

ABB

2 | 14
fr

review



100 ans de parution 7

40 ans de robotique 24

60 ans de courant continu 33

Par-delà la connaissance 68

La revue
technologique
du groupe ABB



Spécial
100 ans

Power and productivity
for a better world™





Chers lecteurs,

Depuis toujours, la réussite d'ABB repose sur l'innovation technologique.

Concrètement, cela se traduit chaque année par 1,5 milliard de dollars investis en recherche-développement et 8500 ingénieurs et scientifiques mobilisés dans les immenses chantiers de l'énergie et de l'automatisation.

Voilà cent ans que notre magazine informe les investisseurs, clients et collaborateurs du Groupe sur ses réalisations et ses avancées majeures dans ces domaines stratégiques.

Tout comme ABB, la revue n'a de cesse d'innover, dans son contenu et sa présentation, pour mieux vous informer et vous servir.

La prochaine étape sera d'accroître sa présence sur les différents supports de communication en ligne pour s'accorder aux nouveaux usages du numérique et renforcer les liens et les échanges avec ses lecteurs par un traitement plus interactif de l'actualité technologique.

Bienvenue dans ce Spécial Centenaire!

A handwritten signature in blue ink, reading 'Ulrich Spiesshofer'.

Ulrich Spiesshofer

Directeur général
du groupe ABB

Centenaire

- 7 **ABB review, témoin de son siècle**
100 ans de parution
- 21 **Morceaux choisis**
Les coups de cœur de la rédaction

Précurseur

- 24 **Génération montante**
ABB célèbre 40 ans de robotique industrielle
- 33 **60 ans de CCHT**
Genèse d'un leadership mondial

Moteur

- 42 **En grande pompe**
Un convertisseur de 100 MW pour Grimsel 2
- 48 **Densité de puissance**
Des moteurs ABB à la pointe de l'innovation
- 54 **Tour de force**
L'ACS800 *multidrive*, un convertisseur aux multiples talents

Visionnaire

- 58 **Point chaud**
Un nouveau capteur infrarouge mesure la température dans les disjoncteurs d'alternateur
- 65 **Montée en grade**
Une alimentation sans interruption moyenne tension pour une protection électrique complète
- 68 **Repousser les frontières de la connaissance**
Les conditions aux limites, cruciales pour la fiabilité des simulations
- 74 **Le turbo met les gaz**
La simulation de turbine pour turbocompresseurs de nouvelle génération

1914 – 2014



Claes Ryttoft

Chères lectrices, chers lecteurs,

L'histoire nous donne souvent les clés pour comprendre le présent. Et nous apprend parfois que les idées érigées un peu vite en nouveauté sont déjà « dans l'air » depuis belle lurette ! Mais elle nous rappelle également combien les percées technologiques peuvent bousculer des pans entiers de l'industrie.

2014 est une année d'anniversaires pour ABB. À commencer par sa revue qui, vous l'aurez compris, souffle ses 100 bougies. Nous consacrons tout un cahier à l'événement, qui sera relayé par d'autres manifestations au cours des prochains mois.

Certes, un seul numéro d'*ABB review* ne fait qu'effleurer toute la richesse de nos archives. Nous espérons néanmoins que cette modeste rétrospective vous donnera un aperçu des immenses avancées dont la revue s'est faite l'écho. Pour des raisons de place, nous avons dû élaguer quelques articles dans l'édition papier, mais nos lecteurs y auront accès *in extenso* dans sa version numérique.

Les deux autres grandes dates anniversaires concernent la robotique et le courant continu à haute tension (CCHT). En 1974, ASEA commercialisait l'IRB 6, premier robot à actionneurs électriques et commande électronique au monde. Presque tous les robots industriels en service aujourd'hui relèvent de cette catégorie et s'inspirent de la structure anthropomorphe de l'IRB 6.

En 1954, ASEA livrait la première ligne CCHT au monde pour alimenter en énergie l'île de Gotland, au large des côtes suédoises. 20 MW, 100 kV, 98 km : une brouille, comparée aux records de puissance et de longueur des projets CCHT ultérieurs ! Pour autant, la liaison fera date dans le progrès du transport électrique, notamment par ses câbles sous-marins dont les principes sont toujours d'actualité.

Deux jalons qui méritaient bien chacun un article.

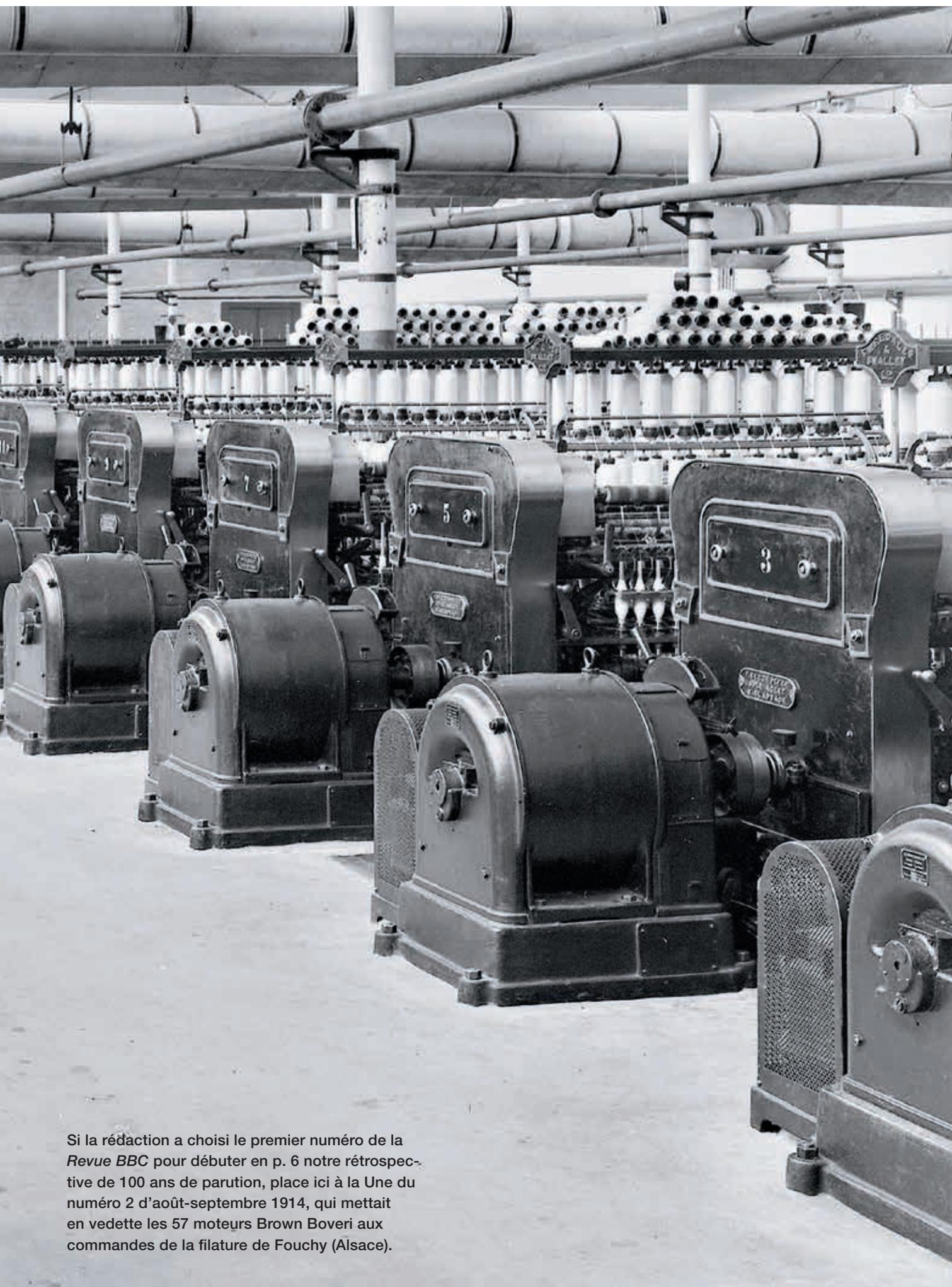
Notre numéro aborde également des domaines aussi variés que les centrales hydrauliques de pompage-turbinage, les moteurs de puissance augmentée, les convertisseurs statiques de fréquence, les capteurs, les alimentations sans interruption et la simulation numérique.

J'espère que ce centenaire d'*ABB review* vous éclairera sur le passé, le présent et le futur de la technologie ABB et vous fera, aux côtés de l'équipe éditoriale, découvrir ou revivre la grande et la petite histoire du Groupe.

Bonne lecture,

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

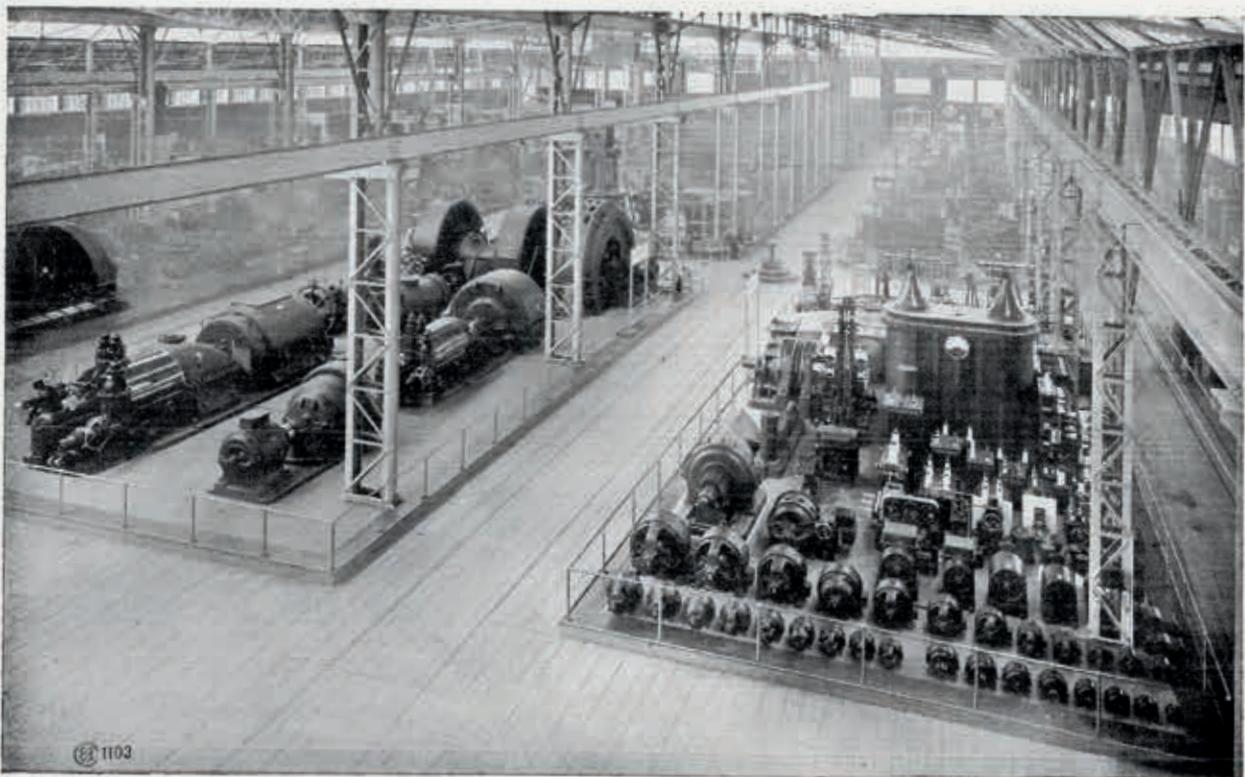




Si la rédaction a choisi le premier numéro de la *Revue BBC* pour débiter en p. 6 notre rétrospective de 100 ans de parution, place ici à la Une du numéro 2 d'août-septembre 1914, qui mettait en vedette les 57 moteurs Brown Boveri aux commandes de la filature de Fouchy (Alsace).

REVUE BBC

Publiée par la Société Anonyme BROWN, BOVERI & Cie., à BADEN (Suisse)



Les stands BBC dans la galerie des machines de l'Exposition Nationale Suisse, à Berne.

SOMMAIRE:

	page
Programme	3
La participation de BBC à l'Exposition Nationale Suisse à Berne, mai-octobre 1914	3
Emploi de commutatrices sur les réseaux à courant continu à trois conducteurs	14
Nouvelles publications de propagande	16
Nomenclature des articles les plus importants parus dans les périodiques techniques, 1 ^{er} trimestre 1914	17

ABB review, témoin de son siècle



L'histoire est bien plus qu'une suite chronologique de grandes dates et d'événements marquants. Si les bouleversements politiques, les conflits armés, les mutations économiques et les progrès de la technique en sont les temps forts, ce sont les petits faits et gestes du quotidien (souvenirs, photographies, anecdotes ...) qui l'animent et lui donnent tout son sens. Retour sur les dix décennies écoulées qui font d'ABB review le fascinant miroir de notre passé.

Quand elle voit le jour en juillet 1914, la *Revue BBC* a pour mission d'informer les commerciaux et partenaires industriels de l'entreprise sur ses produits, développements et activités. Elle élargit peu à peu son périmètre au cours des ans pour conquérir de nouveaux lecteurs, dont les clients et fournisseurs, les experts et journalistes, les universitaires, formateurs, étudiants, mais aussi les profanes et esprits curieux de technique. De nombreux ingénieurs ABB ont été des étudiants passionnés par les prouesses technologiques relatées dans nos colonnes, qui ont inspiré leur orientation professionnelle. Encore aujourd'hui, des articles publiés à l'origine dans *ABB review* sont régulièrement repris par la presse spécialisée, tout comme ses illustrations et graphiques figurent en bonne place dans les ouvrages universitaires. La revue doit en partie son succès à son souci constant d'objectivité: vouée à rendre compte des actualités technologiques du Groupe, elle se veut résolument factuelle et impartiale.

Tout au long de son siècle de parution, *ABB review* a abordé une quantité impressionnante de thèmes divers et variés. Des articles ont traité de premières générations de produits qui sont encore fabriqués par ABB. Souvent avec clairvoyance, pour les offres ABB toujours d'actualité, parfois sans suite, quand les développements n'ont aujourd'hui plus cours ou ont évolué différemment.

Magazine de référence de l'innovation technologique ABB, la revue a beaucoup progressé au fil du temps, dans la forme (typographie, graphisme, couleur...) comme dans le fond. Les articles de l'époque fourmillaient davantage de démonstrations mathématiques, de schémas détaillés et de plans de construction que maintenant. Au-delà de la nécessité de préserver la propriété intellectuelle des produits ABB, cette évolution traduit notre souci de coller aux attentes des

Ci-contre

En couverture du premier numéro, l'Exposition Nationale Suisse qui s'est tenue à Berne, de mai à octobre 1914.



1914

1914

Premier numéro de la *Revue BBC*

Inauguration du canal de Panama

1918

Lancement du magazine *Reader's Digest*

1921

Les femmes acquièrent le droit de vote en Suède

1922

Première injection d'insuline à l'homme par Sir Frederik G. Banting

1923

Parution de l'hebdomadaire américain *TIME*

lecteurs, tout en opérant de subtils changements de ligne éditoriale.

L'entreprise ASEA, cofondatrice avec BBC du groupe ABB en 1988, avait aussi sa publication, *ASEA Journal*, datant de 1909. La fusion d'ASEA et de BBC réunit les deux équipes de rédaction sous une seule et même bannière se nourrissant des talents des deux publications originelles.

ABB review est aujourd'hui diffusée à quelque 60 000 exemplaires dans plus de 120 pays, en 5 langues. Son édition papier et numérique au format PDF s'enrichit d'une version « mobile » pour terminaux Apple et Android.

À noter, calibrage oblige, que vous ne trouverez dans les pages qui suivent qu'un condensé des « belles feuilles » de la *Revue Brown Boveri* et d'*ASEA Journal*. Certaines sont publiées *in extenso* dans la version tablette.

Andreas Moglestue

Rédacteur en chef

Zurich (Suisse)

andreas.moglestue@ch.abb.com

In memoriam

Charles E. L. Brown et Walter Boveri fondent Brown, Boveri & C^{ie}, le 2 octobre 1891. Bien que tous deux ingénieurs de formation, Boveri prend vite les rênes de l'entreprise et devient l'artisan de sa croissance, tandis que Brown ne cesse de relever ses défis technologiques. Leurs initiales sont à jamais gravées dans l'enseigne « ABB ». Décédés en 1924, à quelques mois d'intervalle, ils furent les seuls auxquels la revue rendit un hommage posthume dans ses colonnes.

Les cofondateurs d'ASEA, Ludwig Fredholm et Jonas Wenström, disparurent en 1891 et 1893, avant même la naissance d'*ASEA Journal*.



The death of C. E. L. Brown, which took place at Montagnola near Lugano on the morning of May 2nd after a brief illness, marks the passing of a figure which had already become almost legendary in the world of electrical engineering. This is partly accounted for by the fact that Brown retired from active participation in electrical affairs thirteen years ago, but is, perhaps, to a great extent due to the attitude of a younger generation, which takes for granted the achievements of the past and, striving onwards, finds but little leisure for considering pioneer work carried out before its time. Thus, there is a tendency to forget to whose genius we owe so much of the progress which has been made in the design and construction of electrical machinery.

Charles Eugene Lancelot Brown was born at Winterthur in Switzerland on June 17th, 1863, the son of Charles Brown, an engineer well known as the originator of the bayonet-type frame and the Sulzer drop-valve steam engine. After one year's apprenticeship with M. Burgin in Basle, he was engaged in the spring of 1885, when hardly 22 years old, by the Oerlikon Engineering Works, and two years later was put in control of the electrical department. This marks the commencement of an exceptionally fruitful career.

During his first years with the Oerlikon Company, Brown devoted his energies to the development of the direct-current system, and particularly to the production of practical direct-current machines.

But a few months have elapsed since we recorded the death of the genial inventor and designer C. E. L. Brown, and now his nearest colleague and the co-founder of our firm, Walter Boveri, has followed him on the last journey. His passing away has deprived the Swiss electrical industry of its most outstanding personality, and no deeper loss could have been sustained.

W. Boveri was born in Bamberg in the year 1865, and after a course of engineering training at Nuremberg, he came to Switzerland when 20 years of age. Here he entered the Oerlikon Engineering Works, where, under the direction of C. E. L. Brown, the manufacture of electrical machinery was just being undertaken. Boveri, who subsequently took charge of their erection department, assisted throughout the development of the direct-current machine there, and in the year 1888 carried out the erection and setting into operation of the first electric power transmission scheme from Kriegstetten to Solothurn. In 1891, after a period of six years with the Oerlikon Company, he and C. E. L. Brown, with whom he was closely associated, founded the firm of Brown, Boveri & Co. at Baden.

In the early years following the foundation of the firm, Boveri devoted himself, as at Oerlikon, to the planning, installation, and putting into operation of both small and large plants. The unusually good results obtained with Brown's designs, however, soon resulted in a very rapid increase in the activity of the Baden works, and it was not long before Boveri was faced with work of a very different nature. The pro-



1924

1924

Disparition de Charles E. L. Brown, cofondateur de BBC

Premiers JO d'hiver

Disparition de Walter Boveri, cofondateur de BBC

1925

Premiers essais de la télévision par John L. Baird

1928

Naissance, en Australie, du *Royal Flying Doctor Service*, premier service d'ambulances aériennes au monde

1931

Inauguration de l'*Empire State Building*, à New York

1935

Premier match de baseball de la *Major League* éclairé de nuit

Un siècle en marche

Trois centenaires flambant *vieux*

SALLY DURRANT – Ils étaient déjà à pied d'œuvre bien avant l'invention du grille-pain et de la télévision, l'envol du transport aérien et l'avènement d'Internet. Ils ont connu deux guerres mondiales, le succès planétaire des Beatles, de Britney Spears et de Monty Python, la conquête de la Lune, la découverte de la pénicilline et le triomphe du plastique. Bref, le meilleur et le pire d'un monde en perpétuelle mutation.

Trois transformateurs de puissance ABB ont fait partie du « paysage énergétique » de l'Australie victorienne des cent dernières années, pour le compte du fournisseur local SP AusNet qui possédait également deux entreprises de production hydroélectrique.

Neil Sequeira, chef de projet SP AusNet pour *Capital Delivery and Engineering* en convient : « Ces mastodontes BBC étaient des bêtes de somme surdimensionnées qui n'ont pas failli à la tâche. Leur seul péché mignon : une grande soif d'huile ! Mais qui refuserait à des centaines une petite lampée de temps en temps ? ».

L'heure de la retraite a sonné pour ces trois comparses, non parce qu'ils ont fait leur temps mais pour cause de reconstruction du poste de transformation SP AusNet. L'un deux ira couler des jours tranquilles sur le site ABB de Moorebank (Sydney), à l'ombre d'un arbre à caoutchouc, symbole de longévité... comme la technologie ABB.



Sally Durrant
ABB Corporate Communications
Moorebank (Australie)
sally.durrant@au.abb.com



Les trois transformateurs élévateurs BBC de 9 MVA 22/66 kV, datant de 1914.

REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & C^{IE}, A BADEN (SUISSE)

XXVIII^e ANNÉE

AVRIL/MAI 1941

N° 4/5

La Revue Brown Boveri paraît mensuellement. La reproduction d'articles ou d'illustrations est permise, à condition de citer leur provenance. Prix de l'abonnement annuel pour la Suisse Fr. 10.—, prix du fascicule pour la Suisse Fr. 1.—, port et emballage non compris.

SOMMAIRE :

	Pages		Pages
Le séchage électrique de l'herbe, un problème économique actuel pour la Suisse	75	Courant de vapeur dans les gaines d'anodes des mutateurs, et son influence sur le fonctionnement	97
Transformateurs de mesure isolés aux gaz comprimés	84	Le compresseur centrifuge « Isotherme »	168
L'emploi des chaudières Velox dans les installations de chauffage	89		

LE SÉCHAGE ÉLECTRIQUE DE L'HERBE UN PROBLÈME ÉCONOMIQUE ACTUEL POUR LA SUISSE. ¹⁾

L'importance du séchage artificiel de l'herbe, pour la production de fourrage concentré au moyen de fourrage vert de pays est exposée ici, spécialement au point de vue de la situation actuelle de l'alimentation de la Suisse. Le procédé de séchage déjà connu a été amélioré dernièrement par Brown Boveri qui y a introduit la récupération de chaleur et le chauffage électrique. Les avantages techniques et économiques atteints sont présentés par des chiffres.

I^e MANQUE DE FOURRAGE.

L'importation de denrées alimentaires en Suisse est fortement touchée par les conditions actuelles. Le plan de culture « WAHLEN », qui vise à rendre le pays plus indépendant au point de vue économique, a rencontré une approbation générale.

Une partie de ce plan traite la production du fourrage nécessaire à l'élevage du bétail indispensable. Les fourrages les plus difficiles à se procurer actuellement sont ceux riches en albumine, que l'on pouvait se procurer facilement à l'étranger. Tous les pays en guerre ou touchés par la guerre dans les régions pluvieuses de l'Europe, se trouvent en face du même problème. Partout on attend du séchage de fourrage vert du pays un remède au manque de fourrage.

Ce problème revêt une forme particulière en Suisse. Comme le séchage demande de la chaleur et que l'importation de combustible suffit à peine à couvrir les besoins absolument indispensables, il est évident qu'il faut employer l'électricité comme source de chaleur.

Le séchage de l'herbe se faisant en été, il tombe à l'époque où l'on dispose d'excédents d'énergie hydro-

¹⁾ G. Brunner, Die wirtschaftliche Grastrocknung . . . Bulletin SEV. 1941, p. 41—48.

lique; il est donc intéressant d'utiliser l'électricité. Cependant certains obstacles nous séparent encore de la réalisation de ce procédé.

II^e SÉCHAGE DE L'HERBE.

La pensée de sécher l'herbe artificiellement vient à tous ceux qui voient se pourrir l'herbe sous l'effet de l'humidité que le ciel dispense largement dans nos régions pluvieuses. L'idée est très simple mais sa réalisation est difficile, car il faut que la solution soit économique.

L'herbe contient comme tous les végétaux à l'état frais au maximum un peu moins de 20% de substances nutritives sèches. Le reste est de l'eau, qui doit être presque complètement évaporée si l'on veut que les matières nutritives puissent se conserver. En moyenne il semble que le reste d'eau ne doit pas dépasser beaucoup le 10% de la substance sèche, si l'on ne veut pas qu'avec les variations inévitables il ne se produisent pas de la moisissure.

D'une masse d'herbe de 100 kg il faut donc retirer 80 kg d'eau et plus. Le pressage ne permet d'extraire que peu d'eau et pas sans perte de suc, si bien qu'il n'y a pas d'autres moyens que l'évaporation. Mais la transformation de l'eau en vapeur demande de la chaleur. La chaleur de vaporisation d'un kilogramme d'eau est de 600 calories à l'abri de l'air, et si l'air pénètre librement, la consommation théorique de chaleur est de 700 calories; en pratique aucun sécheur d'herbe ne consomme moins de 1000 calories

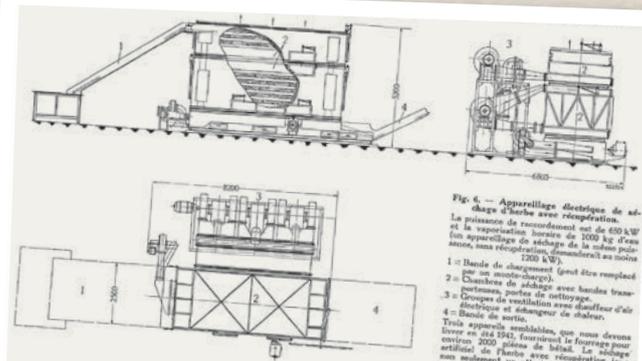
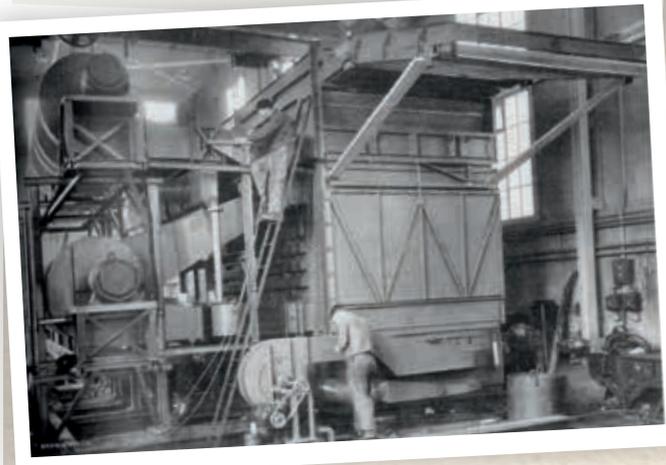


Fig. 6 — Appareillage électrique de séchage d'herbe avec récupération. La puissance de raccordement est de 600 kW et la vaporisation horaire de 1000 kg d'eau. L'installation de séchage de la même puissance, sans récupération, nécessiterait au moins 1200 kW.
1 = Bande de chargement (peut être remplacé par un moteur-chargeur).
2 = Chambre de séchage avec bandes transport, portes de nettoyage.
3 = Chambre de ventilation avec diffuseur d'air électrique et échangeur de chaleur.
4 = Bande de sortie.
Trois appareils semblables, que nous devons construire 2000 pièces de bétail. Le séchage nous rendrait un aide important pour notre ravitaillement actuel, mais sera aussi apprécié à l'avenir.



Sécher à l'électricité les pâturages d'été pour mieux engranger les fourrages d'hiver? Nos archives regorgent d'articles sur des applications originales de la technologie BBC.

Revue Brown Boveri, avril-mai 1941



1942

1937

Le chimiste Wallace Carothers brevète la fibre de nylon

Chester Carlson invente l'électro-photographie ou xérographie, procédé d'impression à sec précurseur de la photocopie

1939

Première démonstration de liaison CCHT par BBC, entre Wettingen et Zurich (Suisse)

BBC construit la première turbine à gaz destinée à la production d'électricité

1942

É. Gagnan et J.-Y. Cousteau mettent au point le scaphandre autonome ou détendeur

1943

Premier disjoncteur BBC à air comprimé rapide de 110 kV

La Swiss connection

De BBC à LCD

ANDREAS MOGLESTUE – ABB et ses devancières n'ont jamais hésité à s'aventurer hors des sentiers battus pour défricher de nouvelles technologies. Certaines de ces escapades ont largement transgressé leur premier métier; en témoigne l'incursion de BBC dans l'électroménager (fours, réfrigérateurs, cireuses, etc.) et les montres!



Prototype d'écran LCD à matrice passive de 540 x 270 pixels, breveté BBC

La montre *digitale* évoque immanquablement les années 1980. Pourtant, son affichage à cristaux liquides ou LCD (*liquid crystal display*) remonte à bien plus loin. Le botaniste autrichien Friedrich Reinitzer fut le premier à identifier, dès 1888, une nouvelle phase de la matière, à une époque où celle-ci n'était supposée exister que sous trois états : solide, liquide et gazeux. Reinitzer en fit part au physicien allemand Otto Lehmann, qui remarqua qu'une substance organique (benzoate de cholestéryle) avait les qualités

biréfringentes du cristal, dans sa phase intermédiaire : d'où le nom de « cristal liquide ».

En 1962, Richard Williams, expert des laboratoires RCA (*Radio Corporation of America*), montre que l'on peut modifier l'orientation des cristaux liquides de p-azoxyanisole en les soumettant à un champ électrique. Son collègue George Heilmeyer rend ce réalignement visible à

l'aide de colorants, ouvrant la voie au LCD. Vers 1968, l'entreprise Sharp, consciente du potentiel de cette technologie pour ses calculatrices de poche, lance la recherche dans ce domaine ; la première calculette à écran LCD voit le jour en 1973.

En 1969, la recherche BBC, installée au centre de Dättwil (Suisse) inauguré deux ans

plus tôt, s'associe au groupe pharmaceutique Hoffmann-La Roche. Ce partenariat porte ses premiers fruits grâce à Wolfgang Helfrich et Martin Schadt qui déposent l'année suivante un brevet de cristaux liquides nématiques à effet torsadé. Cette technologie améliore le contraste des écrans tout en consommant moins. Hoffmann-La Roche met fin à cette coopération en 1972, tandis que BBC poursuit les développements. Une première chaîne de fabrication est créée à l'usine BBC de tubes de Birrfeld (Suisse) en 1973.

L'année suivante, un tout nouveau site de production est inauguré à Lenzbourg, puis agrandi pour occuper 4370 m² en 1978.

Compacts, ces afficheurs s'adaptent parfaitement aux montres-bracelets. Si BBC se contente au début de travailler avec de petits horlogers suisses, c'est avec le Japonais CASIO et son produit phare, la *CASIOTRON*, que vient le succès. Cette montre LCD fut la première à être produite en masse et dotée d'un affichage alphanumérique intégrant un calendrier à années bissextiles.

Quelques années plus tard, BBC ajoute le principe du rétroéclairage, toujours d'actualité. En 1983, il invente la « matrice passive », qui améliore considérablement la netteté et la finesse de l'affichage. La technologie envahit les consoles de jeux *Game Boy* de Nintendo et les premiers téléphones mobiles. Ce sont surtout les royalties que BBC perçoit de ses brevets qui profitent à l'entreprise, dont la production commence à décliner. Aujourd'hui, Lenzbourg produit des semi-condensateurs de puissance.

Andreas Moglestue

ABB review

Zurich (Suisse)

andreas.moglestue@ch.abb.com

Pour aller plus loin

Kawamoto, H., « The History of Liquid-Crystal Displays », *Actes IEEE*, vol. 90, n° 4, p. 460-500, avril 2002.

Wild, P. J., *First-Hand: Liquid Crystal Display Evolution – Swiss Contributions*, [en ligne], disponible sur : http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/First-hand:Liquid_Crystal_Display_Evolution_-_Swiss_Contributions.



Fig. 166. -- Automobile Fiat 500 (Topolino) transformée pour la traction électrique. Puissance 4,2 ch. Batterie au plomb de 90 Ah (pour une décharge en 10 h), 84 V. Vue montrant le montage de la batterie. Convient pour la circulation dans les villes relativement plates. Vitesse maximum en palier 60 km/h.

En route pour l'électromobilité?
L'idée a déjà la cote dans les années
1940 avec la Fiat 500 Topolino.

Revue BBC, janvier-février-mars 1942



Transport de transformateurs en 1908
(ci-dessus) et 1937 (ci-contre)

Revue BBC,
novembre-décembre 1942



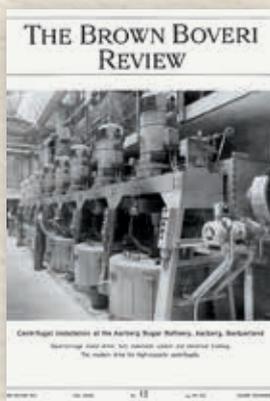
1944

1944

Première
motrice
BBC
rapide
à attaque
directe

1945

George
Orwell
publie
*La République
des animaux*,
satire de
la dictature



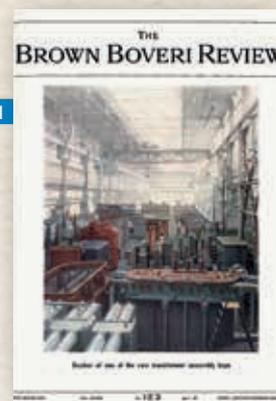
1946

1946

Marion
Donovan
créée
la couche
jetable

1947

J. Bardeen,
W. Brattain
et
W. Shockley
inventent
le transistor



1951

1951

Première
édition
couleur de la
Revue Brown
Boveri

LES TRANSMISSIONS D'ÉNERGIE PAR COURANT ALTERNATIF ET PAR COURANT CONTINU. QUELQUES COMPARAISONS ET LA SOLUTION PRÊTE A L'APPLICATION PRATIQUE DU COURANT CONTINU.

Indice général 424.315.011.014
424.315.013.023

Les transmissions d'énergie par courant continu et par courant alternatif triphasé sont comparées en considérant l'impact de la question et quelques-uns des problèmes techniques qu'elle soulève. De tels projets ont été réalisés au cours de ces dernières années dans divers pays et les résultats ont été publiés dans les revues de l'énergie électrique. Le présent article est un résumé de ces travaux et de la solution qui a été trouvée pour la transmission d'énergie par courant continu.

Le problème de la transmission à longue distance de grandes quantités d'énergie se pose de manière de plus en plus pressante. En effet, devant la nécessité de ménager les ressources malgré tout limitées des mines de charbon, on se trouve conduit à tirer parti toujours davantage de chutes d'eau encore inexploitées. Mais comme l'énergie hydraulique de différents pays a déjà été mise largement à contribution, on se verra obligé de faire appel à celle de régions reculées et, en conséquence, de transporter l'énergie électrique, qui y sera produite, à de grandes distances, jusqu'au centre où elle sera consommée. Pour couvrir de pareilles distances pouvant atteindre des centaines de kilomètres, seul le système de transmission par courant continu peut être envisagé en raison des avantages économiques qu'il présente par rapport à l'emploi du courant triphasé. À partir de quelle distance cette supériorité du courant continu devient-elle manifeste ? Si cette distance limite n'est pas trop élevée, un nouveau champ d'application s'ouvre alors au courant continu : l'interconnexion des grands réseaux qui nécessite l'établissement de longues lignes capables de transmettre de fortes puissances. Mais la transmission d'énergie par courant continu ne deviendra une réalité qu'au moment où l'on aura réussi à construire des stations de départ et d'arrivée suffisamment puissantes et offrant une sécurité d'exploitation assez grande, dans lesquelles le courant triphasé est converti en courant continu et, inversement, le courant continu en courant triphasé. C'est pourquoi il nous a paru utile de montrer à quel point avancé on est parvenu dans l'évolution de la construction des mutateurs à haute tension destinés à ces sous-stations.

a) Comparaison économique.

Nous avons eu déjà l'occasion de comparer les coûts de transmissions d'énergie à grande distance par courant continu et par courant alternatif ¹⁾. Cette étude nous a permis de conclure à la supériorité de la transmission par courant continu dès que la distance dépasse 200 à 300 km. Depuis, nous avons réalisé des progrès aussi bien dans l'un des systèmes de transmission que dans l'autre. Certains résultats sont venus battre en brèche, en particulier, l'opinion courante, à cette époque, suivant laquelle il était nécessaire d'échelonner le long des lignes à courant triphasé des stations de compensation destinées à en

assurer la stabilité. Il semble en effet possible, en utilisant des machines asynchrones spéciales ou en agissant de façon appropriée sur l'excitation des machines synchrones, d'assurer cette stabilité sans l'emploi de stations de compensation pour des distances bien supérieures à celles que l'on considérait comme maximum ²⁾. Cette nouvelle conception nous oblige donc à revoir et à corriger les calculs comparatifs que nous avions établis.

La raison principale de la supériorité du courant continu sur le courant triphasé, dès qu'il s'agit de grandes distances, réside dans le fait que pour une puissance donnée, le coût d'une ligne à courant continu est sensiblement inférieur à celui d'une ligne à courant triphasé. La figure 1 montre, pour les deux genres de courant, comment le coût d'une ligne varie en fonction de la puissance transmise. La comparaison porte sur trois lignes doubles comportant six conducteurs pour le courant triphasé, quatre et respectivement deux conducteurs pour le courant continu. Elle a été faite en admettant des pertes égales à 1% par 100 km de longueur dans chacune des lignes. Les prix de revient des lignes ont été établis sur la base des prix en vigueur en 1939 et s'entendent pour les lignes complètement montées ³⁾. Ils comprennent les conducteurs en cuivre, le câble de terre en acier galvanisé, la mise à la terre des pylônes, les isolateurs, les pinces et pièces accessoires, les pylônes en acier galvanisé, les fondations, les frais de montage, les droits de passage, les relevés de plans et de profils, les frais d'études et dépenses diverses.

Si l'on compare les courbes 1 et 2, on constate que le prix de la ligne à courant continu est inférieur de plus de 30% à celui de la ligne à courant triphasé. Si une avarie se produit sur l'un des conducteurs, on ne dispose plus, dans le cas du courant triphasé, que d'un seul circuit resté sain. Dans le cas du courant continu, un point médian relié à la terre (courbe 2), par contre, un conducteur opposé à celui qui est avarié peut continuer à fonctionner normalement si l'on utilise le sol comme conducteur de retour et l'on dispose encore ainsi d'un circuit et demi. Tenant compte de ce fait, on peut estimer que la ligne correspondant à la courbe 3 est comparable à la ligne double à courant triphasé. En fait, dans ces deux lignes, la mise hors de service d'un conducteur a pour effet de réduire de moitié la puissance transmissible. La sécurité d'exploitation est même supérieure en courant continu (courbe 3) puisque la probabilité d'apparition d'un défaut est plus faible dans une ligne à deux conducteurs que dans une ligne à six conducteurs ⁴⁾.

¹⁾ Les résultats des essais réalisés dans ce domaine ont fait l'objet d'un article qui paraîtra dans un numéro ultérieur de la Revue Brown Boveri.

²⁾ La documentation nécessaire concernant ces prix a été obligeamment communiquée par la Société anonyme d'Entreprises Électriques «Motor-Columbus».

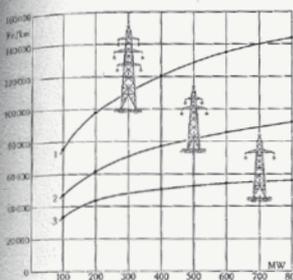


Fig. 1. — Les prix de revient de lignes à courant alternatif triphasé et à courant continu en fonction de la puissance, calculés sur la base des prix en vigueur en 1939.

1. Ligne double à courant triphasé pour tensions de 150 à 400 kV.
2. Ligne double à courant continu pour tensions de 300 à 600 kV.
3. Ligne simple à courant continu pour tensions de 300 à 800 kV. Les calculs ont été établis en admettant, dans les 3 cas, des pertes égales à 1% par 100 km.

La différence entre les prix des lignes à courant continu et à courant triphasé est si grande que les tronçons d'énergie à grande distance peuvent être économiquement réalisés par courant continu à l'avance. Les lignes correspondant respectivement aux courbes 2 et 3 sont équivalentes à la condition, en cas d'avarie affectant 1 conducteur, que le retour de courant puisse se faire temporairement par la terre. L'écart entre les courbes 2 et 3 montre l'économie que cette même condition permet de réaliser dans le cas du courant continu.

Il faut reconnaître, cependant, que la transmission par courant continu exige la conversion du courant aux deux extrémités de la ligne et, par conséquent, l'introduction d'éléments supplémentaires pouvant être le siège de perturbations. Mais on peut remédier à cet inconvénient par l'installation de groupes de réserve. Dans la figure 1, la différence des ordonnées des courbes 2 et 3 donne l'économie réalisable dans le cas où les conditions d'exploitation permettent d'utiliser temporairement le sol comme conducteur de retour. Finalement, en comparant les courbes 1 et 3, on constate que la ligne à courant continu coûte moins de la moitié du prix de la ligne à courant triphasé.

³⁾ Th. Boveri, «Betrachtungen über die Verwendung von Längsapplern in Höchstspannungsnetzen», Bull. ASE, 1944, p. 270-273.
⁴⁾ F. Häberli, «La terre utilisée comme conducteur de retour dans la transmission d'énergie à grande distance», Revue Brown Boveri, 1941, p. 303-306.

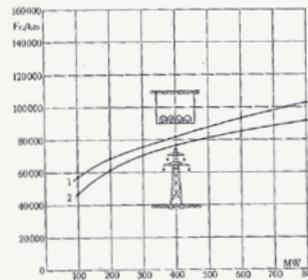


Fig. 2. — Les prix de revient de lignes aériennes et de lignes souterraines (câbles) à courant continu en fonction de la puissance, calculés sur la base des prix en vigueur en 1939.

1. Ligne double, souterraine, pour tensions de 400 à 700 kV.
2. Ligne double, aérienne, pour tensions de 300 à 600 kV (courbe identique à la courbe 2 de la figure 1). Les calculs ont été établis en admettant, dans les deux cas, des pertes égales à 1% par 100 km.

