développe une instrumentation sans fil 100 % autonome qui récupère l'énergie ambiante

Pour pallier la faible autonomie des batteries, en particulier à de grandes vitesses de rafraîchissement, ABB travaille sur des appareils basse consommation (alimentés par une batterie «D» classique), capables d'augmenter considérablement leur autonomie en puisant directement l'énergie du procédé mesuré. Ces transmetteurs intègrent pour cela une cellule Peltier très efficace qui exploite le gradient thermique entre *process* et environnement.

Le transmetteur de température d'ABB embarque un microgénérateur thermoélectrique qui utilise les variations de température entre le procédé et le milieu ambiant. Le dispositif sera capable de fonctionner de manière autonome avec un écart d'environ 35 °C.

Ce type de « récupérateur » d'énergie équipe des capteurs de pression et de température sans fil, sans aucune mécanique de raccordement ni électronique de conversion et d'adaptation de puissance.

ABB étudie en outre une plate-forme de gestion « intelligente » de l'énergie qui acceptera des sources externes et permettra de connecter différents dispositifs de récupération d'énergie (vibratoire, solaire, etc.) pour alimenter l'instrumentation. D'autres lignes de produits suivront : capteurs de niveau et de débit, par exemple.



Lancée début 2014, l'offre sera d'abord proposée en pression et en température avec les gammes *266 Pressure* et *TTF300, TSP3xx Temperature*.

Universelle, Sûre, Busch-Jaeger!

Une prise de courant SCHUKO® à connecteur USB

Plébiscitée par les utilisateurs, cette nouveauté Busch-Jaeger (société du Groupe ABB) résout le sempiternel problème d'avoir à mettre la main sur son chargeur et câble USB, puis de débrancher un appareil électroménager pour recharger son mobile ou autre équipement nomade. De plus en plus d'appareils domestiques étant équipés d'un port USB, la prise SCHUKO USB facilitera la tâche de bien des utilisateurs.

Cette prise encastrée à sécurité enfant fournit un courant de charge de 700 mA maxi. De dimensions identiques aux SCHUKO habituelles, elle s'intègre tout naturellement dans l'installation électrique.

Deux autres produits enrichissent le catalogue SCHUKO USB de Busch-Jaeger : une alimentation et une station de charge, la première accueillant une prise double chargeur USB de 700 mA (ou simple chargeur de 1400 mA), la seconde offrant un support à revêtement antidérapant et une connectique micro-USB capable de délivrer un courant maxi de 1400 mA, soit assez pour nos tablettes énergivores.



L'innovation a remporté plusieurs récompenses internationales, dont le Prix du Public au Salon de l'électronique IFA 2013, à Berlin.

À lire en p. 55.

Booster la récupération d'énergie de freinage en bordure de voie

Les engins de traction ferroviaire récupèrent l'énergie de freinage par l'intermédiaire de leurs moteurs utilisés en génératrice. Or seule une fraction de cette énergie cinétique alimente les charges à bord, le reste étant renvoyé au réseau d'alimentation électrique et réutilisé par un véhicule à proximité en phase d'accélération. À défaut, le surplus est dissipé dans des résistances embarquées ou en bordure de voie. Le système de récupération d'énergie ERS (*Energy Recuperation System*) de la gamme ENVILINE™ d'ABB évite non seulement ce gaspillage mais réduit la consommation totale d'énergie de 10 à 30 %, sans avoir à renouveler le matériel roulant ni à investir dans des systèmes de conduite du réseau ferroviaire.

L'ERS est un onduleur à IGBT, monté en parallèle avec le pont redresseur à diodes de la sous-station en courant continu, qui réinjecte l'énergie du réseau de traction CC



dans le réseau en courant alternatif. Il peut aussi atténuer la puissance réactive et assurer un filtrage actif pour réduire les harmoniques et soutenir les redresseurs en place.

Quand il n'est pas possible de revendre le surplus d'énergie, ABB propose le système de stockage ESS (*Energy Storage System*), le plus petit, le plus modulaire et le plus souple d'emploi de l'industrie. Il peut être équipé de supercondensateurs pour un stockage de courte durée ou de batteries. Autres points forts : la gestion des creux de tension, l'augmentation de la puissance de traction à l'accélération et la réduction des pénalités dues au fournisseur d'énergie en cas de pointes

de consommation. L'ESS sert également d'alimentation de traction autonome, mobile ou fixe, pour remplacer les alimentations traditionnellement raccordées au réseau général. Utilisé avec des batteries, il peut aussi fournir une énergie de secours et même générer des revenus en participant aux marchés locaux de l'énergie. C'est l'objet du partenariat entre ABB et le transporteur américain SEPTA (*South East Pennsylvania Transit Authority*).

La solution ERS vient d'être primée au salon Railtex 2013, à Londres, dans la catégorie « Électrification ».

Pour en savoir plus, rendez-vous p. 28 et sur notre site <http://www.abb.com/railway>.

Un lac en réserve

La possibilité de stocker l'énergie pour la restituer au gré de la demande est l'un des principaux avantages de l'hydroélectricité. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) vont encore plus loin : en refoulant l'eau d'un bassin aval vers un bassin amont, elles permettent d'ajuster le stock d'eau en fonction des aléas de consommation. Les STEP constituent ainsi une réserve de puissance facile à mobiliser pour réguler le réseau électrique et assurer la continuité de la fourniture.

ABB a équipé la STEP Grimsel 2 de la société suisse des Forces motrices de l'Oberhasli SA (KWO) du plus puissant convertisseur de fréquence au monde. Cette centrale de pompage-turbinage relie le bassin supérieur de l'Oberaar à celui du Grimsel, situé plus de 400 mètres en contrebas.

Jusqu'à présent, la puissance de pompage ne pouvait être régulée qu'en jouant sur le nombre de pompes en



marche (4 au maximum). Désormais, le convertisseur de fréquence de 100 MW module individuellement la vitesse des pompes en fonction du surplus d'énergie disponible. Celles-ci peuvent alors démarrer, tourner et s'arrêter plus vite, permettant un usage plus efficace et souple de la réserve hydraulique pour produire l'électricité, tout en accroissant la contribution de la centrale à la stabilité du réseau.

Si d'autres techniques de stockage ont progressé, l'accumulation par pompage reste à ce jour la solution la plus aboutie

et la plus économique pour la régulation du réseau électrique. Les STEP occupent donc une place de choix dans le futur paysage de la production énergétique. Le nouveau convertisseur de Grimsel 2 contribuera à la *Stratégie énergétique 2050* du Conseil fédéral et du Parlement suisses, qui vise à assurer la continuité de l'approvisionnement électrique du pays tout en augmentant la part des énergies renouvelables dans son bouquet énergétique.

Nous aurons l'occasion de revenir sur le convertisseur de fréquence de la STEP Grimsel 2 dans un prochain numéro.

Recharge express pour bus électrique

Deux freins empêchent l'adoption du véhicule électrique : les temps de charge trop longs et les recharges fréquentes. Dans les transports en commun, les arrêts nécessaires pour « recharger les accus » peuvent être un obstacle majeur à la viabilité commerciale du 100 % électrique. À cela s'ajoutent la taille et la masse des batteries embarquées qui augmentent la consommation d'énergie et rognent sur l'espace passagers. Le bus TOSA, en test actuellement à Genève (Suisse), relève le défi avec élégance.

La technique « flash » d'ABB permet de recharger un bus en seulement 15 secondes, l'espace d'un arrêt, sans pénaliser le temps de parcours. À l'approche d'une station, son bras rétractable piloté par laser se lève automatiquement pour faire contact avec le rail d'alimentation intégré à l'abribus.

Cette recharge accélérée (400 kW en 15 s) procure une autonomie suffisante et permet de réduire la puissance requise de la batterie. Elle profite également de l'énergie récupérée au freinage. Le « plein d'électricité » se fait au terminus (200 kW en 3 à 5 min) par le même contact de toit.

La ponction de 400 kW sur le réseau électrique local peut néanmoins poser problème. C'est pourquoi la station de charge utilise des supercondensa-



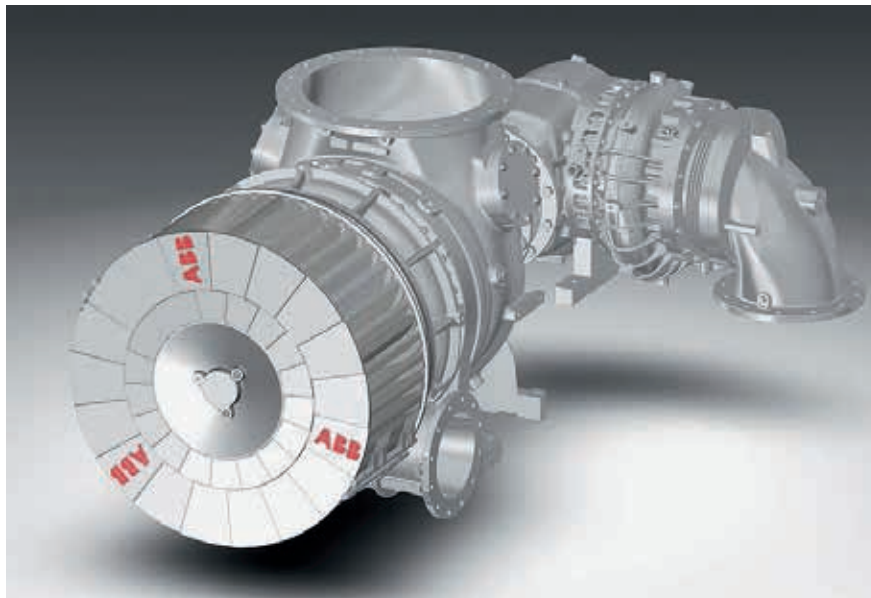
teurs pour lisser la pointe de courant et moins solliciter le réseau. Contrairement aux solutions de charge nocturne, TOSA peut tout naturellement tirer parti de l'énergie solaire en journée.

Intéressé ? Nous vous invitons à relire l'article « Prise en charge : en route pour l'électromobilité zéro émission », *ABB review*, 4/2013, p. 64.

Power2 met le turbo

La suralimentation bi-étagée joue un rôle primordial dans la réduction de la consommation de carburant et des émissions polluantes tout en augmentant la puissance spécifique des moteurs. Avec la gamme Power2 800-M, ABB lance sa deuxième génération de turbo-compresseurs à double étage pour moteurs quatre temps diesel et gaz.

Les moteurs modernes quatre temps moyenne vitesse ont aujourd'hui l'obligation de rendements énergétiques élevés, de faibles coûts de fonctionnement, de densité de puissance accrue et de conformité aux réglementations et normes anti-pollution. La nouvelle génération de turbocompresseurs Power2 d'ABB leur permet de remplir toutes ces exigences, grâce à des pressions de suralimentation pouvant atteindre 12 bar.



L'ensemble des composants a été optimisé pour adapter le double étage aux applications maritimes et aux centrales d'énergie.

Le système innove par sa cartouche extractible renfermant des outils spéciaux pour faciliter la dépose et accélérer la maintenance, ainsi que

par de nouveaux étages compresseur et turbine optimisés pour une exploitation combinée. Le tout a diminué de taille pour gagner de la place sans sacrifier à la performance.

Robots nouvelle génération

Voilà plus de 30 ans qu'ABB développe de gros robots industriels pour satisfaire aux besoins de l'usine moderne. Aujourd'hui, le maître mot est la robustesse : la 7^e génération de robots ABB, l'IRB 6700, offre une multitude d'améliorations, fruits d'une coopération étroite avec la clientèle ABB et de développements complets.

Les nouveaux robots ABB gagnent encore en performance et en fiabilité, pour un coût total de possession revu à la baisse. Plus rapides, plus précis et plus sobres en énergie de 15 %, ils voient leur capacité de

charge et leur rayon d'action augmentés.

Chaque membre de la famille est équipé de la technologie *Lean ID (Integrated Dressing)* qui intègre les parties les plus exposées de l'équipement *process* dans le robot. Les mouvements des flexibles et des câbles étant prévisibles, la programmation et la simulation s'en trouvent facilitées. L'encombrement et l'usure du robot sont réduits, allongeant d'autant les intervalles de maintenance.

Faciliter la maintenance fut un critère de conception décisif pour améliorer le coût total de possession. Les programmes d'intervention sont écourtés, et leur périodicité est diminuée. L'accès aux moteurs a également été amélioré. Lancés fin 2013, les six premiers IRB 6700



affichent des capacités de charge de 150 à 235 kg et des rayons d'action de 2,6 à 3,2 m. Ils seront complétés fin 2014 de deux autres variantes capables de déplacer 300 kg.

AC500-S : sécurité, souplesse, simplicité

L'AC500-S vient enrichir l'offre d'automates programmables industriels (API) d'ABB. Souple et puissant, il accélère et simplifie le développement d'automatismes de commande et de régulation de haut vol. Il a déjà fait ses preuves dans des applications cinématographiques complexes (grues, palans, robots, éoliennes).

Son architecture double processeur en fait un API compatible avec les niveaux de sécurité fonctionnelle SIL3/PLe. Sa programmation s'effectue sous *Automation Builder*, l'atelier logiciel intégré d'ABB pour automates AC500, terminaux opérateurs CP600, variateurs, commandes d'axe et robots.

L'API innove avec de nombreuses fonctionnalités adaptées au marché de la sécurité des machines ; il prend notamment en charge la programma-



tion de haut niveau en langage littéral structuré (ST), en langage à contacts (LD) et par blocs de fonctions (FBD). L'inclusion de la programmation ST, une exception dans le monde des automatismes industriels, simplifie les études mettant en œuvre des algorithmes et des opérations mathématiques pointus.

Cet automate de sécurité offre un choix de modules d'entrées/sorties certifiés SIL3/PLe, dont des entrées et des sorties numériques et un module dédié d'entrées analogiques 0–20 mA (ou 4–20 mA).

Pour simplifier la conception du système et améliorer la productivité, les modules d'E/S de sécurité peuvent faire partie intégrante de la solution API principale ou être déportés dans un châssis distant, les échanges empruntant les protocoles PROFINET/PROFIsafe.

L'AC500-S s'insère parfaitement dans la plate-forme d'automatisme modulaire AC500, permettant au client de choisir le niveau de performances adapté à l'application cible, y compris dans des conditions d'exploitation difficiles ou extrêmes.

SafeRing Air La compacité dans l'air

ABB a mis au point un tableau de distribution monobloc aussi compact qu'un appareillage traditionnel à l'hexafluorure de soufre (SF₆) mais plus respectueux de l'environnement puisqu'il est isolé dans l'air sec, évitant l'usage intensif de matériaux époxydes.

Son isolement dans un gaz atmosphérique n'entraîne pas d'augmentation de taille de l'appareil.

Le tableau répond aux besoins de la distribution moyenne tension jusqu'à

12 kV, dans des configurations disjoncteur et interrupteur coupe-charge.

Entièrement scellé, SafeRing Air intègre une cuve en acier inoxydable contenant toutes les parties sous tension et les fonctions de coupure. Il trouve parfaitement sa place dans des postes électriques compacts et des applications de distribution secondaire dans l'industrie légère, le bâtiment et les infrastructures, en neuf comme en rénovation. Cette unité à 3 directions occupe le même encombrement que son homologue isolé dans le SF₆.

L'appareillage hérite des atouts de la gamme existante *SafeRing/SafePlus* : même interface utilisateur, même surface au sol, mêmes pièces détachées et même continuité de service en rénovation.



Tableau numérique

Depuis près d'un siècle, les appareillages ABB ne cessent de progresser au rythme de l'innovation technologique. *UniGear Digital* est le dernier-né de la gamme ABB de tableaux de distribution moyenne tension isolés dans l'air.

UniGear Digital associe la conception aboutie de la gamme UniGear à une solution unique de protection, de commande, de mesure et de transmission numérique. La nouveauté ? Chaque panneau intègre des capteurs de courant et de tension à la pointe de la technologie, ainsi que des dispositifs électroniques intelligents IED multifonctions Relion d'ABB, qui assurent la compatibilité avec la norme CEI 61850 de communication numérique dans les postes électriques. Le regroupement des fonctions de commutation et de transmission permet

de réduire jusqu'à 30 % les temps de livraison, de simplifier l'installation, la mise en service et les essais, et d'éviter l'émission de 150 t de CO₂ par rapport à un poste *UniGear ZS1* classique à 14 lignes d'arrivée, prévu pour durer 30 ans.

Les solutions de connectivité IED facilitent et accélèrent le raccordement du tableau au système de supervision du client. Le numérique autorise de nouvelles applications encore plus performantes, telles que le transfert rapide de jeux de barres et le délestage à haute vitesse. Conçu pour s'adapter, UniGear Digital peut évoluer sans nécessiter de câblage supplémentaire complexe.

L'utilisation de capteurs de courant et de tension renforce considérablement la sécurité : pas de risque de circuits de courant ouverts ou de phénomène de ferrorésonance dans les transformateurs de tension. Ces capteurs permettent également de réduire de 30 % le délai de livraison, grâce à la standardisation des



variantes qui évite les transformateurs de mesure élaborés sur commande.

Le déploiement de transmissions normalisées CEI 61850-9-2 dans tout l'appareil garantit la fiabilité de la protection et de la commande.

UniGear Digital est pour l'instant proposé avec des caractéristiques assignées maxi de 17,5 kV/4000 A/50 kA. ABB envisage d'étendre cette offre numérique à l'ensemble de la gamme UniGear 12-24 kV.

Insérez, poussez, c'est connecté !

Les armoires électriques font partie du paysage industriel. Des dizaines de câbles (voire des milliers dans les grands sites) y convergent, chacun exigeant un raccordement parfait pour éviter la moindre erreur risquant de mettre en défaut toute l'installation. ABB fiabilise cette connectique avec un nouveau bloc de jonction ressort *PI-Spring* breveté, pour des applications aussi bien standard que contraignantes.

La technologie PI-Spring permet une insertion directe sans outil pour conducteurs rigides ou souples avec embout, et avec tournevis pour conducteurs souples sans embout. Vous gagnez 50 % de temps de câblage sur les techniques de raccordement classiques.



Les blocs de jonction PI-Spring se distinguent par leur robustesse (tenue aux vibrations, aux chocs et aux ambiances agressives) et leurs certifications et agréments internationaux qui permettent d'accéder aux marchés mondiaux et de satisfaire à de nombreuses applications industrielles exigeantes, voire dangereuses, marine comprise.

L'insertion directe et à ressort faisant partie de la même offre de connectique, vous diminuez votre stock de 50 %. Qui plus est, le bloc de jonction PI-Spring partage des accessoires communs avec la gamme vissée SNK d'ABB.

Toutes les flasques d'extrémité s'adaptent à de nombreux borniers, réduisant encore l'effort logistique. Sa forme asymétrique permet un contrôle visuel immédiat pour éviter les inversions de montage. Un premier repérage rapide au stylo, avant étiquetage définitif, est facilité par une généreuse surface de marquage plane. L'inclinaison à 30° du conducteur permet de gagner 15 % en hauteur tout en conservant un grand rayon de courbure.

Nous reviendrons sur cette innovation dans un prochain numéro d'*ABB review*.





Pleins feux

Un capteur de courant à fibre optique dans un disjoncteur haute tension

KLAUS BOHNERT, RICHARD THOMAS, MICHAEL MENDIK – Essentielle à la protection et au contrôle-commande des réseaux électriques, la mesure de courant et de tension passe habituellement par des transformateurs encombrants et lourds (plusieurs tonnes). Les dispositifs à fibre optique exploitant l'effet Faraday possèdent de longue date bien des atouts pour pallier ces défauts. Les remarquables progrès accomplis par les télécommunications optiques au cours des vingt dernières années ont fourni une kyrielle de composants (sources lumineuses, fibres optiques, modulateurs et photodétecteurs) propres à réaliser des capteurs de courant optiques fiables et abordables. Ces capteurs ont en outre bénéficié du développement rapide des gyroscopes à fibre optique dont la technologie s'appuie sur les mêmes principes fondamentaux de la physique.

Photo ci-contre

Pendant des décennies, la mesure de courant dans les équipements haute tension a fait appel à des transformateurs aussi encombrants que lourds. Place aujourd'hui au capteur de courant à fibre optique d'ABB, intégrable à l'appareillage primaire, comme les disjoncteurs.

Voilà plus de 40 ans que l'effet Faraday a prouvé son intérêt pour améliorer la mesure de courant.

sources lumineuses, fibres optiques, modulateurs et photodétecteurs.

Les nouveaux capteurs optiques ont également bénéficié de l'évolution des gyroscopes à fibre optique, qui équipent aujourd'hui de nombreux systèmes de navigation (notamment dans l'aérospatial) et utilisent des techniques similaires pour mesurer le déphasage différentiel des ondes lumineuses. Seule différence : quand l'écart de phase est le résultat d'une rotation dans les gyroscopes (effet Sagnac), il est induit par le champ magnétique du courant à mesurer dans les capteurs optiques.

Aujourd'hui, la mesure de courant dans l'appareillage haute tension (HT) fait appel à des transformateurs de courant (TC) aussi lourds que volumineux, qui utilisent le principe de l'induction électromagnétique pour produire à partir d'un courant primaire un courant secondaire de faible intensité (le plus souvent 1 A ou 5 A au courant assigné), transmis aux relais de protection ou compteurs d'énergie. Après avoir régné en maîtres des décennies durant, ces TC continuent de fournir des mesures précises et fiables, même dans les conditions difficiles des postes électriques d'extérieur. Ils ont néanmoins leurs inconvénients : l'encombrement et la masse certes, mais surtout un courant secondaire dont la forme d'onde, souvent faussée par la saturation magnétique et la limitation de la bande passante, ne reflète pas fidèlement le courant primaire.

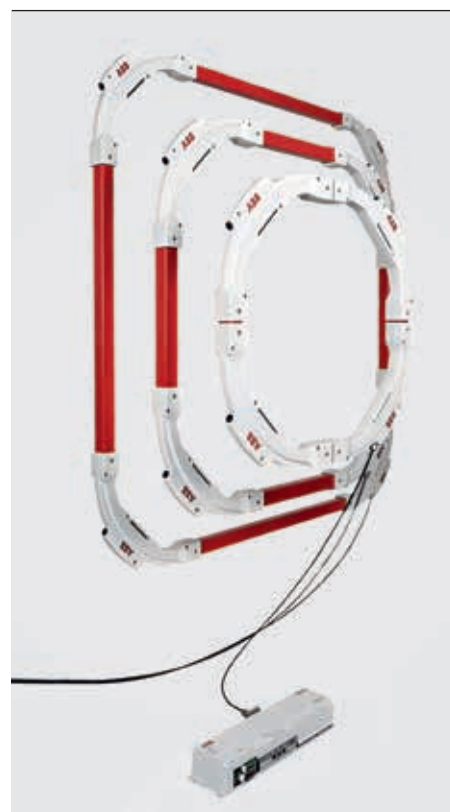
Si voilà plus de 40 ans que l'effet Faraday a prouvé son intérêt pour améliorer la mesure de courant, il a fallu attendre 20 années pour que la technologie adéquate, parvenue à maturité, en conforte les atouts commerciaux pour la mesure optique. De même, les fabuleux progrès des transmissions optiques ont donné naissance à de multiples composants applicables à la mesure optique tels que

Rétrospective

En 2005, ABB lançait un capteur à fibre optique → 1 appelé à révolutionner la mesure de courants continus jusqu'à 600 kA [1,2], en conciliant haute précision ($\pm 0,1\%$ sur une plage de 1% à 120% du courant assigné) et température de service de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ce capteur trouve aujourd'hui une multitude d'applications dans l'électrolyse de l'aluminium, l'électro-extraction du cuivre, la production de chlore et même la recherche en fusion nucléaire.

ABB a récemment amélioré son capteur pour l'adapter aux postes HT. Par sa compacité et son format adaptable, un capteur de courant optique n'a pas besoin d'être autonome comme un transformateur de mesure classique ; il peut se loger dans un appareillage primaire HT (disjoncteur, par exemple) pour économiser l'espace et les coûts d'installation. Autre nouveauté : sa communication numérique avec les équipements de protection et de contrôle-commande, sur un bus de procédé optique qui permet de s'affranchir du cuivre tout en facilitant la configuration du poste électrique.

1 Capteur optique pour la mesure de forts courants continus

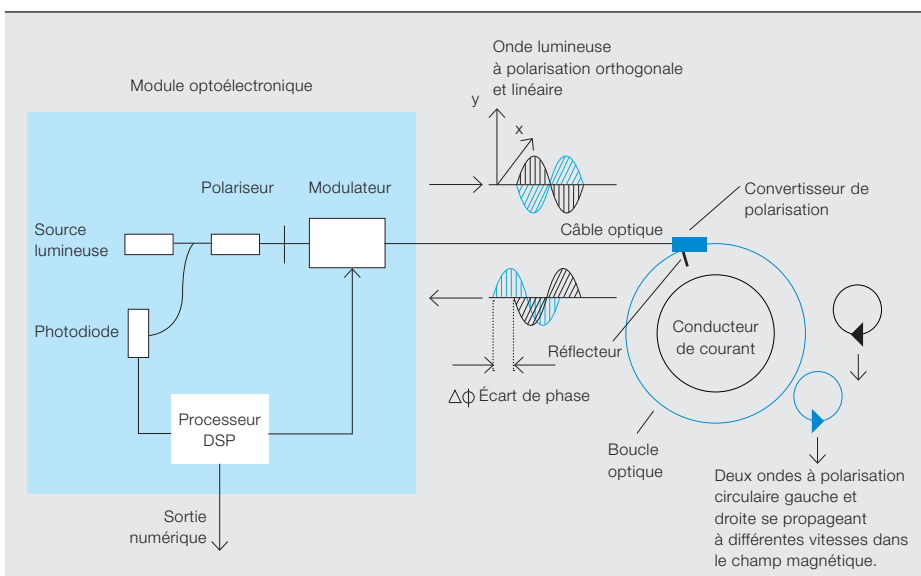


Principe

Cette mesure du courant ABB exploite la « rotation de polarisation » de l'effet Faraday, selon laquelle une onde lumineuse à polarisation linéaire qui traverse un matériau soumis à un champ magnétique se décompose en deux faisceaux à polarisation circulaire droite et gauche se propageant à des vitesses légèrement différentes. Dans notre cas, l'élément sensible est une fibre optique exposée au champ magnétique créé par le courant à mesurer. La différence de vitesse induite par l'effet Faraday engendre un écart de phase relatif entre les deux ondes, dont on déduit la valeur du courant.

Le capteur se compose principalement d'un module optoélectronique au potentiel de masse et d'une fibre de mesure bobinée autour du conducteur → 2. L'optoélectronique intègre une source lumineuse à semi-conducteur et un circuit de détection en boucle fermée doté d'un polariseur, d'un modulateur de phase et d'un circuit DSP de traitement numérique du signal. Deux ondes lumineuses à polarisation linéaire et orthogonale sont converties, à l'entrée de la fibre de mesure, en ondes à polarisation circulaire gauche et droite. Soumises au champ magnétique du courant, celles-ci

2 Schéma de principe du capteur de courant à fibre optique ABB



se propagent à différentes vitesses dans la fibre, induisant une différence de chemin optique (effet Faraday) et, donc, un écart de phase. En bout de fibre, les ondes réfléchies font le trajet optique inverse jusqu'au module optoélectronique et au polariseur dans lequel elles créent un phénomène d'interférence dont l'intensité, dépendant de l'écart de phase, est mesurée par photodiode. Le circuit de commande en boucle fermée inverse le déphasage induit par le courant au moyen d'un modulateur ; ainsi, l'écart de phase des ondes interférant dans le polariseur est toujours maintenu à zéro. Le signal optique de retour au modulateur est donc fondamentalement une image du courant primaire dont est déduite la sortie numérique du capteur. Cette détection en boucle fermée présente l'avantage d'un signal parfaitement proportionnel au courant primaire, sur toute la plage de mesure.

L'écart de phase aller et retour des deux ondes lumineuses est proportionnel au nombre de boucles optiques et à l'intégrale du champ magnétique le long du chemin fermé décrit par la fibre de mesure. La géométrie de la boucle (diamètre, par exemple) ou la position du conducteur à l'intérieur de la boucle, de même que les courants extérieurs, n'influencent pas le signal ni ne modifient la mesure.

L'exploitation de la fibre de mesure en réflexion rend le capteur insensible aux contraintes mécaniques. Dans ce mode, les états de polarisation des ondes

optiques permutent à l'extrémité de la boucle. Résultat, les déphasages réciproques induits par les vibrations s'annulent en un seul aller-retour tandis que les déphasages magnéto-optiques non réciproques doublent : un principe de capteur optique inventé par ABB en 1992 et repris depuis par d'autres industriels.

Un nombre de boucles de fibre judicieusement choisi optimise l'étendue de mesure pour des applications particulières ; dans notre cas, elle est de ± 180 kA et la température de service de la tête de mesure comprise entre -40 °C et $+105$ °C. Le module optoélectronique est prévu pour fonctionner dans une armoire d'extérieur chauffée, avec trois boucles de fibre correspondant aux trois phases d'une installation HT.

Des avantages... en boucle

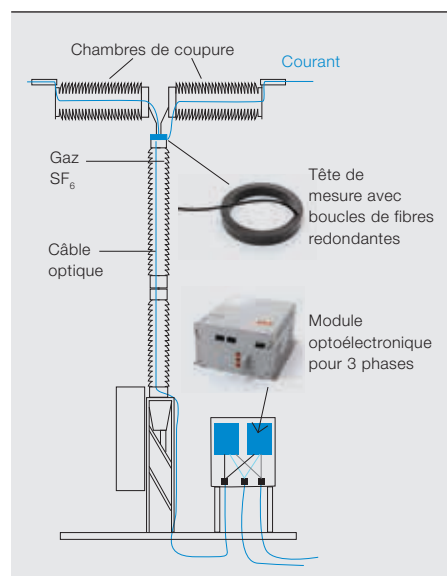
Grande précision

Dans la bande passante donnée par la vitesse de transmission de la sortie, le capteur fournit une image fidèle et juste de la forme d'onde du courant primaire, qui n'est pas perturbée par les phénomènes de saturation magnétique ou de rémanence. Les composantes du courant continu sont correctement enregistrées. Le capteur remplit sa double mission de mesure et de protection électrique.

Faible empreinte écologique

Ce capteur évite l'aluminium, le cuivre, les isolants et l'huile qui entrent dans la composition d'un TC classique. Rappeler

3 Intégration dans un disjoncteur à cuve sous tension



Les fabuleux progrès des télécoms optiques ont donné naissance à de multiples composants : sources lumineuses, fibres optiques, modulateurs et photodétecteurs.



Les capteurs de courant optiques ont aussi bénéficié du développement des gyroscopes à fibre optique.

lors qu'un TC de 550 kV, par exemple, peut peser 3,5 t et contenir 500 kg d'huile.

Zéro armoire

Le capteur s'intègre dans des armoires de type disjoncteurs ou traversées.

Sécurité intrinsèque

Les risques de catastrophe en cas de séisme, par exemple, ou d'atteinte à la sécurité sur ouverture du circuit secondaire sont exclus. L'électronique est isolée galvaniquement des hautes tensions.

Transmission numérique

Un bus de communication optique avec le procédé, sous protocole CEI 61850-9-2 LE, interface le capteur aux équipements de protection et de contrôle-commande de tranche; fini les dizaines de kilomètres de câblage cuivre dans chaque poste! Cette liaison numérique facilite également la configuration ou la reconfiguration ultérieure du poste. La fréquence d'échantillonnage de 4 kHz à 50 Hz ou de 4,8 kHz à 60 Hz peut être portée à

100 kHz, par exemple, pour satisfaire aux besoins d'autres applications, moyennant des interfaces réseau spécifiques.

Disjoncteurs à cuve sous tension

Le faible encombrement et la souplesse d'utilisation de la boucle optique permettent de loger le capteur dans d'autres équipements électriques. Un système triphasé redondant, par exemple → 4, peut s'intégrer dans un disjoncteur à double chambre de coupure ABB → 3, comme le HPL550B2 de 550 kV. Chacun des trois boîtiers de tête de mesure renferme deux fibres bobinées et se monte au sommet du pôle de disjoncteur correspondant. On modifie le parcours du courant pour qu'il passe dans les bobines. Les fibres sont protégées par un câble spécialement adapté à l'atmosphère gazeuse du disjoncteur à cuve sous tension. Le câble traverse le volume de gaz pour se raccorder à la masse et sort du pôle du disjoncteur par une traversée étanche. Les deux modules optoélectroniques triphasés sont montés en armoire, près du disjoncteur, ou fixés au support de disjoncteur. Des liaisons redondantes CEI 61850-9-2 LE relient les capteurs aux relais de protection numérique comme le REL670 d'ABB, dans le coffret de commande → 5. La solution multiplie les avantages :

- En usine, les têtes de mesure sont intégrées au disjoncteur et les modules optoélectroniques placés dans leur enceinte. Reste sur site à aménager l'armoire pour accueillir l'optoélectronique et à dérouler les câbles optiques ;

- La tête de mesure fait corps avec le poteau du disjoncteur, sans gêner l'installation sur site. Seules quelques petites retouches des procédures de montage de l'appareil sont nécessaires ;
- Le raccordement haute tension-masse de la fibre n'a pas besoin d'isolateur supplémentaire ;
- On économise la place nécessaire à un TC classique ou un capteur de courant optique autonome, ce qui réduit d'autant l'encombrement du poste et les coûts d'implantation, surtout quand les capteurs sont couplés à des disjoncteurs-sectionneurs [3] ;
- Fondations et supports de TC sont inutiles ;
- L'installation en extérieur des modules optoélectroniques, à proximité du disjoncteur, minimise la longueur de câble à fibre optique ;
- La transmission des signaux numériques de l'optoélectronique au contrôle-commande du poste, sur liaisons redondantes CEI 61850-9-2 LE, est insensible aux perturbations électromagnétiques.

Le disjoncteur à cuve sous tension et son capteur de courant optique intégré subissent des essais de type normalisés CEI pour en valider la conception : haute tension, T100 (vérification du fonctionnement du disjoncteur à des courants et tensions élevés), échauffement (à 4000 A_{eff}) et endurance mécanique (plus de 10 000 manœuvres d'ouverture-fermeture). Le bon fonctionnement du capteur avant, pendant et après les essais



fut vérifié. D'autres épreuves d'immunité électromagnétique validèrent sa conformité CEM.

Fiabilité garantie

Cette technologie a fait ses preuves depuis plusieurs années dans l'environnement difficile de l'électro-extraction. Mais ce n'est rien à côté des exigences de fiabilité dans les postes HT : là, pas question d'envisager une maintenance spéciale ou un réétalonnage pendant toute la durée d'exploitation sur site. La fiabilité du capteur de courant optique et de ses constituants est vérifiée en usine par des essais de vieillissement accéléré et de performance à long terme. Des autodiagnostic surveillent en permanence son fonctionnement. Qui plus est, des installations pilotes sur site procurent un retour d'expérience sur l'installation et la mise en service de cette nouvelle technologie, et démontrent sa fiabilité dans les conditions d'un poste électrique.

À l'épreuve du terrain

Une installation pilote, réalisée en collaboration avec l'électricien suédois Svenska Kraftnät, met en œuvre un disjoncteur à cuve sous tension équipé d'un capteur de courant optique triphasé redondant → 6 et → 7, dans un poste 420 kV. Les deux modules optoélectroniques sont montés dans l'armoire de commande du disjoncteur de la phase B. Deux liaisons CEI 61850-9-2 les relient à deux relais REL670 d'ABB dans le coffret de commande. Un TC à circuits magnétiques de protection et de mesure sert de référence. Une source délivrant

une impulsion par seconde synchronise l'ensemble. Les données sont enregistrées à intervalles réguliers pour une comparaison à long terme. La fonction de protection peut également demander des enregistrements de perturbographie. Outre la performance et la fiabilité du capteur en place, ce pilote a testé les procédures d'assemblage en usine ainsi que l'installation et la mise en service sur site.

Le système a fonctionné sans incident depuis avril 2010, en affichant des performances conformes aux spécifications. De plus, l'enregistrement des courants de défaut transitoires s'est révélé manifestement supérieur à celui d'un TC classique, laissant augurer le développement de fonctions de protection et de commande toujours plus efficaces.

Perspectives

Cette technologie de capteur de courant optique servira de tremplin à d'autres applications HT. Grâce au diamètre variable de sa tête de mesure, le capteur peut s'adapter sans peine à des appareillages d'interruption à isolation gazeuse ou des disjoncteurs d'alternateur. Un nombre de boucles de fibre bien choisi permet d'obtenir une haute précision à de faibles courants, par exemple, dans des mesures de courant de séquence zéro. La réactivité de l'appareil et sa mesure précise des courants alternatifs et continus transitoires ouvrent la voie à des améliorations ou des innovations dans les fonctions de protection et de surveillance des postes électriques.



Klaus Bohnert

ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
klaus.bohnert@ch.abb.com

Richard Thomas

ABB Power Products
Ludvika (Suède)
richard.thomas@se.abb.com

Michael Mendik

Anciennement ABB Power Products
Mount Pleasant (Pennsylvanie, États-Unis)
michael.mendik@sma-america.com

Bibliographie

- [1] Bohnert, K., Guggenbach, P., « La mesure du courant à la fibre optique », *Revue ABB*, 1/2005, p. 6-10.
- [2] Bohnert, K., *et al.*, "Highly Accurate Fiber-Optic DC Current Sensor for the Electrowinning Industry", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, n° 1, p. 180-187, 2007.
- [3] Jing, L., *et al.*, "Small footprint, high performance: Design of an air-insulated switchgear substation based on new technology", *ABB review Special Report: Dancing with the dragon*, p. 38-42, novembre 2008.

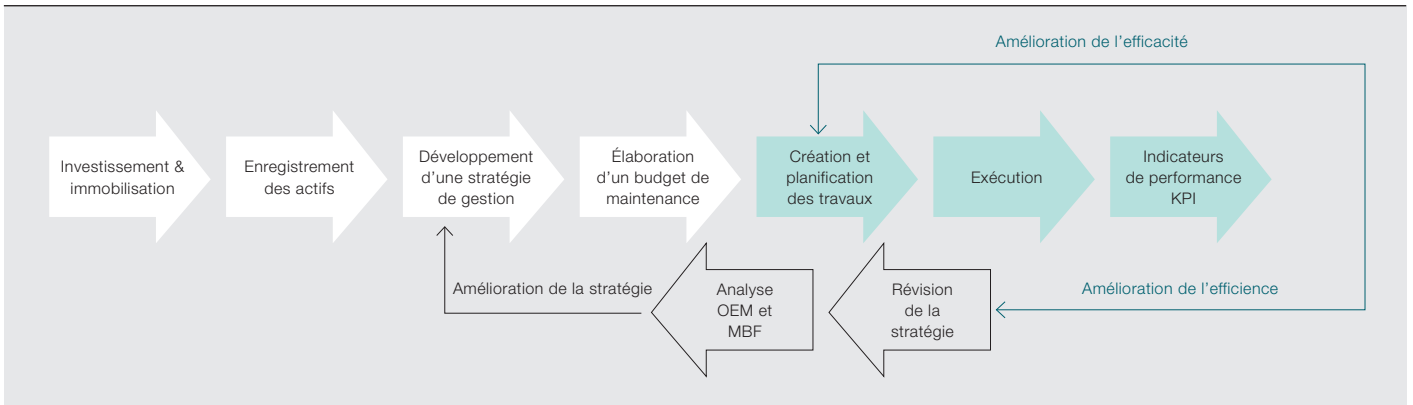


Experts à la manœuvre

L'analyse « métier » pour un pilotage optimisé de la performance industrielle

KAREN SMILEY, SHAKEEL MAHATE, PAUL WOOD, PAUL BOWER, MARTIN NAEDELE – De plus en plus, les industriels des secteurs à forte intensité capitaliste se voient contraints d'améliorer leurs performances en exploitation et en maintenance. La « gestion d'actifs » s'annonce pour cela comme une fonction stratégique, au vu des retombées potentiellement considérables des décisions en matière de rentabilité, de conformité et de satisfaction client sur les résultats de l'entreprise. Pour guider et améliorer ce processus, et supprimer les dépenses inutiles, le centre de compétences en gestion de parc AHC (*Asset Health*

Center) d'ABB associe informatique décisionnelle et analyse d'actifs, auxquelles il greffe l'expertise des équipements et systèmes industriels. ABB tire parti de sa maîtrise du transport électrique pour aider les grands énergéticiens du continent nord-américain à optimiser leurs dépenses d'investissement, leurs opérations et leurs plans de maintenance. Un nouvel outil ABB de regroupement des expertises métier, l'atelier *SME Workbench (Subject Matter Expert)*, fera évoluer ces capacités analytiques et élargira le champ d'action de cette gestion des performances à d'autres domaines.



Or ces connaissances sont souvent diluées dans l'entreprise et fragmentées entre ses prestataires, quand elles ne s'entassent pas sur les bureaux et supports informatiques des ingénieurs (fichiers texte, feuilles de calcul, diagrammes, etc.). Récupérer et compiler ce savoir pour l'exploiter à des fins d'analyse décisionnelle posent un réel défi.

visibilité des opérations. Les procédures de traitement et d'analyse qui exploitent les données déjà en possession du client donnent un sérieux coup de pouce à ce pilotage des performances ; par exemple, les données isolées peuvent être importées ou les données utiles extraites en scannant et en traitant les enregistrements hors ligne.

Un *actif industriel* est une ressource physique synonyme d'investissements, de durées de vie et... de coûts! → 1 Dans les secteurs capitalistiques, une gestion saine et performante des équipements de production est déterminante. Pour l'heure, le vieillissement des infrastructures, la pression financière et réglementaire, et la perte de compétences (départs en retraite) font que les stratégies habituelles de maintenance essentiellement réactive ou planifiée ne répondent plus aux objectifs économiques de bon nombre de clients industriels d'ABB. Les décisions concernant la production se répercutent généralement sur de nombreux processus de l'entreprise. Les décideurs doivent donc prendre en compte de multiples horizons de planification et arbitrer entre plusieurs catégories d'objectifs. Les processus analytiques basés sur les connaissances permettent de caractériser l'impact de leurs choix sur les indicateurs clés de performance de la production.

Données multisources

L'analyse peut associer aux traditionnels «bilans de santé» des actifs des données d'efficacité opérationnelle, des métadonnées de registres d'actifs et des mesures remontées de l'instrumentation, des essais et des contrôles. L'extension et la complexité croissante des systèmes font exploser la volumétrie des données à gérer. Or il arrive que celles-ci «dorment» dans des archives et des dossiers papier, ou que la masse d'informations temps réel affluant des actifs «intelligents» connectés se perde, faute d'être bien stockée. Les données sont souvent engrangées dans les bases de différents constructeurs et les systèmes peuvent même référencer un actif de différentes manières.

De l'information à l'action

Au-delà du recueil et de l'intégration de la totalité des données disponibles, encore faut-il savoir ce que l'on va faire de chaque actif tout au long de sa vie. L'analytique qui tire profit de l'expertise métier de l'entreprise permet de capitaliser sur les pratiques de maintenance prédictive et conditionnelle. Dans cer-

Les processus analytiques à base de connaissances caractérisent l'impact de différents choix et décisions sur les indicateurs de performance de l'entreprise.

Il est possible de combler ces lacunes par un savant mélange de réflexion, d'instrumentation, de partage et d'innovation. Dans certaines régions du monde, les entreprises de distribution d'énergie encouragent vivement le déploiement de capteurs de diagnostic et de suivi d'état dans leur équipement pour accroître la

tains cas, la maintenance corrective peut rester la solution privilégiée, mais l'absence d'outils adéquats et interconnectés ne permet pas de prendre les meilleures décisions en matière d'actifs. Pour obtenir des résultats optimaux, les clients ont besoin d'informations approfondies et exploitables leur permettant de savoir comment leurs plans d'action et de maintenance influent dans le temps sur leurs objectifs. Le centre AHC d'ABB leur apporte ces éclairages stratégiques.

Photo p. 18

Le centre de gestion d'actifs industriels *Asset Health Center* d'ABB procure toutes les informations dont ont besoin ses clients pour prendre les décisions et engager les actions qui s'imposent en vue d'optimiser l'exploitation et la maintenance de leur parc.

Pour obtenir des résultats optimaux, les clients ont besoin de cerner l'impact de leurs plans d'action et de maintenance sur leurs objectifs.

2 Principaux facteurs d'intégration des actifs [1]

Domaine	Facteurs	Motifs
Économique	Fiabilité	Réduire l'exposition aux sanctions réglementaires.
		Réduire les arrêts non planifiés.
		Réduire l'impact de l'évolution démographique du personnel.
		Allonger la durée de vie des équipements et réduire les temps d'arrêt.
	Efficacité du personnel	Faciliter la prise de décisions en matière de priorités de maintenance.
	Améliorer le planning d'intervention des agents de maintenance.	
	Automatiser le processus analytique pour réduire les coûts de main d'œuvre.	
	Gestion des risques	Réduire l'exposition aux pannes catastrophiques et à leurs dommages collatéraux.
	Optimisation du taux d'utilisation	Améliorer la connaissance de l'état fonctionnel des équipements pour autoriser les contraintes dynamiques.
Non économique	Mise en conformité et édition de rapports	Réduire le temps nécessaire à la création de bilans de performance.
		Formaliser les processus d'évaluation, de suivi et d'achat.
	Mise en réseau	Réduire les coûts de transmission et de progrès technologique pour faciliter et accélérer la communication avec des capteurs distants isolés.
	Capacité d'acquisition et de traitement	Augmenter le nombre de dispositifs de contrôle-commande numériques dans l'industrie et les services publics de façon à créer un impressionnant flux de données qui peut être traité à moindres frais grâce à l'informatique distribuée et à la chute des coûts de matériel.
	Intégration accrue de l'entreprise	Faire converger les silos opérationnels à mesure que progresse l'intégration des divers systèmes et fonctions des entreprises capitalistiques, grâce aux efforts accomplis pour tirer parti des données multisources et gagner ainsi en efficacité.

Un pôle dédié

La vocation du centre AHC d'ABB est de collecter et d'agrèger les données, d'en exploiter le détail et d'épauler la prise de décision pour offrir une large palette d'avantages économiques et non économiques → 2. Il s'appuie en cela sur la plate-forme décisionnelle *FocalPoint* d'ABB.

FocalPoint a toujours doté les clients ABB des secteurs à forte intensité capitalistique d'une base solide d'analyse et d'affichage de leurs données métier. Ses

tion mobile, par exemple), d'un superviseur ou d'un réseau de capteurs spécialisés, et leur analyse holistique ouvrent de nouvelles possibilités d'évaluation des risques et d'aide à la décision en matière de maintenance ou de remplacement d'actifs.

Le centre AHC combine l'intégration informatique/opérationnelle et analytique avec des tableaux de bord, tels que le module de surveillance d'actifs, et des affichages spécifiques au domaine pour donner aux planificateurs, déci-

deurs et responsables plus de visibilité, d'information et de contrôle sur l'activité → 3.

Atouts AHC

Les quatre composantes du centre AHC sont complé-

Dans les secteurs industriels capitalistiques, la gestion des actifs est vitale pour la réussite de l'entreprise.

fonctions d'intégration de données provenant de multiples systèmes disparates fournissent une vue globale de chaque actif. En particulier, la collecte de données issues d'applications informatiques traditionnelles (programme de gestion productive des actifs ou outil d'inspec-

tionnaires → 4. En entrée, on trouve les informations de base, données d'état et indicateurs de production; en sortie, on visualise les diagnostics d'état, recommandations et données de criticité. Les résultats de l'aide à la décision permettent de décider et d'engager des

3 L'interface graphique intuitive de la surveillance d'actifs AHC éclaire sur les risques et conséquences d'une défaillance sur un parc d'équipements, comme ici des transformateurs.



actions de maintenance, lesquelles amènent à mettre à jour les informations sur les actifs.

Maillon de la chaîne analytique, le centre AHC exécute les modules de diagnostic, de criticité et d'optimisation spécifiques à chaque actif. Les algorithmes correspondants ont été développés par des spécialistes ABB des transformateurs et des disjoncteurs de réseaux de transport et de distribution d'électricité.

Le bilan de santé qui découle de l'analyse peut servir à toute l'entreprise. Cette gestion globale et intégrée complète les logiciels décisionnels généralistes en exploitant le savoir des spécialistes de l'application et de l'équipement de production.

Miser sur l'expertise

Les experts métier en savent long sur l'organisation d'un système complexe, ses caractéristiques, forces et faiblesses, ses choix et critères de conception, son environnement de fonctionnement et les répercussions des opérations de maintenance et de mise à niveau sur le bilan de santé d'un équipement proprement dit ou de l'ensemble. Ce savoir est exploité

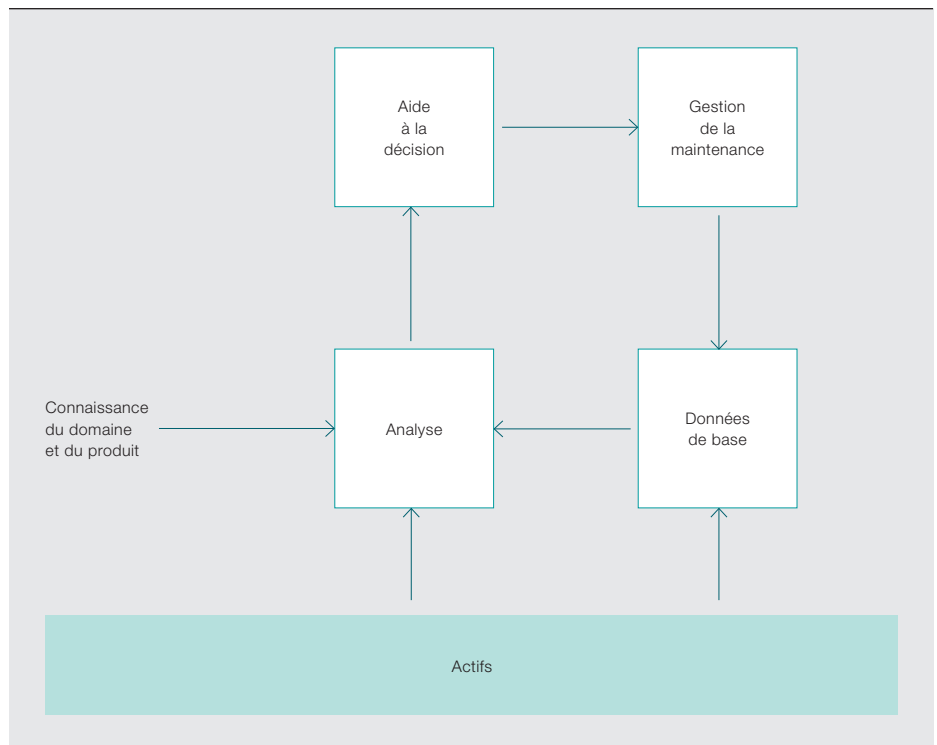
dans de nombreux types de procédures analytiques d'actifs industriels, dont les trois suivantes :

- État fonctionnel : des modèles de performance dressent le bilan de santé du parc en quantifiant la probabilité de défaillance ou de dégradation des performances, en identifiant les causes probables de certaines conditions et en préconisant des améliorations ;
- Importance : des modèles de criticité décrivent l'importance de l'actif en qualifiant l'impact de ses changements d'état sur la performance de l'entreprise industrielle (déroulement des opérations, reprises de service et interdépendances avec d'autres équipements) ;
- Aide à la décision : ces analyses combinent savoirs et données pour éclairer les décisions concernant l'actif.

Pour une entreprise locale de distribution d'électricité, une analyse d'aide à la décision utile consisterait, par exemple, à étudier le risque total de pannes (en associant suivi d'état et criticité) pour élaborer les budgets optimaux d'investissement et les plans d'action et de

La plate-forme de développement commune de l'atelier SME renforce la fonction d'analyse d'actifs multi-sectoriels et permet aux spécialistes de l'équipement, des données et de la performance industriels de se concentrer sur leur domaine d'excellence.

4 Le centre AHC d'ABB intègre toutes les composantes indispensables à une gestion complète des actifs industriels.



maintenances pour les deux années à venir.

Accélérer l'analyse

Il est capital de faciliter au maximum la transformation des expertises métier en modules logiciels exécutables, à travers trois actions primordiales :

- Incorporer au logiciel les connaissances expertes d'ABB de son parc d'équipements et de systèmes ;
- Récupérer les modèles de performance d'actifs clients pour compléter l'expertise ABB (« programmation utilisateur final ») ;
- Permettre aux tiers (fournisseurs ou experts-conseils, par exemple) de contribuer aux modules complexes de diagnostics d'actifs, par le biais d'une interface de programmation.

C'est pour cela qu'a été créé l'atelier *SME Workbench*. Son outil de développement commun vient renforcer la fonction d'analyse d'actifs multisectoriels et permet aux spécialistes de l'équipement, des données et de la performance industriels de se concentrer sur leur domaine d'excellence.

Libérer l'expertise

SME Workbench permet de construire des algorithmes sans chercher à savoir comment ils s'exécuteront dans l'environnement

cible ni comment les données ont été stockées ou retrouvées. Les experts du domaine peuvent décrire naturellement leurs connaissances avec les organigrammes, arbres de décision et autres outils familiers.

S'ils travaillent en équipe pour bâtir un modèle analytique de performance d'actifs, les éléments du modèle sont stockés dans le *Cloud*, tandis que l'atelier SME fournit l'infrastructure de test locale.