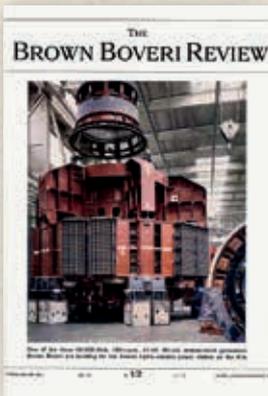
La différence de prix de ces deux lignes est très faible. Or, dans le cas du courant continu, la transmission, par câbles, de puissances élevées à grande distance devient économique.

temporaire du courant par la terre. Mais nous avons la conviction que, malgré toutes les difficultés rencontrées dans ce domaine, on réussira à trouver une solution à ce problème indépendamment du choix du système de courant.

- Pour quelles raisons y a-t-il une telle différence de prix entre les lignes à courant continu et à courant triphasé ? Cela résulte de l'action conjuguée de plusieurs avantages que présente le courant continu et qui peuvent être résumés comme suit :
1. Le nombre moins élevé des conducteurs entraîne une diminution du nombre des isolateurs et permet une simplification de la construction des pylônes.
 2. Le courant continu permet une meilleure utilisation de l'isolation. On sait, en effet, qu'en courant alternatif, l'isolation doit correspondre à la valeur de crête de la tension et non pas à la tension efficace. Pour une valeur déterminée de l'isolation par rapport à la terre, la tension en courant continu peut donc être $\sqrt{2}$ (= 1,414) fois plus grande qu'en courant triphasé. Par ailleurs, pour un diamètre et un écartement donnés des conducteurs, la tension admissible entre conducteurs, eu égard à l'effet de couronne, est théoriquement égale à $\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1,63$ fois celle que l'on peut admettre en courant triphasé.
 3. Les conducteurs peuvent être pleins, même pour des tensions très élevées, puisqu'il n'y a pas d'effet pelluculaire en courant continu. En raison des sections plus fortes que peuvent avoir ainsi les conducteurs, il est possible, sans augmenter les pertes en ligne,

Les arguments en faveur du transport électrique en courant continu pour intégrer la production d'énergie renouvelable ne datent pas d'hier, comme l'atteste cet article de 1945. Malgré les efforts de BBC, ce fut ASEA qui s'imposa dans ce domaine (cf. p. 33 de ce numéro d'ABB review).

Revue Brown Boveri, septembre 1945



1953

ASEA est le premier au monde à fabriquer des diamants synthétiques

1960

Theodore Maiman invente le laser

1961

Premier concert de Bob Dylan à Greenwich Village (New York)

1952

Jonas Salk met au point le vaccin contre la polio

1954

Pose de la première liaison CCHT par ASEA

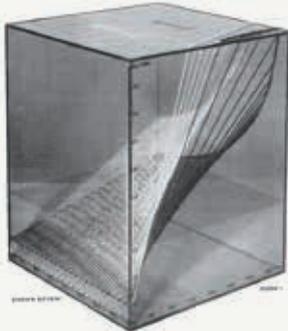


Fig. 3. - Vue de dessus

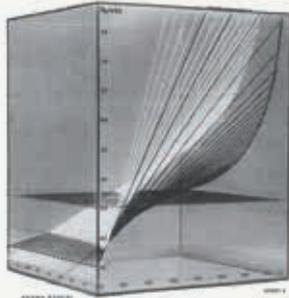


Fig. 4. - Vue de dessus

Fig. 3. et 4. - Diagramme des frais de transport par courant triphasé et par courant continu en fonction de la distance et de la puissance. Surface solide = courant triphasé. Surface hachurée = courant continu. Ordonnées = frais de transport en 10.000 Fr.

Abscisses : avec le genre dans les figures 3 et 4 = distance en km. Abscisses avec la droite dans la figure 7, en mètres et gauche dans les figures 3 et 4 = puissance en MW.

Surface hachurée = frais de transport continu de 0,25 c/kWh. On a représenté sur la face supérieure (Fig. 3) les lignes des lignes de transport. La diagonale montre l'équilibre constant des frais de transport augmentant avec la distance (Fig. 7) et montrant la distance quand la puissance est la même. On voit également que dans le cas d'un courant continu on a, distance non nulle, la plus petite surface d'achat, est beaucoup plus élevée et change d'ordre de grandeur. La courbe d'intersection des deux surfaces rigides représente la limite au-delà de laquelle le courant continu est plus économique que le courant triphasé.

triphase. La courbe d'intersection des deux surfaces rigides, représente la limite au-delà de laquelle le courant continu est plus économique que le courant triphasé; elle est bien visible dans les figures 5 et 7. Si l'on suit cette courbe limite dans la figure 7, on constate que les frais de transport augmentent au voisinage de l'origine des coordonnées, c'est-à-dire dans le domaine des petites distances et des faibles puissances pour lesquelles ces systèmes de transport ne peuvent économiquement se justifier.

Pour les grands transports d'énergie à grande distance, le système à courant continu est plus économique que le système à courant alternatif triphasé. L'évolution technique du premier a depuis maintenant le stade des essais et nous sommes prêts à réaliser avec de bonnes chances de réussite une première installation sur une base industrielle. Étant donné les risques financiers que présente une telle installation, il vaudrait mieux réduire sa puissance au strict minimum, même si, dans ces conditions, l'emploi de courant continu ne se justifie plus économiquement. Nous sommes disposés à assumer, en coopération avec un ou plusieurs industriels, une partie des risques que présente une première installation de ce genre.

1201702

Ch. Ekmanpapper



Fig. 5. - Vue de dessus

que l'accroissement est moindre dans le cas de courant continu. La figure 6 montre que les frais de transport diminuent lorsque la puissance croît et surtout qu'ils augmentent énormément quand la puissance devient faible; on peut aussi constater que pour la distance nulle, les stations d'extrémité du système à courant continu sont beaucoup plus chères que celles du système

Incinérer les déchets pour les transformer en combustibles: Phoenix renaît de ses cendres.

Revue Brown Boveri, juillet 1969

Elimination rationnelle des ordures par incinération, avec production de vapeur et d'énergie électrique

628.492:621.182
628.492:621.311

Dans le présent article, la question de l'incinération des ordures avec production simultanée de vapeur et d'énergie électrique est traitée et expliquée.

Cette méthode d'élimination des ordures ainsi que ses conditions d'application intéressantes sont encore, souvent, peu connues.

C'est un fait bien connu que dans une installation d'incinération des ordures avec production de vapeur et d'énergie électrique, les frais d'exploitation et les frais de capital peuvent, à partir d'une quantité d'ordures déterminée annuellement, être réduits considérablement par la vente de vapeur et d'énergie électrique. Les compagnies d'électricité devraient, dans l'établissement du tarif pour l'achat d'énergie aux centres d'incinération des ordures avec production d'énergie, montrer assez de compréhension pour que la vente d'énergie puisse entraîner la réduction du coût de l'élimination des ordures. En général, un prix d'achat d'énergie de 0,03 à 0,05 Fr./kWh suffit.

L'exposé suivant, destiné en premier lieu à informer les pouvoirs publics, décrit un exemple de projet partant des données pratiques en expliquant clairement les avantages de la méthode d'élimination des ordures.

existe évidemment une certaine différence entre les zones urbaines, rurales et industrielles. Connaître la portée du problème et trouver, malgré son aspect multiple, une solution simple et en même temps économique est la tâche des spécialistes.

Elimination des ordures par incinération

La forme la plus hygiénique pour l'élimination des ordures consiste à les incinérer.

Le processus d'incinération produit des scories et des gaz de combustion.

Les scories peuvent être considérées comme stériles et imputrescibles à cause des températures élevées dans la chambre de combustion. Elles peuvent être stockées sans danger ou utilisées comme matière première.

L'incinération des ordures a lieu à une température comprise entre 900 et 1000 °C. Pour que les gaz d'échappement soient inodores il faut que la température de la zone chaude, parcourue une fois par les gaz brûlés, soit supérieure à la « limite odorante », c'est-à-dire à 800 °C. Avant leur rejet par la cheminée dans l'atmosphère, les gaz chauds doivent être refroidis et purifiés. Pour la purification (filtrage), les gaz doivent être refroidis à environ 300 °C. Selon les méthodes usuelles, le refroidissement se fait par exemple par mélange d'eau ou d'air froid. La quantité de chaleur excédentaire contenue dans les gaz brûlés est ainsi évacuée sans être utilisée.

C'est là qu'intervient notre proposition économique. La quantité de chaleur excédentaire contenue dans les gaz brûlés représente de l'énergie. Elle doit et peut être utilisée pour la production de vapeur et d'énergie électrique.

Introduction

Avec l'accroissement de la population et de l'industrialisation, croissent aussi l'importance d'une élimination efficace des ordures et les problèmes qui s'y rapportent. La quantité d'ordures par tête d'habitant augmente de plusieurs pour cent par an; il

¹ Un film produit par la Ligue suisse pour la protection des eaux et de l'air sous le titre « Déchets - revers de la prospérité », et présenté en première lors du 4^e Congrès International du Groupe International de Recherches sur les ordures ménagères (GIROM) le 2 juin 1969 à Bâle, tend également aux solutions décrites ci-après.

RBB 7-69

329

ABB n'a pas attendu MATLAB™ pour illustrer les résultats de ses recherches en 3D!

Revue Brown Boveri, octobre 1946

BROWN BOVERI REVIEW

750-kV System



1964

1962

La biologiste Rachel Carson publie *Printemps silencieux*, terreau du mouvement écologiste en Occident

1964

J. G. Kemeny et T. Kurtz conçoivent le langage BASIC

1965

James Russell invente le disque compact

1967

Naissance de la calculatrice de poche

1968

Douglas Engelbart invente la souris



Fig. 116. — Voiture de patrouille de la police parisienne équipée d'un poste émetteur-récepteur Brown Boveri
 Ces postes permettent un échange parfait, dans un rayon de 50 km, de communications téléphoniques avec une station centrale.

Équipement radio d'une *Traction* de la police parisienne

Revue Brown Boveri, janvier–février 1949

Les installations électriques dans le Grand Nord canadien firent parfois appel à des moyens logistiques insolites.

Revue Brown Boveri, juillet–août 1955



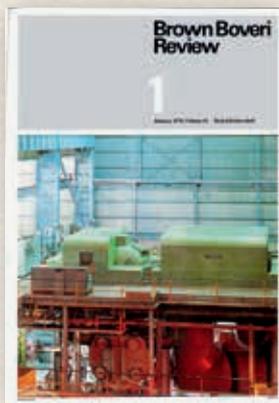
Fig. 25. — Les difficultés des transports routiers dans le nord du Canada ont nécessité l'acheminement par avion jusqu'au bord du grand lac des Esclaves de l'équipement THF pour la centrale de Snow River



Fig. 26. — La centrale de Snow River alimente Yellow Knife, la ville des chercheurs d'or, par l'intermédiaire d'une ligne à 115 kV longue de 110 km. C'est uniquement par la liaison THF utilisant cette ligne que le personnel sédentaire de l'usine communique avec le reste du monde.

1969

Développement par BBC du premier entraînement direct pour cimenterie



1974

1971

Droit de vote des femmes en Suisse

1974

Ernö Rubik invente le *Rubik's Cube*, petit casse-tête aux 43 milliards de combinaisons

ASEA lance l'un des premiers robots industriels électriques au monde



1975

1975

Steve Sasson, ingénieur Kodak, conçoit l'appareil photo numérique

1976

Invention de l'imprimante à jet d'encre



REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & C^{IE} A BADEN (SUISSE)

TOME 42

SEPTEMBRE 1955

N° 9

La Revue Brown Boveri paraît mensuellement.
La reproduction d'articles ou d'illustrations est permise, à condition d'en citer le propriétaire.

Sommaire

	Page
Le premier groupe turbo-alternateur de 150 MW installé en Europe	231
Les dispositions de protection et de réglage automatique de la centrale de Weisweiler	237
Le groupe convertisseur pour l'électrochimie électrolyse de l'aluminium	238
Tableau d'évaluation et valeurs recommandées Brown Boveri (généralistes des générateurs industriels pour le chauffage en haute fréquence)	239
Deux notes techniques :	
1° Les caractéristiques d'essai des bobines de choc et d'essai de surcharge d'un transformateur à haute tension	240
2° Quelques nouvelles machines électromotrices	241

Le premier groupe turbo-alternateur de 150 MW installé en Europe

821.000-001.213.002 (00)

L'article ci-dessous est consacré à la description de la centrale de Weisweiler, près d'Alten-Chapel (Allemagne), où se trouve en service depuis quelques mois un grand turbo-alternateur Brown Boveri de 150 MW qui est en même temps le plus grand d'Europe. Les auteurs s'efforcent de décrire l'alternateur et l'excitateur.

Le premier groupe turbo-alternateur de 150 MW d'Europe est entré en service au début de l'année 1955 à la centrale de Weisweiler de la Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk A.G. (RWE), à Essen (Allemagne). Depuis lors, il débite à pleine charge sur le réseau sans aucun incident.

La centrale de Weisweiler

La nouvelle centrale de 350 MW construite par la RWE, d'après ses propres plans, brûle du lignite à faible pouvoir calorifique et à haute teneur en humidité et en cendres. Pour des centrales qui utilisent un combustible de pouvoir calorifique aussi peu élevé, la rémunération du capital et les dépenses d'exploitation entrent pour une grande part dans le prix de revient du courant électrique. Lorsque la centrale de Weisweiler a été proposée, on a considéré qu'il était de première importance d'arriver à de faibles frais de premier établissement, à de courts délais de construction (dus à des intérêts réduits à payer pour les frais de construction), à une sécurité de fonctionnement accrue (dus à un coefficient d'utilisation élevé) et enfin à de faibles frais d'exploitation.

⁽¹⁾ W. Kutschmann (Niederländische Braunkohle-Gesellschaft, Essen), *Wärme und Energie*, 1953, n° 1928, p. 395 à 418.
⁽²⁾ Die Braunkohle-Kraftwerk Weisweiler, *Elektrotechnik*, 1953, vol. 54, n° 11, p. 342 à 350.

L'accroissement régulier d'environ 8% par an des besoins en énergie électrique du réseau de la RWE, ainsi que la nécessité de pouvoir produire du courant électrique aussi rapidement et en aussi grandes quantités que possible grâce au capital investi, ont obligatoirement conduit à réaliser de grandes unités. On sait, en effet, que plus la puissance de ces dernières augmente, plus le coût par unité de puissance de toute l'installation diminue. Ces centrales (voir la couverture de ce numéro) ont initialement construites pour une puissance de 350 MW; déjà au stade du projet, on a prévu les surajustements nécessaires pour les extensions futures. Comme la puissance des grands groupes turbo-alternateurs est constamment en rapport avec celle du réseau de distribution auquel ils sont raccordés et que le réseau allemand dispose avec toutes ses interconnexions de plus de 6 millions de kW, on conçoit que le choix d'un groupe de 150 MW et de deux de 100 MW, soit respectivement 2,5 et 1,7% de la puissance du réseau, était bien dans la ligne de la tendance actuelle à l'emploi d'unités toujours plus importantes.

Les différents groupes sont indépendants les uns des autres au point de vue thermique et ne comportent donc pas de liaisons entre eux. Également du côté production du courant, les trois groupes sont complètement distincts, chacun étant séparément excité en bloc avec son transformateur propre aux lignes à haute tension. Pour disposer d'une réserve en cas d'incidents et pour rendre possible le fonctionnement avec de faibles charges, on a associé à chacune des deux turbines de 100 MW, deux chaudières haute pression à haute débitant 200 t/h de vapeur, et à la turbine de 150 MW, deux chaudières tubulaires à circulation forcée de 300 t/h.

que l'on appelle encore de façon plus concise la téléprotection. On n'utilise cependant pas dans ce but la version normalement prévue pour la transmission de signaux de télécommande.

En effet, les conditions de base imposées par la téléprotection sont plus dures que celles concernant la télécommande, et c'est avant tout au point de vue temps de transmission et insensibilité aux perturbations que les exigences sont plus sévères. En particulier, les parasites dus aux arcs qui peuvent se produire le long des lignes ne doivent pas avoir pour conséquence des fonctionnements intempestifs. En principe, l'impédance d'un arc est plus faible que l'impédance caractéristique de la ligne; malgré la présence du spectre de fréquences parasites créé par les arcs, il faut surmonter l'affaiblissement supplémentaire de la voie de transmission. On doit prévoir de plus des

dispositifs de surveillance, des facilités de contrôle interne, etc. Enfin, il faut tenir compte du fait que les impulsions envoyées doivent agir sur des circuits de commande parcourus par des courants forts. On peut ici utiliser aussi bien des relais intermédiaires que des thyristors. La figure 6 montre une réalisation obtenue avec la première solution envisagée. On y voit l'équipement qui fonctionne dans le domaine des fréquences musicales et transmet les signaux de la téléprotection en même temps que ceux correspondant aux canaux d'appel et de téléphone.

La figure 7 représente un tel équipement incorporé dans une armoire de téléphone par ondes portantes. Dans ce cas, le châssis ne dispose pas d'une alimentation propre, mais est raccordé au dispositif d'alimentation commun branché sur le réseau.

MS 253

C. Hehn (M. M.)

Le vibreur à magnétostriction et son emploi dans les oscillateurs et les filtres

826.862
001.373.51:538.622
001.373.54:538.622

Après avoir rappelé les lois relatives au phénomène de magnétostriction et développé certaines considérations théoriques sur son utilisation, l'auteur décrit les vibreurs à magnétostriction construits par la Société anonyme Brown, Boveri & Cie et en indique les applications.

Il y a déjà longtemps que l'on a cherché à tirer parti du phénomène de la magnétostriction pour construire des vibreurs et des transducteurs électromécaniques. La première étude faite en vue de construire un organe utilisant ce phénomène pour fixer la fréquence d'un oscillateur à tubes a donné déjà des résultats assez encourageants⁽¹⁾. En raison de la très grande acuité de la courbe de résonance mécanique, la stabilité de fréquence de tels oscillateurs est comparable à celle des oscillateurs à quartz. Malheureusement, avec les alliages utilisés, le coefficient de température de la fréquence était beaucoup trop grand ($\alpha_f = 10^{-4}$ par degré C) pour pouvoir envisager une utilisation pratique. D'autre part, ces oscillateurs ne fonctionnaient que pour les fréquences comprises entre 10 et 50 kHz. La limite inférieure était donnée par la longueur des barreaux et la limite supérieure par l'apparition de résonances purement électriques qui se superposaient au phénomène de magnétostriction.

Des recherches systématiques ont permis d'éliminer tous ces inconvénients et de mettre au point des éléments utilisant la magnétostriction pour le domaine des fréquences s'étendant de 20 à 350 kHz. L'emploi, pour le barreau vibrant, d'un alliage ayant subi un traitement thermique approprié a abaissé le coefficient de température de la fréquence à environ $5 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$. Il a été possible, en outre, par une conformation convenable des éléments et par un choix judicieux du point de fonctionnement, sur la courbe d'aimantation, d'éviter, dans tout le domaine des fréquences, l'apparition de résonances électriques et de rendre le phénomène de magnétostriction suffisamment fort pour obtenir dans des montages d'oscillateurs une fréquence nettement déterminée. Aussi peut-on aujourd'hui attribuer aux oscillateurs à magnétostriction des stries identiques à celles des oscillateurs à quartz, en renonçant toutefois à l'emploi d'un thermostat, car le coefficient de température est suffisamment faible. C'est ainsi, par exemple, que les appareils Brown Boveri de télécommunications utilisant le système à bande latérale unique sont équipés uniquement d'oscillateurs à magnétostriction sans thermostat.

⁽¹⁾ G. W. Pierce: *Magnetostriction Oscillators*, Proc. Inst. Radio Eng., 1929, vol. 17, n° 1, p. 42 à 88.

Théorie des oscillateurs à magnétostriction

En conjuguant les effets de la magnétostriction et les propriétés mécaniques d'une tige animée de vibrations longitudinales, les grandeurs électriques en jeu dans une bobine qui entoure cette tige sont liées aux grandeurs mécaniques. Suivant que la tige est entourée d'une seule ou de deux bobines entre lesquelles il n'y a pas de couplage magnétique, on est en présence d'un dipôle ou d'un quadripôle magnétostrictif. Ce dernier est aussi appelé vibreur magnétostrictif.

Avant d'en donner l'expression mathématique, nous allons rapidement rappeler ce qu'est le phénomène de la magnétostriction.

1° Les pièces en matières ferromagnétiques subissent des déformations lorsqu'elles sont soumises à un champ magnétique.

2° Si l'on exerce sur une pièce en matière ferromagnétique qui se trouve dans un champ magnétique des efforts qui y créent des tensions internes, il en résulte une modification de l'aimantation de la substance.

Les lois relatives aux effets magnétostrictifs qui nous intéressent ont été formulées par Joule et par Villari:

Effet Joule longitudinal: La variation de la longueur d'un barreau en matière ferromagnétique placé dans un champ magnétique H variable, parallèlement aux lignes de force, et dans lequel les contraintes mécaniques ne changent pas est donnée par la formule

$$dl = \lambda l dH \quad (1)$$

Effet Villari: Lorsqu'on modifie par un effort mécanique la longueur d'un barreau en matière ferromagnétique placé dans un champ magnétique constant, parallèlement aux lignes de force, l'induction magnétique B dans le barreau subit une variation

$$dB = \lambda d\sigma \quad (2)$$

Précisons en outre que ces effets sont indépendants du sens du champ et qu'on a

$$\lambda = F(H) = F(-H) \quad (3)$$

Si l'on désire obtenir une variation de longueur sinusoidale, il est nécessaire de superposer un champ constant H_0 au champ variable H . Le facteur λ est le même dans les équations (1) et (2), et bien qu'il dépende de H_0 , il est appelé constante de magnétostriction. Ce facteur est positif pour certaines substances et négatif pour d'autres.

Equations du quadripôle magnétostrictif

Soit un barreau de section constante, de densité ρ , de raideur $s = 1/E$ ($E =$ module d'élasticité), placé dans un champ magnétique H . Si l'on désigne par σ la contrainte magnétique à l'intérieur de ce barreau dans le sens longitudinal, par dx la longueur d'un élément de ce barreau, et par $d\xi$ la variation de cette longueur, on peut écrire, en négligeant le frottement interne, les équations du mouvement

$$d^2\xi = -s d\sigma dx \quad (\text{avec } H = \text{const.}) \quad (4)$$

$$d\sigma = -\rho \frac{d^2\xi}{dt^2} dx \quad (5)$$

Pour les matières ferromagnétiques, l'équation (1) donne en outre

$$d^2\xi = \lambda dH dx \quad (\sigma = \text{const.}) \quad (6)$$

où h désigne l'intensité du champ alternatif auquel le champ constant H_0 est superposé, étant admis que $h \ll H_0$. Si nous posons $d\xi/dt = v$ et que l'on considère une variation simultanée de la contrainte mécanique et du champ, les équations (4) et (6) permettent d'écrire

$$\frac{dv}{dx} = -s \frac{d\sigma}{dx} + \lambda \frac{dh}{dx} \quad (7)$$

et comme on a $d^2\xi/dt^2 = dv/dx$, on tire de (5)

$$\frac{d\sigma}{dx} = -\rho \frac{dv}{dx} \quad (8)$$

Si le barreau de longueur l est placé dans l'axe d'une solénoïde comprenant N spires, l'équation du circuit magnétique, qui est fermé, est, en tenant compte de (2),

$$\theta = 4\pi iN - \lambda \int \sigma dx = \Phi \sum \frac{l}{\mu_0 \mu_r} = \Phi R_{ext} \quad (9)$$

En désignant les réactances du barreau et du circuit magnétique complet respectivement par R_{ext} et R_{int} , et la force électromotrice interne d'un élément dx du barreau par

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{4\pi N}{R_{ext}} \left[N \frac{dl}{dt} - \lambda \int \frac{d\sigma}{dt} dx \right] \quad (10)$$

on en déduit

$$\frac{dh}{dt} = \frac{R_{ext}}{N} + \frac{\lambda}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (11)$$

100
ABB
1914

Salle de conduite d'une centrale hydroélectrique, en Italie. Ces postes de commande sont toujours équipés par ABB, mais leur look est aujourd'hui bien différent.

The Brown Boveri Review, janvier 1955



Fig. 496. — Control room in the underground power station of Santa Massenza, belonging to the Società Idroelettrica Sarca-Molveno, Italy. Right: the central control desk for generators, transformers and transmission lines; in the centre: the mimic diagram; and adjoining, the switch panels for measuring, recording, controlling and protection. Built by Tecnomasio Italiano Brown Boveri, Milan.



Fig. 5. — Pour effectuer la dernière partie du trajet et atteindre ainsi le bâtiment situé à 190 m d'altitude où sera monté l'émetteur de télévision de La Dôle, on a le secours de machines; c'est à bras qu'il faut hisser les divers éléments de l'émetteur-image Brown Boveri. L'émetteur de La Dôle situé près de la frontière française diffuse à l'aide de deux antennes directrices des émissions destinées principalement aux régions de Lausanne et de Genève.

Traction à force d'hommes de l'émetteur TV de la Dôle (Suisse)

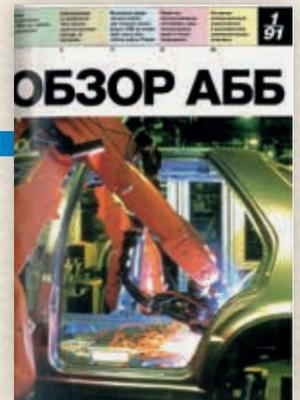
Revue Brown Boveri, mars 1955



1984



1987



1991

1978

Naissance du premier bébé-éprouvette

1987

La *Revue Brown Boveri* prend l'accent espagnol

1988

Fusion d'ASEA et de BBC en ABB
Stephen Hawking publie *Une brève histoire du temps*

1990

Lancement par ABB des systèmes *Azipod* de propulsion marine électrique

1991

Premier numéro en russe

NEWS IN BRIEF

German-Swedish-Swiss working group develops HVDC circuit-breaker

High-voltage direct-current (HVDC) transmission will have an increasingly important role to play in the future in meeting the needs for electrical energy. All existing HVDC transmission lines have to be two-terminal systems, but in the future multi-terminal systems will also be required. However, up to now there has not existed on the market any suitable d.c. circuit-breaker capable of interrupting the service current, disconnecting unloaded transmission lines and, together with the converter control system, clearing any faults.

"Arbeitsgruppe HGU-Schulze," the working group established in 1995, by AEG-Telefunken, ASEA, Brown Boveri (BBC) and Siemens, has now developed and tested, in co-operation with Institut für Hochspannungstechnik der TU Braunschweig (the Institute for High-Voltage Technology at Brunswick, West Germany), a model assembly of an HVDC circuit-breaker.

Each breaking unit consists of an oil-minimum a.c. breaker serving as a commutating switch, connected in parallel with a commutating circuit comprising

a spark gap and capacitor as well as with an energy absorption circuit incorporating a surge arrester. The latter serves at the same time as a breaker for the residual current.

Development work on the new HVDC breaker has proceeded in three stages. The first stage involved the testing of the reversibility of the individual breaker components, where series-manufactured parts were used as far as possible. During the second stage, the integration of the individual components with one another was investigated. The development work during these first two stages took place at Brunswick. Finally, a complete breaking unit underwent tests at FGH (Forschungsgemeinschaft für Hochspannung und Hochstromtechnik e.V., Mannheim-Rheinheim, West Germany). This testing involved breaking tests at full voltage on a complete breaking unit and at reduced voltage per unit on an arrangement consisting of two breaking units connected in series. All these tests were successful in every respect.

Breaking tests were performed on one

breaking unit involving the interruption of 300 to 2500 A at inductances in the d.c. circuit varying between 0.5 and 1.9 mH. At 1.9 mH and 2550 A, 7.1 MW was thus developed in the surge arrester. In addition, a test series involving a $O = 3 \text{ ms} \rightarrow O = 3 \text{ ms} \rightarrow O$ cycle was performed at 1800 A and 0.5 mH. The series reacting from this duty do not in any way limit the interruption capability of the breaker.

In the model assembly, one breaking unit with commutating and energy-absorbing circuit is designed for a service voltage of up to 200 kV. HVDC breakers for higher system voltages can be obtained by connecting two or more breaking units in series. Thus, the model assembly with an additional surge arrester could already be used for a 400 kV HVDC system. A special high-speed disconnection system (oil isolation) of the breaker is designed so that the overvoltage factor 1.6 (p.u.) will not be exceeded for any interruption duty. Thus, the breaker voltage for a 400 kV HVDC breaker will not exceed 2 x 130 kV.

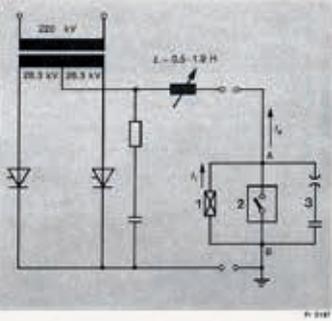
ABB Rep. 14

Fig. 1. Model assembly of an HVDC breaker developed by "Arbeitsgruppe HGU-Schulze," in co-operation with Institut für Hochspannungstechnik der TU Braunschweig (the Institute for High-Voltage Technology at Brunswick, West Germany), undergoing tests at FGH, Mannheim-Rheinheim, West Germany. From left to right: d.c. surge arrester, oil-minimum circuit-breaker and commutating capacitor.



Fig. 2. Design of the breaking unit for HVDC circuit-breaker.

- 1 Energy absorption circuit with d.c. surge arrester
- 2 Oil-minimum circuit-breaker
- 3 Commutating circuit with spark gap and capacitor



Des entraînements ABB mettent nos autos à rude épreuve.

Revue Brown Boveri, mars 1986

Banc d'essai à quatre rouleaux pour véhicules à quatre roues motrices

Le nombre de véhicules à quatre roues motrices croît. Pour accélérer leur développement, l'industrie automobile avait besoin de bancs d'essai appropriés. Brown Boveri a développé et exécuté un banc d'essai dynamique à quatre rouleaux pour véhicules à quatre roues motrices. Il est équipé de quatre entraînements individuels d'une puissance unitaire de 110 kW et convient à l'essai de véhicules avec un empattement allant de 2 à 3,5 m et une vitesse atteignant 240 km/h.



Roland Gae, ingénieur, directeur de la Division installations industrielles, sur le projet et le développement de bancs d'essai. Mannheim/ République fédérale d'Allemagne

Ces véhicules à quatre roues motrices sont très en vogue sur le marché de plus en plus souvent. Etant donné que de nombreux essais sont effectués au banc d'essai, il fallait développer et construire des bancs d'essai à rouleaux appropriés pour véhicules. Les raisons importantes suivantes pèsent en faveur de l'essai au banc:

- Les conditions d'essai, telles qu'elles apparaissent lors d'essais de véhicules, peuvent être parfaitement simulées par des bancs d'essai modernes.
- Les marches d'essai sont beaucoup mieux reproductibles au banc d'essai que sur route.
- Les essais au banc sont plus économiques que les essais sur route et ils permettent de réaliser des économies de temps.

Un banc d'essai universel doit répondre aux conditions fondamentales suivantes:

- Chaque roue du véhicule se trouve sur un rouleau entraîné individuellement.
- Des arbres de liaisons entre les rouleaux doivent être évités afin de laisser l'accolé libre par le bas.

Il en résulte que le synchronisme de marche entre les rouleaux doit être assuré et que ces derniers doivent pouvoir être déplacés librement. Brown Boveri a conçu et construit le banc d'essai décrit dans cet article aussi bien pour les véhicules d'entraînement «classiques» (propulsion arrière et traction avant) que pour véhicules à quatre roues motrices. Le banc d'essai est prévu pour l'essai, dans les conditions de marche sur route, de véhicules, de leurs groupes fonctionnels et de leurs composants individuels.

Nos fournitures et prestations comprennent:

- Conception et exécution mécaniques et électriques et équipement du banc d'essai avec dispositifs de commande, de régulation et de simulation de la résistance à l'avancement
 - Le calcul et le dimensionnement des fondations de banc d'essai sur le plan de la technique des vibrations
 - Construction métallique
- Le client, en accord avec Brown Boveri, a pris toutes les mesures constructives, par exemple en ce qui

Fig. 1 - Véhicule à propulsion arrière sur le banc d'essai à quatre rouleaux



Banc d'essai à quatre rouleaux pour véhicules à quatre roues motrices

ABB Brown Boveri - 151

En 1988, ABB naît de la fusion BBC-ASEA. Mais le tandem n'en est pas à sa première coopération: les deux entreprises avaient déjà fait équipe dans les années 1970 pour concevoir un disjoncteur CCHT.

ASEA Journal, vol. 48, n° 3, 1975



1994



2003

1997

Victoire de l'ordinateur Deep Blue sur le champion du monde d'échecs Gary Kasparov

1998

Mise en service du pont du détroit d'Akashi, plus long ouvrage suspendu au monde (portée centrale de 1991 m)

2001

La Revue ABB est mise en ligne

Apple lance l'iPod

2002

ABB relie les réseaux en courant alternatif de l'Australie du Sud et de Victoria avec le plus long câble souterrain au monde

2003

La revue peut aussi se lire en chinois!

La technique de contrôle-commande de Brown Boveri équipe l'une des installations de triage de bagages les plus modernes du monde

Brown Boveri a été chargée par Swissair de la résolution des problèmes de contrôle-commande de la nouvelle installation de triage de bagages au terminal A de l'aéroport de Zurich. Grâce à l'emploi du BBC-PARTNERBUS® et du système de contrôle-commande INDACTIC® 15, on obtient une installation fiable et stable avec ordinateurs de triage décentralisés, proches du processus.



Marvin Meyer, ingénieur, est le chef de la Section «Projets spécialisés» à la Compagnie Suisse Romande.

Kurt Klemm est le chef du projet de la partie Avion par Brown Boveri, Turgo/Quisac.

Introduction

Un transport sûr de bagages fait partie intégrante d'un voyage par avion sûr, confortable et ponctuel. Le fait que le bagage accompagne le voyageur est une condition inaliénable aujourd'hui. Pour pouvoir satisfaire cette condition, l'aéroport de Zurich possède depuis le premier novembre 1985 une des installations de triage de bagages les plus modernes du monde.

Conception

Dans sa conception, la nouvelle installation de triage au terminal A est identique à celle du terminal B, qui fonctionne depuis plus de dix ans avec une grande fiabilité. Ainsi, l'aéroport de Zurich offre aux voyageurs aujourd'hui le confort suivant:

- Ils peuvent faire enregistrer leurs bagages le jour du vol à n'importe quel moment, jusqu'à immédiatement avant l'envol.
- Aux guichets de la classe correspondante, ils peuvent choisir librement le guichet avec la file d'attente la plus courte.

- Ils peuvent utiliser les correspondances avec des temps de transfert très courts pour continuer leur voyage, avec la certitude que leurs bagages les accompagnent.

Cette prestation de service exige d'autre part des installations appropriées, pouvant trier les très nombreux bagages suffisamment rapidement et les affecter aux différents vols. Ce résultat est obtenu, entre autres, grâce à l'emploi de tronçons de transporteur à haute vitesse, qui relient entre eux surtout les terminaux A et B. Une autre condition importante consiste, bien sûr, à assurer une sécurité de fonctionnement aussi élevée que possible, afin que soit évité le voyageur «le passager et le bagage voyagent dans le même avion».

Transport et triage des bagages

Dans la salle d'embarquement récemment organisée du terminal A, les guichets d'enregistrement sont divisés en deux groupes. Chacun d'eux est relié, par un transporteur, au hall de triage qui se trouve au rez-de-chaus-

Fig. 1 - Introduction des valises sur la machine de triage



Le triage de contrôle-commande de Brown Boveri équipe une des installations de triage de bagages les plus modernes du monde. Brown Boveri Turgo/Quisac 205



Fig. 91. — 1100 h.p. d.c. locomotive of the Viação Férrea Federal Leste Brasileiro em Salvador. Ten locomotives of this type were equipped by Brown Boveri with driving motors, circuit breakers and voltage converters with quick-acting regulators.

En 1955, BBC fournissait les moteurs, disjoncteurs et régulateurs de cette locomotive CC 3 kV de 1500 hp destinée aux chemins de fer brésiliens. BBC a toujours compté parmi les grands équipementiers du secteur ferroviaire.

The Brown Boveri Review, janvier 1955

Et si la technologie BBC avait aidé au triage de vos bagages ?

Revue Brown Boveri, mai 1986



2008

2008

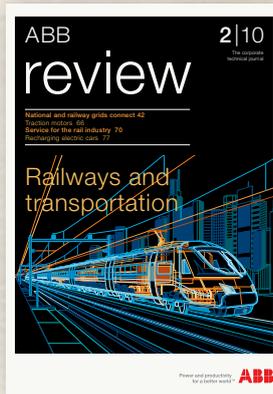
Premier tour de roue de la Singapore Flyer, record mondial de hauteur (165 m)

2009

Usain Bolt bat le record du monde du 100 m en 9,58 s

2010

ABB installe un poste électrique dans le plus haut gratte-ciel au monde, Burj Khalifa (828 m), à Dubaï



2010

2012

ABB conçoit et développe avec succès un disjoncteur à courant continu hybride pour les grands réseaux CC d'interconnexion



2013

2013

ABB review devient numérique avec sa version tablette et mobile

Morceaux choisis

Les coups de cœur de la rédaction



Tracer la voie

SARAH STOETER – Le groupe ABB est bien connu des lecteurs de la revue pour son offre technologique colossale dans les domaines de l'énergie et de l'automatisation : moteurs et variateurs industriels, transformateurs, appareillages électriques, robots, automatismes, systèmes de propulsion marine, lignes de transport à courant continu haute tension, plates-formes de contrôle-commande, etc. Mais saviez-vous qu'il avait aussi fabriqué des chasse-neige ? C'est tout cela l'innovation ABB ... et notre privilège de rédacteur d'y contribuer !

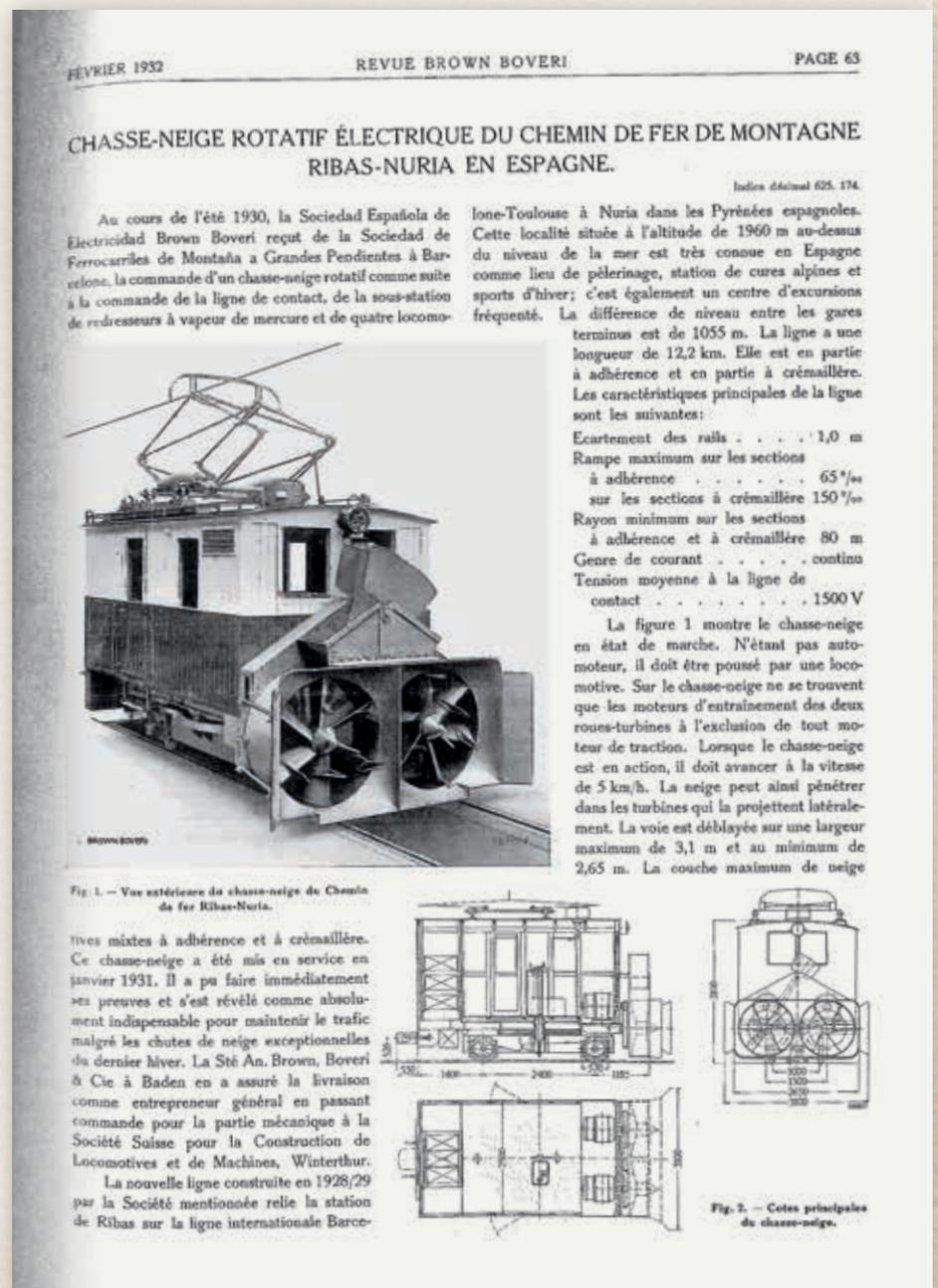
La « grande histoire » d'ABB et de ses prédécesseurs ASEA et BBC dans la construction de locomotives et l'électrification de nombreuses voies ferrées, notamment en Suède et en Suisse, cache quelques anecdotes technologiques plus pittoresques, comme ce chasse-neige rotatif électrique attelé à une locomotive, vedette de la *Revue Brown Boveri* de février 1932.