Tous bénéfiques

SME permet à tous les détenteurs d'une expertise métier de développer de nouvelles extensions au modèle analytique. Son interface ergonomique par glisser-déposer facilite la transformation des idées et algorithmes en puissants modules logiciels. Des boîtes à outils personnalisées simplifient l'accès aux calculs et aux fonctions d'analyse de fiabilité qui sont de la plus haute importance pour l'analyse d'actifs. SME favorise ce partage de connaissances et peut également s'enrichir de nouveaux éditeurs destinés à rationaliser les développements analytiques dans différents domaines.

Ses interfaces de programmation permettent aux clients, fournisseurs et prestataires, y compris ceux ne travaillant

Regrouper les données de l'informatique traditionnelle ou de systèmes opérationnels comme la supervision, et les analyser de manière holistique libèrent tout le potentiel de l'analyse des risques et de l'aide à la décision en matière de maintenance ou de remplacement d'actifs.

pas avec ABB, de contribuer à l'analytique en s'insérant de façon transparente dans l'architecture AHC. Cette démarche autorise la collecte et la mutualisation des savoirs qui peuvent être diffusés dans toute l'organisation.

Réutilisation et extension

Les premiers clients du centre AHC d'ABB étant des énergéticiens, il va de soi que les analyses et diagnostics ont d'abord visé les équipements de réseau électrique. L'architecture AHC a pour avantage que la plate-forme de veille stratégique comme l'atelier SME sont indépendants du domaine étudié. ABB possède de solides connaissances métier dans des applications verticales à forte composante de capital, telles le pétrole et le gaz, l'eau, l'exploitation minière et les technologies maritimes. L'offre s'ouvrira à ces secteurs à mesure que les experts ABB du domaine et des équipements de production contribueront, avec SME, à la diffusion et au partage de leurs connaissances.

L'Internet des objets connectés

La vision ABB de l'avenir de la gestion de la performance industrielle se fonde sur un système intégrant à la fois les informations sur les équipements, l'expertise du diagnostic, la présentation de données exploitables et l'aide à l'exécution des actions qui en découlent. Les diagnostics et procédures analytiques développés par ses experts peuvent s'ajouter à son riche portefeuille d'applications éprouvées englobant

- la gestion productive des actifs (GPA) dans l'industrie lourde ;
- l'affichage d'informations sur les actifs, à différents niveaux de détail ;
- la planification de la maintenance et l'accompagnement des équipes d'intervention.

Analyses, tableaux de bord, affichages, forums de questions/réponses... Tous ces outils sont indispensables, mais pas suffisants. Les actifs instrumentés et enrichis de fonctions réseau deviendront le lot commun, tandis que leur conception et leur compréhension continueront d'évoluer. Le centre AHC préconise une solution en boucle fermée qui peut prédire la performance des actifs et contribuer à l'optimisation de l'exploitation, de la maintenance, des dépenses et des investissements. Il pilote la performance des actifs et maximise les résultats de l'activité en collectant en permanence les données d'un parc d'équipements, de systèmes et de capteurs communicants, dont son puissant moteur de traitement analytique extrait l'information pertinente et exploitable.

Par son impact sur les résultats financiers de l'entreprise, la gestion de la performance s'impose de plus en plus comme une activité vitale pour les clients industriels. ABB s'oriente vers un centre AHC intégré, combinant décisionnel et analytique. En utilisant l'atelier SME pour faciliter le déploiement et l'intégration de ces outils, l'expertise peut être recueillie et mise à profit pour améliorer la prise de décision dans les secteurs industriels à forte densité de capital. ABB exécute en ce moment un contrat de fourniture AHC pour le plus grand propriétaire d'équipements de transport électrique en Amérique du Nord. Rationaliser la collecte et l'utilisation de cette expertise métier permet d'améliorer encore l'analyse et d'étendre la solution à d'autres grandes filières de l'industrie.

Karen Smiley

Shakeel Mahate

ABB Corporate Research,
Industrial Software Systems
Raleigh (Caroline du Nord, États-Unis)
karen.smiley@us.abb.com
shakeel.mahate@us.abb.com

Paul Wood

Ventyx (société du Groupe ABB)
Sacramento (Californie, États-Unis)
paul.wood@ventyx.abb.com

Paul Bower

Ventyx (société du Groupe ABB)
Atlanta (Géorgie, États-Unis)
paul.bower@ventyx.abb.com

Martin Naedele

ABB Power Systems,
Automation and Communication
Baden (Suisse)
martin.naedele@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] *Evaluating Asset Health: Prioritizing and Optimizing Asset Management*, GreenTech Media (GTM) Research Whitepaper, [en ligne], disponible sur : <http://www.ventyx.com/~media/files/whitepapers/wp-assethealth-ventyx-gtm.ashx?download=1>, consulté le 26 juillet 2013.

Lectures complémentaires

An Anatomy of Asset Management, The Institute of Asset Management (IAM), [en ligne], disponible sur : <http://theiam.org/what-is-asset-management/anatomy-of-asset-management>, consulté le 26 juillet 2013.

Asset Health, Ventyx, [en ligne], disponible sur : <http://www.ventyx.com/en/ga/demand-asset-health.aspx>, consulté le 26 juillet 2013.

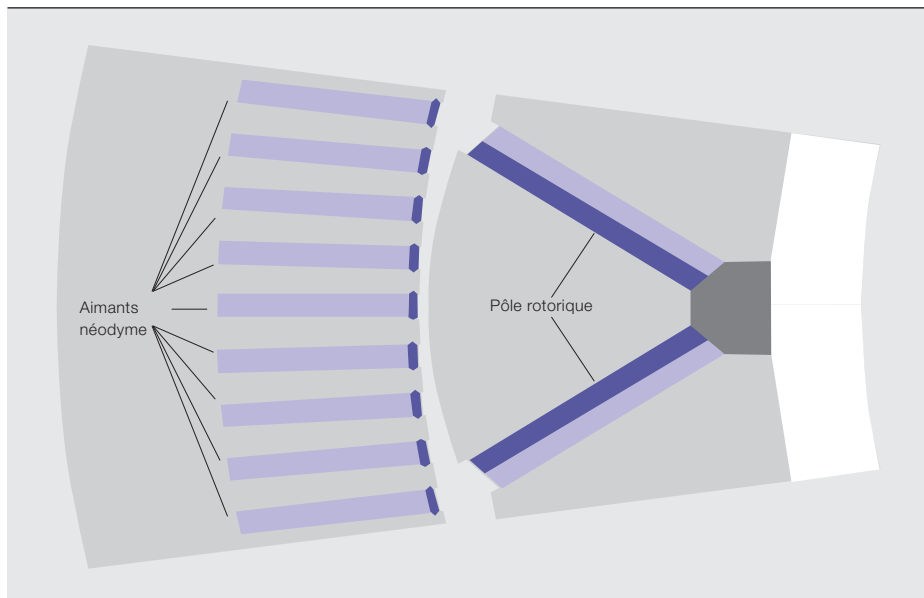
ISO 55000 Standards for Asset Management, The Woodhouse Partnership Ltd (TWPL), [en ligne], disponible sur : <http://www.assetmanagement-standards.com/>, consulté le 26 juillet 2013.



Le vent tourne

Conception et essai d'un système aéro-générateur de 7 mégawatts

ERKO LEPA, TOBIAS THURNHERR, ALEXANDER FAULSTICH – Partout dans le monde fleurissent les éoliennes... Ces lourds investissements obligent à choisir le meilleur de la technologie! Si le marché des aéro-générateurs a jusqu'ici été dominé par les machines asynchrones à double alimentation (MADA), les solutions intégrant des convertisseurs de puissance gagnent du terrain. Sur ce créneau, la moyenne tension (MT) et la moyenne vitesse (MV) offrent les meilleures caractéristiques pour les exploitations éoliennes de grande envergure: les systèmes MT constituent en effet une solution à faible courant qui minimise les pertes Joule, facilite la conception de la génératrice et permet d'exploiter un convertisseur MT robuste à haute disponibilité, quand la moyenne vitesse surclasse toutes les autres solutions aux rangs de la compacité, de la légèreté et du rendement énergétique. Concevoir soigneusement les composants d'un aéro-générateur est économiquement avantageux, comme l'illustrent ici la réalisation et les essais d'intégration d'une unité de 7 mégawatts (MW).



Les solutions à double alimentation et à convertisseur électronique de puissance ont le vent en poupe dans le grand éolien. Elles se distinguent principalement par le type et la taille de la génératrice, ainsi que par la fonction du convertisseur. Longtemps dominante, la première se voit grignoter des parts de marché par la seconde. Plusieurs facteurs expliquent cette évolution, dont les nouvelles règles de couplage au réseau (*grid code*) et l'optimisation de la puissance prélevée à faibles vitesses de vent.

Dans la solution à électronique de puissance, le convertisseur découple la génératrice et la transmission mécanique du réseau; toute la puissance produite est injectée dans le réseau par l'intermédiaire du convertisseur qui régule la génératrice en couple et en vitesse.

Trois techniques de conversion de puissance sont aujourd'hui utilisées, chacune avec un ensemble multiplicateur-génératrice différent: à basse vitesse

(encore appelée « attaque » ou « entraînement » direct), à moyenne vitesse et à haute vitesse. Toutes trois privilégient deux grandes familles de génératrices: les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et les machines asynchrones à cage d'écureuil (MACE).

Conversion basse vitesse

Cette technologie à entraînement direct, sans multiplicateur, exploite des génératrices de grand diamètre (machines synchrones à aimants ou à excitation séparée avec un seul palier) tournant à la vitesse maximale de 30 tours par minute (tr/min).

Conversion moyenne vitesse

On utilise ici un multiplicateur à un ou deux étages accouplé à une MSAP compacte tournant à la vitesse nominale de 100 à 500 tr/min. Vitesse réduite et multiplicateur intégré ménagent la mécanique et limitent l'encombrement.

Conversion haute vitesse

Cette solution à environ 1000–2000 tr/min, mécaniquement similaire à la double alimentation, met en œuvre un multiplicateur traditionnel à trois étages. À son faible encombrement s'ajoutent les avantages de la légèreté.

Choix de la topologie

Chaque solution résultant d'un compromis masse/taille/maintenance, la chaîne de conversion doit être judicieusement choisie en tenant compte de toutes les contraintes de l'aérogénérateur, des exi-

gences de certification et des règles de couplage au réseau.

Dimensionnement en tension

Ce n'est pas le choix de la vitesse qui détermine la tension réseau mais le niveau de puissance requis. Les génératrices débitant jusqu'à 3 MW fonctionnent généralement en basse tension (690 V, par exemple). Au-delà, la moyenne tension (3,3 kV, par exemple) a du bon, en particulier pour réduire le courant du convertisseur et minimiser ainsi les pertes Joule. La construction et l'approvisionnement en pièces de l'aérogénérateur s'en trouvent également simplifiés.

Vitesse de rotation de la génératrice

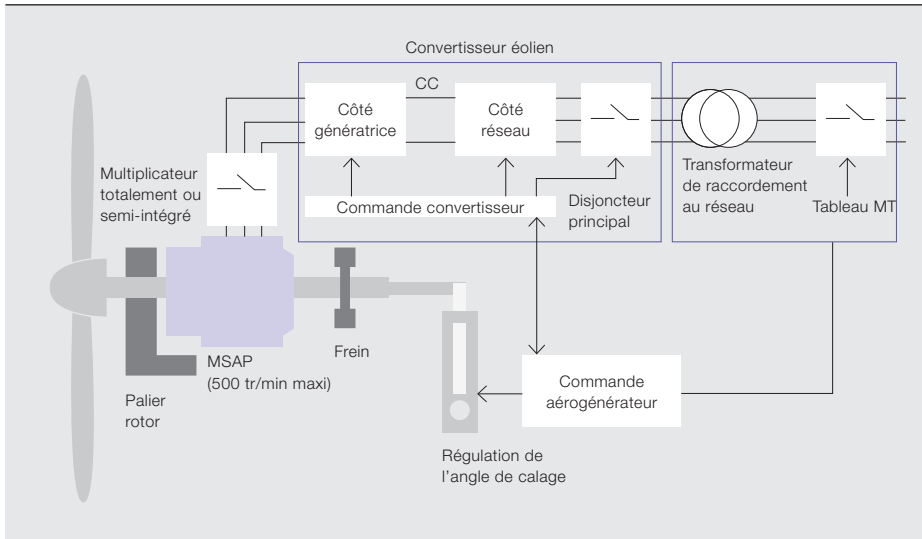
Le choix de la vitesse dépend des caractéristiques de la chaîne électromécanique (multiplicateur, génératrice, convertisseur et transformateur, par exemple).

Questions d'investissement...

Selon l'exécution et la puissance de l'aérogénérateur mais aussi les exigences du réseau et le prix des matériaux, la solution haute vitesse est celle qui demande habituellement le moins d'investissement. La basse vitesse à entraînement direct est d'ordinaire la plus onéreuse, et la moyenne vitesse légèrement plus chère que la haute vitesse. Néanmoins, les coûts de maintenance, la disponibilité et la distribution annuelle des vents contribuant également au coût global du système, seule une analyse de tous ces facteurs peut déterminer la solution la plus avantageuse.

Photo p. 24

Choisir LE bon système aérogénérateur, comme cette génératrice à aimants permanents tournant à moyenne vitesse et refroidie à l'eau, procure bien des avantages sur la durée de vie d'une éolienne. Mais quels sont les choix de conception décisifs ?



Les machines synchrones à aimants permanents affichent un rendement record de plus de 98 %.

... et de rendement

Les calculs montrent que le duo MV-MSAP affiche un rendement record au point nominal : plus de 98 %. Ce rendement est également élevé sous charges partielles et vent faible, autorisant la plus haute production annuelle d'énergie en kilowattheures. Sans compter que les multiplicateurs sont facilement intégrables pour réaliser une solution compacte et que la plus faible vitesse de rotation diminue l'usure des organes de transmission.

Type de génératrice

Le facteur de puissance d'une machine asynchrone (MAS) décroît à mesure que le nombre de pôles augmente et que le pas polaire diminue. Les MAS à faible nombre de pôles concurrencent donc les machines synchrones (MS) dans les applications HV. En moyenne vitesse, le rendement des MAS est nettement inférieur. En général, les performances de la génératrice sont proportionnelles à son diamètre. Les MS pouvant avoir un plus grand nombre de pôles, il est possible d'augmenter le diamètre de l'entrefer et

de disposer de plus de liberté dans le dimensionnement de la fréquence nominale.

Les machines synchrones à excitation bobinée rapide ou par aimants permanents se réservent le domaine de la basse vitesse. Leur rendement est excellent jusqu'à des vitesses de vent de 8 m/s, soit environ 0 à 40 % de la puissance nominale de l'aérogénérateur ; au-delà, elles sont fortement concurrencées par d'autres solutions.

Les MSAP cumulent les avantages d'un rotor plus léger, d'un meilleur rendement et d'une plus petite taille en l'absence de système d'excitation : l'idéal pour l'entraînement direct.

Le créneau de la moyenne vitesse

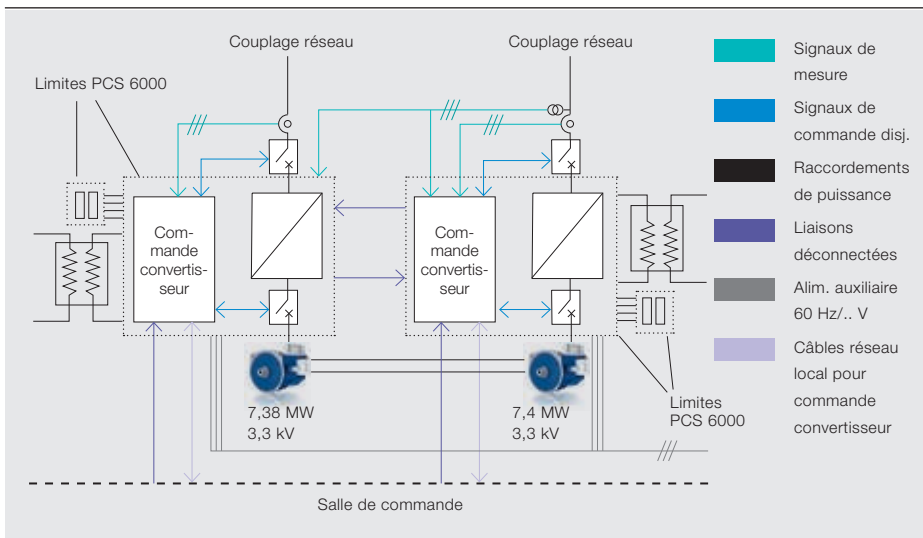
Plusieurs critères présidèrent à la conception et à l'essai d'un ensemble convertisseur-MSAP moyenne vitesse de 7 MW :

- La longue distance qui sépare la génératrice du transformateur et la turbine de forte puissance amenèrent à choisir une MSAP associée à un convertisseur MT ;
- Les calculs démontrèrent la faisabilité des solutions à 14-20 pôles sous l'angle des performances et de la fabrication. Des constructions à 16 et 18 pôles étaient similaires, à quelques petites différences près en matière de pertes, de facteur de puissance, de force contre-électromotrice et de masses actives. La solution à 18 pôles l'emporta du fait des inductances et de l'angle de charge légèrement inférieurs ;



- Des calculs, optimisations et analyses poussés aboutirent à un pôle rotorique en V → 1. Sur la base de simulations de charge soudaine et de courts-circuits avec différentes propriétés d'aimants et températures, on opta pour des néodymes à force coercitive intrinsèque élevée ;
- En conception, il importe d'identifier les fréquences de résonance potentiellement dangereuses pour la mécanique et d'assurer un amortissement et une raideur suffisants pour tolérer les forces en jeu. Il faut également pouvoir adapter la stratégie de modulation et la fréquence de découpage. On sait d'expérience qu'une modification d'environ 50 Hz de la fréquence de découpage décale la fréquence d'excitation du point résonant, réduisant considérablement les nuisances sonores et vibratoires.

4 Montage dos à dos



Convertisseur

Le convertisseur de cet aérogénérateur de 7 MW exploite un IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*) trois niveaux à point neutre clampé, qui allie les faibles pertes par conduction et la fiabilité d'un thyristor entièrement commandable à l'extinction. La tension nominale

réseau par l'intermédiaire du second convertisseur. Dans cette configuration, seules les pertes du système complet doivent être couvertes par le réseau. Elle permet de faire tourner la génératrice à la puissance nominale, à condition que le convertisseur « moteur » soit capable de fonctionner à la puissance

nominale de l'aérogénérateur et puisse couvrir les pertes totales de l'installation.

L'échauffement de la génératrice fut conforme aux calculs et les températures finales des composants du

Un courant plus faible se traduit par moins de pertes Joules et plus de facilité dans la conception et l'approvisionnement en pièces.

convertisseur (3,3 kV) permet non seulement de réduire le câblage et les pertes Joule par rapport à un convertisseur à plus faible tension de sortie, mais aussi les points de défaillance, compte tenu du moins grand nombre de semi-conducteurs utilisés. La modularité des convertisseurs PCS 6000 d'ABB → 2 autorise un agencement sur mesure des composants → 3, que l'appareil soit logé dans le mât, la nacelle ou une enceinte extérieure.

Intégration

L'essai d'intégration porta sur deux génératrices accouplées et reliées chacune au réseau par un convertisseur de fréquence → 4 : un PCS 6000 pilotait la génératrice raccordée en mode « moteur principal », laquelle pilotait l'autre génératrice réinjectant la puissance dans le

convertisseur restèrent inférieures aux limites. La tension à vide de la génératrice, moins élevée que la valeur calculée, réduit le facteur de puissance de la génératrice. Malgré cela, les principales caractéristiques assignées de la génératrice furent conformes aux calculs. L'essai de court-circuit triphasé après échauffement montra que les aimants de la génératrice étaient, comme prévu, protégés de la démagnétisation. Les mesures de vibrations et d'émissions sonores furent bien inférieures aux prescriptions CEI. La génératrice afficha un rendement de 98,17 % au point nominal, dépassant même les attentes à d'autres points de charge.

On testa plusieurs fréquences de découpage sur toute la plage de vitesse, dans différents modes de modulation. Les

meilleurs résultats furent obtenus avec une fréquence porteuse MLI (modulation de largeur d'impulsions) fixe de 720 Hz ou plus, sur toute la plage de vitesse, en asynchrone. Le mode asynchrone donna de bons résultats car la fréquence de commutation et ses bandes latérales ne rencontrèrent aucun point de résonance dangereux, quelle que soit la vitesse de rotation.

La moyenne vitesse l'emporte sur la basse vitesse dans les applications éoliennes de plusieurs mégawatts. C'est une solution à faible courant qui minimise les pertes Joule, facilite la conception de la génératrice et permet d'utiliser un convertisseur MT robuste à haute disponibilité. Équipée de MSAP, elle est compacte, légère et offre le plus haut rendement proche du point nominal. Des essais de chaîne de conversion électrique dos à dos montrèrent que l'ensemble génératrice-convertisseur ABB remplit les exigences du client et de la normalisation CEI. Les écarts entre calculs théoriques et mesures effectives restèrent dans des limites acceptables.

L'association moyenne vitesse-moyenne tension accumule les avantages, tant pour le constructeur éolien, client d'ABB, que pour l'exploitant du parc et le consommateur final.

Erko Lepa

ABB Discrete Automation and Motion, Motors and Generators
Helsinki (Finlande)
erko.lepa@ee.abb.com

Tobias Thurnherr

Alexander Faulstich
ABB Discrete Automation and Motion, Power Conversion
Turgi (Suisse)
tobias.thurnherr@ch.abb.com
alexander.faulstich@ch.abb.com



Freiner pour accélérer

La récupération d'énergie de freinage dope la traction ferroviaire en courant continu

MICHAL LODZINSKI – Si le train et le tramway sont parmi les modes de transport les plus performants, ce sont aussi les plus énergivores, surtout en phase d'accélération. En effet, la quantité d'énergie nécessaire pour accélérer un véhicule pesant plusieurs centaines de tonnes, même à des vitesses modestes, est impressionnante. D'où les énormes bénéfices économiques que l'on peut tirer d'une amélioration de l'efficacité énergétique de la traction électrique. Les techniques de récupération d'énergie de freinage pour accélérer sont bien connues mais elles sont loin d'avoir révélé tout leur potentiel. Sous la bannière ENVILINE™, ABB propose des solutions qui permettent de mieux utiliser l'énergie cinétique dégagée au freinage et d'accroître ainsi la performance énergétique du chemin de fer.



Le recyclage ou la gestion du surplus d'énergie de freinage peut alléger la facture électrique de 10 % à 30 %, sans avoir à investir dans de nouveaux engins ou systèmes de conduite du réseau.

L'efficacité énergétique intéresse beaucoup de secteurs industriels, dont le transport ferroviaire urbain et périurbain. Même si le rail est d'ores et déjà bien plus écopereformant que la plupart des autres moyens de locomotion, les exploitants de réseaux métropolitains, de tramways et de trains légers ont intérêt à améliorer leur efficacité énergétique pour réduire les coûts de fonctionnement mais aussi offrir aux citoyens des transports en commun respectueux de l'environnement. ABB dispose pour cela d'une offre complète de produits, en particulier de gestion du surplus d'énergie de freinage.

Photo

Le transport ferroviaire urbain peut améliorer son efficacité énergétique en mieux utilisant l'énergie cinétique dissipée au freinage. Comment les solutions ENVILINE™ d'ABB répondent-elle à ce besoin ?

Il faut savoir que jusqu'à 80 % de l'énergie totale consommée par un système de transport ferroviaire sont engloutis par la traction électrique. On comprend alors que le recyclage ou plutôt la gestion du surplus d'énergie de freinage puisse alléger la facture d'électricité de 10 à 30 %, sans qu'il soit besoin d'investir dans de nouveaux engins ou systèmes de conduite du réseau.

De nos jours, nombreux sont les véhicules ferroviaires à recycler l'énergie de freinage. Mais la plupart du temps, seule une petite partie de cette énergie ali-

mente les charges, le reste étant renvoyé dans le réseau d'alimentation pour être

Le système de récupération d'énergie ERS réduit les coûts énergétiques en renvoyant l'énergie de freinage du véhicule ferroviaire dans le réseau à courant alternatif.

réutilisé par un véhicule circulant à proximité : c'est l'« échange naturel d'énergie entre trains ». À défaut, la tension réseau augmente et l'excès de puissance est dissipé dans des résistances à bord ou en bordure de voie.



Un recyclage ou une gestion « intelligente » de ce surplus d'énergie de freinage est pourtant un bon moyen de faire chuter la consommation électrique totale. Les solutions ENVILINE™ d'ABB s'y emploient.

Récupération d'énergie ERS

La solution de récupération d'énergie ERS (Energy Recuperation System) → 1,

L'ERS vient en appui des redresseurs grâce à un redressement actif qu'autorise le fonctionnement bidirectionnel du système.

récemment primée au salon international de l'industrie ferroviaire *Railtex 2013* → 2, diminue les dépenses énergétiques en renvoyant l'énergie de freinage du véhicule dans le réseau de distribution à courant alternatif (CA).

Nous l'avons dit, l'énergie de freinage non réutilisée immédiatement est souvent dissipée en pure perte dans des résistances embarquées. Par contre, le

La technologie ERS ENVILINE d'ABB a été récompensée au salon *Railtex 2013* pour sa capacité à alléger jusqu'à 30 % la consommation électrique et à réduire la dissipation d'énergie calorifique dans les tunnels souterrains : un coup de pouce à la « climatisation » du métro londonien !

Créés en 2013, les prix Railtex visent à reconnaître l'excellence dans le ferroviaire. ABB s'est ainsi vu remettre un prix dans la catégorie Électrification des mains de Phil Tufnell, légende vivante du cricket britannique, et de Garry Richardson, célèbre présentateur radio de la BBC, lors d'une cérémonie à Londres, le 1^{er} mai 2013.