Long de 12,2 km, le chemin de fer à crémaillère du val de Nuria, dans les Pyrénées espagnoles, dessert de Ribes de Fresser (altitude 905 m) à Vall de Núria (1960 m) une région très courue des « pèlerins, curistes, randonneurs et amateurs de sports d'hiver ». Mais impossible d'emprunter cet itinéraire enneigé une bonne partie de l'année sans puissant moyen de dégagement. D'où ce chasse-neige électrique de fabrication BBC et SLM Winterthur (*Swiss Locomotive and Machine Works*), mis en service en janvier 1931.

Hugentobler, E. (G.A.W.), « Chasse-neige rotatif électrique du chemin de fer de montagne Ribas-Nuria en Espagne », *Revue Brown Boveri*, p. 63–65, février 1932.



Diplômée d'anglais et de psychologie de l'université du Minnesota (États-Unis), Sarah Stoeter fait partie de l'équipe éditoriale de la revue depuis 2007.
sarah.stoeter@ch.abb.com



Aux confins de l'émerveillement

MICHELLE KIENER – Aux dires des habitués du Louvre, il faudrait au moins neuf mois pour entrevoir tous les chefs-d'œuvre du lieu. Il en va ainsi des archives de la revue: même après quinze années passées chez ABB, si je décidais de lire tous les articles qui m'intéressent, j'y consacrerai sans doute tout mon temps... et jusqu'au-delà du départ en retraite. Difficile de limiter ses recherches dans un fonds documentaire aussi riche et passionnant!

Ce qui m'a néanmoins le plus impressionnée, c'est le rayonnement mondial de la revue et du groupe ABB. S'il est aujourd'hui normal de penser *global* et *mondialisation*, de traverser l'océan en un après-midi et de transmettre des messages à l'autre bout de la planète en quelques secondes, ABB et ses prédécesseurs (ASEA et BBC) ont transcendé les frontières bien avant que le haut débit, le train à grande vitesse et les voyages supersoniques soient des lieux communs.

Pourtant, livrer des tonnes de matériel en 2014 à l'autre bout du monde oblige encore à «déplacer des montagnes» pour s'accommoder des aléas du transport, des infrastructures et de la météo, le tout sous une avalanche de courriels et de SMS. Même la diffusion de notre édition papier dans le monde entier doit jongler avec les vicissitudes douanières pour franchir les frontières, sans compter la gestion d'une liste mondiale d'abonnés par nos 102 distributeurs locaux. Alors, qu'en était-il en 1914? Imaginez l'expédition d'une turbine fabriquée en Suisse à un client australien, l'envoi d'une équipe sur place pour y installer et mettre en service la machine, le temps passé là-bas loin des siens et la barrière de la langue sans Google ou un dico en ligne sur son mobile. Imaginez l'envoi de tirages de la revue à autant de destinataires dans le monde, à une époque où le cinéma muet était le summum de la technologie.

Pour illustrer cette épopée technologique, j'ai choisi l'article ci-dessous qui résume parfaitement l'esprit pionnier, l'audace et la ténacité de tous les «architectes» du groupe ABB ayant su de tout temps nous faire partager leur aventure, leur science et leur passion.



Michelle Kiener a étudié l'électronique au *Merchant Navy College* (École de la Marine marchande britannique) et est diplômée en sciences de l'environnement.

Elle collabore à la revue depuis quatre ans.
michelle.kiener@ch.abb.com

PAGE 108 REVUE BROWN BOVERI FÉVRIER 1931

DIVERS.

Transport outre-mer de transformateurs de grande puissance.

Indice détaillé 656.026 + 621.314.21.

L'emballage et le transport dans les pays d'outre-mer de transformateurs de grande puissance, dont les dimensions sont de plus en plus grandes, causent de nombreuses difficultés et posent des problèmes très compliqués au constructeur et à l'entreprise chargée du transport.

Le mode de transport le plus rationnel consiste à expédier la partie active du transformateur dans sa cuve, remplie d'huile; les isolateurs de traversée, le conservateur d'huile, le chariot et le réfrigérant sont, par contre, envoyés séparément. Cette façon de procéder réduit les frais de montage à un minimum et supprime ou raccourcit le séchage du transformateur au lieu d'utilisation.

Le poids du transformateur rempli d'huile dépasse cependant dans bien des cas la force des engins de levage des bateaux et des ports et, d'autre part, les dimensions de transformateur excèdent souvent les valeurs maxima admissibles pour le passage des ponts, les passages sous-voies, les gabarits de chargement des chemins de fer et les ouvertures de chargement des bateaux. Le transformateur doit, alors, être complètement ou partiellement démonté pour l'expédition et pour des unités d'une puissance particulièrement élevée, il est nécessaire de construire la cuve en deux ou même en trois parties. La partie supérieure de la cuve et, le cas échéant, la culasse supérieure, sont envoyées séparément. Pour le transport, la culasse supérieure est remplacée par un dispositif auxiliaire maintenant en place le circuit magnétique et les enroulements.

A titre d'exemple, on décrit brièvement le transport de deux transformateurs de grande puissance destinés à la sous-station Richmond de la Victoria State Electricity Commission, à Melbourne (Australie). Quelques illustrations permettent de mieux se rendre compte de la façon dont ont été chargés et déchargés ces transformateurs. Il s'agit de deux transformateurs triphasés, à trois enroulements, pour montage en plein air, avec réfrigération extérieure par circulation d'huile et d'eau. Ces transformateurs sont prévus pour les caractéristiques suivantes:

Tension à vide	primaire	120 000 V
	secondaire	22 000 V
	tertiaire	11 000 V
Paissance	primaire	31 000 kVA
	secondaire	37 500 kVA
	tertiaire	30 000 kVA

Fig. 1. — Chargement d'un transformateur au moyen d'un grue flottante dans le port de Brisbane.

Fréquence	50 péri/s
Dimensions: Hauteur (y compris les bornes)	6,8 m
Longueur	4,7 m
Largeur	2,8 m
Poids total (sans huile) y compris le groupe de réfrigération	est 66 500 kg levé 71 000 kg
Poids maximum à transporter (sans le système supérieur et le chariot)	44 000 kg 44 000 kg
Poids de l'huile	20 000 kg

Ces transformateurs (voir deuxième page de la couverture de ce numéro) ont été exécutés avec des cuves en deux parties et ils comportent des dispositifs provisoires maintenant en place le circuit magnétique et les enroulements; de cette façon le poids de la pièce la plus lourde

Fig. 2. — Déchargement d'un transformateur dans le port de Melbourne.

Fig. 3. — Transport d'un transformateur sur le quai du port de Melbourne.

Un vent chaud dans l'espace

ANDREAS MOGLESTUE – Il suffit de feuilleter nos archives pour embrasser les activités du Groupe tout au long de ces cent dernières années. S'il est des domaines que BBC, ASEA et ABB ont marqués de leur empreinte technologique, il existe également des gammes de produits qui ont été arrêtées ou vendues, ou d'autres encore qui ont vu le jour par innovation interne ou croissance externe. À cela s'ajoutent des pièces rares ou uniques, taillées pour une application.

Témoin, cet article de 1968 sur un réchauffeur fabriqué par Tecnomasio Italiano Brown Boveri (Milan) pour le *Centro Ricerche Aerospaziali* (CRA) de l'université de Rome Sapienza, capable de chauffer l'air à quelque 1000 °C, sous 80 à 100 atmosphères, et de le souffler à une vitesse hypersonique : Mach 12 !

Si le développement et les essais du dispositif y sont exposés, c'est à peine si l'on évoque l'application visée. Le CRA travaillait pourtant sur le programme aérospatial *San Marco* et, en 1964, lançait le premier satellite scientifique italien qui ne fut pas d'origine soviétique ou américaine. Propulsé dans l'espace par une fusée américaine Scout depuis la base de Wallops Flight (Virginie) et sous contrôle de la NASA, le satellite emportait de quoi sonder l'atmosphère et étudier les effets de la transmission radio à longue portée.

Quelques années plus tard, les Italiens construisirent au Kenya leur propre base, également baptisée *San Marco*, d'où furent tirées au moins 27 fusées entre 1964 et 1988.

ABB est toujours présent dans la recherche spatiale, notamment avec son spectroscope infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) qui équipe les satellites d'observation de l'atmosphère.

Voilà encore un exemple de la contribution d'ABB, au premier rang ou en coulisses, à la réalisation des grands chantiers technologiques du siècle !



Andreas Moglestue a étudié l'électrotechnique à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH), puis travaillé pour ABB Semiconductors et développé des logiciels avant de rejoindre la rédaction d'*ABB review*. andreas.moglestue@ch.abb.com

MARCH 1968

THE BROWN BOVERI REVIEW

155

AN AIR HEATER FOR SPACE RESEARCH

621.365:629.78.001.5

An air heater built by Tecnomasio Italiano Brown Boveri S.A. in Milan for experiments in the space research field has been successfully commissioned at the Centro Ricerche Aerospaziali in Rome. With this equipment a high-pressure air flow of 0.5 kg/s can be heated in a few seconds to a final temperature of some 1000 °C. As a result, the jet velocity at the exit nozzle from the duct is twelve times the speed of sound. This article describes the construction and test results.

convergent-divergent duct of about Mach 12, which is required for certain types of test.

The difficult question of selecting the correct heat transfer coefficients, which is a determining factor in sizing equipment of this kind, was accompanied by unusual problems of sealing and cooling.

The Problem

A VERY interesting and original application of an electric air heater has been developed by Tecnomasio Italiano Brown Boveri S.A. of Milan for the Centro Ricerche Aerospaziali in Rome. The heater is used to produce a hypersonic jet of air. The technical problems were considerable, owing to the exacting requirements to be met by the materials of the electrical part and of the sealing system, as these have to operate under extreme conditions.

Air at 80 to 100 atmospheres has to be heated to a temperature of some 1000 °C with the purpose of obtaining a maximum velocity at the exit from the

Construction

The principles underlying the design of the air heater shown in Fig. 1 are essentially the same as those usually adopted for normal heaters, inasmuch as the air is brought into direct contact with the heating elements. These are spiral-wound and arranged longitudinally in the flow direction. They are of Kanthal alloy and located in channels in the refractory in a manner which is described more fully below.

The quality and shape of the refractory were the subject of detailed investigation and numerous laboratory tests in order to establish data on thermal expansion and the distribution of electric potential

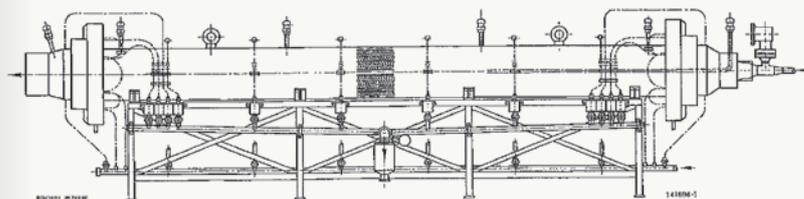


Fig. 1. -- Diagram of air heater

Maximum heat output 600 kW, max. pressure 100 atm Maximum air flow rate 0.5 kg/s Maximum temperature 1250 °C



Génération montante

ABB célèbre 40 ans
de robotique industrielle

DAVID MARSHALL, NICK CHAMBERS – Dans ce « Spécial 100 ans » d'*ABB review*, nous célébrons un autre anniversaire important: les 40 ans du tout premier robot ABB (ASEA à l'époque), l'IRB 6. Point de départ d'une dynastie à succès, ce robot à actionneurs électriques et commande à microprocesseur allait marquer l'histoire de la robotique industrielle. Depuis, si la discipline a profondément évolué grâce à des développements et des concepts innovants, c'est bien le progrès technologique lui-même qui a servi de facteur de différenciation et d'accélérateur à la robotique en simplifiant son utilisation et en levant les barrières à sa diffusion.



En quarante ans, la robotique industrielle a fait des progrès spectaculaires.

Les robots industriels ont investi l'industrie manufacturière mondiale, privilégiant gains de productivité, constance de qualité et sécurité du personnel. En quarante ans, les progrès ont été stupéfiants. Si les premiers robots exécutaient en solo et en ambiance dangereuse des tâches relativement simples et répétitives, les systèmes multi-robots synchronisés actuels effectuent des opérations très complexes dans des cellules de fabrication flexibles. ABB a été un acteur majeur de cette révolution robotique.

Photo

La robotique a considérablement progressé ces quarante dernières années ; les robots sont aujourd'hui beaucoup plus simples à mettre en œuvre et à exploiter.

La robotique industrielle est née en 1961 lorsque le constructeur automobile General Motors installa le premier robot hydraulique *Unimate* pour charger/décharger une presse. La technologie des actionneurs hydrauliques s'imposa jusqu'en 1974, année où le Suédois ASEA (qui fusionna ensuite avec le Suisse Brown

Boveri pour créer ABB) commercialisa l'IRB 6, premier robot industriel à actionneurs électriques et commande électronique au monde → 1. D'une capacité de charge de 6 kg, il était original à plus d'un titre : système d'entraînement électrique, structure anthropomorphe et

commande électronique des axes. Ce robot allait devenir la référence en

L'hydraulique s'imposa jusqu'en 1974, année où ASEA commercialisa l'IRB 6, premier robot industriel à actionneurs électriques et commande électronique.

matière d'encombrement, de vitesse et de répétabilité, et faire ainsi des émules.

Le soudage par points devint rapidement un domaine d'application privilégié et l'IRB 90, lancé en 1982, fut conçu spécifiquement pour cette tâche. Ce robot

Le dernier-né des robots de peinture est le modèle compact et innovant *FlexPainter* IRB 5500.

1 Premier robot IRB 6 installé chez un client



6 axes, qui intégrait directement dans son bras les alimentations en eau, air et électricité, conquiert une part importante du marché.

Robots de peinture

Assez rapidement, les robots industriels s'invitèrent dans les ateliers de peinture. Dès 1985, ASEA sortait son premier robot de peinture tout électrique, le TR 5000. Au cours de la décennie suivante, ABB inventait le système à cartouches pour la peinture de pièces automobiles. Les cartouches interchangeables autorisent une large palette de teintes et réduisent au strict minimum les consommations de peinture et de solvant, donc les coûts et les rejets polluants.

Dans la famille des robots de peinture, le dernier-né est le modèle compact et innovant *FlexPainter* IRB 5500 → 2. La structure et la configuration de ce robot en montage mural permettent de couvrir une zone de travail étendue offrant une flexibilité maximale pour peindre l'extérieur d'une carrosserie automobile. Deux *FlexPainter* IRB 5500 font ainsi le travail de quatre robots de peinture classiques avec des résultats probants : dépenses d'investissement et d'exploitation en baisse, installation rapide, disponibilité élevée et fiabilité accrue.

Une belle mécanique

Si l'élégance originelle de l'IRB 6 avec sa cinématique anthropomorphe polyarticulée est le signe distinctif de la dynastie des robots ABB, les progrès ont au fil du temps porté sur la vitesse, la précision et l'encombrement.

Très tôt, les réducteurs sans jeu se sont substitués aux entraînements à vis à billes au niveau des articulations de la « hanche » et de l'« épaule » du robot, améliorant sa cinématique spatiale. Autre évolution marquante : le remplacement des moteurs électriques à courant continu (CC) par des moteurs à courant alternatif (CA) plus petits, d'une maintenance plus aisée car sans balais, plus puissants et endurants, toutes qualités réclamées par les industriels.

Robots pour charges lourdes

Flexibilité et adaptabilité sont deux demandes fortes des utilisateurs de robots. Pour y répondre, ABB lance, dès 1991, l'IRB 6000 pour charges lourdes (150 kg de capacité de charge). Destiné avant tout au soudage par points et à la manipulation de grosses pièces, il s'appuie sur un concept de modularité avec un grand choix d'embases, de bras et de poignets afin d'adapter parfaitement la solution robotique aux besoins de chaque utilisateur. Cette modularité reste aujourd'hui la règle de conception des robots ABB. Doté de fonctionnalités séduisant un large éventail de clients, l'IRB 6000 connut un succès immédiat dans les applications de soudage par points. Le modèle le plus récent, l'IRB 6700, s'inscrit dans cette lignée en affichant les meilleures performances dans le segment des 150 à 300 kg. Plus robuste, avec des intervalles d'entretien espacés et une maintenance simplifiée, son coût de possession est 20 % inférieur à celui de son prédécesseur, l'IRB 6640. Dès sa conception, la fiabilité de l'IRB 6700 devait cibler un temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) de 400 000 heures.



Pour ce faire, chaque compte-rendu de défaillance de l'IRB 6640 fut analysé pour améliorer l'IRB 6700. Sa consommation d'énergie étant réduite de 15 %, il pèse moins sur l'environnement et sur la facture d'électricité.

Bras pré-câblé

La fiabilité des câbles et tuyaux d'alimentation en fluides et énergie d'un robot jusqu'à son organe terminal est au moins aussi importante que celle du robot lui-même. Souvent, la maintenance est un vrai casse-tête. Les câbles externes s'usent plus vite et limitent les mouvements du robot. Pour autant, leur insertion dans le bras du robot coûte cher et peut imposer des limites en termes de capacité et de contenu. Le nouveau concept *LeanID* d'ABB permet un juste équilibre entre coût et longévité en intégrant dans le bras les équipements les plus exposés → 3. La programmation et la simulation sont ainsi plus aisées, les interventions de maintenance moins fréquentes et la solution robotisée est plus compacte. Le dernier-né des robots ABB, l'IRB 6700, a été, dès le départ, conçu dans ce sens.

Poids plume

Les petits robots ont également leurs avantages. L'IRB 120 est le plus petit robot industriel polyvalent jamais fabriqué par ABB : il ne pèse que 25 kg pour

une capacité de charge de 3 kg (4 kg avec un poignet vertical) et un rayon d'action de 580 mm → 4. Une version pour salle blanche ISO 5 de classe 100, certifiée par l'IPA (*Fraunhofer-Institut Produktionstechnik und Automatisierung*), existe également.

La variante IRB 120T est destinée aux applications rapides de prise et dépose exigeant une flexibilité extrême doublée d'une répétabilité inégalée de 10 µm. Ce robot 6 axes affiche une augmentation notable des vitesses maximales des axes 4, 5 et 6 débouchant sur des temps de cycle raccourcis jusqu'à 25 %.

Robots ultrarapides de prise et dépose à la volée

1998 est une autre année historique pour ABB qui introduisit son premier robot « delta » IRB 340 *FlexPicker*® de saisie et dépose à la volée. Ses accélérations et ses cadences impressionnantes (10 G, 150 manipulations par minute) surpassent de très loin la vitesse et la dextérité des opérateurs humains pour manipuler de petits objets comme les composants électroniques et les produits alimentaires.

Le logiciel du *FlexPicker* associe une commande d'axes haute performance, un système de vision intégré et le suivi de convoyeur en mouvement. Le modèle

L'élégance originelle de l'IRB 6 avec sa cinématique anthropomorphe polyarticulée est le signe distinctif de la dynastie des robots ABB.

Dès sa conception, la fiabilité de l'IRB 6700 visait un temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) de 400 000 heures.

4 IRB 120 chez ABB SACE à Frosinone (Italie)



standard actuel (IRB 360) est également proposé avec des bras plus longs et différentes capacités de charge (1 à 8 kg), ainsi qu'un rayon d'action de 1,6 m → 5. Ces nouveautés permettent à la machine d'exécuter des tâches de prise/dépose à la volée sur de plus longues distances tout en conservant de bonnes performances, même lors de la saisie de plusieurs pièces lourdes.

Robots de palettisation

La palettisation robotisée a connu un fort développement ces dernières années → 6. Dans ce domaine, le nouvel IRB 460 d'ABB est le plus rapide au monde. Ce robot 4 axes compact d'une capacité de charge de 110 kg peut exécuter jusqu'à 2190 cycles par heure et constitue une solution parfaite pour la palettisation à grande vitesse de sacs et de produits en fin de ligne. Il possède un volume de travail de 2,4 m pour une empreise au sol réduite de 20 % et des vitesses supérieures de 15 % à celles de ses concurrents les plus proches.

L'offre actuelle va bien au-delà du simple robot. L'IRB 460, par exemple, est fourni avec la cellule fonctionnelle *PalletPack 460* pré-équipée pour la palettisation en fin de ligne, facilitant grandement la tâche des intégrateurs.

Pour la palettisation à des cadences élevées de couches complètes de produits, ABB a conçu l'IRB 760 d'une capacité de charge de 450 kg et d'un

rayon d'action de 3,2 m. La forte inertie de son poignet, deux fois plus élevée que celle de ses rivaux, lui permet de retourner des produits plus lourds et plus encombrants que n'importe quel autre robot de sa catégorie. Sa grande vitesse le rend particulièrement bien adapté à la palettisation de couches complètes de boissons, de matériaux de construction et de fûts de produits chimiques.

Systèmes de commande

En 1974, le système de commande de l'IRB 6 se composait d'un seul microprocesseur 8 bits Intel 8008, d'une interface homme-machine (IHM) avec écran LED à 4 chiffres et 12 boutons ainsi qu'un logiciel rudimentaire pour l'interpolation des axes et la commande des mouvements. La programmation et l'exploitation du robot étaient alors affaire de spécialistes ! Quarante ans et quatre générations de systèmes après, les choses ont bien changé : aujourd'hui, l'armoire de commande de cinquième génération IRC 5 a été conçue avant tout pour simplifier l'utilisation des robots et lever les obstacles à leur intégration au sein des sites industriels existants → 7.