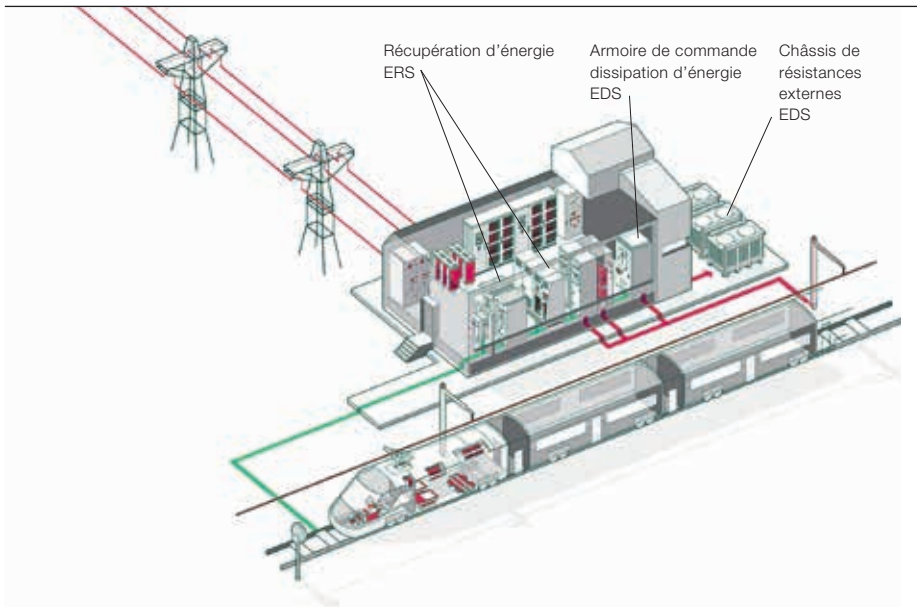
système ERS, installé en bordure de voie, est capable de récupérer cette énergie du réseau de traction électrique en courant continu (CC) pour la réinjecter dans le réseau CA et alimenter les auxiliaires du train comme la climatisation, le chauffage, la ventilation, l'éclairage, etc. L'ERS est en fait un onduleur à IGBT (transistors bipolaires à grille isolée) logé dans la sous-station de traction CC → 3 et raccordé en parallèle aux redresseurs à diodes existants → 4.

Quand il ne sert pas à récupérer l'énergie de traction, l'ERS peut optimiser la qualité de l'alimentation CA en atténuant la puissance réactive mais aussi les harmoniques, par filtrage actif. Il exploite ainsi la capacité de l'onduleur à IGBT à améliorer la forme de l'onde de courant et

à réguler indépendamment l'énergie active ou réactive. Schématiquement, la tension de traction CC est transformée par l'onduleur en une sinusoïde ; modulée par technique MLI (modulation de largeur

d'impulsion) à une fréquence de plusieurs kilohertz, l'onde de sortie est exempte d'harmoniques.

L'ERS offre également un soutien au groupe redresseur en place, grâce au redressement actif rendu possible par la réversibilité du système. Si des véhicules en mouvement ont besoin d'un surplus d'énergie, l'ERS peut l'injecter en utilisant le même transformateur que celui



L'énergie de freinage renvoyée dans le réseau par le système ERS peut également être stockée par le système ESS.

servant à renvoyer l'énergie récupérée dans le réseau CA.

Sa plage de puissance, comprise aujourd'hui entre 0,5 et 1 MW, sera bientôt portée à 2 MW. Apte à une surcharge maximale de 225 % sur une courte durée, il affiche un rendement de 97,5 %. Son faible encombrement et sa compatibilité avec l'existant et les nouveaux systèmes facilitent son installation, tout comme son architecture modulaire garantit son évolutivité, au gré des besoins de puissance. Son entretien réduit et sa longévité se traduisent par d'importantes économies d'énergie sur de nombreuses années. L'ERS est ainsi capable d'abaisser la consommation totale d'énergie d'un système de transport ferroviaire de 10 à 30 %.

Stockage d'énergie ESS

L'énergie de freinage peut aussi être stockée avec le système ESS (*Energy Storage System*) → 5 et → 6 ; la solution est particulièrement utile aux sociétés de transport ferroviaire dont les sous-stations sont directement raccordées au distributeur d'électricité (sans possibilité de revente du surplus d'énergie à bon prix), et à celles qui rencontrent des difficultés de fourniture et de qualité de la tension. L'ESS est le plus petit système de stockage d'énergie en bordure de voie, mais aussi le plus modulaire et le plus souple d'emploi de l'industrie. Il est équipé de supercondensateurs pour un stockage et un recyclage de courte durée, ou de batteries, si l'on a intérêt à revendre l'électricité ou besoin de fortes

puissances. Comme l'ERS, il permet d'économiser 10 à 30 % de la consommation totale d'énergie d'un système de transport ferroviaire.

Mais ce n'est pas tout : il peut être installé à un endroit donné pour soutenir la tension et parer à des creux profonds, mais aussi augmenter la puissance de traction en phase d'accélération ou encore diminuer les pénalités à payer au fournisseur d'énergie en cas de pointes de consommation. Le tout, grâce à un usage intelligent des réserves de puissance disponibles.

Compatible avec les systèmes de train existants, l'ESS se programme sans difficulté pour garantir un fonctionnement optimal sur chaque site. Sa modularité permet un dimensionnement indépendant de la puissance et du stockage. Son exploitation est encore facilitée par un accès à distance avec alerte par courriel en plusieurs langues, comptage d'énergie, tableaux de bord opérationnels et fichiers de données téléchargeables. L'ESS fonctionne sur des lignes de tension nominale 600 V et 750 V ; sa puissance maximale peut être portée à 4,5 MW, et sa capacité de stockage à 60 MJ par ligne d'armoires. Des configurations parallèles sont possibles pour les applications d'envergure.

Au-delà de l'efficacité énergétique

Le système ESS peut fonctionner en source d'alimentation autonome : outre le surplus d'énergie de freinage, il injecte



6 Batteries et armoires de convertisseurs ESS, à Philadelphie (Pennsylvanie, États-Unis)



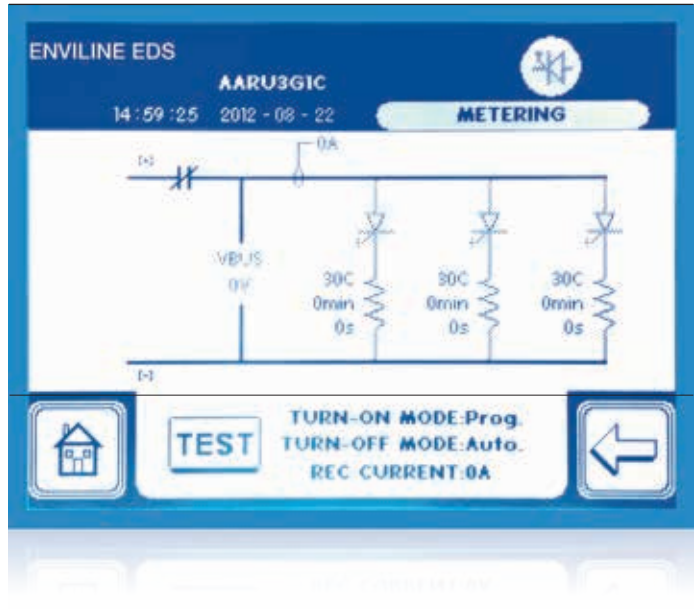
realise par une armoire de commande, dans la sous-station, et un châssis de résistances, à l'extérieur. Il garantit la réceptivité de la voie en phase de freinage régénératif par dissipation du surplus d'énergie qui ne peut être absorbé par d'autres charges à bord ou les trains à proximité. L'EDS est compatible avec toutes les sous-stations de traction CC, nouvelles ou existantes. Son fonctionnement peut aussi être coordonné à celui des systèmes de stockage et de récupération d'énergie en bordure de voie pour maximiser le recyclage de l'énergie de freinage et ne recourir qu'en dernier ressort à la dissipation dans des résistances. L'armoire de commande est directement intégrée aux appareillages CC ou montée à part, avec d'autres équipements (sectionneurs négatifs et interrupteurs de mise à la terre automatique, par exemple).

Les résistances sont implantées à l'extérieur de la sous-station → 3, où la chaleur peut se dissiper de manière passive,

sans ventilateur : une solution économique, n'engendrant ni nuisance sonore, ni pollution électromagnétique.

En plus d'une protection contre les surtensions, l'EDS améliore la qualité du courant et la fiabilité d'exploitation. Parmi ses autres avantages, citons :

- Un coût moindre par rapport aux systèmes à hacheurs ;
- Des coûts de fonctionnement et de maintenance inférieurs à ceux des unités embarquées ;
- Une maintenance facilitée par la télésurveillance et l'accès distant ;
- Une conduite évoluée avec des fonctions de tests à distance → 7 et un amorçage programmable pour optimiser la performance et éviter les déclenchements intempestifs ;
- Un équilibrage temporel du fonctionnement des transistors *GTO* (*Gate Turn-Off*) et des résistances pour répartir l'usure des composants et maximiser leur durée de vie.



La gamme ENVILINE compte d'autres produits, comme le redresseur de traction à pont de diodes qui transforme le courant alternatif en continu, couramment utilisé dans les infrastructures de transport urbain → 4.

En optant pour les solutions ENVILINE, les clients bénéficieront non seulement de la longue expertise d'ABB en traction électrique mais aussi d'une réponse globale, évolutive et pérenne à leurs attentes en matière d'économie et de performance énergétique.

Pour en savoir plus, consultez le site www.abb.com/enviline ou contactez-nous à l'adresse enviline@pl.abb.com.

Michał Łodźinski

ABB Discrete Automation and Motion,
Power Control
Aleksandrów Łódzki (Pologne)
michal.lodzinski@pl.abb.com

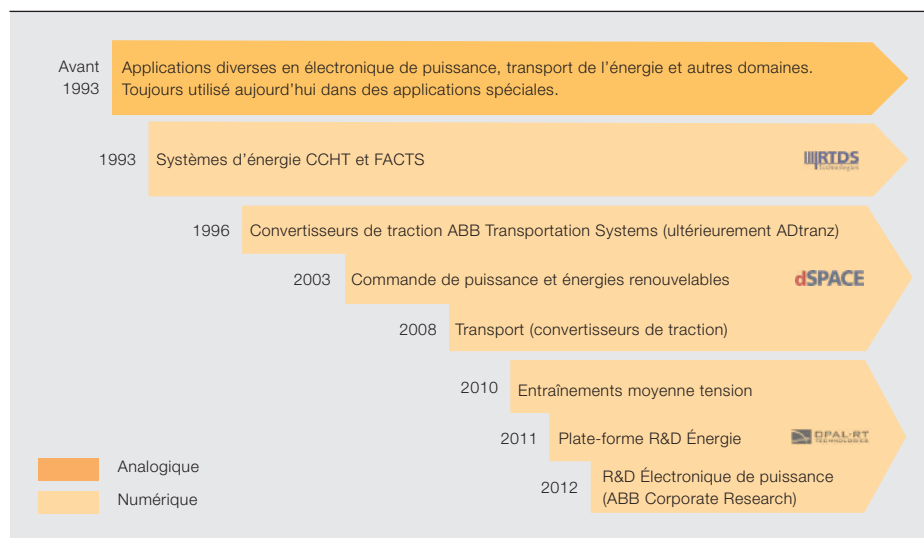


Direct temps réel

L'électronique de puissance sur la voie de la simulation temps réel

ROXANA IONUTIU, SILVIA MASTELLONE, XINHUA KE, ERICH SCHEIBEN, NIKOLAOS OIKONOMOU, DIDIER COTTET, DANIEL STUMP – La simulation numérique en temps réel a révolutionné la chaîne technologique des systèmes de régulation électronique en rapprochant le développement des stratégies de commande avancée et le déploiement des produits à succès. C'est sans doute en électronique de puissance que la discipline se heurte aux plus grands défis, face à des systèmes commutés complexes qui repoussent les limites de performance de la simulation. ABB a fait longtemps figure de pionnier dans la réalisation de simulateurs temps réel toujours plus pointus pour fiabiliser et tester efficacement et à moindre frais le dernier cri des systèmes électroniques de puissance.

1 Vingt ans de simulation temps réel ABB



Les outils de simulation ont favorisé le développement industriel depuis l'apparition des ordinateurs analogiques et numériques au début des années 1950. La très grande puissance de calcul dont disposent aujourd'hui les ingénieurs permet la simulation rapide de systèmes complexes. Son apport est particulièrement précieux en contrôle-commande où, pour tester le fonctionnement du régulateur à vitesse nominale, le modèle numérique doit tourner au même rythme que son homologue physique réel, c'est-à-dire « en temps réel ».

La simulation temps réel en électronique de puissance joue un rôle crucial aux étapes successives de la chaîne de développement qui permet de traduire les nouvelles lois de contrôle-commande en produits aboutis.

Des premiers outils analogiques « maison » aux plates-formes numériques haut de gamme du commerce, ABB s'est de tout temps appuyé sur la simulation temps réel pour étayer les avancées du contrôle-commande à base d'électronique de puissance → 1. La simulation est en effet capitale pour améliorer les stratégies de commande, mais aussi la qualité des logiciels et des matériels avec la réalisation d'essais rapides et

performants, en amont du cycle de développement. Les simulateurs temps réel ont pour fondement la technologie HIL (*Hardware-In-the-Loop*) qui fait le lien entre les algorithmes de traitement tournant sur la cible matérielle (processeurs DSP, FPGA, etc.) et les modèles logiciels qui émulent les convertisseurs statiques et leur environnement. Sur cette plate-forme de test, la commande s'exécute comme si elle pilotait le système physique avec toutes ses fonctionnalités.

L'électronique de puissance moderne et son extraordinaire dynamique sont des casse-têtes pour la simulation temps réel car elles exigent de nouveaux modes de conception des modèles à structure variable, moyennant des pas de temps de simulation sous contraintes et un minimum de calcul.

La simulation temps réel est aujourd'hui massivement utilisée par ABB qui s'attache à la faire évoluer pour répondre aux besoins grandissants en calcul, résoudre la complexité accrue des systèmes et accompagner les progrès de l'algorithmique.

La chaîne technologique

On appelle « chaîne technologique » le processus qui régit l'amélioration des concepts technologiques d'une généra-

tion à l'autre. La simulation temps réel est un maillon fort de la chaîne technologique des convertisseurs de puissance ABB.

La démarche débute par la connaissance de l'existant (génération $k-1$), prélude à la formulation de nouvelles idées conduisant à l'amélioration du produit. Celles-ci doivent être mises en œuvre, testées et validées avant de pouvoir incorporer le nouveau concept de contrôle-commande à un produit de génération k → 2.

La simulation temps réel facilite cette étape de conceptualisation en fournis-

La simulation temps réel se heurte à deux problématiques : les contraintes de synchronisation ainsi que la rapidité et la précision des modèles physiques.

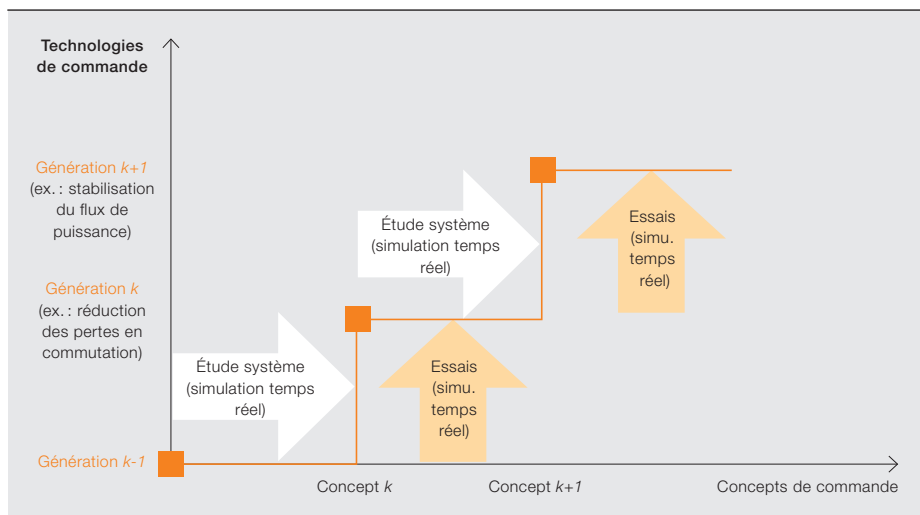
sant un environnement propice à l'exploration et à la compréhension du comportement du système avant de définir une stratégie de contrôle-commande.

Photo p. 34

Dans de nombreuses applications courantes, comme le ferroviaire, la simulation temps réel est un moteur du développement des systèmes à électronique de puissance embarqués.

La simulation temps réel en électronique de puissance joue un rôle crucial à plusieurs étapes de la chaîne technologique qui transforme les idées en produits.

2 La chaîne technologique



Une fois développé et implanté dans le convertisseur, le concept doit d'abord être rigoureusement testé aux normes avant de passer au déploiement du produit. Cette phase englobe plusieurs étapes d'essais sous divers environnements, de la simulation hors ligne à la simulation temps réel pour finir sur le système réel. Les simulations hors ligne ont deux défauts caractéristiques : elles ne reproduisent pas assez fidèlement le comportement en boucle fermée du système incorporant logiciel et matériel de contrôle-commande réels, et elles coûtent trop cher en calcul, au regard du niveau de précision requis. Qui plus est, le test du logiciel du convertisseur sur le système réel peut s'avérer coûteux en argent (jusqu'à 60 000 dollars par jour) et en temps, voire prohibitif en conditions extrêmes (courts-circuits, surtensions ou surintensités, charges importantes, hautes vitesses, etc.).

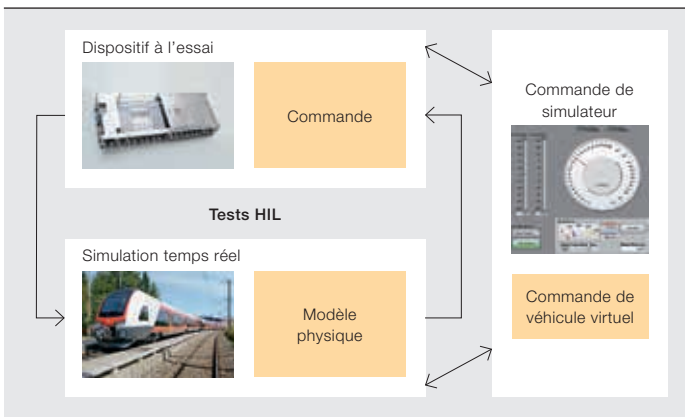
La simulation temps réel est la solution pour gérer la complexité des systèmes actuels. Elle pallie les lacunes du test hors ligne et sur site en s'appropriant la puissance de l'émulation en ligne. Elle reproduit en temps réel la complexité du système physique tout en préservant les atouts de la simulation : flexibilité, mise en œuvre rapide, débogage facile et couverture de test élevée. Elle permet enfin de tester minutieusement et d'améliorer le logiciel de commande dans les premières phases du cycle de développement, garantissant la qualité du logiciel et du produit, et écourtant la mise en service sur la cible réelle.

Des équipes spécialisées d'ingénieurs travaillent sans relâche pour lever les verrous technologiques de la simulation temps réel.

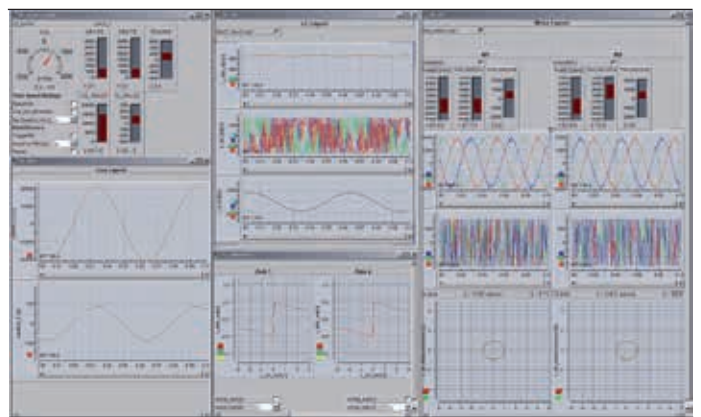
Défis

Pour fiabiliser le développement et le test des systèmes de contrôle-commande, la simulation temps réel doit reproduire avec une grande précision l'environnement de fonctionnement de la commande. En traction ferroviaire, par exemple, la commande agit sur l'électronique de puissance du convertisseur embarqué. Le simulateur émule cet environnement à l'aide de configurations matérielles et logicielles spéciales dans lesquelles des modèles mathématiques complexes, regroupés sous le vocable générique de « modèle physique », se substituent au convertisseur et au train réels, la commande restant couplée en boucle fermée au modèle physique → 3. À partir des données d'entrée reçues de la commande (impulsions de commutation des éléments semi-conducteurs du convertisseur, par exemple), le modèle calcule les sorties nécessaires (valeurs de tension, courant et vitesse, etc.) qu'il renvoie à la commande pour le cycle de simulation suivant. Les états correspondants du modèle physique peuvent être visualisés, contrôlés et manipulés sur écran → 4. Ce simulateur temps réel comporte en outre une unité de commande de véhicule virtuel sur laquelle l'effort de traction souhaité ou la consigne de vitesse sont paramétrés à l'identique d'un véhicule réellement piloté par conducteur.

3 Simulation temps réel sur plate-forme HIL avec commande de véhicule virtuel



4 Affichage temps réel de l'état de l'application pour interaction directe avec le modèle physique



5 Le délai de réponse du simulateur temps réel à l'envoi des impulsions de commutation par la commande ne doit pas dépasser deux fois le pas de temps de simulation.

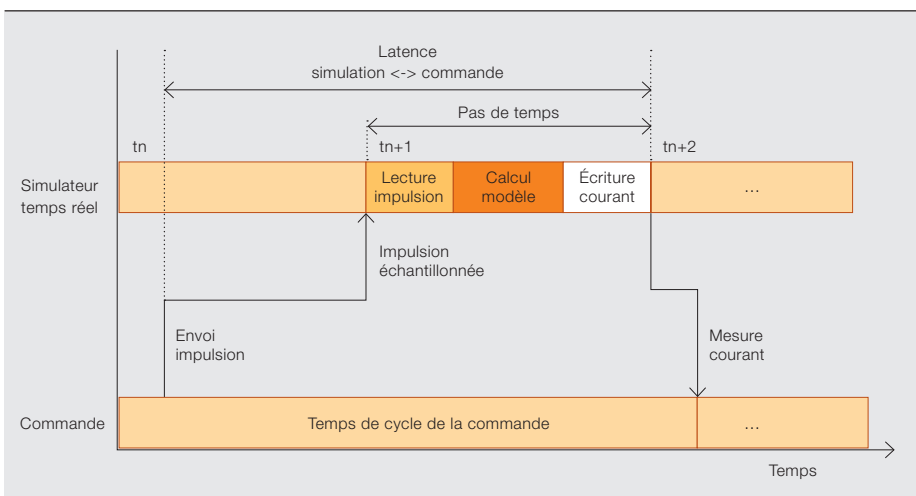


ABB a développé plusieurs simulateurs temps réel en partenariat avec des éditeurs de logiciels dédiés à un secteur d'activité donné → 1.

Si ces outils se distinguent par leur taille, leur plate-forme d'exécution ou les particularités de la modélisation de l'application visée, tous se heurtent aux mêmes difficultés, notamment deux critères interdépendants, inhérents à la simulation temps réel : les contraintes de synchronisation ainsi que la rapidité et la précision des modèles physiques.

Temps critique

Premier impératif : synchroniser temps réel et temps simulé. Autrement dit, les entrées, sorties et états obtenus après un certain temps de simulation doivent être identiques à ceux du système réel, à échéance du même intervalle de temps. La vitesse à laquelle l'horloge temps réel réalise cette synchronisation est donnée par le pas de temps du simulateur, qu'il convient de choisir aussi court que possible

pour minimiser le temps de latence du système simulé, mais suffisamment long pour permettre au simulateur d'exécuter les opérations requises en une seule passe, sans débordement → 5.

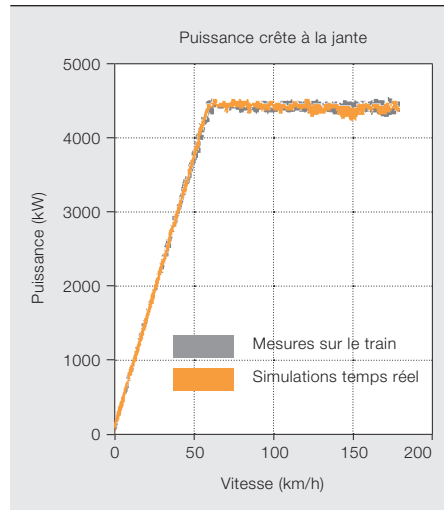
Vitesse et précision

La commutation haute fréquence (kHz) en électronique de puissance impose des temps de cycle de commande compris entre 100 et 300 microsecondes (μs), et donc des cycles de simulation temps réel encore plus courts (inférieurs à $60 \mu s$). Des simulations rapides et précises avec des pas de temps de l'ordre de la microseconde sont ici plus problématiques que dans des applications à plus faible dynamique de calcul (automobile ou robotique, par exemple) où les pas de temps peuvent atteindre des millisecondes.

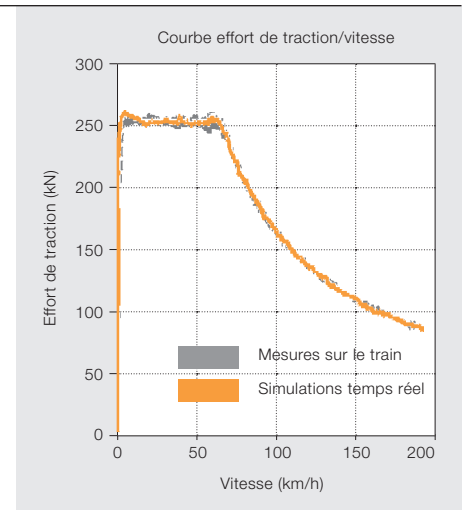
Pour gagner cette course contre la montre, les systèmes temps réel d'ABB s'appuient sur les solutions matérielles et logicielles dédiées des fournisseurs,

couplées à l'expertise du Groupe en modélisation et simulation des circuits électroniques de puissance. Une plate-forme matérielle rapide ne suffisant pas à la tâche, il faut optimiser les modèles physiques et les programmes de résolution numériques. ABB investit beaucoup de savoir-faire dans cette recherche d'efficacité maximale.

La difficulté réside surtout dans le traitement des impulsions de commutation reçues de la commande et envoyées aux interrupteurs du convertisseur, comme les transistors IGBT. Les simuler avec précision impose une granularité encore plus fine que le temps de cycle de la simulation temps réel ; la technologie FPGA s'y emploie [1]. Pour simuler le convertisseur en mode redresseur, on modélise également les événements de commutation internes causés par les diodes auto-commutées. Les fréquents changements de position des interrupteurs (amorçages et blocages) et la nature non linéaire de certains compo-



7a Simulation temps réel



7b Concordance des mesures sur le train et
des simulations temps réel

L'avenir est à des solutions de simulation « intelligentes » qui réduisent l'effort de modélisation des systèmes commutés de complexité croissante tout en satisfaisant aux exigences de vitesse et de précision.

sants du modèle compliquent l'affaire car il faut reconnaître et résoudre sur-le-champ, en cours d'exécution, différentes configurations de commutation. Ces problématiques peuvent trouver une solution dans les simulations hors ligne utilisant des algorithmes numériques d'intégration temporelle poussés, mais ces méthodes sont trop coûteuses en calcul pour une utilisation temps réel. D'où le besoin de solutions spécifiques. Au sein d'ABB, des systèmes de grande complexité issus de différents domaines de l'électronique de puissance peuvent être simulés sur des plates-formes temps réel « métier », comme le simulateur dSPACE pour la traction ferroviaire → 1.

Le virtuel au labo

Dans le monde des transports, la simulation temps réel fournit des configurations matérielles et logicielles flexibles aux applications de traction ferroviaire de 100 kW à plus de 6 MW de puissance, à courant alternatif (CA) triphasé/monophasé ou à courant continu (CC), Diesel-électrique ou multisystème.

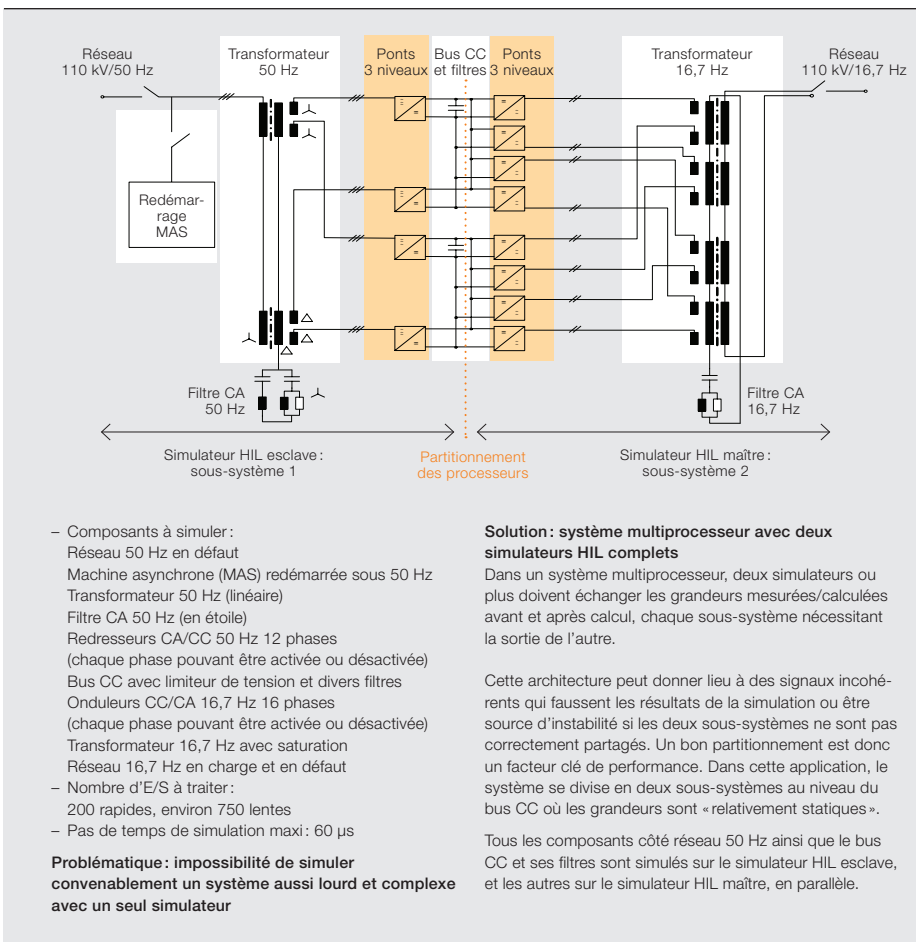
La modélisation temps réel porte sur l'alimentation de la locomotive (caténaire, pantographe et disjoncteur principal), le transformateur, le convertisseur de traction (convertisseur réseau, bus continu avec filtre accordé, convertisseur de moteur), le moteur, la transmission mécanique (engrenages et essieux), le convertisseur auxiliaire, le groupe Diesel, le stockage d'énergie et le contact roue-rail. Facilement configurables, les modèles physiques répondent aux attentes du

client avec la prise en charge de plusieurs types de couplages de transformateurs, de topologies de convertisseurs (à deux ou trois niveaux) ou de montages d'essieux moteurs (entraînement individuel ou par bogie), etc.

Un exemple de projet utilisant la plateforme de simulation temps réel d'ABB : l'automotrice articulée à plancher surbaissé *FLIRT* (*Fast Light Innovative Regional Train*) du Suisse Stadler Rail. La fourniture ABB comprend des convertisseurs → 6 et transformateurs de traction, et des équipements basse tension. Le transformateur et le convertisseur transforment l'alimentation CA monophasée à fréquence fixe du réseau en une alimentation triphasée à fréquence variable pour entraîner les moteurs et les roues. Toute la chaîne de traction, de l'alimentation au contact roue-rail, est modélisée sur la plate-forme de simulation de façon à tester les algorithmes de traitement et les matériels de commande en boucle fermée, comme sur un train réel.

Un critère important de performance est l'évolution de l'effort de traction en fonction de la vitesse, qui détermine la puissance du train. Dans le cas de FLIRT, une puissance crête de 4500 kW à la jante est développée avec un effort de traction maxi de 250 kN, à une vitesse de pointe de 200 km/h. La caractéristique effort de traction/vitesse est simulable en temps réel → 7 : on applique un effort au démarrage de 250 kN jusqu'à ce que l'on atteigne la puissance crête de 4500 kW, puis on diminue l'effort

8 Configuration de simulation temps réel multiprocesseur d'un convertisseur de traction ferroviaire triphasé 110 kV/50 Hz -> monophasé 110 kV/16,7 Hz



pendant l'accélération du train jusqu'à la vitesse maximale de 200 km/h, tout en maintenant sa puissance constante. La coïncidence des courbes de la simulation → 7a et de celles des mesures sur le train → 7b prouve la fiabilité de la simulation temps réel.

80 MW en laboratoire

Autre projet ambitieux : la simulation d'un convertisseur statique de fréquence responsable des échanges d'énergie entre le réseau électrique triphasé à 50 Hz et le réseau ferroviaire monophasé à 16,7 Hz. La résolution d'un problème d'une telle ampleur passe par la mise en parallèle des processeurs → 8.

Destination future

De nos jours, l'apport de la simulation temps réel à la commande électronique de puissance est incontestable. Sans surprise, les demandes d'innovation portent sur une plus grande efficacité des essais et la prise en compte de cas de figure encore plus délicats ; c'est là qu'intervient l'automatisation du test logiciel avec son environnement d'exé-

cution et d'enregistrement périodiques, sans intervention humaine, qui raccourcit considérablement les phases d'essai et de mise en service de la commande.

De son côté, la modélisation temps réel s'oriente vers des solutions « intelligentes » qui allègent la tâche sur des systèmes commutés toujours plus complexes. Les techniques actuelles exigent une compréhension fine du comportement du système tout entier et des compétences mathématiques poussées pour construire des modèles et mener des simulations à la hauteur des exigences de vitesse et de précision. Les systèmes à électronique de puissance se complexifiant, les solutions de simulation optimisées qui exploitent le parallélisme et la hiérarchie des modèles gagnent en importance. Dans cette optique, la nouvelle méthode de quantification des variables QSS (*Quantized State System*) est appelée à révolutionner la simulation numérique. Selon ce principe, on ne discrétise plus le temps mais on quantifie les variables d'état, ce qui permet de mieux simuler les systèmes changeant

souvent de topologie (typiques de l'électronique de puissance) en utilisant un formalisme à événements discrets [2].

Que ce soit dans la production ou le transport électrique, les énergies renouvelables, les entraînements industriels ou la traction ferroviaire, la simulation temps réel ABB des systèmes à électronique de puissance, en collaboration étroite avec les fournisseurs de plates-formes dédiées, continuera d'avancer ses pions. Elle tirera profit des meilleures performances des calculateurs, de la sophistication des modèles et de la plus grande rapidité des algorithmes de résolution pour innover rapidement d'une génération de commande à l'autre.

Roxana Ionutiu

Erich Scheiben

Xinhua Ke

Daniel Stump

ABB Discrete Automation and Motion,
Power Conversion

Turgi (Suisse)

roxana.ionutiu@ch.abb.com

erich.scheiben@ch.abb.com

xinhua.ke@ch.abb.com

daniel.stump@ch.abb.com

Silvia Mastellone

Nikolaos Oikonomou

Didier Cottet

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

silvia.mastellone@ch.abb.com

nikolaos.oikonomou@ch.abb.com

didier.cottet@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] Terwiesch, P., *et al.*, "Rail vehicle control system integration testing using digital hardware-in-the-loop simulation", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, n° 3, p. 352-362, mai 1999.
- [2] Bergero, F., *et al.*, "A Novel Parallelization Technique for DEVS Simulation of Continuous and Hybrid Systems", *Simulation*, 2013.

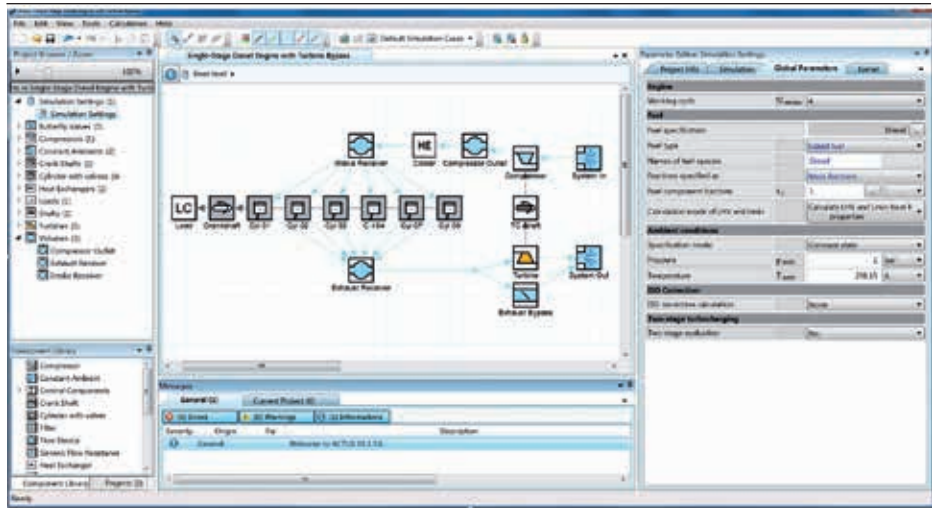


Turbomachines

ACTUS, le nouveau logiciel de simulation ABB pour les gros moteurs à combustion interne turbosuralimentés

THOMAS BÖHME, ROMAN MÖLLER, HERVÉ MARTIN – Les performances d'un moteur thermique à turbocompresseur dépendent beaucoup de son système de suralimentation. L'interaction moteur-turbocompresseur est complexe ; pour en maîtriser les caractéristiques, faire les meilleurs choix d'assemblage et optimiser la conception, la simulation s'impose chez la plupart des motoristes. Ils font pour cela appel à des simulateurs du commerce, parfois complétés de développements spécifiques. Si ces outils sont habituellement d'une très grande qualité et richesse fonctionnelle, ABB continue d'utiliser ses propres logiciels « maison », taillés sur mesure pour ses besoins de simulation de grands moteurs à combustion. Nombreux sont les apports de la simulation tant à des fins commerciales qu'expérimentales : élaboration du cahier des charges optimal, étude sur bancs d'essais, développement de nouveaux produits et concepts technologiques.

1 Écran de l'éditeur graphique ACTUS représentant un modèle de moteur 6 cylindres à turbocompresseur monoétagé et soupape de décharge



La simulation des moteurs suralimentés est une tradition de longue date chez ABB. Les premiers calculs sur ordinateur remontent aux années 1960 avec l'avènement des calculateurs numériques [1,2], qui n'ont cessé depuis de progresser et d'étendre leur champ d'action. Au début de la décennie 1980, les méthodes de calcul étaient regroupées sur une seule plate-forme de simulation certes évolutive mais monolithique, dénommée *SiSy (Simulation System)* [3].

Après plus de 20 ans de développement continu, il devint de plus en plus difficile de faire évoluer ce logiciel. On décida alors de le remplacer par un nouvel outil modulaire, baptisé ACTUS (*Advanced Computation of Turbocharging Systems*), composé de deux parties : une interface graphique moderne pour les simulations, un noyau pour les calculs.

Interface graphique

Le moteur est construit en assemblant les composants d'une bibliothèque logicielle (tubulures, soupapes, compresseurs, cylindres, arbres, etc.) et en définissant leurs interactions fluidiques, mécaniques, thermiques ou les échanges de signaux. Cette topologie définie, les paramètres de chaque élément sont renseignés dans l'éditeur dédié (à droite de

l'écran → 1). Un éditeur de cas permet d'enchaîner les simulations pour simuler, par exemple, les multiples points de fonctionnement du moteur en une seule passe. L'interface donne aussi facilement accès à une importante base de données recensant les performances détaillées de toute l'offre Turbocompresseurs d'ABB depuis les années 1970.

Noyau

Le noyau d'ACTUS résout les équations du modèle du système et calcule les résultats. Le premier objectif de la simulation est de prédire les aspects les plus significatifs du système moteur

complet, plutôt que de s'attacher aux détails. S'il est aujourd'hui possible de simuler les échanges gazeux d'un cylindre moteur par CFD 3D, ce haut degré de raffinement ne convient pas à un calcul de niveau système car il demanderait beaucoup trop de temps en optimisation et une connaissance très précise de toutes les géométries du moteur, ce dont ne dispose pas ABB.

Les modèles utilisés dans ACTUS sont donc des représentations mathématiques simplifiées, dérivées de modèles physiques de premier principe. La simulation système d'un moteur turbosuralimenté exige un grand nombre de ces modèles pluridisciplinaires : mécaniques pour le vilebrequin, les arbres et paliers du turbocompresseur ; thermiques pour le transfert de chaleur ; chimiques pour

les émissions ; thermodynamiques pour les propriétés des gaz ainsi que la compression, la détente, l'écoulement et le stockage des fluides.

Pour les processus complexes (combustion dans le cylindre, par exemple), ces modèles sont habituellement complétés par des extensions empiriques puisées

ACTUS se compose d'une interface graphique pour construire les simulations et d'un noyau pour exécuter les calculs.

dans la littérature du domaine, tirées de partenariats de recherche ou encore développées en interne par ABB.

Convergence accélérée

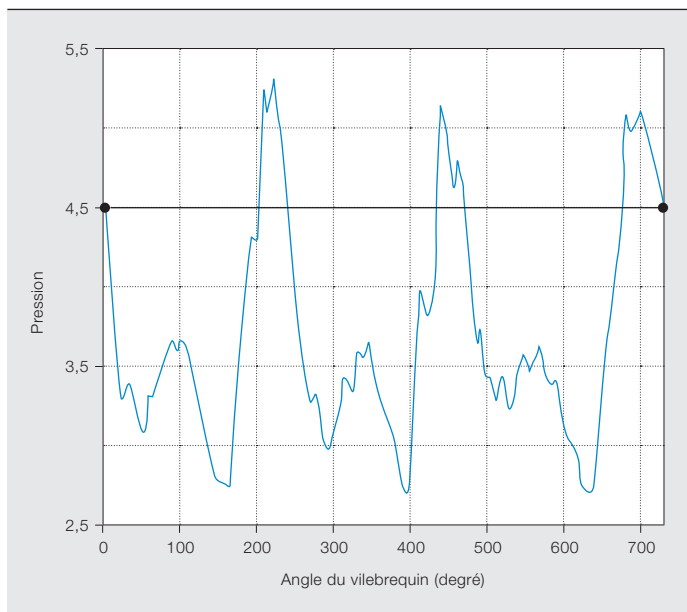
La plupart des gros moteurs tournent longtemps sous charge constante. Les points de fonctionnement à charge constante jouent donc un rôle prépondérant dans l'optimisation de la conception.

Le moteur à combustion interne étant par nature un processus instable, un point de fonctionnement constant n'est pas un état permanent mais plutôt un

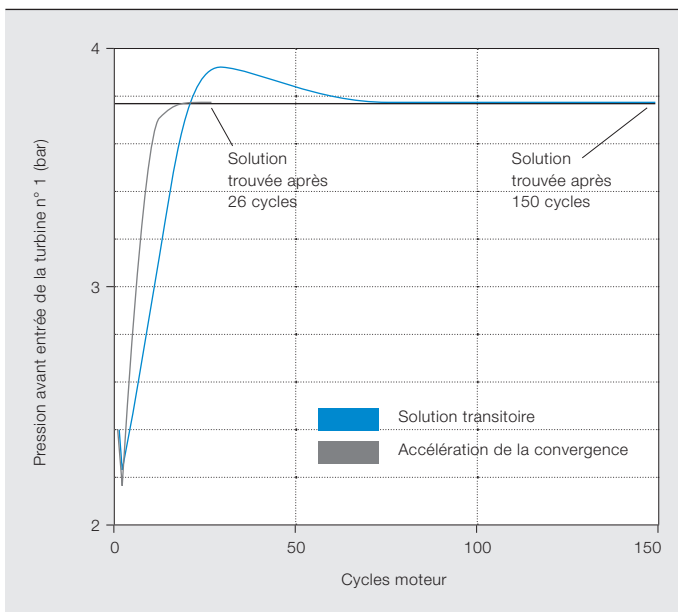
Photo p. 40

Seul un logiciel de simulation développé en interne peut lever les immenses complexités des turbocompresseurs de moteurs.

2 Pression avant entrée de la turbine n° 1 sur un cycle moteur pour un point de fonctionnement permanent (à pleine charge)



3 Avantage de l'accélération de la convergence : le nombre de cycles de calcul de la solution périodique passe de 150 à 26.



En utilisant ACTUS pour prescrire le couple turbocompresseur-moteur optimal, les commerciaux d'ABB satisfont la plupart de leurs clients.

régime présentant une périodicité, comme l'illustre en → 2 la trajectoire de la pression à proximité de l'entrée de la turbine, sur un cycle moteur.

La solution est périodique lorsque, le cycle achevé, tous les états dynamiques du système coïncident avec l'état initial. La méthode la plus répandue pour déterminer cette solution périodique consiste à effectuer une simulation transitoire assez longue pour faire disparaître toutes les perturbations de départ. Compte tenu des fortes inerties de rotation du turbocompresseur et des vilebrequins, il faut normalement plus de 100 cycles moteur pour obtenir la solution. Pour accélérer ces simulations, ACTUS emploie une méthode d'optimisation dénommée « accélération de la convergence » qui réduit considérablement le nombre de cycles moteur → 3. Quelques secondes suffisent pour calculer, sur un PC classique, les régimes de fonctionnement permanent de moteurs types.

Le bon accord

Cette accélération de la convergence est couplée à une autre spécificité d'ACTUS permettant de calculer le jeu de valeurs d'entrée de la simulation qui va donner le jeu désiré de valeurs de sortie. Cette fonctionnalité « ACTUS Match » est utile aux applications de conception qui ont souvent besoin de définir une configuration système capable de fournir le résultat souhaité. Exemple : pour adapter le turbocompresseur au moteur, il est cou-

rant de déterminer la dimension de la turbine qui permettra au moteur de fonctionner avec le rapport air/carburant prescrit par le constructeur et une charge donnée. Une tâche délicate car ce rapport A/C n'est pas une entrée mais plutôt un résultat de la simulation dépendant de la pression de l'air de suralimentation, elle-même fonction de la taille de la turbine.

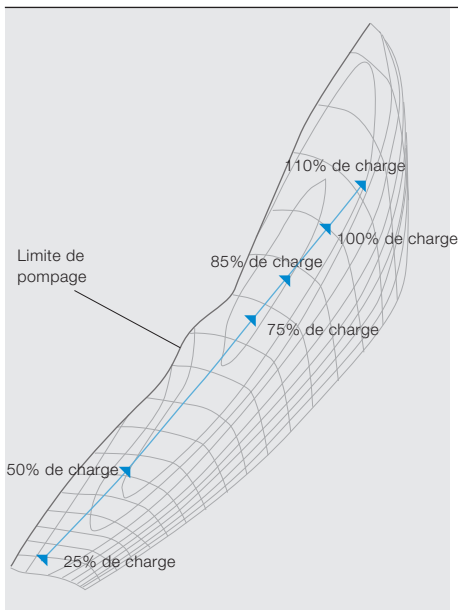
ACTUS Match permet ici de spécifier la turbine tout en tenant compte de la quantité de carburant nécessaire au régime moteur souhaité. ACTUS Match effectue directement ce calcul, en à peine plus de temps qu'une simulation classique, quand la plupart des simulateurs du commerce a recours à un processus d'optimisation externe qui augmente notablement la durée et la complexité de la tâche pour l'utilisateur. La grande puissance de calcul d'ACTUS Match est gage de performance en phases de conception et d'optimisation.

Application commerciale

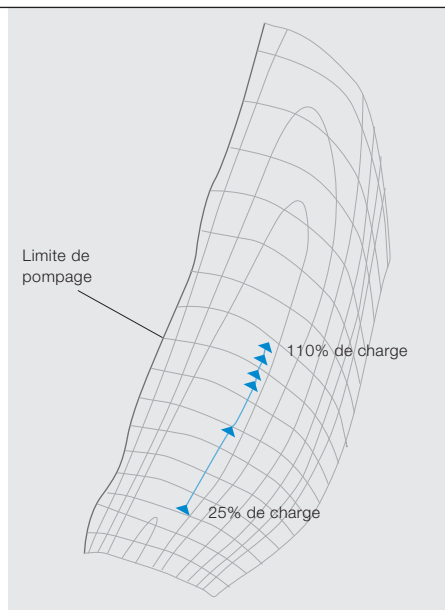
Lancé en 2012, ACTUS compte déjà une trentaine d'utilisateurs au sein des équipes de vente et de recherche ABB, et des représentations du Groupe dans le monde entier.

Les commerciaux l'emploient couramment pour établir le cahier des charges du turbocompresseur adapté à un moteur particulier ; une tâche que confie d'ailleurs la plupart des clients à ABB.

4 Champs caractéristiques de compression d'un turbocompresseur à deux étages pour centrale d'énergie



4a Compresseur basse pression



4b Compresseur haute pression

Les caractéristiques de fonctionnement du moteur et, éventuellement, les mesures récupérées des précédentes générations de moteurs similaires servent de base à la réalisation du modèle de simulation qui permettra ensuite de déterminer le turbocompresseur optimal.

L'affaire se corse pour les systèmes moteurs complexes, par exemple équipés d'un turbocompresseur à deux étages et d'une soupape de décharge pour régler la pression de suralimentation. Dans ce cas, le motoriste commence toujours par définir les régimes de fonctionnement souhaités du moteur. Charge ensuite à ABB de choisir une configuration compresseur-turbine qui maximise le rendement de la suralimentation et donc de la motorisation. En parallèle, l'étude doit se plier à bien d'autres contraintes : marge de réglage de la soupape de décharge, distance minimale à la limite de pompage du compresseur, vitesses de rotation maximales admissibles du turbocompresseur et températures d'entrée de turbine maximales admissibles. Des prescriptions que la fonction ACTUS Match produit aujourd'hui en quelques minutes, quand il fallait plusieurs heures dans le passé → 4.

Recherche

ACTUS est utilisé par la division Turbo-compresseurs d'ABB pour étudier les nouvelles techniques de suralimentation et leur impact sur le moteur à combustion. Certaines études ont d'ailleurs été

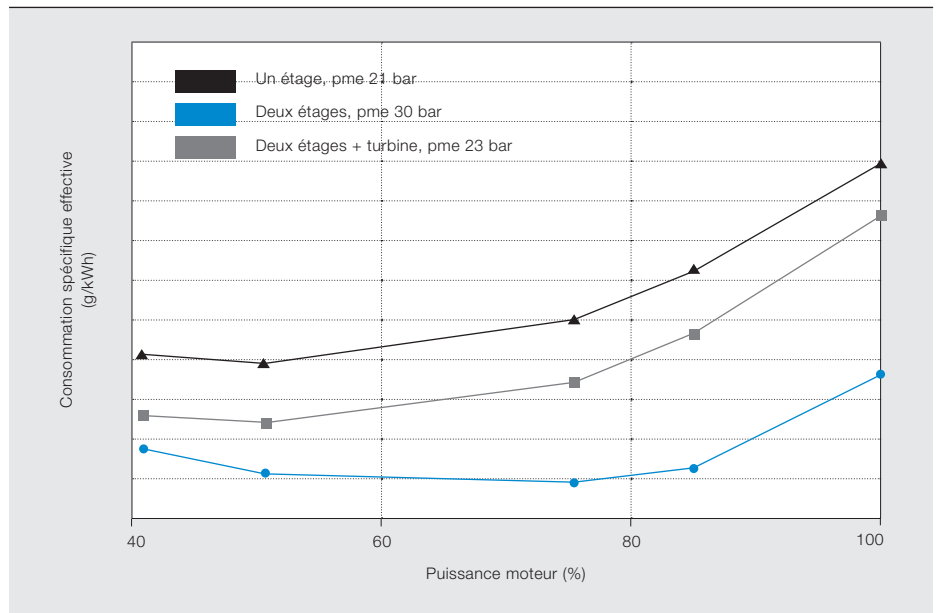
présentées au congrès CIMAC Shanghai 2013 [4,5,6].

La tendance est aujourd'hui aux turbocompresseurs à deux étages, qui offrent des rapports de compression beaucoup plus élevés. Si les avantages de la technologie sont bien compris pour les moteurs à quatre temps et déjà au catalogue de plusieurs motoristes, son potentiel pour les gros moteurs deux temps n'est pas totalement cerné. Les études de simulation menées dans ce sens ont révélé le potentiel d'économies totales de carburant, à différents régimes de charge [4].

Dans le cas usuel en → 5 (courbe noire), le moteur est suralimenté par un turbocompresseur monoétagé, à une pression moyenne effective (pme) au frein de 21 bar. Un turbocompresseur à deux étages avec, soit une pme augmentée (courbe bleue), soit une turbine ou encore un système de récupération de chaleur (courbe grise), fait chuter la consommation de carburant totale. À noter que ces résultats sont une prédiction simplement basée sur les modèles de simulation ayant servi à étudier le potentiel des futurs choix techniques de turbosuralimentation, bien avant de disposer de quelconques mesures expérimentales.

Au-delà des applications citées, ACTUS est également un outil de développement produit pour prédire les paramètres de conception de la prochaine géné-

Outil de développement produit, ACTUS sert aussi à prédire les paramètres de conception de la prochaine génération de turbocompresseurs.



ACTUS permet aux spécialistes Turbocompresseurs d'ABB d'étudier les nouvelles techniques de suralimentation et leur impact sur le moteur à combustion.

ration de turbocompresseurs. ACTUS intègre pour cela un mode d'évaluation des performances du turbocompresseur, à partir des données de mesure et de leur comparaison avec les valeurs attendues. L'outil a récemment évolué pour être à même de spécifier les nouveaux bancs turbocompresseurs à deux étages des sites ABB et relayer ainsi les méthodes de spécification antérieures qui ne suffisaient plus à gommer la complexité du double étage.