L'IRC 5 améliore les performances du robot et accélère l'intégration des équipements supplémentaires. Sa technologie de commande et d'asservissement des axes, notamment les fonctionnalités *TrueMove* et *QuickMove*, garantit les meilleurs résultats en termes de précision, de vitesse, de temps de cycle, de



simplicité de programmation et de synchronisation avec les équipements de périrobotique. *QuickMove* calcule l'accélération maximale de chaque déplacement afin d'atteindre le plus vite possible la position finale; *TrueMove* assure un suivi précis de la trajectoire programmée, indépendamment de la vitesse, évitant tout recalage de trajectoire lorsque les paramètres de vitesse sont modifiés en ligne. Autres atouts : l'interface de programmation graphique *FlexPendant* d'ABB avec son écran tactile et son combinatoire de mouvements, le langage flexible RAPID et les puissantes fonctions de communication.

ABB a récemment introduit une version compacte de l'IRC 5 pour les applications où l'encombrement au sol doit être minimisé, sans perte de fonctionnalités.

Au cœur du système de commande, *RobotWare* propose plusieurs options destinées à renforcer les fonctionnalités et à simplifier davantage le travail des utilisateurs. À titre d'exemple, citons le traitement multitâche, le transfert de fichiers de données au robot, la communication avec des systèmes externes ou une commande d'axes avancée.

Autre fonction remarquable de l'IRC 5 : *MultiMove* pour la commande simultanée de quatre robots ABB et leurs positionneurs ou autres équipements de périrobotique, soit au total 36 axes synchronisés.

Les tâches complexes de configuration et d'exploitation d'une cellule multi-robot avec des axes entièrement coordonnés ont été considérablement simplifiées grâce à *FlexPendant*, première interface opérateur ouverte au monde développée pour l'IRC 5.

À la pointe de la sécurité

Pour protéger le personnel, les cellules robotisées sont généralement entourées de barrières, grillages et autres coûteuses protections. Avec son automate *SafeMove*, ABB réduit les besoins en équipements de sécurité. Logé dans l'armoire de commande IRC 5, *SafeMove* surveille et valide de manière fiable la vitesse et la position des robots, et détecte toute dérive intempestive ou anormale. La détection d'un danger provoque l'arrêt d'urgence du robot en une fraction de seconde.

L'usinage avec contrôle d'effort

Autre innovation récente : le système *FlexFinishing* d'ABB avec fonction de contrôle d'effort *RobotWare Machining FC* pour les tâches délicates de meulage, d'ébavurage et de polissage de pièces de fonderie. Cette solution robotisée unique en son genre, lancée en 2007, associe notamment un environnement de programmation qui permet au robot de trouver lui-même la trajectoire optimale et une boucle d'asservissement pour moduler la pression de l'outil et sa vitesse.



Le nouveau concept *LeanID* d'ABB offre un juste équilibre entre coût et longévité en intégrant dans le bras du robot les équipements les plus exposés.



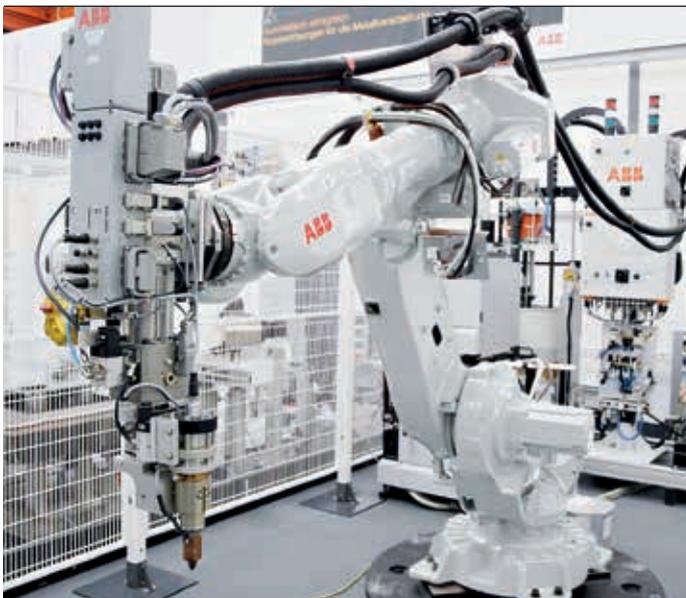
Jamais la programmation n'a été aussi simple et efficace: le capteur de force définit la trajectoire du robot, l'opérateur se contentant de guider le robot par le bras pour lui montrer sa trajectoire approximative. Le robot épouse automatiquement les contours de la pièce, enregistrant la trajectoire précise et créant le programme.

Cette démarche innovante permet non seulement d'améliorer la qualité des pièces de fonderie, mais encore d'écourter de 80 % le temps total de programmation de l'application, de diminuer de 20 % les temps de cycle et d'allonger de 20 % la durée de vie de l'outillage. Pour les applications de précision, ABB propose d'autres cellules fonctionnelles comme, par exemple, les cellules d'encollage qui garantissent une coordination parfaite des axes du robot et de la dépose de joints avec le suivi des pièces sur convoyeur, améliorant la qualité des pièces tout en réduisant les temps de cycle → 8.

Un robot dans votre PC

Au fil du temps, l'ordinateur PC s'est imposé comme le moyen le plus simple, le plus rapide, le plus précis et le plus souple pour créer des programmes robot avant même de toucher tout matériel physique dans le monde réel.

Cette programmation hors ligne maximise le retour sur investissement des systèmes robotiques et en réduit les coûts, accélère la mise sur le marché des produits et améliore leur qualité.



RobotStudio d'ABB permet de valider une solution robotique avant même de la réaliser ou sans immobiliser la production. Il facilite la programmation des robots et la conception des solutions pour des environnements industriels complexes.

Sur le marché, *RobotStudio* se distingue par le «modèle virtuel», reproduction exacte du programme exécuté sur les robots ABB en production. En exploitant des programmes robot réels et des fichiers de configuration identiques à ceux utilisés en atelier, l'utilisateur a l'assurance que tous les aspects du monde virtuel fonctionneront exactement comme dans la réalité.

Pour les développeurs, cette méthode très efficace permet de s'affranchir des contraintes de temps ou d'espace des lignes de production. En facilitant l'intégration des robots, clients et intégrateurs allègent leurs budgets et vendent leurs

Le prêt-à-produire

Pour lever certains obstacles à la robotisation, des cellules standardisées ont été conçues. ABB propose ainsi à ses clients le concept *FlexLean* qui regroupe, dans une cellule compacte, les robots, les automates et les câbles prémontés sur une plate-forme. Dans l'industrie automobile, par exemple, deux types de cellule existent: l'une pour l'assemblage géométrique, l'autre pour les lignes de finition. Le client se voit proposer différentes configurations prédéfinies et un large choix de produits robotiques. Les coûts de production chutent à un niveau tel que la solution *FlexLean* peut concurrencer la main d'œuvre des pays à bas coût.

FlexArc®, autre exemple de cellule standardisée, est une solution clé en main de soudage à l'arc robotisée → 9 comprenant robots, armoire IRC 5 avec les outils logiciels pour la commande coordonnée multi-robot, positionneurs et équipements

de soudage. Les clients ont le choix entre plusieurs solutions mono ou multi-robots. Tous les câbles internes sont tirés et raccordés en usine. Là encore, les éléments constitutifs de la cellule sont montés sur plate-forme, ce qui

Le logiciel du *FlexPicker* associe commande d'axes haute performance, système de vision intégré et suivi de convoyeur.

produits plus rapidement avec, à la clé, un retour sur investissement quasi immédiat.

supprime tout travail d'adaptation sur site. Le logiciel est préprogrammé pour une configuration et une exploitation



simples. S'agissant d'une solution clé en main, FlexArc peut être déplacée au sein d'un même site ou entre différents sites. Les ingénieurs peuvent ainsi concevoir un outil de production hautement flexible qui s'adapte rapidement à tout changement de campagne.

Système de vision

Devant les immenses progrès accomplis par la vision industrielle ces dix dernières années, ABB a compris qu'une solution robotique puissante assortie d'un système de vision pouvait aider à relever bon nombre de défis industriels.

L'offre multisectorielle *ABB Integrated Vision* regroupe dans un boîtier IP67 compact → 10 une cinquantaine de fonctions répondant pratiquement à tous les besoins de contrôle visuel: autofocus, optique et éclairage intégrés, acquisition d'images rapide, alimentation énergétique et commande d'éclairage externe, et nombreuses entrées/sorties.

La bibliothèque étendue de fonctions de commande simplifie son utilisation, même pour les novices. L'outil de programmation 3D hors ligne d'ABB, *RobotStudio*, intègre en standard des composants prêts à l'emploi facilitant la programmation du robot et du système de vision.

Contrat de réactivité

Toute dégradation des performances des robots pouvant avoir des retombées importantes sur la production, ABB a développé des services de télémaintenance et un réseau de 1200 spécialistes qui couvrent 50 pays et 100 sites. Le Groupe met à profit l'expérience acquise sur son parc installé de plus de 230 000 robots pour proposer des prestations de classe mondiale à un coût raisonnable. C'est là un important levier de différenciation pour ABB.

Dans le cadre d'un contrat de service ABB, les données d'état d'un robot sont transmises par son armoire de commande à un centre où elles sont analysées automatiquement et examinées à la loupe par un expert. Ce dernier peut identifier l'origine de la panne ou d'un écart de performance, et aider rapidement l'utilisateur. De nombreux problèmes sont ainsi réglés à distance, sans avoir à se déplacer. L'analyse automatique sert non seulement à signaler une défaillance, mais aussi à anticiper les problèmes. À tout moment et n'importe où, un utilisateur peut vérifier l'état fonctionnel d'un robot et accéder à d'importantes données de maintenance sur le système en se connectant au portail www.abb.com/MyRobot.

La force de l'âge

Depuis l'introduction, en 1974, du premier robot tout électrique ABB commandé par microprocesseur, la robotique industrielle a considérablement évolué et



les progrès devraient s'accélérer. Cette année, ABB prévoit de vendre son 250 000^e robot et poursuivra ses efforts d'innovation pour étoffer son offre de robots industriels, systèmes de commande, logiciels et services. En 40 ans, la précision de positionnement est passée de 1 mm à 10 µm, l'écran-ligne de 4 chiffres est devenu une IHM tactile sous Windows et la capacité mémoire a littéralement explosé, passant de 8 kilooctets à plusieurs téraoctets. Parallèlement, la fiabilité a fait un énorme bond et les prix ont tellement chuté qu'un robot coûte actuellement moitié moins cher qu'il y a dix ans. La robotique industrielle est aujourd'hui dans la force de l'âge.

David Marshall

ABB Robotics
Milton Keynes (Royaume-Uni)
david.marshall@gb.abb.com

Nick Chambers

ABB Robotics
Auburn Hills (Michigan, États-Unis)
nick.chambers@us.abb.com





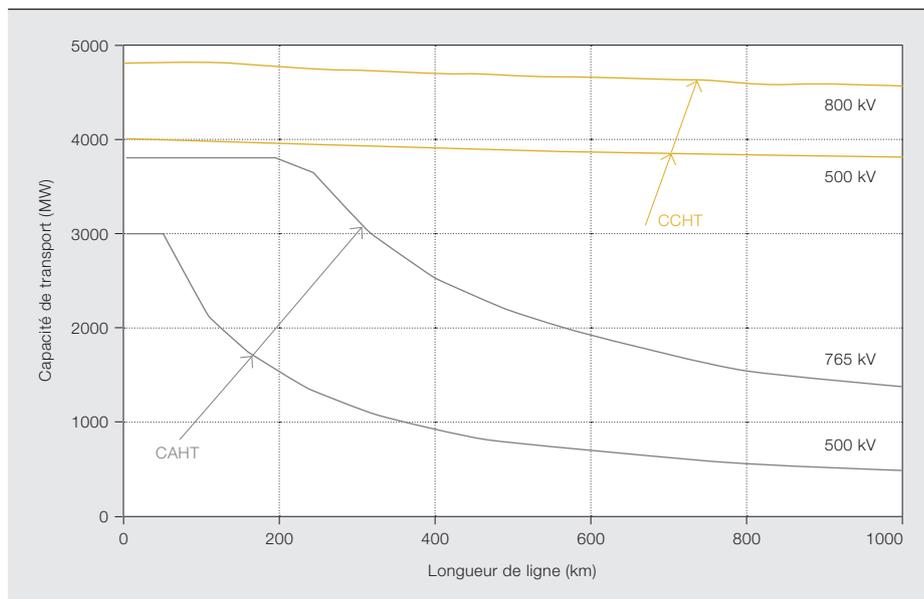
60 ans de CCHT

Genèse d'un leadership mondial

ANDREAS MOGLESTUE – On croit souvent que la « guerre des courants » qui opposa Edison, partisan du continu, et Tesla, défenseur de l'alternatif, dans les années 1880 aux États-Unis, eut finalement raison du premier. Loin s'en faut : tout au long des 60 dernières années, le courant continu a progressivement refait surface (qui plus est, à des niveaux de tension supérieurs à ceux qu'imaginait Edison), au point d'être aujourd'hui un maillon indispensable des réseaux de transport électrique du monde entier. L'histoire du groupe ABB, de ses sociétés d'origine, pionnières du domaine, à son rang actuel de chef de file du marché, se confond avec celle du courant continu à haute tension (CCHT). Mieux, ABB est aujourd'hui le seul à pouvoir fournir la totalité de l'arsenal CCHT, des transformateurs, stations de conversion, semi-conducteurs de puissance et câbles aux outils de développement et systèmes de conduite.

Photo

Premières valves à thyristors CCHT au monde, montées en série avec le convertisseur d'origine (au second plan) de la liaison de Gotland, vers 1970.



Le transport de l'électricité sur de longues distances ne peut se faire qu'à de hauts niveaux de tension. Les pertes en ligne étant proportionnelles au carré de l'intensité, chaque doublement de la tension réduit celles-ci d'un quart. Le plus simple moyen d'élever la tension est d'utiliser des transformateurs ; hélas, les lois de la physique font que le principe de la transformation ne vaut que pour l'alternatif. Loin de s'avouer vaincu, Edison contre-attaqua en dénonçant les dangers de la haute tension (non sans user parfois de macabres subterfuges comme l'électrocution d'animaux et la mise au point de la première chaise électrique) et en vantant les bienfaits de la production locale d'électricité. Concrètement, cela revenait à équiper chaque quartier d'une centrale d'énergie puisque la distance du transport à 110 VCC plafonnait autour de 1,6 km. Aussi cocasse et problématique qu'ait pu paraître cette solution, compte tenu de la pollution urbaine, l'idée d'Edison retrouve aujourd'hui du crédit avec l'essor de « microcentrales » qui permettent d'injecter l'électricité produite sur place (photovoltaïque, par exemple) dans le réseau général.

Autre riposte d'Edison : le transport de l'électricité à des niveaux de tension encore supérieurs, en contradiction avec

son activisme « anti-HT ». En 1889, il construit une ligne de 22 km reliant Williamette Falls à Portland, dans l'Oregon (États-Unis), pour acheminer 130 kW sous 4 kV. Il parvient à ce niveau de tension en raccordant des génératrices en série, principe démontré pour la première fois lors d'une exposition à Munich (Allemagne) en 1882. Mais à l'image du courant continu, la ligne fait long feu : emportée par une inondation en 1890, elle est reconstruite en alternatif... par le propre rival d'Edison, Westinghouse.

En était-ce fini du transport CC ? Nullement si l'on en juge par la soixantaine de clients new-yorkais toujours raccordés

À l'époque d'Edison, le courant continu gagnait déjà du terrain dans de nombreux secteurs.

à l'alimentation CC d'Edison en 2006, jusqu'à sa mise hors service définitive l'année suivante. Déjà du temps de son inventeur, le courant continu gagnait du terrain dans le ferroviaire, la production d'aluminium et les télécommunications, secteurs où il est encore très présent. De nouvelles applications se sont depuis ajoutées comme l'informatique et le photovoltaïque. Toujours est-il qu'en matière de transport et de distribution, la supériorité de l'alternatif semblait a priori imparable.

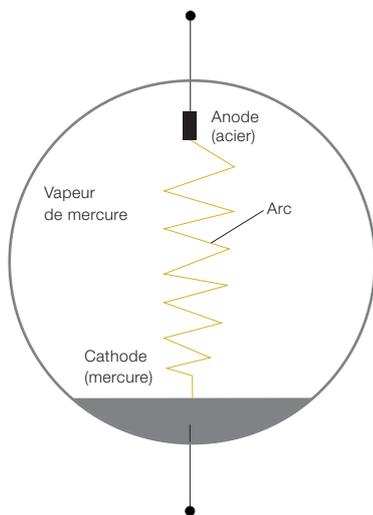
Les inconvénients de l'alternatif

Malgré l'adoption rapide du triphasé alternatif, l'accroissement des distances de transport et de distribution en courant alternatif (CA) se heurte à plusieurs problèmes dont, au premier chef, le phénomène de puissance réactive qui charge et décharge en permanence les champs électriques et magnétiques de la ligne suivant l'oscillation périodique des ondes de tension et de courant. Même si cette énergie n'est pas à proprement parler gaspillée, puisqu'elle est récupérée quand les champs se déchargent, elle induit des courants et des tensions supplémentaires sur la ligne qui dégradent l'intérêt économique du transport d'électricité : tout comme la capacité et l'inductance augmentent avec la distance, la puissance réactive croît également avec la longueur de la ligne.

Comble de l'ironie,

les lois de la physique qui sont au fondement de la transformation et du transport CAHT sont aussi celles qui limitent sa distance utile → 1.

Des parades existent comme les dispositifs de compensation de puissance réactive FACTS (*Flexible Alternating Current Transport Systems*). Pour autant, le transport CC élimine totalement ce problème car les champs électriques et magnétiques de la ligne sont constants



et n'ont donc besoin d'être chargés que lorsque la ligne est mise sous tension.

Valves à vapeur de mercure

Rappelons que les premiers essais de transport CCHT mettaient en œuvre des génératrices ou des moteurs-générateurs¹ couplés en série. Or ce principe, limité par des contraintes mécaniques, était incapable de rivaliser au plan économique avec le courant alternatif.

La conversion CA-CC connut un regain d'intérêt avec l'avènement de la valve à vapeur de mercure². Cette ampoule étanche, remplie de mercure, comporte plusieurs anodes en acier et une cathode à mercure → 2. L'amorçage d'un arc entre anode et cathode donne naissance à un courant qui produit de la chaleur et ionise la vapeur de mercure. À l'interface arc-mercure, le bombardement d'ions libère des électrons, que l'acier peut absorber mais pas céder en grandes quantités à la température de service. Résultat, le courant ne circule que dans un sens, de l'acier au mercure. Telle une

Notes

- 1 Moteur et générateur accouplés au même arbre mécanique, qui permettent de former un ensemble de moteurs-générateurs en raccordant des moteurs en parallèle et des générateurs en série pour augmenter les niveaux de tension CC.
- 2 Cf. « Cent ans de plénitude : des valves à vapeur de mercure au disjoncteur hybride », *ABB review*, 2/2013, p. 70-78.
- 3 En 1939, BBC fait pourtant la démonstration d'une liaison de 25 km, 500 kW/50 kV, entre Wettingen et Zurich (Suisse).



diode, la valve à vapeur de mercure se prête très bien à la conversion CA-CC.

Elle peut aussi transformer du continu en alternatif : l'amorçage artificiel de l'arc (par une bobine d'inductance appliquant une pointe de tension à une électrode auxiliaire) déclenche la conduction à un point arbitraire du cycle.

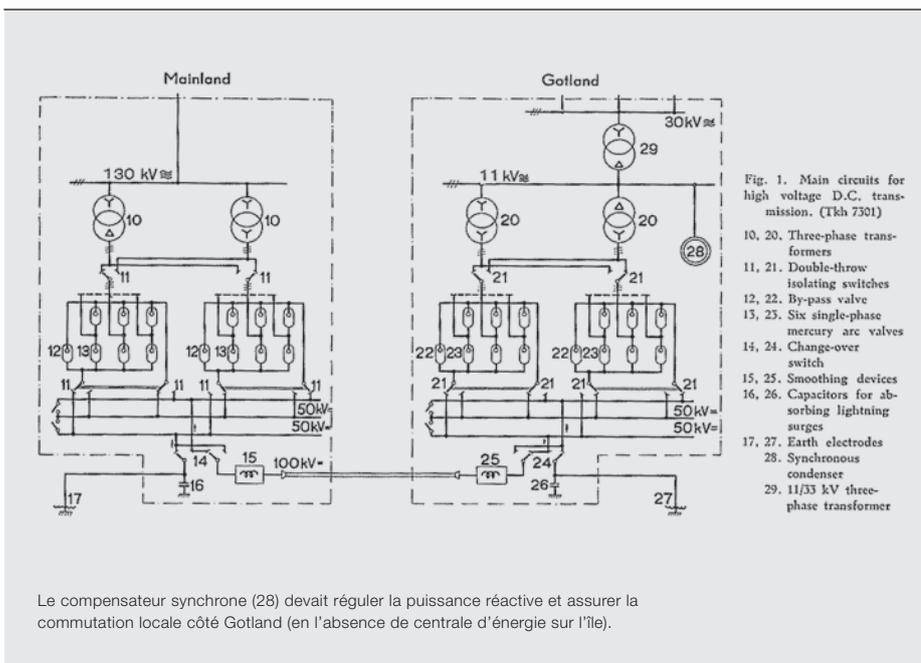
En réalisant cette double conversion, les valves à vapeur de mercure permettent d'utiliser des transformateurs et de combiner par là-même les avantages de la transformation CA et du transport CC.