Booster le futur

La compréhension fine du processus de suralimentation et son amélioration permanente ont toujours été les points forts d'ABB. Ces connaissances trouvent en partie leur origine dans une longue tradition de la simulation des grands moteurs à combustion. Le nouveau logiciel de simulation ACTUS d'ABB capitalise ce savoir « historique » pour relever les défis de demain. Cet excellent outil de simulation au niveau système répond aux exigences spécifiques du Groupe en matière de développement et de construction de turbocompresseurs pour continuer à seconder sa clientèle dans le choix de la solution optimale de suralimentation et forger les nouvelles technologies de turbocompresseurs qui amélioreront encore les rendements moteurs, dans le respect des réglementations antipollution.

Thomas Böhme

Roman Möller

Hervé Martin

ABB Process Automation, Turbocharging
Baden (Suisse)

thomas.boehme@ch.abb.com

roman.moeller@ch.abb.com

herve.martin@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] Meier, E., "Zweistufige Aufladung", *Brown Boveri Mitteilungen*, vol. 52, n° 3, p. 171–179, 1965.
- [2] Ryti, M., "Computing the gas-exchange process of pressure charged internal combustion engines", *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, vol. 182, partie 3L, acte 11, 1967–68.
- [3] Codan, E., *et al.*, "Das Programmpaket von ABB Turbo Systems AG für das Design und die Optimierung von Aufladesystemen", *Motorprozesssimulation und Aufladung*, Berlin, 2005.
- [4] Schürmann, P., *et al.*, "Contribution of turbocharging solutions towards improved fuel efficiency of two-stroke low-speed engines", *Congrès CIMAC*, Shanghai, 2013.
- [5] Christen, C., Brand, D., "IMO Tier 3: Gas & Dual Fuel Engines as Clean & Efficient Solutions", *Congrès CIMAC*, Shanghai, 2013.
- [6] Kahi, M., *et al.*, "Second Generation of Two-Stage Turbocharging Power2 Systems for Medium-Speed Gas & Diesel Engines", *Congrès CIMAC*, Shanghai, 2013.



Ligne modèle

Des simulations mécaniques et électromagnétiques pour mieux concevoir les systèmes d'entraînement

TIMO P. HOLOPAINEN, TOMMI RYYPPO, GUNNAR PORSBY – La puissance motrice fournie à une machine tournante classique (pompe ou compresseur, par exemple) transite par une chaîne complexe d'organes mécaniques et de composants électriques interposés entre le réseau d'alimentation et la machine entraînée. Chaque élément doit supporter la charge, notamment des forces extrêmes induites par les modes de résonance ou de défaillance provoquant une torsion mécanique. Certes, la modéli-

sation mécanique est à même de simuler ce comportement vibratoire, mais les effets électromagnétiques (raideur et amortissement), qui ont aussi leur influence, restent difficiles à intégrer dans une analyse holistique de la chaîne de transmission. ABB ajoute à la simulation mécanique sa longue expérience de la simulation des champs électromagnétiques de machines électriques pour perfectionner l'analyse de torsion des entraînements industriels.

1 Exemple type de chaîne cinématique : ventilateur (à gauche), arbre (capot jaune), réducteur (enceinte d'insonorisation jaune) et moteur surmonté d'un refroidisseur (à droite)



Une chaîne de transmission de puissance est souvent constituée d'un ensemble récepteur (machine entraînée de type compresseur, pompe, etc.), d'un éventuel réducteur, d'un moteur, parfois d'un convertisseur de fréquence, et du réseau électrique. Ces composants, reliés mécaniquement et électriquement, transmettent chacun l'énergie nécessaire pour fournir, en bout de course, le travail utile à la charge (accélération du débit d'un fluide dans une pompe, par exemple). Tous doivent résister à ce transfert de puissance qui prend la forme de « couple cinématique » dans les organes mécaniques.

Si le couple nominal est le premier critère de dimensionnement des composants, des forces extrêmes peuvent faire entrer le système en résonance ou entraîner la rupture. Il y a résonance quand le système est soumis à une excitation coïncidant avec l'une de ses fréquences propres ; la plus basse fréquence propre

d'une transmission de grande taille, par exemple, avoisine 20 Hz. Les principaux constituants de la chaîne cinématique (machine entraînée, réducteur, moteur, etc. → 1) produisent tous des fréquences multiples de la fréquence fondamentale ou « harmoniques » [1].

Analyse de torsion

L'analyse de torsion a pour but de prédire le comportement vibratoire d'une transmission : des informations capitales pour éviter l'apparition de vibrations dangereuses, quel que soit le régime de fonctionnement, pouvant entraîner des arrêts intempestifs ou des pannes catastrophiques.

Dans la plupart des configurations industrielles, chaque chaînon de la transmission est conçu et réalisé par un constructeur différent, souvent sans tenir compte des autres composants : un casse-tête pour l'intégrateur de système car c'est précisément l'interaction de ces éléments qui caractérise les vibrations de torsion de l'ensemble et exige une analyse vibratoire globale. L'usage est que l'intégrateur prépare un modèle de torsion basé sur les données fournies par chaque constructeur, qui permet

ensuite aux deux parties d'adapter la conception de la transmission aux contraintes de vibration en torsion.

Par commodité, le modèle est 1D. Un modèle numérique complet de chaque composant aurait en effet le double inconvénient d'ajouter des informations superflues à l'analyse et de dévoiler des données confidentielles sur le produit. Le modèle se veut donc simple, portable et suffisamment précis pour remplir sa fonction, sans surabondance de données → 2.

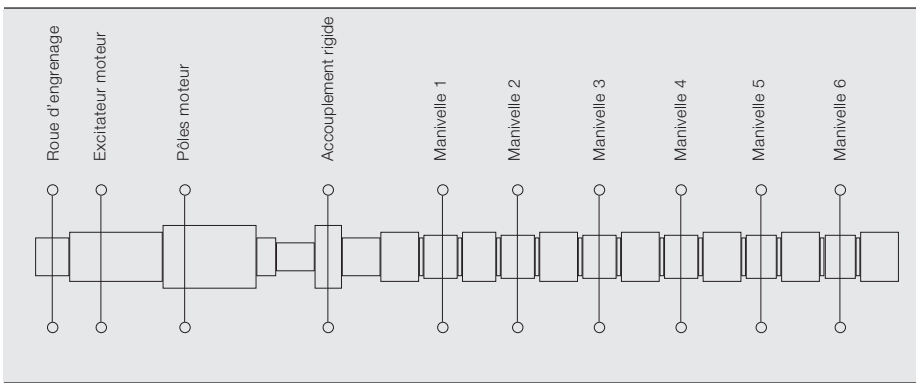
La modélisation d'une machine électrique dans une chaîne de transmission se fonde généralement sur deux caractéristiques du rotor : sa raideur et son inertie. Ce modèle s'intègre aisément au modèle du système. On néglige souvent les effets électromagnétiques même s'ils

ABB a relevé le défi de la simulation des transmissions mécaniques en développant des modèles électromagnétiques simples, portables et précis.

peuvent influencer le comportement vibratoire en introduisant une raideur et un amortissement électromagnétiques.

Photo p. 45

Coupler modélisation mécanique et simulation électromagnétique peut améliorer la conception des machines tournantes. Mais comment marier ces deux mondes ?



La solution ? Le calcul des coefficients de raideur de torsion et d'amortissement électromagnétiques.

Cette omission se justifie notamment par la difficulté à insérer la partie électromagnétique du modèle moteur dans celui de la transmission [2].

Simulation des champs électromagnétiques

On utilise souvent des modèles numériques 2D pour décrire le comportement électromagnétique (champs électromagnétiques et courants) du rotor et du stator d'un moteur en fonctionnement → 3. La densité de flux magnétique et les lignes de flux apparaissent dans le tiers supérieur gauche de la figure : les lignes de champ sont représentées dans le plan de la figure, les courants rotoriques et les enroulements statoriques dans le sens perpendiculaire. Le champ électromagnétique est concentrique à l'arbre. Le rotor accompagne le champ tournant soit de façon synchrone, soit avec un léger retard. Les champs électromagnétiques, même en régime permanent, doivent être simulés dans le domaine temporel. La durée maximale du pas de temps de simulation est fonction de la précision requise mais elle s'établit généralement à quelques dizaines ou centaines de microsecondes.

La géométrie variable de l'entrefer rotor/stator, due à la rotation de la machine, complique la simulation ; les non-linéarités introduites par la saturation magnétique de l'acier ajoutent à la difficulté. L'entrefer étant le siège de la conversion électromécanique de l'énergie, c'est à ce niveau qu'il faut une analyse mathématique minutieuse du comportement du champ électromagnétique pour calculer avec précision le couple mécanique.

Couplage mécanique-électromagnétique

Une façon de simuler un système en torsion est d'intégrer la partie mécanique du modèle de transmission au modèle de moteur électrique. Ce dernier utilisera une vitesse de rotation du rotor variable, donnée par le couple moteur, le couple de charge et les équations du mouvement. La simulation est relativement directe, tant que le modèle mécanique du rotor est simple et fondé sur des éléments bien connus. Sont ainsi simulés plusieurs points de fonctionnement comme, par exemple, la réponse mécanique aux excitations de torsion créées par la machine entraînée, le réducteur, le moteur ou le réseau électrique. Des événements transitoires (courts-circuits, démarrage du système, etc.) peuvent également être analysés.

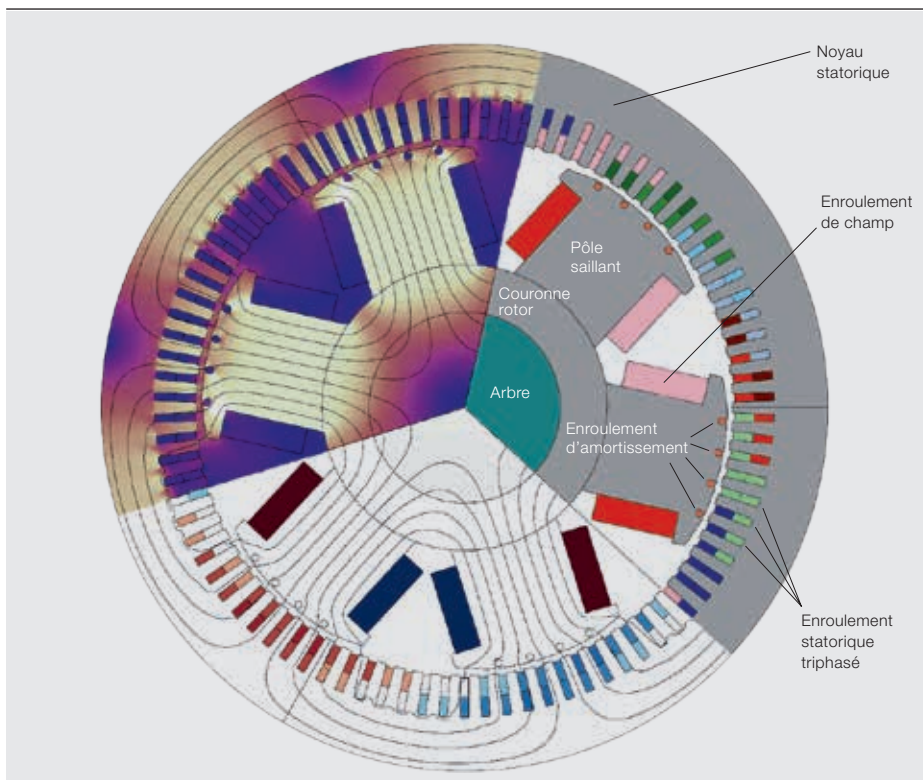
Si cet excellent mode d'analyse et de simulation des effets électromécaniques sur les phénomènes dynamiques de torsion fut utilisé avec succès par ABB, dans des cas précis, il s'avère trop gourmand en temps de calcul pour la conception d'une transmission classique. Sans compter que les intégrateurs ou leurs consultants n'ont généralement pas accès aux bons outils de simulation.

Modèles de raideur et d'amortissement électromagnétiques

ABB a relevé le défi en développant des modèles simples et portables qui décrivent avec précision l'interaction électromagnétique [3]. L'innovation réside dans le calcul des coefficients de raideur de torsion (raideur d'un ressort) et d'amortissement électromagnétiques → 4. Tous deux dépendent de la fréquence et peuvent être calculés sans modèle de transmission mécanique, en simulant le

Des modèles simples, capables de décrire précisément les effets électromagnétiques dans les chaînes de transmission font aujourd'hui consensus ; reste à en préciser la forme.

3 Vue en coupe d'un moteur synchrone 6 pôles de forte puissance



moteur en régime permanent. La raideur de torsion est le rapport de l'amplitude du couple oscillant sur celle du déplacement angulaire, et l'amortissement le rapport de l'amplitude du couple sur celle de la vitesse.

En principe, on peut calculer ces rapports pour une fréquence donnée en forçant l'oscillation du rotor et en calculant l'oscillation du couple, à cette même fréquence. Mais, en pratique, l'affaire se corse quand les encoches du rotor et du stator génèrent des harmoniques qui coïncident avec la fréquence en question. On les supprime par un calcul de référence reprenant exactement les mêmes paramètres, sauf l'oscillation du rotor qui est « soustraite ». Seul défaut de la méthode : le temps de calcul. Deux simulations dans le domaine temporel avec post-traitement sont en effet nécessaires pour obtenir les coefficients d'une seule fréquence, dans un régime de fonctionnement donné.

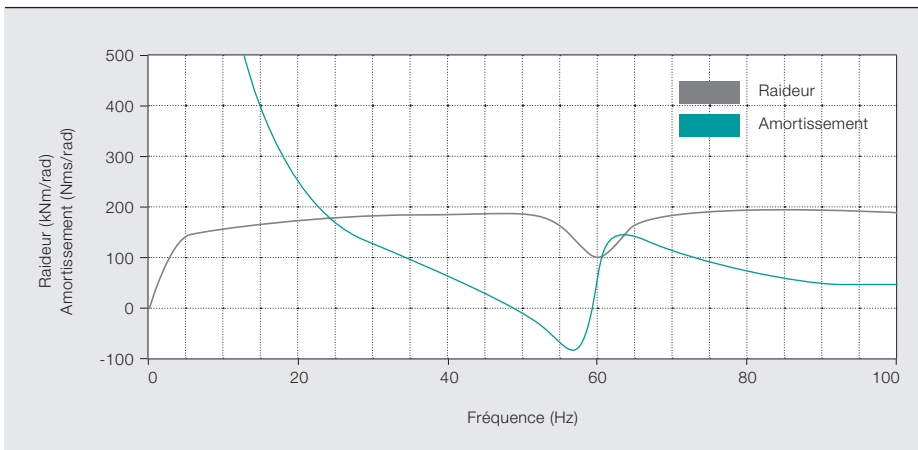
Plus efficace est la méthode spectrale sous excitation impulsionnelle : le rotor est ici excité par une impulsion tournante forcée et la réponse en couple est simulée. Une fois calculée la différence entre les résultats de la simulation et l'analyse de référence, il est possible de détermi-

ner les coefficients de raideur et d'amortissement électromagnétiques pour une plage de fréquences. Celle-ci dépend des paramètres de l'impulsion mais elle couvre facilement la plage de fréquences utiles à l'analyse de torsion de la transmission. Paradoxalement, cette méthode impulsionnelle peut servir à un système non linéaire en régime harmonique ; de nombreuses simulations montrent en effet que le système paraît linéaire par rapport à l'amplitude de l'excitation et que, par conséquent, les coefficients de raideur et d'amortissement calculés décrivent le comportement durant une oscillation de torsion arbitraire.

Le grand nombre de simulations auparavant nécessaires pour calculer ces coefficients peut ainsi être ramené à deux !

Il est alors possible d'inclure ces paramètres dans l'analyse de torsion de la transmission. Certes, leur dépendance fréquentielle peut légèrement compliquer la tâche mais, en principe, tous les programmes d'analyse s'en accommodent. Plus problématique est le calcul de ces coefficients pour un seul régime de fonctionnement.

4 Raideur de torsion et amortissement électromagnétiques d'un moteur asynchrone 60 Hz/932 kW en fonction de la fréquence de vibration [3]. À noter l'amortissement négatif entre 49,7 et 59,4 Hz.



Modèle de circuit équivalent

Une solution plus souple, mais un peu moins précise, réside dans un modèle de circuit équivalent prenant en compte les effets électromagnétiques. ABB a utilisé cette méthode pendant plus de 20 ans pour analyser et concevoir ses systèmes d'entraînement. Son propre logiciel évolué de simulation des transitoires *SMT (Simulation of Machine Transients)*, développé au début des années 1990, fut d'ailleurs un grand succès, surtout pour les systèmes équipés de gros moteurs synchrones.

Un modèle de circuit équivalent est un modèle moteur analytique défini par un nombre limité de paramètres (une dizaine dans les cas les plus simples). Il décrit le comportement d'une machine électrique depuis le point d'entrée de la tension réseau jusqu'au couple et à la vitesse de rotation de l'arbre résultants. Développé pour l'analyse et la conception élec-

trique, le code source ni connaissance approfondie, l'opération est délicate ! Le modèle n'en demeure pas moins totalement réalisable et souvent intégré à la commande d'un convertisseur de fréquence.

La précision est une autre problématique posée par les modèles de circuit équivalent mis au point aux premières heures des machines électriques ; les paramètres du modèle étaient alors basés sur les dimensions réelles des pièces critiques et les résultats expérimentaux. De nos jours, on peut appliquer des modèles de simulation pour déterminer ces paramètres. La solution conjugue la précision de la simulation avec la simplicité et la portabilité des modèles de circuit équivalent.

Top modèle

Aujourd'hui, les modèles de simulation de champs électromagnétiques fournissent sans grand effort des informations précises mais les effets électromagnétiques ne sont qu'occasionnellement pris en compte dans les analyses de torsion des chaînes de transmission. Cela tient sans doute à la difficulté d'inclure ces effets dans un programme de calcul classique pouvant être mis à la disposition des intégrateurs.

S'il existe plusieurs façons de combiner les parties mécaniques et électriques des modèles de torsion d'une chaîne de transmission, ce sont des modèles courants et simples, capables d'en décrire précisément les effets électromécaniques, qui font aujourd'hui consensus. Leur forme exacte reste néanmoins à préciser. ABB poursuit sa collaboration étroite avec les clients et les spécialistes des machines tournantes pour affiner ces modèles. Cet effort de développement facilitera la prise en compte des effets électromagnétiques dans l'analyse des transmissions mécaniques et débouchera certainement sur des nouveautés et des améliorations produits.

Les multiples simulations auparavant nécessaires pour calculer les coefficients de raideur et d'amortissement peuvent être ramenées à deux.

triques avant l'avènement de l'informatique, il s'intègre toujours utilement à un modèle de torsion d'une chaîne de transmission. Reste la difficulté de le coupler au modèle mécanique, puisque ce n'est pas un composant classique d'un modèle de torsion type ; sans accès au

Timo P. Holopainen

Tommi Ryyppö

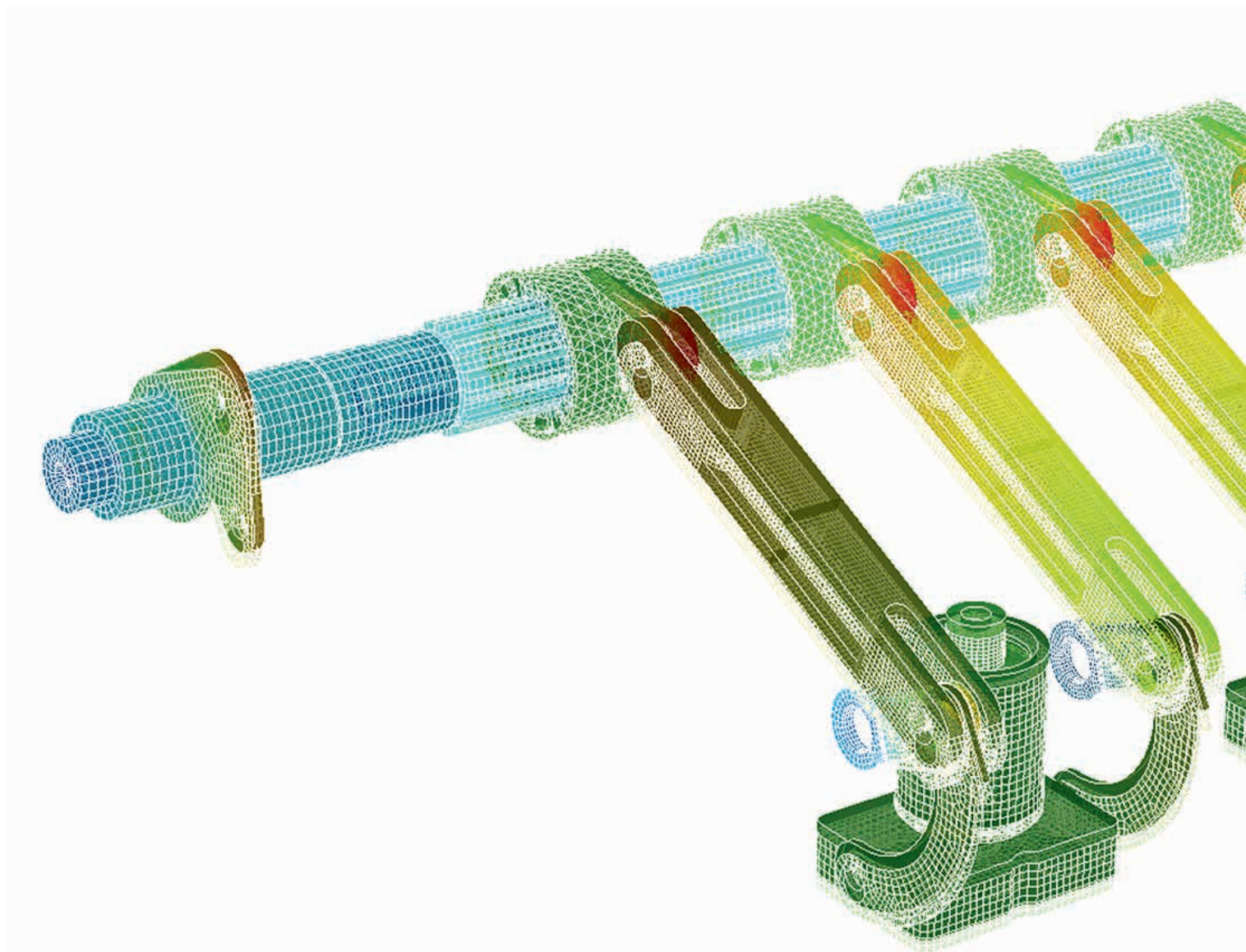
ABB Motors and Generators
Helsinki (Finlande)
timo.holopainen@fi.abb.com
tommi.ryyppo@fi.abb.com

Gunnar Porsby

ABB Motors and Generators
Västerås (Suède)
gunnar.lf.porsby@se.abb.com

Bibliographie

- [1] API 684, API Standard Paragraphs "Rotordynamic Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train Torsionals and Rotor Balancing", 2^e édition, *American Petroleum Institute*, Washington (District de Columbia, États-Unis), 2005.
- [2] Holopainen, T. P., *et al.*, "Electric motors and drives in torsional vibration analysis and design", *42nd Turbomachinery Symposium*, Houston (Texas, États-Unis), à paraître sur : <http://turbolab.tamu.edu/proc/>, 2013.
- [3] Holopainen, T. P., *et al.*, "Electromechanical interaction in torsional vibrations of drive train systems including an electrical machine", *8th International Conference on Rotor Dynamics*, Séoul (Corée), 12–15 septembre 2010.



Modélisation en chaîne

De nouvelles techniques de simulation pour la conception et l'optimisation des disjoncteurs

GRZEGORZ JUSZKIEWICZ, CHRISTIAN SIMONIDIS, GREGOR STENGEL, LUKASZ ZIOMKA, SAMI KOTILAINEN – Les simulateurs numériques font depuis longtemps partie de la boîte à outils des ingénieurs. Aujourd'hui, le développement produit oblige de plus en plus à combiner plusieurs domaines physiques. Les disjoncteurs moyenne et haute tension en sont un bon exemple : les phases de conception et d'essai doivent prendre en compte des effets mécaniques, fluidiques, tribologiques, hydrauliques et électromagnétiques, qu'il faut dans l'idéal simuler individuellement mais aussi en interaction les uns avec les autres.

En outre, certains disjoncteurs à actionneur magnétique ont une commande électronique, qui doit aussi être intégrée à la conception et à l'analyse du produit. Dans le passé, chaque discipline avait son outil de simulation et ses spécialistes qui coopéraient et échangeaient ponctuellement leurs données et connaissances. Aujourd'hui, la complexité des disjoncteurs exige de fédérer tous ces domaines au sein d'une structure garantissant le transfert dynamique en temps réel, la transparence et la réutilisabilité des informations, sans oublier des interfaces et des bibliothèques d'objets de modèles conviviales.



En post-traitement, l'utilisateur peut visualiser toutes les sorties de champ prédéfinies, afficher ou masquer des instances de pièces, créer des vues et les personnaliser.

Dans notre environnement de développement mondialisé, les outils de simulation sont utilisés par des ingénieurs évoluant à différents niveaux d'expertise, au sein d'entreprises disparates. Leur exploitation doit être la plus efficace possible pour capitaliser les bonnes pratiques et automatiser ou supprimer les tâches de modélisation répétitives. ABB propose deux méthodes pour transposer ces exigences à la conception des disjoncteurs.

Outils et environnement

La première méthode revêt la forme d'un «kit» de développement, à savoir un ensemble de routines utilisateur sous logiciel de simulation multicorps MSC.ADAMS, qui définissent les éléments usuels du disjoncteur (organe de manœuvre, tige, amortisseur, etc.). Ses composants sont entièrement paramétrables afin de pouvoir étudier différentes conceptions d'appareil et facilement accessibles par l'interface graphique de MSC.ADAMS.

Une méthode légèrement différente consiste à utiliser les bibliothèques de chambres de coupure intégrées à l'environnement de modélisation et de simulation du commerce Dymola, qui repose sur le langage de modélisation libre Modelica. Le comportement thermodynamique des chambres y est intégralement modélisé à l'aide de composants standard et centralisé dans une biblio-

thèque. La totalité des variantes de développement est ainsi disponible tout au long du projet. Une fois validée et diffusée, la conception définitive est archivée et, au besoin, accessible aux utilisateurs externes, sans possibilité toutefois de modifier ces variantes ; le modèle est chiffré pour protéger les informations sensibles. Cette approche accélère le développement tout en garantissant l'accès de l'ensemble des utilisateurs à une même version de produit.