On doit à l'inventeur américain Peter Cooper Hewitt la première valve à vapeur de mercure, présentée en 1902. À partir de 1913, le prédécesseur d'ABB, Brown, Boveri & Cie (BBC), devient l'un des précurseurs de son développement et de sa commercialisation, même si les premières installations ne visent pas à acheminer du courant continu mais à redresser de plus faibles tensions (jusqu'à environ 2500 V) pour les besoins de l'industrie et des transports³.

Très vite, l'augmentation des niveaux de tension se heurte notamment au phénomène de « retour d'arc » ; celui-ci se produit quand une tension inverse aux bornes d'une valve non allumée provoque un amorçage électrique involontaire dans le sens inverse, risquant d'endommager le circuit mais aussi de détruire la valve. La solution réside dans l'insertion d'une électrode de répartition

La capacité et l'inductance augmentent avec la distance et la puissance réactive croît avec la longueur de la ligne, au point d'éroder la rentabilité du transport en courant alternatif.

4 Schéma de principe de la liaison de Gotland (couplage série des convertisseurs aux deux stations d'extrémité, sur l'île et sur le continent)



ASEA Journal, 1954, p. 142

La ligne de Gotland a posé bien des défis à ASEA, comme la traversée sous-marine.

de potentiel entre l'anode et la grille de commande, reliée à un diviseur de tension. Cette invention, brevetée en 1929, revient à Uno Lamm, ingénieur ASEA (autre société à l'origine du groupe ABB) souvent considéré à ce titre comme le père du transport CCHT → 3.

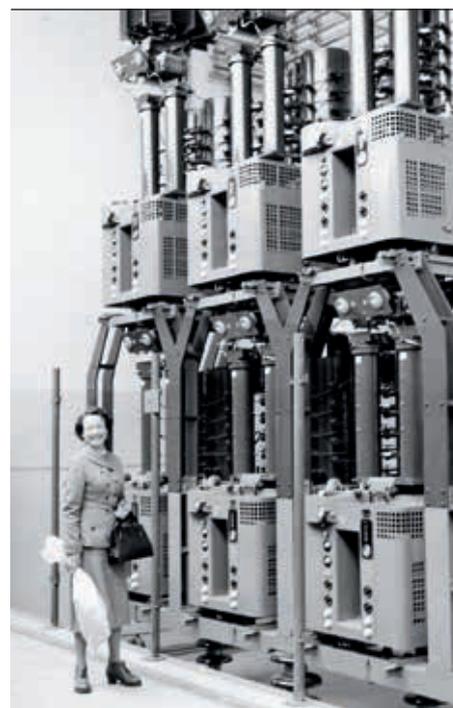
Fiabilité oblige, il restait encore beaucoup à faire pour concrétiser cette idée. Le comportement souvent imprévisible des arcs rendait en effet la mise au point de la valve très empirique. Pour ne pas déstabiliser le réseau électrique de la ville suédoise de Ludvika où était installé le laboratoire d'ASEA, les essais de forte puissance se déroulaient parfois la nuit !

L'Agence suédoise de l'énergie (aujourd'hui Vattenfall) suit avec intérêt les progrès d'ASEA. Au début des années 1940, la technologie est suffisamment aboutie pour envisager une station d'essais à Trollhättan, à côté d'une centrale de production. Construite à partir de 1943, une ligne de transport de 6,5 MW/90 kV, longue de 50 km jusqu'à Mellerud (et une autre station de conversion), est mise en service en 1945. Elle ne servira qu'aux essais jusqu'à son démantèlement à la fin de la décennie 1960.

Réalisations emblématiques

En 1950, la Suède décide de se doter d'une liaison CCHT entre l'île baltique de

5 Les trois valves d'un convertisseur de Gotland (à côté, l'épouse d'Ugo Lamm)



Gotland et la côte → 4-5, posant de nouveaux défis à ASEA, dont le développement d'un câble sous-marin.

Le 7 mars 1954, la ligne de 200 A est alimentée sous une tension de 50 kV, portée le 26 juillet à 100 kV moyennant l'ajout d'une seconde paire de convertisseurs en série. L'ère du CCHT a commencé.

L'ASEA Journal relate l'événement dans un article liminaire signé par Ugo Lamm lui-même → 6 :

« La réalisation de cette ligne de transport électrique reliant la Suède et Gotland est le point d'orgue d'une longue histoire du CCHT en Suède.

Si l'effort de développement s'est polarisé sur les valves, clés de voûte d'une station de conversion CA-CC, l'ensemble du chantier a soulevé bien d'autres problématiques, comme la technologie des convertisseurs, le retour à la terre, la construction et la pose des câbles, l'interférence avec les circuits de télécommunication, l'effet de couronne sur les lignes aériennes, le comportement des isolateurs de suspension en tension continue, etc. »

Ce deuxième paragraphe de l'article aurait sa place dans n'importe quelle rétrospective du transport CCHT. Les principes fondamentaux établis pour

Les labos ASEA lancent le développement du thyristor au milieu des années 1960.

1954

ASEA JOURNAL

The first High Voltage D.C. Transmission with Static Convertors

Some Notes on the Development

U. Lamm. Manager Rectifier Dept.

U.D.C. 621.315.051.024
ASEA Reg. 4897, 730

The realisation of the high voltage D.C. transmission from the Swedish mainland to Gotland is a high point in a very extensive development work in Sweden, the beginnings of which can be traced back a long time.

The convertor valves, as the most critical part of a D.C. plant, have always formed the focus of this development work. The total scheme has, however, covered many other spheres such as convertor technique generally, the problems of earth return, cable construction and laying, interference with telecommunication circuits, corona phenomena on overhead lines, the behaviour of suspension insulators with direct voltage, etc.

The development of the valves can be said to have begun in 1929, when the first ASEA patent was applied for, dealing with the principle of grading electrodes interposed between anode and cathode of a mercury-arc valve in order to decrease the risk of arc-back at high inverse voltage. This principle of grading electrodes has been adhered to ever since. The work lay idle, however, during long periods when other tasks took priority in ASEA's rectifier department. In the thirties some rather primitive valves were tested in the laboratory, and although they had a short life, they clearly confirmed the usefulness of the grading electrodes.

It was not until 1939, however, that the material combination which was necessary for progress in the work on the valves became available. In 1942—45, experiments were carried out in the rectifier laboratory at Ludvika on complete rectifiers and inverters built up from valves having an anode structure fundamentally the same as is now used in the Gotland transmission. Owing to the limited resources of the factory's three-phase system, however, the tests could continue only for limited periods of time, mainly at night.

Sweden is a country where reliable and economical power transmission on a large scale is of great importance to industry and life in general. The bulk of the water power resources is situated in the northern part of the country, while the majority of the population is in the southern part. Within the State Power Board the possibilities of using high voltage D.C. for transmission were realised at an early stage. Although extensive and successful efforts were made to develop the three-phase A.C. system for higher capacity and voltage and better economy, the State Power Board unhesitatingly put their resources at the disposal of the engineers working on the development of high voltage D.C., and a period of close collaboration between the Board and ASEA started about 1942. One result was the building of

139

Gotland font toujours autorité, ASEA et son successeur ABB s'étant bâti une expertise dans tous les domaines évoqués. ABB est aujourd'hui la seule entreprise au monde à pouvoir couvrir toute la fourniture CCHT : transformateurs, stations et équipements de conversion, câbles, systèmes de conduite et, plus récemment, disjoncteurs CC.

La deuxième ligne CCHT commerciale d'ASEA, d'une puissance de 160 MW, est inaugurée en 1961 entre la Grande-Bretagne et la France. Suivent dans les années 1960 d'autres liaisons en Scandinavie, en Italie, au Japon, au Canada et en Nouvelle-Zélande, dont plusieurs en sous-marin. Le développement du transport CCHT à valves à

vapeur de mercure est à son apogée avec l'interconnexion Pacific Intertie qui transporte sur 1300 km, entre Celio (Oregon) et Sylmar (Californie du Sud), 1440 MW, puis 1600 MW en 1982, sous 500 kV. Réalisée avec General Electric, elle est mise en exploitation en 1970.

ASEA bâtira ainsi huit liaisons CCHT de ce type → 7 pour une puissance totale de 3400 MW, jusqu'à l'arrêt du développement des valves à vapeur de mercure en 1971.

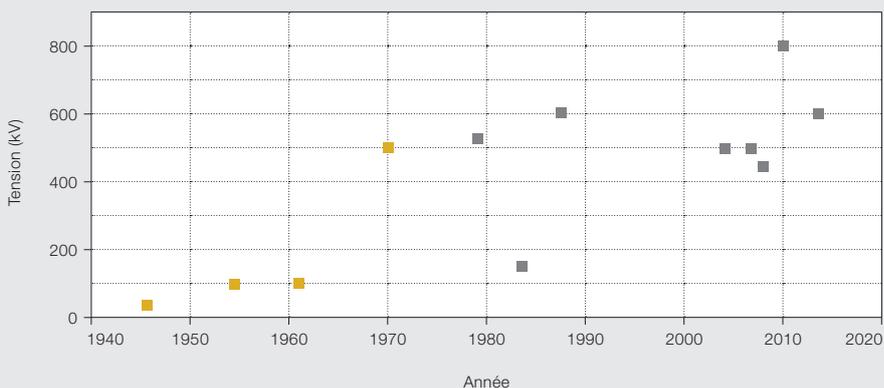
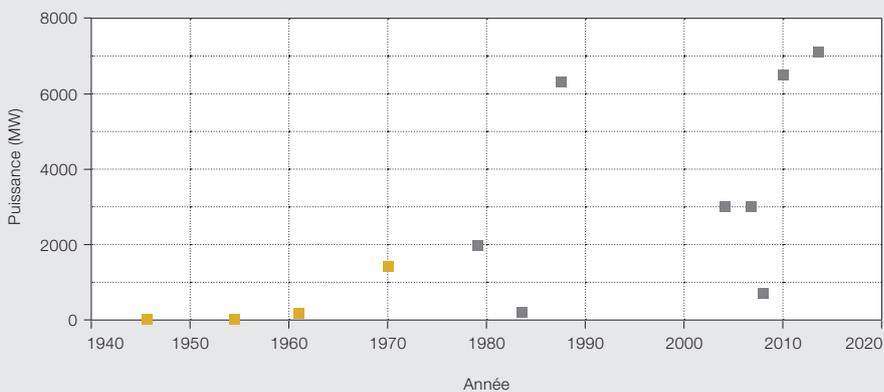
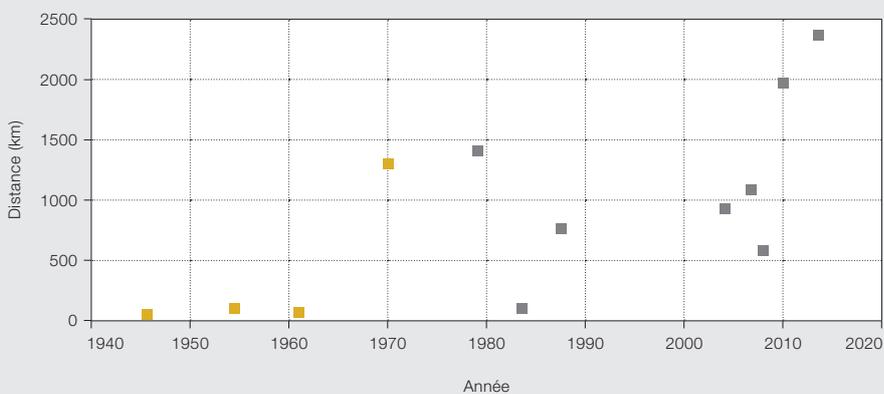
Valves à thyristors

Les années 1960 voient la généralisation d'un nouveau type de redresseurs, les valves à thyristors, qui finiront par remplacer la vapeur de mercure → 8.

De 1946 à 1971, ASEA réalisa huit liaisons CCHT basées sur la technologie des valves à vapeur de mercure.

7 Quelques-uns des nombreux projets CCHT à l'actif d'ABB (plus de la moitié des 170 liaisons au monde)

Année	Liaison	Type de convertisseurs	Distance (km)	Puissance (MW)	Tension (kV)	
1946	Trollhättan-Mellerud (ligne d'essai)	Valves à vapeur de mercure	50	6,5	45	
1954	Gotland 1		98	20	100	
1961	Interconnexion France-Angleterre (IFA)		64	160	100	
1970	Pacific Intertie		1300	1440	500	
1979	Cahora Bassa		Statiques	1420	1920	533
1983	Gotland 2			99	130	150
1987	Itaipu			780	6300	600
2004	Trois Gorges-Guangdong			940	3000	500
2007	Trois Gorges-Shanghai	1060		3000	500	
2008	NorNed	580		700	450	
2010	Xiangjiaba-Shanghai	1980		6400	800	
2013	Rio Madeira	2375		7100	600	





HVDC Light® substitue aux valves à thyristors des convertisseurs à source de tension et des IGBT, comparables à ceux utilisés dans les variateurs de vitesse industriels.

Le principe du thyristor fut inventé par William Shockley, en 1950. Ce semi-conducteur à trois bornes (anode, cathode et électrode de commande ou « gâchette ») se comporte comme une diode : il laisse passer le courant dans un sens, avec une tension inverse qui prélève des porteurs de charge de la zone de jonction. Le thyristor possède des couches supplémentaires entre les zones p- et n- qui normalement empêchent aussi la conduction. Pourtant, l'application d'un courant d'amorçage sur la gâchette inonde cette zone de porteurs de charge et permet la conduction. Une fois celle-ci amorcée, la production de porteurs de charge s'auto-entretient et le courant de gâchette peut disparaître. Le thyristor continue de conduire tant que le courant de charge ne descend pas en dessous d'une valeur de seuil. Il s'apparente à une valve à mercure commandable, avec les avantages de la compacité et des faibles pertes mais sans les risques de manipulation du mercure. Il s'adapte à de nombreux dispositifs connectés en série pour créer des valves destinées à de plus hauts niveaux de tension.

ASEA lance le développement du thyristor au milieu des années 1960. En 1967, la liaison CCHT de Gotland⁴ se dote d'une station d'essais, puis en 1970, des redresseurs à thyristors sont raccordés en série aux valves à vapeur de mercure en place → photo p. 32-33 pour porter la tension à 150 kV (tout en conservant le câble d'origine qui supporte sans mal cette montée en tension).

D'autres grands systèmes CCHT marquent la décennie 1970 : la liaison Skagerak entre la Norvège et le Danemark, celle d'Inga-Shaba au Congo, les projets CU aux États-Unis (Dakota du Nord) et Nelson River 2 au Canada.

Au temps de la valve à vapeur de mercure, ASEA fait pratiquement cavalier seul sur le marché du CCHT, mais l'innovation de rupture que constitue le thyristor, de fonctionnement plus facile, fait entrer de nouveaux concurrents dans l'arène : BBC s'associe à Siemens et AEG, au milieu des années 1970, pour construire la liaison de Cahora Bassa entre le Mozambique et l'Afrique du Sud. ASEA riposte en investissant dans la recherche pour établir sa suprématie technologique dans le domaine des thyristors CCHT.

Projet phare de la décennie 1980, la liaison Itaipu-São Paulo (Brésil) de 6300 MW, adjugée au consortium ASEA-PROMON, voit sa mise en exploitation échelonnée de 1984 à 1987. L'interconnexion Québec-Nouvelle Angleterre de 2000 MW, livrée à peu près à la même époque, est la première liaison CCHT à extrémités multiples.

Note

⁴ La ligne d'origine, Gotland 1, fut exploitée jusqu'en 1986. L'île est aujourd'hui reliée par deux liaisons CCHT, Gotland 2 (en service depuis 1983) → 7 et Gotland 3 (1987), totalisant 260 MW.

Dès 1992, ABB propose un maillage de lignes CCHT pour chapoter le réseau existant et le soulager du transport massif d'électricité.

9 Station de conversion de la liaison Trois Gorges-Guangdong, à Jingzhou



En 1988, ASEA et BBC fusionnent pour créer ABB. En 1995, le Groupe lance une nouvelle génération de stations de conversion que caractérisent des convertisseurs commutés par condensateurs permettant l'extinction des valves sans avoir à attendre le passage par zéro du courant alternatif. Cette première grande innovation du domaine de la commutation depuis 1954 améliore la souplesse de commande et réduit la puissance réactive. Elle prend corps avec l'interconnexion Brésil-Argentine (station de conversion Garabi) de 2200 MW, en 1999.

ABB poursuit la montée en tension et en puissance: en 2004, la liaison Trois Gorges-Guangdong (Chine) de 940 km est inaugurée pour transporter 3000 MW à ± 500 kV → 9. En 2007, une ligne de 1060 km relie avec la même puissance Trois Gorges à Shanghai. L'année 2010 marque la mise en service d'un autre projet d'envergure: la liaison CCHT à très haute tension (6400 MW/ ± 800 kV) Xiangjiaba-Shanghai, longue de 1980 km. En 2013, la ligne Rio Madeira au Brésil commence à acheminer 7100 MW sur 2375 km.

Au demeurant, le CCHT n'est pas que synonyme de grand transport de puissances toujours plus fortes. Dans le prolongement de Gotland, il convient parfaitement aux liaisons sous-marines pour lesquelles il affiche des distances supérieures de plusieurs dizaines de kilomètres à celles du CAHT, grâce à la

capacité plus élevée de ses câbles blindés → 10. En témoignent, par exemple, les 580 km de la ligne NorNed qui relie la Norvège aux Pays-Bas depuis 2008.

Transporter léger

À moindre échelle, le CCHT sert également à raccorder les parcs éoliens en mer ou à alimenter en électricité les plates-formes pétrolières et gazières → 11: des applications de faibles puissances pour lesquelles ABB lance en 1990 HVDC Light™, qui substitue aux valves à thyristors des convertisseurs à source de tension et des transistors IGBT, comparables à ceux utilisés dans les variateurs de vitesse industriels. La plus grande souplesse de commande de ce CCHT «léger», ainsi que la meilleure régulation de la puissance réactive et sa capacité de redémarrage sur défaut lui permettent de raccorder des réseaux îlotés, sans commutation locale, mais aussi de stabiliser et de réduire la charge des réseaux CA existants. Grâce à cette solution compacte, les stations de conversion peuvent être logées dans des conteneurs et livrées d'un seul tenant, simplifiant les essais et la mise en service sur site.

Bâtir les autoroutes de l'énergie

Les réseaux électriques de demain doivent relever quantité de nouveaux défis, et non des moindres comme la transformation radicale de la production d'énergie. Les centrales classiques ont pour la plupart été construites à proximité des lieux de consommation. Or l'essor

10 Embarquement du câble de la liaison Fenno Scan, achevée en 1989



11 Chargement d'un module HVDC Light® sur une plate-forme pétrolière en mer du Nord



et la part croissante des renouvelables dans le paysage énergétique entraînent un afflux de puissance en provenance de régions éloignées, qu'il faut transporter sur de grandes distances en traversant souvent des zones où le réseau est traditionnellement faible et inapte à gérer des charges supplémentaires. Dès 1992, le Suédois Gunnar Asplund, directeur R&D chez ABB Power Technologies Grid Systems, propose de construire un maillage de lignes CCHT pour chapoter le réseau existant et le soulager du transport massif d'électricité.

Mais la tâche est plus compliquée qu'il n'y paraît. Principal obstacle technique, l'absence de disjoncteur adapté. En alternatif, les disjoncteurs peuvent isoler rapidement et en sécurité n'importe quel tronçon de ligne, sur apparition d'un défaut par exemple, sans affecter le reste du réseau. À l'ouverture d'un disjoncteur, l'arc électrique continue de conduire le courant entre les contacts jusqu'au passage par le zéro de courant suivant. Le courant continu étant dépourvu de cette fonctionnalité, il faut une autre méthode : depuis 2012, le disjoncteur hybride d'ABB associe semi-conducteurs de puissance et interrupteurs mécaniques pour couper le flux CC de manière sûre et opportune⁵.

Note

⁵ Cf. « Montée en charge : le nouveau disjoncteur hybride d'ABB fiabilise les réseaux CCHT », *ABB review*, 2/2013, p. 6–13.

Pas de deux

Alors, CC ou CA ? Tesla ou Edison ? La question est loin d'être tranchée ; le courant continu investit les domaines traditionnels de l'alternatif sans jamais pouvoir l'évincer complètement. L'histoire donnera sans doute encore longtemps raison aux deux concurrents.

Andreas Moglestue

ABB review

Zurich (Suisse)

andreas.moglestue@ch.abb.com

Pour aller plus loin

Lamm, U., « The first High Voltage D.C. Transmission with Static Convertors: Some Notes on the Development », *ASEA Journal*, 1954, p. 139–140.