Parfois, la manipulation des composants du système à simuler (à savoir, certains sous-ensembles) demande de la flexibilité. Dans MSC.ADAMS ou Dymola, la géométrie des objets de composants est représentée par une masse ponctuelle («masse globale») aux moments d'inertie prédéfinis, tandis que les composants eux-mêmes sont considérés comme des entités rigides. Des simulations basées sur l'analyse par éléments finis

Illustration

Les principes physiques complexes qui régissent le fonctionnement d'un disjoncteur obligent à coupler des outils de simulation traitant de domaines physiques radicalement différents. Si leur regroupement dans un environnement structuré facilite leur chaînage et l'échange des variables d'exécution, encore faut-il les faire interagir.

Lors du développement d'un produit, le résultat d'une simulation fournit souvent l'entrée d'une autre : c'est le « chaînage ».

1 Éléments du réenclencheur automatique triphasé ABB Gridshield®; le relais de commande et de protection RER620 (en bas à droite) est inclus dans la fourniture.



(EF) permettent alors de calculer avec précision les contraintes, déformations et autres variables discrètes. Les interactions entre composants peuvent être formulées en termes de « connecteurs » et de « comportement des contacts ».

En présence d'interactions complexes, la modélisation des contacts est capitale pour prédire les éventuelles collisions de composants et évaluer la pression de contact maximale.

Parmi les logiciels d'analyse EF du commerce figure ABAQUS, qui offre ce type de modélisation multicorps flexible. ABAQUS représentant le système sous forme d'éléments finis, l'utilisateur doit se charger du maillage, de la définition des relations entre composants, de l'affectation des matériaux, de la caractérisation des charges et du paramétrage des conditions aux limites. Le langage de script libre Python automatise certaines de ces étapes. En outre, des fonctions évoluées du modèle EF peuvent être définies par routines utilisateur. L'analyse EF offre également une méthode hybride de modélisation multicorps dans laquelle certains composants sont représentés par des corps rigides et d'autres, par des corps flexibles, avec des temps de calcul bien inférieurs à ceux d'une modélisation complète de corps flexibles.

Les codes de calcul et l'environnement nécessaires à ces simulations complexes existent. Encore faut-il les organiser de façon à faire interagir des outils issus de

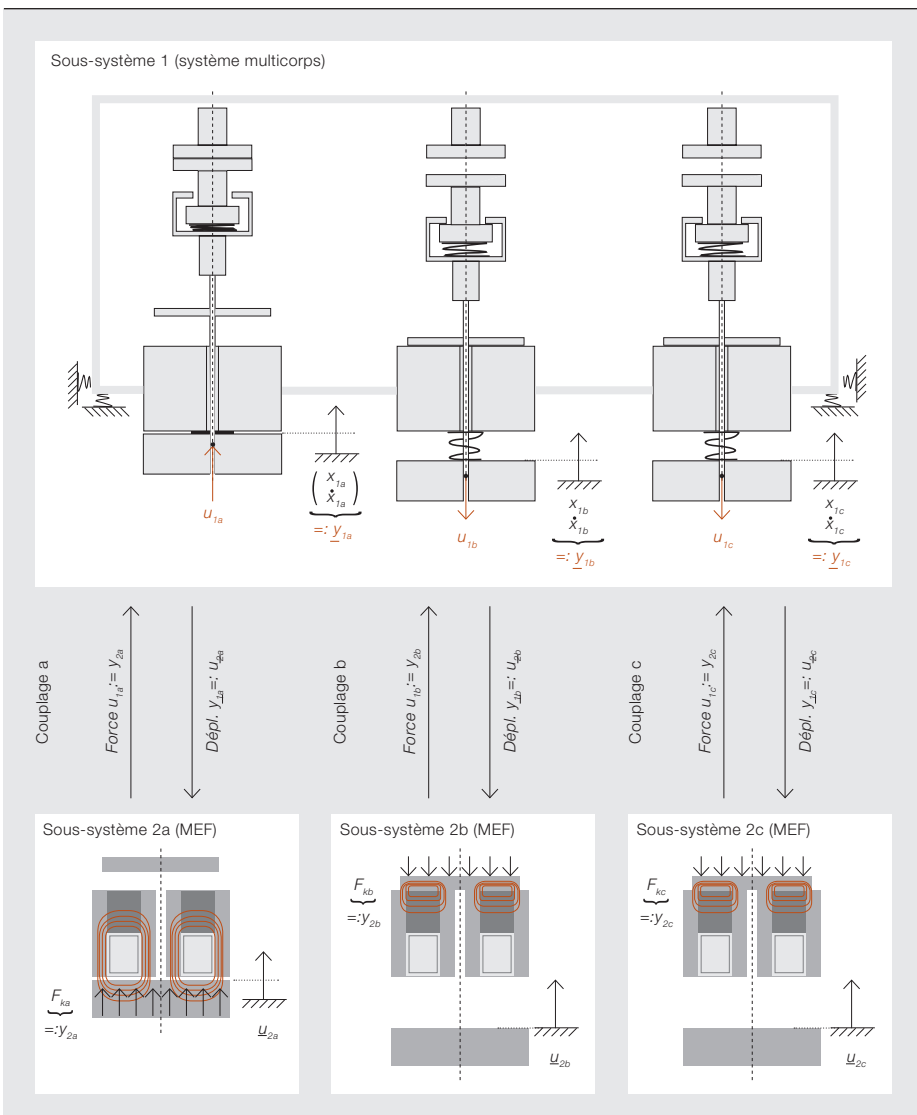
domaines physiques très différents pour produire les meilleurs résultats.

Chaînage d'outils et couplage de modèles

Lors d'un développement produit, la sortie d'une simulation sert souvent d'entrée à une autre : c'est le « chaînage ». En simulation mécanique, il est possible d'exporter les résultats de calculs effectués sur un corps rigide dans MSC.ADAMS, par exemple, vers un logiciel d'analyse EF comme ABAQUS, pour approfondir certains détails. De même, la sortie d'une simulation thermique peut fournir l'entrée d'une simulation complète de dynamique des fluides.

Autre possibilité : l'approche totalement couplée, qui répond au besoin d'interaction réaliste, temps réel et dynamique, de domaines physiques.

Deux méthodes prévalent : dans la première, toutes les équations physiques sont résolues dans un seul logiciel multiphysique approprié, à l'aide de modèles réalistes de forces externes non linéaires, au lieu de représentations simplifiées comme les tables de consultation. Dans la seconde, des sous-modèles monodisciplinaires sont construits dans des outils dédiés, puis couplés au sens mathématique ; leurs équations, spécifiques au domaine physique étudié, sont résolues par leur propre intégrateur temporel et les informations relatives à l'état des deux systèmes sont échangées à certains moments synchronisés. Cette « co-simulation » permet de calculer des



interactions physiques complexes, facilite la réutilisation des sous-modèles et rassemble efficacement les compétences d'experts dans des domaines physiques particuliers.

Environnement de couplage

ABB a créé un environnement de simulation qui utilise à la fois ses routines de couplage internes et celles du commerce pour permettre une co-simulation intégrant les univers de la mécanique multicorps, de la mécanique des structures, de la dynamique des fluides et de l'électromagnétique en régime transitoire. L'analyse de l'interaction des effets de diffusion magnétique et de la dynamique des mécanismes est un outil spécifique majeur que l'on trouve rarement dans les logiciels de simulation multiphysique. C'est pourquoi ABB a développé, en coopération avec des universitaires, un environnement approprié qui autorise le

couplage de COMSOL Multiphysics (outil d'analyse EF spécialiste des phénomènes couplés) avec MSC.ADAMS.

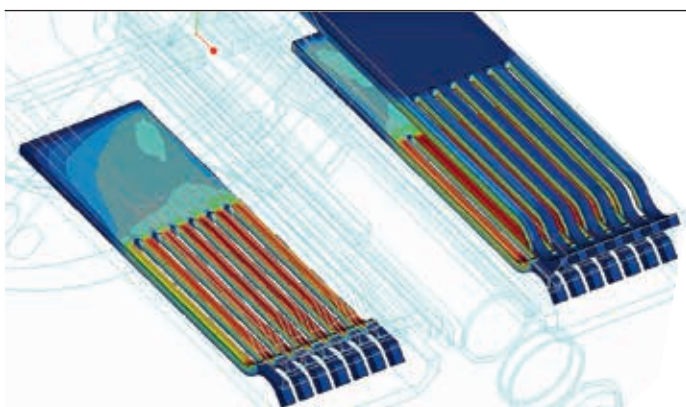
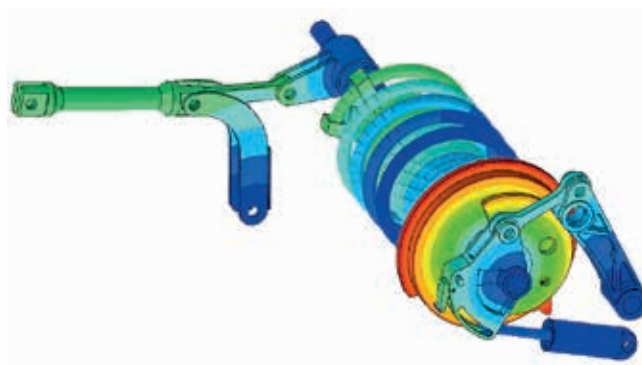
Co-simulation de disjoncteurs

Cette co-simulation a été appliquée au nouveau disjoncteur magnétique à réenclenchement automatique Gridshield® d'ABB → 1, selon un scénario faisant intervenir plusieurs sous-systèmes → 2. L'analyse électromécanique réalisée pour ce développement produit est un bon exemple de couplage électromagnétique-mécanique.

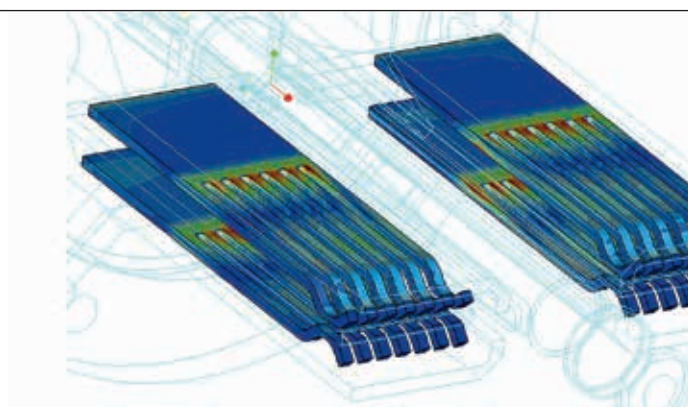
La première étape consiste à évaluer la densité de courant et la répartition des forces de Lorentz ; la seconde calcule les contraintes et le déplacement des pièces soumises à ces forces.

Alternative au chaînage, l'approche totalement couplée autorise une interaction réaliste, temps réel et dynamique des domaines physiques.

Le logiciel *Simulation Toolbox* d'ABB permet de calculer les forces de Lorentz, les pertes Joule et les densités de courant. Deux outils peuvent servir à calculer les contraintes et les déplacements : le solveur mécanique de *Simulation Toolbox* ou ABAQUS. Celui-ci admet des simulations personnalisées : ajout de sorties de champ supplémentaires, définition de propriétés non linéaires de matériaux, analyse modale de contrôle des modes et fréquences propres. En pré- et post-traitement, *Simulation Toolbox* utilise l'outil de prototypage virtuel 3D *PTC Creo Simulate*, qui permet de tester les propriétés structurelles et thermiques d'un appareil, en amont de la conception. En post-traitement, l'utilisateur peut visualiser toutes les sorties de champ prédéfinies, afficher ou masquer des instances de pièces, créer des vues en coupe, des vues personnalisées, etc.



5a Densité des forces de Lorentz



5b Répartition du champ de contrainte

1^{er} exemple : actionneur de disjoncteur

L'actionneur MSD1 → 3, monté sur un disjoncteur haute tension, assure l'ouverture et la fermeture des contacts. L'énergie nécessaire aux manœuvres est stockée dans trois ressorts, deux de fermeture et un d'ouverture (le plus à l'extérieur). Lorsque les ressorts se détendent, l'énergie libérée fait tourner l'arbre principal de l'actionneur, qui déplace les contacts situés à l'intérieur du disjoncteur.

On peut modéliser ce dispositif ou ses composants à l'aide de plusieurs outils de simulation, comme MSC.ADAMS, Dymola ou ABAQUS, qu'il est en outre possible de coupler, la sortie d'un solveur servant d'entrée à l'autre. La sortie ABAQUS pour un champ de déplacement calculé de cette façon est présentée en → 4.

2^e exemple : lames de contact

La simulation électromécanique des composants du disjoncteur fournit un autre exemple de co-simulation : il s'agit

ici d'estimer la densité du courant et des forces de Lorentz → 5a. Les résultats sont transférés à un code de calcul de structures EF pour évaluer les contraintes et les déplacements → 5b.

Simuler l'avenir

Les outils de simulation modernes offrent une large palette de méthodes puissantes pour résoudre les complexités du développement de produits évolués. Ces outils multiphysiques peuvent être couplés et chaînés à l'aide de logiciels et d'extensions du marché ou développés en interne, pour fédérer les points forts de chacun en une plate-forme de simulation unifiée, plus puissante que la somme de ses parties. Autre atout : cette approche modulaire donne des résultats utiles et précis, dans un temps de calcul raisonnable. L'objectif est aujourd'hui d'améliorer la convergence et l'intégration de ces outils dans un cadre cohérent facilitant leur mise en œuvre.

Les ingénieurs de tous horizons ou niveaux d'expertise pourront tirer profit de cette synergie pour réaliser des produits encore plus performants.

Grzegorz Juszkiwicz**Lukasz Ziomka**

ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)
grzegorz.juszkiwicz@pl.abb.com
lukasz.ziomka@pl.abb.com

Christian Simonidis**Gregor Stengel**

ABB Corporate Research
Ladenburg (Allemagne)
christian.simonidis@de.abb.com
gregor.stengel@de.abb.com

Sami Kotilainen

ABB High Voltage Products
Baden (Suisse)
sami.kotilainen@ch.abb.com



Ubiquité USB

Une prise universelle pour recharger
tous les appareils multimédia

SASCHA DEHLEN – L'interface USB (*Universal Serial Bus*) mérite plus que jamais son qualificatif d'« universelle ». Soutenue par les entreprises, privées comme publiques, elle s'invite aujourd'hui chez le particulier pour transférer ses données ou recharger son mobile, sa tablette, son lecteur MP3, son appareil photo, son GPS... Mais reste la sempiternelle question : où est donc passé le chargeur ? Et même retrouvé, encore faut-il débrancher un équipement électroménager pour lui laisser la place. La solution Busch-Jaeger : la prise de courant SCHUKO® à port USB intégré.

1 Prise de courant SCHUKO USB de Busch-Jaeger



2 Prise double chargeur USB



Dans bien des pays, la prise murale SCHUKO est le symbole indéfectible d'une fée électricité intemporelle, qui alimente pourtant une technologie progressant à un rythme époustoufflant. Busch-Jaeger a changé la « face » de ce produit mature par excellence en le mariant au connecteur le plus répandu de ces 50 dernières années : le port USB → 1.

Adieu transfos, adaptateurs et câbles USB branchés sur les prises domestiques : le chargeur USB intégré est toujours à portée de main. On peut y enficher directement ses appareils multimédia, sans débrancher l'électroménager. Les prises encastrées SCHUKO USB avec sécurité

enfant fournissent un courant de charge de 700 mA maxi. De dimensions identiques aux SCHUKO actuelles, elles se greffent naturellement à l'existant.

Autres innovations

Deux autres produits enrichissent le catalogue SCHUKO de Busch-Jaeger : une alimentation USB et une station de charge USB, également encastrées.

L'alimentation Busch-Jaeger comprend deux prises USB. Parée du cadre traditionnel des prises téléphone TAE, elle peut être configurée en double chargeur de 700 mA → 2 ou simple chargeur de

Busch-Jaeger a changé la « face » de la prise murale, en la mariant au connecteur le plus populaire de ces dernières décennies : le port USB.

1400 mA, selon l'appétit énergétique des terminaux raccordés ; idéal pour les tablettes, particulièrement énergivores.

La capacité de charge de la station USB → 3 est fournie par un cordon et une prise micro-USB pouvant délivrer un courant maxi de 1400 mA : une connectique choisie pour son universalité mondiale mais aussi sa conformité aux normes européennes. La station est également un support bien pratique pour le mobile en charge. Son revête-

Photo p. 55

L'innovation la plus marquante est sans doute celle qui « révolutionne » les objets du quotidien. Faire d'une banale prise de courant une station de recharge USB en est un bon exemple.



ment antidérapant évite à l'appareil de glisser en mode vibreur.

Une pluie de récompenses

La prise SCHUKO USB de Busch-Jaeger a remporté plusieurs trophées, dont celui de l'innovation 2013 du distributeur de matériels électriques Rexel et le prestigieux *ETOP Innovation Award*, remis par l'organisateur des salons internationaux *VNU Exhibitions Europe* et la fédération néerlandaise *Federatie Elektrotechniek*, lors de la grand-messe de l'électrotechnique à Utrecht (Pays-Bas).

En septembre dernier, la prise SCHUKO USB décrochait le Prix du Public à l'IFA 2013 → 4, pour son design et sa facilité d'emploi. Cette célébrité médiatique, inédite pour un produit ABB ou Busch-Jaeger, lui valut un spot publicitaire en début de soirée sur la chaîne nationale de la télévision allemande !

Non contente d'être universelle, l'interface USB continue d'évoluer. Un connecteur réversible (écarté dans la version actuelle par souci d'économie) est prévu : fini le casse-tête du branchement dans



La prise de courant SCHUKO USB de Busch-Jaeger, distinguée par les utilisateurs et fabricants au salon high tech IFA 2013 de Berlin.

le bon sens des câbles USB. De même, la prochaine génération devrait pouvoir fournir 100 W, remplaçant les fils électriques dans certaines applications. La connectivité USB investit donc la sphère domestique pour raccorder l'électroménager et le bâtiment. Et pas seulement par commodité, mais par nécessité. La prise SCHUKO USB de Busch-Jaeger pose la première pierre à l'édifice.

Aux dimensions exactes des SCHUKO actuelles, la nouvelle prise s'adapte sans mal à l'installation électrique.

Sascha Dehlen

Busch-Jaeger Elektro GmbH
Société du Groupe ABB
Lüdenscheid (Allemagne)
sascha.dehlen@de.abb.com





Double jeu

PCS100 RPC : au-delà de la compensation de puissance réactive

SOPHIE BENSON-WARNER – Si une panne ou une baisse de qualité de l'alimentation électrique est un casse-tête pour l'industriel, elle peut aussi virer à la catastrophe, obligeant à arrêter et à redémarrer la production à grand frais. Le PCS100 RPC (*Reactive Power Conditioner*) d'ABB est conçu pour atténuer les défauts d'alimentation les plus courants causés par la puissance réactive, la pollution harmonique, les variations rapides de charge, les creux de tension, les mauvais facteurs de puissance et autres heurts et malheurs de la fourniture électrique. Mais il fait encore mieux : associé à une alimentation sans interruption appropriée, il offre une garantie globale de haute qualité électrique pour l'industrie, le tertiaire et les énergies renouvelables.

Photo ci-contre

Menace de dégradation de la fourniture électrique en vue ? Prenez les devants avec le conditionneur de puissance réactive PCS100 RPC d'ABB qui préserve l'alimentation des charges critiques, comme ici une station de pompage.

1 Sites industriels et infrastructures sont souvent tributaires d'une alimentation électrique constante, respectueuse de l'environnement et de qualité.



Qui n'a pas déjà pesté contre des lampes qui se mettent à papilloter ou, pire, des appareils qui s'éteignent brusquement, à cause d'incidents électriques survenant à des kilomètres de là ? Pour l'industriel, ces désagréments peuvent prendre une tournure bien plus grave : remettre en route une chaîne de production est dans certains cas un exercice aussi complexe que dispendieux. Les distributeurs d'électricité, d'eau et de

sites rapides dues aux sources d'alimentation embarquées (photovoltaïques, par exemple) qui jouent les perturbateurs. Mieux vaut par conséquent investir dans une alimentation industrielle continue, «propre» et de qualité. Le conditionneur de puissance réactive PCS100 RPC d'ABB est LA solution.

Protection

L'offre de protections électriques PCS100 d'ABB s'enrichit aujourd'hui du RPC → 2. Spécialement conçu pour l'industrie et le tertiaire, le PCS100 RPC est à même de réagir instantanément

aux perturbations de la qualité du courant tout en corrigeant en permanence la puissance réactive → 3.

Calibré pour des applications de 100 kVA à 2000 kVA, le PCS100 RPC utilise un onduleur à IGBT pour réguler le flux de réactif dans le réseau alternatif.

Les défauts d'alimentation se manifestent de bien des façons : problèmes de facteurs de puissance, creux de

gaz, mais aussi les ensembles tertiaires, les réseaux et infrastructures de transport (trains, aéroports, installations portuaires → 1, etc.) sont logés à la même enseigne : leurs activités sont tributaires d'une alimentation électrique stable. Quand ce ne sont pas les équipements de production eux-mêmes (machines à souder, fours à arc, etc.) ou les tran-

sion provoqués par les appels de courant, déséquilibres de tension ou dépassements des seuils réglementaires (caractéristiques des moteurs à démarrage direct sur le réseau) et harmoniques. Non corrigés, ils peuvent donner lieu à des pénalités contractuelles et des dysfonctionnements de l'installation électrique qui coûtent cher à l'industriel !



Non corrigées, les perturbations peuvent entraîner des pénalités et endommager l'installation électrique : un coût pour l'industriel !

Si le PCS100 RPC est avant tout un stabilisateur de courant (en injectant du réactif dans le circuit pour stabiliser la tension), c'est aussi une parade très efficace et économique aux défauts électriques. En stabilisant le courant absorbé par la charge du client, il complète les autres produits de la gamme PCS100 tels que l'alimentation sans interruption de charges critiques PCS100 UPS-I (*Industrial Uninterruptable Power Supply*) et le conditionneur actif de tension PCS100 AVC (*Active Voltage Conditioner*) [1].

Calibré pour des applications de 100 kVA à 2000 kVA, le PCS100 RPC utilise un onduleur rapide à IGBT (transistor bipolaire à grille isolée) pour réguler le flux de réactif dans le réseau alternatif. En injectant un courant capacitif ou réactif à différents angles de phase et fréquences,

il intervient de manière efficace et fiable pour

- compenser en dynamique la puissance réactive ;
- rapprocher le facteur puissance de l'unité ;
- corriger les déséquilibres de courant ;
- supprimer les harmoniques.

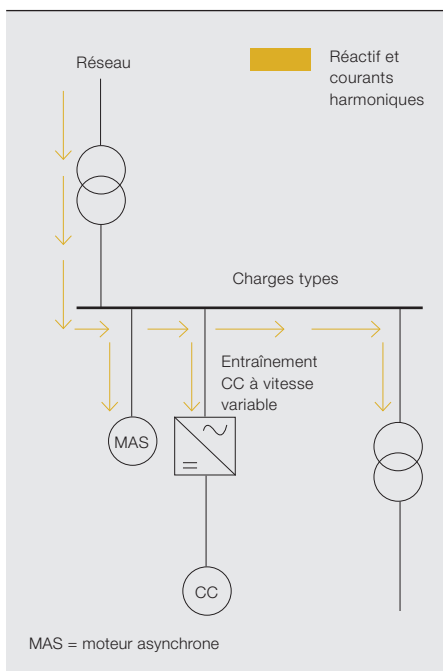
Grâce à l'onduleur, la compensation et la réduction des perturbations électriques se font de manière progressive, contrairement à bien d'autres solutions.

Modularité

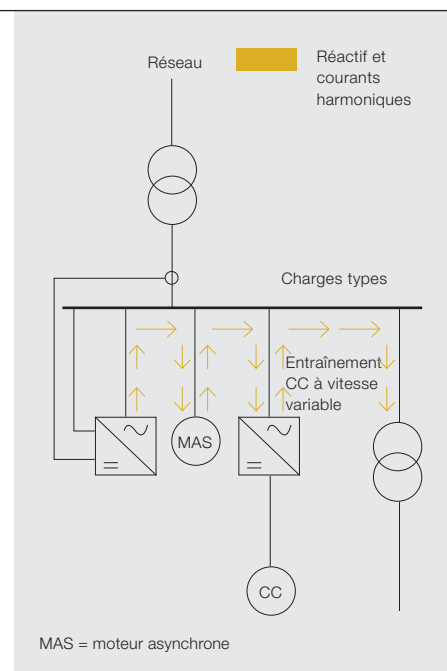
Le PCS100 RPC se loge dans toute une gamme d'armoires de raccordement direct aux alimentations basse tension usuelles (380-480 V) → 4 et s'adapte à une grande plage de puissances, de 100 kVAr à plusieurs MVar. Associé à

Redondant, modulaire et extrêmement fiable, le PCS100 RPC d'ABB évolue au gré des besoins de protection électrique.

3 Schéma de principe



3a Sans PCS100 RPC



3b Avec PCS100 RPC

l'alimentation sans interruption PCS100 UPS-I et au conditionneur PCS100 AVC, le PCS100 RPC se prête à un large éventail d'utilisations, de l'alimentation de secours d'une salle informatique à la protection d'un grand *datacenter* et de tout un site industriel. Redondant, modulaire et extrêmement fiable, il évolue facilement au gré des besoins électriques de l'application. En cas de défaillance d'un module, le système ne disjoncte pas mais continue de fonctionner à puissance réduite. Cette faible granularité garantit une redondance totale à très bas coût et un niveau de fiabilité exceptionnel pour l'industrie.

RPC plus UPS

L'association RPC et UPS-I fait de la solution PCS100 d'ABB une « assurance tous risques » de l'alimentation électrique. Voyons l'exemple d'un client ABB, grand équipementier électronique soucieux de protéger sa ligne de fabrication de film polyimide.

Apprécié pour sa légèreté, sa souplesse, sa thermostabilité et sa résistance chimique, le polyimide constitue le matériau de choix des circuits imprimés flexibles des équipements télécoms, des suspensions sans fil de disques durs et des têtes de lecture optique. Chez ce client, qui dit panne électrique implique d'énormes coûts d'arrêt et de reprise d'activité, mais aussi le risque de ternir la réputation de l'entreprise.

Grâce à l'onduleur, la compensation et la réduction des perturbations électriques se font de manière progressive, contrairement à bien d'autres solutions.

La solution de protection globale offerte par les deux produits PCS100 permet à la fois de supprimer les coupures, creux et surtensions (PCS100 UPS-I de 1050 kVA) et de porter le facteur de puissance de la charge à plus de 0,90 (PCS100 RPC de 323 kVAr). Non content de réguler ce facteur de puissance de manière dynamique, le PCS100 RPC filtre également les harmoniques de rangs faibles, améliorant encore la qualité de l'énergie électrique : une valeur ajoutée déterminante quand on sait le rôle que joue la protection des équipements industriels stratégiques dans la continuité de la production.

PCS100 RPC + UPS-I : l'« assurance tous risques » de l'alimentation électrique



Avec cette solution clé en main, sur apparition d'un défaut électrique, l'UPS-I déconnecte la charge du réseau et alimente la ligne de fabrication à pleine puissance pendant 5 minutes, tandis que le RPC régule le facteur de puissance au-dessus de 0,90. En cas de perte réseau, le cahier des charges du client prévoyait que l'alimentation sans interruption fournisse 1000 kVA pour protéger l'application ; l'UPS-I fait encore mieux en débitant 1050 kVA.

Le PCS100 UPS-I intègre un commutateur statique (sectionneur ultrarapide) qui stabilise très vite la puissance. D'autres évaluations menées par l'industriel débouchèrent sur le même constat : aucune offre concurrente ne pouvait rivaliser avec la technologie ABB. Dernier facteur décisif : le rendement du système, qui permit au fabricant d'économiser énormément en climatisation, grâce aux faibles déperditions thermiques du PCS100 UPS-I. Le PCS100 RPC affiche lui-même un rendement de 99 %. Son faible encombrement est un autre atout quand l'espace est compté ou cher.

La modularité et l'évolutivité du PCS100 RPC d'ABB, mais aussi sa compatibilité avec les autres produits de la gamme et son aptitude à remédier aux problèmes récurrents de qualité du courant dans l'industrie expliquent son succès dans un large éventail d'applications de protection électrique. En témoigne le PCS100 RPC de 100 kVar qui veille à la qualité de l'alimentation électrique des voitures funiculaires du pittoresque *Wellington Cable Car* de la capitale néo-zélandaise, signant par là même trois grandes « premières » : première implantation PCS100 dans le pays, première application aux transports publics dans le monde et plus petit PCS100 jamais réalisé.

Sophie Benson-Warner

ABB Discrete Automation and Motion
Napier (Nouvelle-Zélande)
sophie.benson-warner@nz.abb.com

Bibliographie

- [1] Benson-Warner, S., « Alimentation équilibrée : fiabiliser l'alimentation électrique de l'outil industriel face aux instabilités du réseau », *Revue ABB*, 1/2012, p. 27-29.





En harmonie

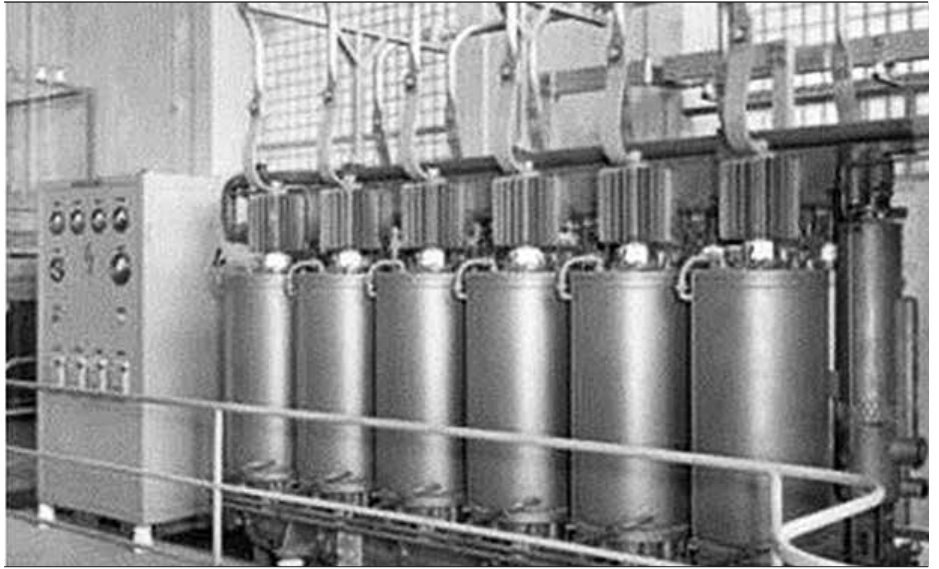
L'évolution parallèle des redresseurs de forte puissance et des semi-conducteurs

SHRIPAD TAMBE, RAJESH PAI – Si l'électricité est majoritairement produite, acheminée et distribuée en courant alternatif (CA), nombreuses sont ses applications industrielles en courant continu (CC). C'est le cas, entre autres, de l'électrolyse, de la production d'acier, de la traction électrique et des torches à plasma. L'électronique de puissance soutient ces charges de manière fiable, sûre et économique. L'évolution parallèle des redresseurs de grande puissance et de la technologie des semi-conducteurs ABB, au fil des décennies, méritait que l'on confonde, le temps d'un article, leur histoire et leurs prodigieuses avancées. Ces composants et dispositifs commutent aujourd'hui des centaines de mégawatts, une prouesse technologique encore inimaginable il y a quelques dizaines d'années. Un précédent numéro d'*ABB review*¹ a déjà retracé un siècle d'électronique de puissance, mais notre article se place ici sous un autre angle : la production de courant continu de forte intensité.

Photo ci-contre

Depuis des décennies, les redresseurs de forte puissance jouent un rôle important dans la production du cuivre (ici, l'usine suédoise de Boliden, en 2008).

1 Redresseur à vapeur de mercure



2 Redresseur à contacts



Que de chemin parcouru depuis l'invention des semi-conducteurs destinés aux redresseurs de grande puissance! Et combien d'innovations non seulement quantitatives, chiffrées en mégawatts (MW) et kiloampères (kA), mais aussi qualitatives, en termes de sécurité et de fiabilité, jusque dans des conditions de fonctionnement et d'environnement extrêmes.

La division Redresseurs de BBC/ABB a toujours eu pour mot d'ordre de développer et de réaliser des groupes redresseurs sûrs et efficaces, dans un souci constant de sécurité des équipements mais aussi, et surtout, du personnel.

Au commencement de l'électronique de puissance

Si les avancées de l'électronique de puissance ces 40 dernières années sont intrinsèquement liées au progrès des semi-conducteurs, les sociétés d'origine du Groupe ABB étaient déjà actives dans le domaine de la conversion de puis-

sance, bien avant que la technologie des semi-conducteurs ne fût commercialisée ou même comprise.

Redresseurs à vapeur de mercure

Les tout premiers redresseurs, il y a une centaine d'années, utilisaient des dispositifs à vapeur de mercure, laquelle avait la propriété de bloquer une seule polarité du courant alternatif → 1.

Redresseurs à contacts

La conversion CA-CC faisait appel à des redresseurs à contacts capables de supporter plusieurs kiloampères → 2.

Entrée en scène des semi-conducteurs

La mise au point de composants semi-conducteurs robustes et puissants

révolutionna l'industrie et ouvrit la voie à de nombreuses applications inédites.

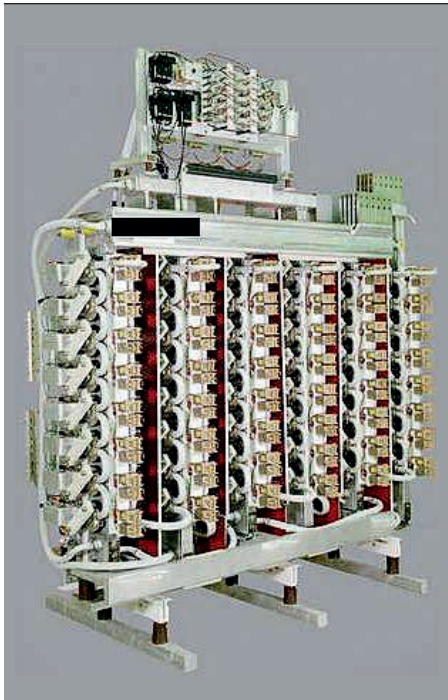
En conversion de puissance, elle signait la fin des risques liés aux redresseurs à vapeur de mercure et de la lourde maintenance des redresseurs à contacts.

La facilité avec laquelle on pouvait manipuler ces semi-conducteurs, en dissiper la chaleur et les connecter en série ou en parallèle en fit les composants indispensables à une infinité d'applications.

Au premier redresseur à diodes BBC de 1956 succédèrent en 1960 le thyristor, puis la décennie suivante, la diode à boîtier en verre et céramique boulonné à fond plat pour le redressement de forte puissance.

Note

- 1 Lire « Cent ans de plénitude : des valves à vapeur de mercure au disjoncteur hybride », *ABB review*, 2/2013, p. 70-78.



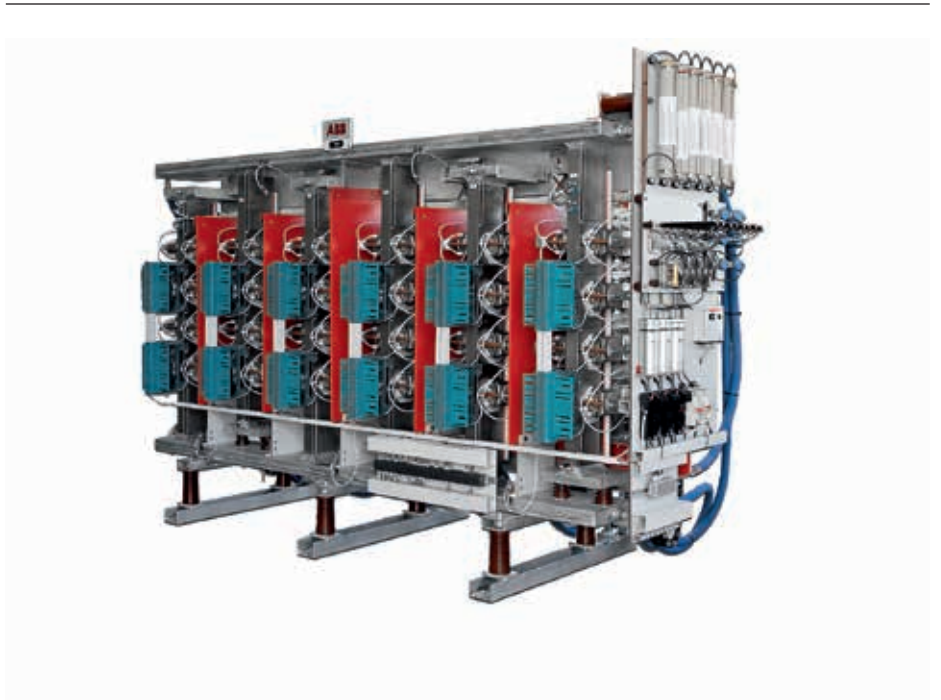
Les années 1970 virent le progrès des techniques de fabrication des semi-conducteurs et le développement consécutif des diodes et thyristors de 2 et 3 pouces → 3, fondement d'un autre palier technologique : le premier redresseur à pont de diodes BBC pour des courants continus supérieurs à 100 kA.

Les redresseurs ABB produisent aujourd'hui jusqu'à 200 kA, grâce à des diodes et thyristors de très gros diamètre (4 pouces) → 4 offrant

- plusieurs tensions de blocage ;
- une protection intégrée contre l'explosion ;
- une chute de tension directe faible et uniforme (composants disponibles dans la bande étroite) pour de gros montages redresseurs alignant 16 semi-conducteurs ou plus en parallèle.

Refroidissement

Au-delà des nombreux atouts des semi-conducteurs, ce fut l'avènement du « boîtier pressé » qui inaugura le déploiement d'applications de forte puissance. L'attrait de la solution réside dans son excellente dissipation des pertes thermiques du silicium, premières causes de limitation des performances et de dysfonctionnement des semi-conducteurs.



Un transfert de chaleur amélioré et fiabilisé allonge la durée de vie de l'équipement de conversion de puissance.

Le développement des semi-conducteurs de forte puissance est donc indissociable du progrès des méthodes et fluides de refroidissement, à commencer par l'air (convection naturelle, puis forcée), auquel succéda l'huile à mesure que les niveaux de courant augmentaient. La course à la puissance aidant, l'huile ne tarda pas à révéler les défauts de ses propriétés physiques (inflammabilité et viscosité variable) pour finir par être abandonnée au profit de l'eau et de l'eau déminéralisée. Les avancées dans ce domaine sont telles qu'il est aujourd'hui possible de construire des systèmes avec une seule unité délivrant jusqu'à 200 MW.

Au cœur du redresseur

De nos jours, le semi-conducteur est l'une des pièces maîtresses des groupes redresseurs de forte puissance. L'adéquation composants (thyristors ou

La division Redresseurs de BBC/ABB a toujours eu pour consigne de réaliser des groupes redresseurs « sûrs et efficaces ».

5 Guide de calcul



Avec ses algorithmes, ses simulations et sa base de données semi-conducteurs et fusibles validée par des essais en laboratoire et des mesures sur site, *RectiCal* est un outil d'aide au dimensionnement de transformateurs et de redresseurs permettant de déterminer

- les types de semi-conducteurs et de fusibles ;
- le nombre de composants en parallèle ;
- la capacité de surcharge du redresseur ;
- les pertes (au niveau semi-conducteurs et fusibles) ;
- les besoins en refroidissement.

diodes), fusibles et procédé, ainsi que le dimensionnement optimal du redresseur obéissent à plusieurs critères :

- Application (électrolyse de l'aluminium, du cuivre ou du zinc, alimentation des fours à arc, etc.) ;
- Tension et courant de sortie du redresseur ;
- Environnement ;
- Conditions du réseau (en particulier, pouvoir de coupure en court-circuit) ;
- Classe de service et régime de fonctionnement en surcharge.

Les ingénieurs ABB sont aidés en cela par le logiciel *RectiCal* → 5.

Endurance et rendement

Les décisions d'investir dans un équipement de puissance sont dictées par son retour sur investissement. Les dépenses de fonctionnement sont primordiales pour la viabilité économique. La plupart des procédés alimentés par des redresseurs ABB ayant une longue durée d'activité, leur coût ne doit pas s'arrêter à l'investissement initial mais tenir compte des dépenses d'exploitation et de maintenance sur tout le cycle de vie du produit.

Pertes et rendement énergétique ont aussi leur importance au regard des coûts de fonctionnement et des contraintes environnementales.

La longévité et l'efficacité opérationnelle de l'équipement, tout comme les performances des semi-conducteurs, peuvent être grandement améliorées par le choix judicieux d'un mode de refroidissement, d'un montage, d'une stabilité des contacts entre surfaces de transfert thermique, d'une distribution du courant et d'une protection *ad hoc*.

ABB y travaille depuis plus de 80 ans, selon plusieurs axes.

Mécanique

L'assemblage qui tient les composants et radiateurs en place est conçu pour exercer une forte pression de contact garantissant un haut niveau de dissipation thermique. Un transfert de chaleur amélioré et fiabilisé allonge la durée de vie de l'équipement de conversion de puissance.

Distribution du courant

L'optimisation économique d'un système de redressement exige de déterminer précisément le nombre requis de semi-conducteurs et, pour cela, de calculer exactement la distribution du courant dans le composant. Cette parfaite connaissance du convertisseur a non seulement pour effet d'en optimiser le coût mais aussi d'aider à mieux en comprendre les pertes et à améliorer la conception du système de refroidissement.

Protection

Le risque de dégradation du matériel peut être minimisé par une protection fiable contre les surcharges transitoires et par un isolement des semi-conducteurs défectueux : deux précautions qui allongent la durée de vie de l'équipement. Même en cas de défaillance d'un semi-conducteur, les stratégies de confinement et de redondance limitent les dérangements dans l'usine et souvent les retombées sur le reste des équipements.

Risque d'explosion

ABB a breveté une technique qui élimine tout type de diffusion plasma en cas de détérioration d'un semi-conducteur. De nombreux incidents qui conduiraient

La plupart des procédés alimentés par des redresseurs ABB ayant une longue durée d'activité, leur coût ne doit pas s'arrêter à l'investissement initial mais tenir compte des dépenses engendrées pendant tout leur cycle de vie.

sinon à la casse sont circonscrits à l'emplacement du composant abîmé. Cette « barrière » à l'explosion influe beaucoup sur la durée de vie de l'équipement.

Protection contre les surtensions

La défaillance d'un semi-conducteur trouve principalement son origine dans une contrainte de tension supérieure aux limites admissibles. Les transitoires de tension préjudiciables naissent souvent en dehors du redresseur. Les outils de conception des systèmes ABB garantissent la très grande efficacité de cette protection sous le triple aspect du réseau, du procédé et des disjoncteurs.

Tenue des fusibles et semi-conducteurs à l'explosion

Une isolation sûre des semi-conducteurs défectueux peut être obtenue par la fusion du fusible en série, avant même que le semi-conducteur ne se dégrade et endommage son environnement.

Les applications mettant en œuvre de gros redresseurs demandent beaucoup aux fusibles : ils doivent être efficaces tout en consommant le minimum d'énergie et en résistant suffisamment à la chaleur produite pendant le défaut. Cette tenue des associations semi-conducteurs/fusibles ABB est testée dans les conditions les plus sévères de notre laboratoire suisse de Baden.

Tous ces facteurs concourent à la longévité et à la sécurité de fonctionnement, aidant ainsi le client à gagner en productivité.

Signification des pertes

Les pertes dans les redresseurs sont principalement dues aux semi-conducteurs et aux fusibles. Si ces derniers accusent souvent des pertes cuivre, certains semi-conducteurs présentent des

pertes proportionnelles au courant et d'autres, des pertes proportionnelles au carré du courant, selon la formule :

$$P = I_t V_t + I_t^2 R_t$$

avec

I_t Courant traversant le composant ;

V_t Chute de tension directe aux bornes du composant ;

R_t Résistance de conduction directe équivalente.

Moins de pertes, c'est plus de rendement et moins de dépenses de fonctionnement.

Redresseurs haute tension (2000 V_{cc})

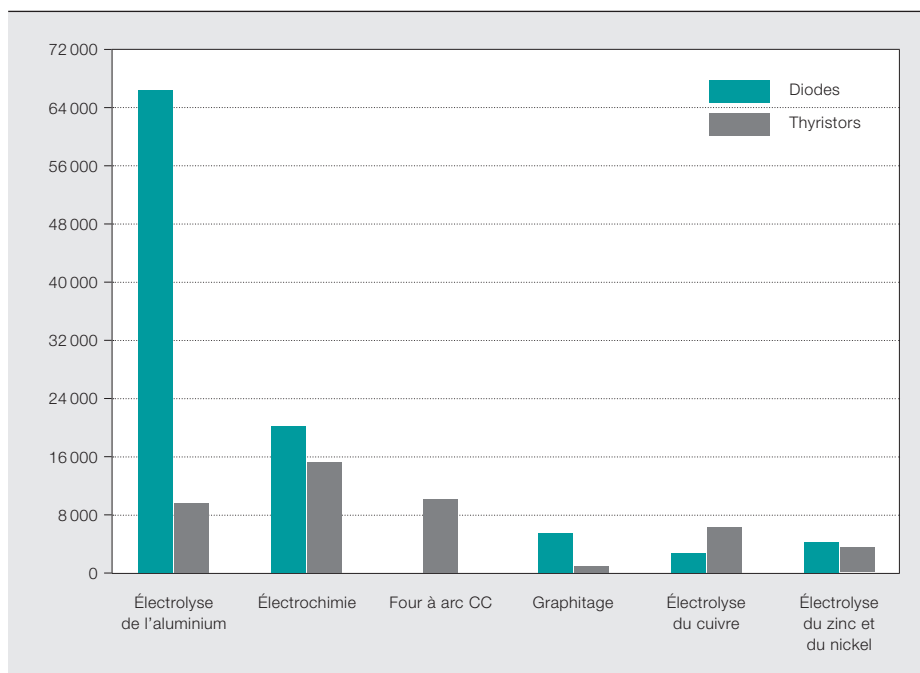
L'économie dicte les choix technologiques. Un rendement accru améliore la viabilité économique. Il est prouvé que les redresseurs à tension élevée sont plus efficaces que les systèmes produisant la même puissance à des tensions plus faibles. La raison en est que les pertes majeures augmentent avec le carré du courant et seulement proportionnellement à la tension. La fiabilité de la technologie des semi-conducteurs ABB et sa tenue aux tensions plus élevées ont permis le développement de redresseurs 2000 V_{cc} offrant en service un bien meilleur rendement à des tensions supérieures.

Une épopée

Leader de l'électronique de puissance en général et des systèmes redresseurs en particulier, ABB a à son actif de nombreuses innovations marquantes. L'électronique de puissance voit le jour avec des redresseurs à vapeur de mercure au service de la recherche et de l'industrie, de 1913 à 1925. En 1939, les sociétés à l'origine d'ABB réalisent la première liaison à courant continu haute tension (CCHT), qui sera exploitée en 1954. À la fin de la décennie 1950, les entreprises qui constituent aujourd'hui le Groupe ABB

La diode est la solution préférée des industriels de l'aluminium pour sa simplicité de commande.

6 Utilisation des semi-conducteurs dans les redresseurs de forte puissance



jettent les bases des semi-conducteurs actuels de type diodes et thyristors.

Vers 1960, BBC met au point des redresseurs à contacts capables de commuter jusqu'à 6 kA, valeur qui entraine à l'époque dans le domaine des « courants forts ». La puissance des redresseurs augmente considérablement de 1967 à 1980 avec l'émergence de ce que l'on considère aujourd'hui comme des diodes à courant et tension élevés. De 1970 à 1980, les convertisseurs destinés aux applications à plus haute fréquence (chauffage et fusion moyenne fréquence) et au CCHT occupent un créneau à part. Ce ne sont là que quelques-unes des innombrables percées d'ABB dans de multiples domaines d'application. Au fil des ans, ABB signe les grandes avancées des redresseurs pour l'électrolyse de l'aluminium et les fours à arc à courant continu.

Un siècle d'électronique de puissance

La division Redresseurs d'ABB, grande utilisatrice de semi-conducteurs de puissance, est fière d'avoir participé à cette aventure technologique. Depuis les années 1960, les semi-conducteurs sont employés en nombre dans quantité d'applications de redressement de grande puissance → 6.

La production d'aluminium arrive en tête de liste. À cela plusieurs raisons :

- La présence d'importants groupes redresseurs alignant un grand

nombre de semi-conducteurs en parallèle ;

- Le nombre de groupes redresseurs fournis et la croissance mondiale de la demande en aluminium ;
- Les exigences de redondance et de protection contre les surcharges.

La diode a la faveur des industriels du secteur qui la préfèrent au thyristor pour sa simplicité de commande. L'essor des diodes de 2 à 4 pouces et l'augmentation des tensions de blocage confortent ce choix.

Le thyristor a toute sa place dans les redresseurs alimentant des charges très dynamiques et contraignantes, comme les fours à arc. Les électrolyses du chlore, du cuivre et du zinc l'emploient surtout pour son efficacité et son aptitude à la commande.

La sécurité d'abord !

Outre la performance et la fiabilité, la sécurité de fonctionnement a toujours été aux avant-postes des activités d'ABB en électronique de puissance : sécurité des personnes travaillant au contact ou à proximité de l'équipement, mais aussi protection des appareils et installations voisines. Par leur conception, nos redresseurs de grande puissance remplissent les exigences de fiabilité et de sécurité, même en cas de défaillance.

Technologie aboutie

Les semi-conducteurs (diodes ou thyristors) jouent un rôle capital dans la construction de redresseurs de forte puissance efficaces, robustes et fiables. Ils ont évolué au rythme des progrès accomplis par le génie des procédés pour satisfaire aux exigences croissantes des redresseurs. La disponibilité de composants de plus gros diamètre (4 et 5 pouces), avec des tensions de blocage plus élevées (4,2 kV, 6,5 kV), autorisent aujourd'hui de très hautes densités de puissance.

Shripad Tambe

Rajesh Pai

ABB Switzerland Ltd, High Power Rectifiers

Turgi (Suisse)

shripad.tambe@ch.abb.com

rajesh.pai@ch.abb.com

Lecture complémentaire

Tambe, S., Winter, C., Dhareshwar, S., "Rectifiers for Higher Voltages in Aluminum Smelters: Challenges and Solutions", *Metal Bulletin*, Mumbai (Inde), 2007.

Rédaction

Claes Ryttoft

Chief Technology Officer and
Group Senior 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
andreas.moglestue@ch.abb.com

Édition

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)

ABB review paraît quatre fois par an en anglais,
français, allemand, espagnol et chinois.
La revue 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 ©2014
ABB Technology Ltd.
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



Fig. 32. Transport of a large three-phase oil-immersed transformer in 1908.

occasion. Inasmuch as one single drop of water greatly
impairs the insulation of a transformer, however, due
attention had always to be paid to its drying. Originally
the transformers were heated over an open fire or by

transformers no good, but they
them into service.
Due to the decrease
by utilizing railway ck

up to 50 kV in the
with electrodes 5 m
adays, due to better
methods, values of
attained. In addition
the oil attention is a
degeneration. This only
the last traces of a
obviating the forma
glow discharge, a p
cable manufacture fo

VIII. TRANSPORT

The time is not
large power transform
dismantled for transp
and re-drying process



Dans le numéro 2|2014

Spécial 100 ans

En juillet 1914, la première *Brown Boveri review*, du nom de la société
à l'origine d'ABB, voyait le jour... Rebaptisée *Revue ABB* en 1988,
elle peut s'enorgueillir de cent ans de parution ininterrompue, qui lui
valent d'être la « doyenne » de toutes les entités du Groupe.

Notre deuxième numéro de 2014 plongera dans ses archives pour y
dénicher des trésors d'inventivité, des curiosités de laboratoire aux
sources de bien des innovations et lignes de produits qui font
aujourd'hui la réussite d'ABB.

Cent ans de revue, ce sont aussi cent ans de lecteurs, de souvenirs
et de témoignages! Nous vous invitons à partager ce Livre d'or avec
notre rédacteur en chef, Andreas Moglestue, à l'adresse *andreas.moglestue@ch.abb.com*.

Notre publication centenaire n'est pas la seule « marque de fabrique »
ayant laissé son empreinte dans l'histoire du Groupe. Citons la liaison
CCHT, mise en service commercial il y a 60 ans, et le robot ABB,
lancé il y a 40 ans. Notre prochain numéro ne manquera pas de
remémorer ces grandes premières.

À vos tablettes!

ABB review a désormais sa version tablette, accessible sur
<http://www.abb.com/abbreview>.

Kiosque

Il vous manque un numéro d'ABB review ?
Pour être informé de chaque parution (ou dossier
spécial), abonnez-vous à la liste de diffusion sur
www.abb.com/abbreview.





Toujours et partout à vos côtés

Retrouvez-nous avec l'appli *ABB review* pour tablette et smartphone. Polyglotte, riche en fonctionnalités et en contenus interactifs (recherche intégrale, galeries photos, vidéos, animations . . .), cette nouvelle version est téléchargeable sur votre magasin d'applications préféré. Du bout des doigts, feuillotez toute l'actualité technologique ABB.
<http://www.abb.com/abbrevreview>