Lidén, I., Uhlmann, E., Svidén, S., « The Gotland D.C. Link: The Layout of the Plant », *ASEA Journal*, 1954, p. 141–154.

Wetzel, R., *Die Geschichte des Quecksilberdampfgleichrichters bei BBC Deutschland 1913–1963*, thèse de doctorat de l'université de Stuttgart, 2001.

Asplund, G., Carlsson, L., Tollerz, O., « 50 ans de transport d'énergie en CCHT, parties 1 et 2 », *Revue ABB*, 4/2003, p. 6–13.

Haglöf, L., Danfors, P., *HVDC Veterans Presentation*, Visby Gotland, 2004.

Zeller, H. R., « Puces savantes : ABB et les semi-conducteurs de puissance », *Revue ABB*, 3/2008, p. 72–78.

Asplund, G., Carlsson, L., « CCHT : ABB, du rôle de pionnier à celui de leader mondial », *Revue ABB*, 4/2008, p. 59–64.

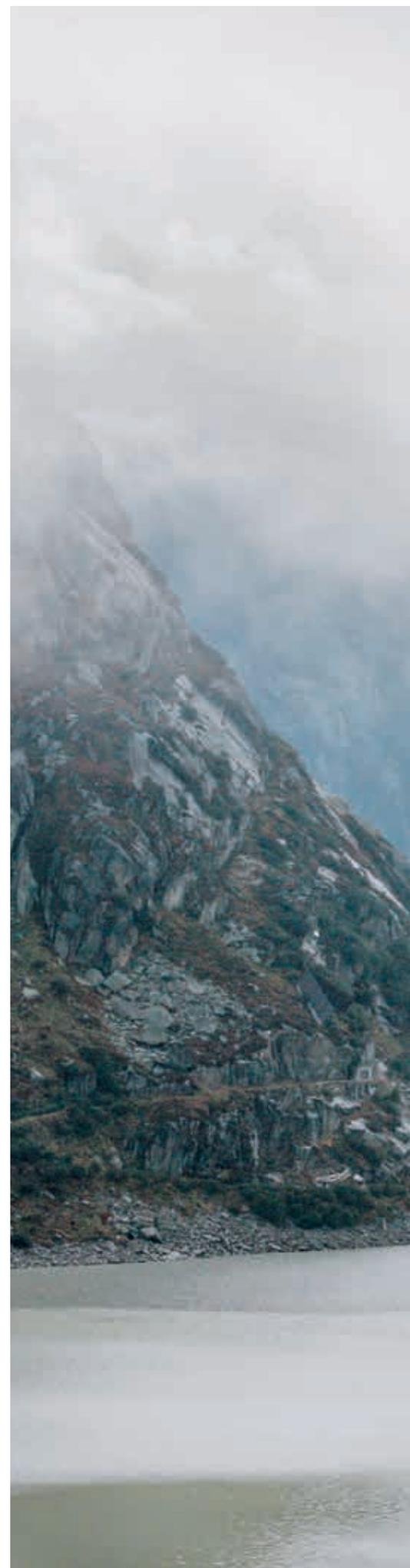
En grande pompe

Un convertisseur ABB de 100 MW pour Grimsel 2

HANS SCHLUNEGGER – L'énergie hydraulique est l'un des plus anciens modes de production d'électricité, mais aussi l'un des plus souples d'utilisation, puisque de grandes quantités d'eau retenue dans un bassin sont libérables à tout moment, au gré des besoins. À cette fonction première s'ajoute la possibilité de stocker le surplus d'énergie en pompant l'eau de l'aval vers l'amont pour la restituer quand le réseau électrique doit être régulé et stabilisé. Afin d'améliorer son rendement en mode pompage, la station de transfert d'énergie par pompage (STEP) Grimsel 2 des Forces motrices de l'Oberhasli SA (KWO) s'est équipée d'un convertisseur de fréquence ABB de 100 MW.

Photo

Les neuf centrales des Forces motrices de l'Oberhasli, dans les Alpes suisses, totalisent une puissance installée de 1125 MW et produisent chaque année 2200 GWh; 700 millions de m³ d'eau par an sont ainsi pompés dans les deux lacs, pour une capacité de stockage de 200 millions de m³.





Le convertisseur ABB de Grimsel 2 est le plus puissant jamais installé dans une centrale hydroélectrique.

L'accumulation d'énergie par pompage sert à écrêter les pics de consommation électrique: l'eau est pompée aux heures creuses (principalement la nuit) pour constituer une réserve de puissance qui sera « turbinée » aux périodes de pointe. En modulant ce stock d'eau en fonction des aléas de la demande, les STEP limitent le recours aux autres sources d'énergie d'appoint, souvent polluantes.

Ce moyen de stockage électrogène est idéal pour compenser les écarts de consommation jour-nuit. Il facilite également l'intégration d'un nombre croissant de parcs éoliens et solaires, dont il peut compenser l'intermittence et l'imprévisibilité pour garantir la continuité de la fourniture électrique, même en l'absence de soleil ou de vent.

Au-delà de cet usage premier, les STEP contribuent au réglage du réseau électrique en turbinant et en pompant les relativement faibles quantités d'énergie nécessaires à l'équilibre production-consommation. Reste que pour être effi-

cace, cette régulation doit être très précise.

Puissance variable

La STEP Grimsel 2 abrite quatre génératrices synchrones → 1, 2 et 3. Jusqu'à présent, KWO ne pouvait moduler la puissance qu'en jouant sur le nombre de groupes en service. Quand des niveaux intermédiaires de puissance étaient nécessaires, il fallait faire tourner une turbine supplémentaire. Or pomper et turbiner simultanément ne gaspille pas seulement l'énergie mais aussi la plus précieuse ressource de la centrale : l'eau.

Afin d'ajuster plus efficacement la puissance absorbée au pompage, KWO décida d'équiper l'une de ses génératrices d'un convertisseur à électronique de puissance. ABB remporta le contrat en 2010 et la mise en exploitation eut lieu en 2013.

Record de puissance

Le convertisseur statique 100 MVA à bus courant continu (CC) de Grimsel 2 est le plus puissant jamais installé dans une centrale hydroélectrique → 4. Il se compose de deux ponts de puissance de 50 MW, dotés de leur propre transformateur d'entrée et de sortie → 5 et raccordés en série côté génératrice et côté réseau. Chacun intègre des ensembles de modules double phase en couplage parallèle à thyristors IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristors*). L'installation aligne ainsi 24 modules double phase.

Pompage et turbinage simultanés ne gaspillent pas seulement l'énergie, mais aussi le bien le plus précieux de la centrale : l'eau !

La puissance varie en permanence dans une plage de 60 à 100 MW, limitée par le risque de cavitation dans la roue de la pompe.

Démarrage

En mode turbinage ou pompage non régulé, le groupe est démarré avec la turbine → 6 ; le bloc transformateur est alors magnétisé par l'alternateur et couplé au 220 kV après synchronisation

1 La STEP de Grimsel 2 en chiffres

Puissance de turbinage	4 × 80 MW
Puissance de pompage	4 × 90 MW
Hauteur de chute moyenne	400 m
Débit	4 × 22 m ³ /s
Vitesse synchrone	750 tr/min
Années de construction	1973-80

2 Les lacs de Grimsel 2

	Lac	Altitude (m)	Volume utile (10 ⁶ m ³)	Superficie (km ²)	Profondeur maxi (m)
Bassin supérieur	Oberaar	2303	58	1,47	90
Bassin inférieur	Grimsel	1908	101	2,63	100

3 Les quatre génératrices synchrones de Grimsel 2



4 Convertisseur ABB de 100 MW



au réseau. En pompage régulé, le bloc transformateur et les deux transformateurs du convertisseur réseau doivent démarrer directement, induisant de forts appels de courant. Pour les éviter, le bus CC du convertisseur de fréquence est mis en charge par le transformateur de démarrage et les diodes du convertisseur moteur. Les transformateurs sont ensuite magnétisés par le convertisseur réseau avant d'être synchronisés. La procédure de démarrage ne dure qu'une dizaine de secondes, puis le convertisseur accélère la machine à 600 tours/minute, pompe à roue noyée et robinet sphérique fermé → 6d. Après ouverture du robinet, la vitesse est réglée à environ 690 tr/min, selon la puissance minimale requise par la hauteur de chute.

Régulation

La puissance active est réglée soit manuellement, soit par le centre de conduite qui adapte la production de toutes les centrales KWO au plan de charge. La consigne de régulation côté réseau s'ajoute à celle du plan de charge. Puissance de conversion et régulation de vitesse sont configurées en cascade, la puissance active étant limitée par la

hauteur de chute et la puissance maximale du convertisseur.

La puissance réactive est réglée par une boucle de réglage de la tension, soit manuellement, soit par le système amont de réglage de la tension réseau 220 kV. La puissance active prime sur la puissance réactive.

Modes de fonctionnement

Grimsel 2 peut fonctionner en

- turbinage;
- pompage non régulé sans convertisseur (vitesse constante);
- pompage régulé par convertisseur (vitesse variable);
- correction de l'angle de phase par convertisseur.

Le turbinage avec convertisseur n'est pas envisagé car l'ajustement de la vitesse de la turbine Francis à la hauteur de chute relativement faible ne compenserait pas les pertes du convertisseur.

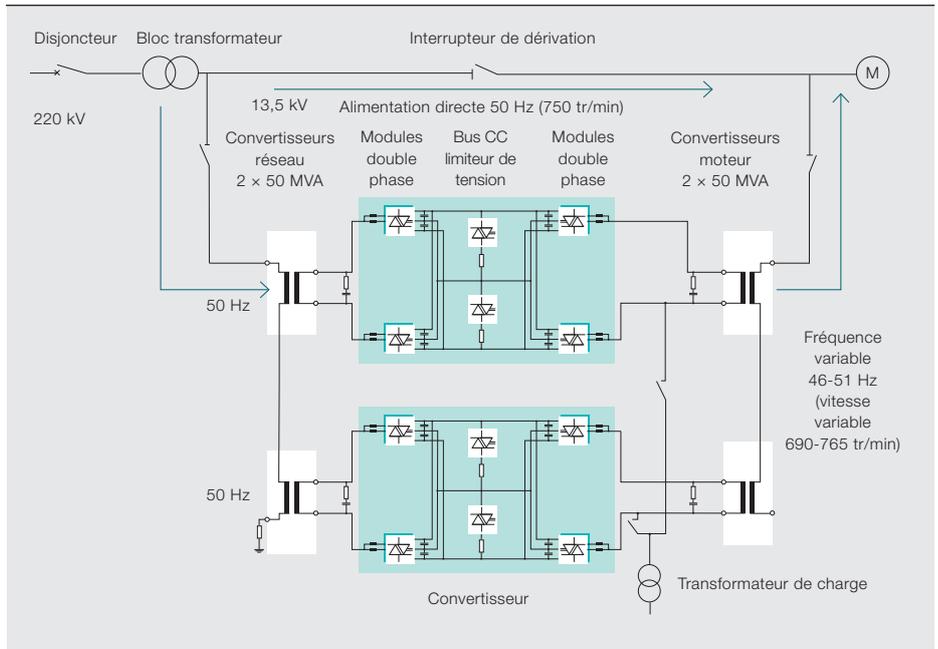
Réalisation

Le planning de livraison et d'installation du convertisseur fut adapté aux travaux de rénovation de l'aménagement, réalisés en parallèle: révision des machines hydrau-

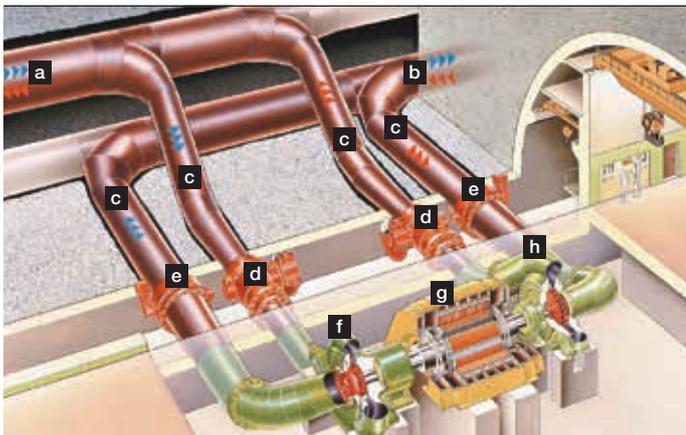
Fin mars 2014, le convertisseur cumulait 3500 heures de pompage régulé et 850 heures de compensation synchrone.

Presque toutes les nouvelles STEP sont équipées de génératrices asynchrones à double alimentation à vitesse variable.

5 Synoptique du convertisseur ABB

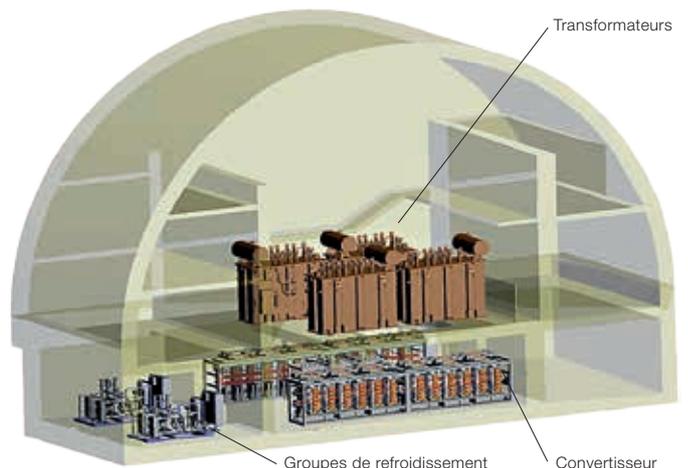


6 Turbine-pompe et raccords



- | | | |
|--------------------------------------|----------------------|--------------|
| a Conduite forcée (Lac de l'Oberaar) | d Robinet sphérique | ▶▶ Turbinage |
| b Conduite forcée (Lac de Grimsel) | e Vanne papillon | ◀◀ Pompage |
| c Tuyauteries | g Pompe | |
| | h Alternateur/moteur | |

7 Galerie souterraine



liques, du robinet sphérique et de la vanne papillon, renouvellement de l'instrumentation et du contrôle-commande, remplacement du régulateur de turbine, du système d'excitation et de l'appareillage 220 kV.

Le convertisseur peut être implanté dans la galerie souterraine → 7-8, avec les quatre transformateurs à l'étage de la salle des machines, et les groupes de refroidissement au niveau inférieur.

Exploitation

L'installation est opérationnelle depuis mai 2013. À la fin du mois de mars 2014, elle cumulait 3500 heures de pompage régulé et 850 heures de compensation synchrone → 9.

Un potentiel important

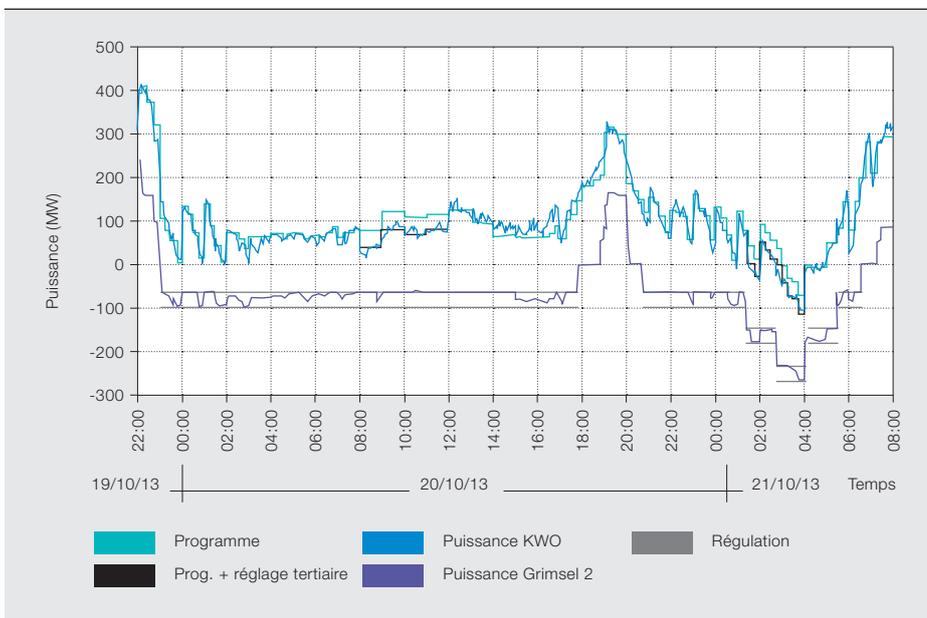
À l'heure actuelle, presque toutes les nouvelles STEP sont équipées de machines asynchrones à double alimentation pilotées en vitesse variable. Une solution qui n'est pas sans inconvénients : d'abord, la complexité du rotor impose des contraintes de conception qui limitent l'accélération nécessaire pour atteindre la vitesse optimale de la pompe-turbine. Ensuite, il est bien plus compliqué de démarrer une machine asynchrone, obligeant parfois à dénoyer la pompe, et plus difficile de respecter les règles de raccordement au réseau. La tendance est donc à l'adoption de machines synchrones pilotées par convertisseur statique de fréquence.

8 Installation du convertisseur au sous-sol de la galerie souterraine



L'accumulation par pompage reste à ce jour la solution la plus aboutie et la plus économique pour la régulation du réseau électrique.

9 Le convertisseur permet de réguler avec précision la puissance de la centrale.



Équiper une STEP d'un convertisseur total est une excellente occasion de tester le pompage à vitesse variable en conditions réelles. La technologie mise en œuvre à Grimsel 2 est à cet égard très prometteuse. Si d'autres techniques de stockage ont progressé, le transfert d'énergie par pompage hydraulique reste à ce jour la solution la mieux maîtrisée et la plus économique pour la régulation du réseau électrique. Les STEP jouent un rôle prépondérant dans la transition énergétique : le nouveau convertisseur de Grimsel 2 participe 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.

Ce texte est inspiré de l'article « 100 MW full-size converter in the Grimsel 2 pumped-storage plant » publié dans le *Bulletin 3/2014* de l'association Electrosuisse.

Hans Schlunegger

Kraftwerke Oberhasli AG

Innertkirchen (Suisse)

hans.schlunegger@kwo.ch

Pour tout renseignement concernant ABB, veuillez contacter Fritz Wittwer (fritz.wittwer@ch.abb.com) ou Steve Aubert (steve.aubert@ch.abb.com).

Lectures complémentaires

Sydnor, G. H., Bhatia, R., Krattiger, H., Mylius, J., Schafer, D., *Fifteen Years of Operation at NASA's National Transonic Facility with the World's Largest Adjustable Speed Drive*, Archives de la NASA.

Hell, J., Egretberger, M., Schürhuber, R., Lechner, A., Vaillant, Y., « Full size converter solutions for pumped storage plants: a promising new technology », *Hydro 2012*, Bilbao (Espagne), 29-31 octobre 2012.

Schlunegger, H., Thöni, A., « 100 MW full-size converter in the Grimsel 2 pumped storage plant », *Hydro 2013*, Innsbruck (Autriche), 7-9 octobre 2013.



Densité de puissance

Des moteurs ABB
à la pointe
de l'innovation

THOMAS EK, KARITA FORSS, TIMO HOLOPAINEN, JANNE IKONEN, OLLI LAHTINEN – ABB a conçu une nouvelle génération de moteurs à partir de sa gamme HXR hautes performances à nervures de refroidissement. Ces moteurs haute tension, baptisés NXR, affichent une densité de puissance remarquable et bénéficient d'un refroidissement interne et externe amélioré, d'une qualité de fabrication des bobines et de la carcasse incomparable, et de niveaux d'adaptabilité et de simplicité de maintenance inégalés. Ils constituent une meilleure solution pour bon nombre d'applications recourant habituellement à des moteurs fermés ventilés. Cette densité de puissance accrue permettra, dans bien des cas, de sélectionner un moteur de hauteur d'axe inférieure mais aussi puissant qu'un moteur plus gros. Pour commencer, la nouvelle gamme sera disponible en hauteurs d'axe normalisées de 355 et 400.



Ces moteurs établissent un nouveau référentiel au sein du secteur tout en élargissant la gamme existante.

Toutes les machines électriques tournantes s'échauffent du fait de pertes électriques et mécaniques. Ces pertes sont très élevées au démarrage et augmentent avec la charge. Les moteurs doivent donc être refroidis pour dissiper en permanence la chaleur produite, généralement dans le milieu ambiant. Le refroidissement des moteurs revêt une importance telle que les différentes méthodes de refroidissement des machines tournantes font l'objet d'une norme de la Commission électrotechnique internationale (CEI).

Photo

La puissance massique et volumique d'un moteur peut être améliorée en optimisant son refroidissement, son bobinage et sa carcasse ; entretien et mise en service gagnent en simplicité.

Le secteur industriel réclame toujours des moteurs plus compacts et plus puissants. Pour les constructeurs, cette double exigence constitue un véritable défi technique sur le plan du refroidissement. De plus, les moteurs doivent endurer de fortes vibrations mécaniques, être faciles à entretenir et simples à mettre en service.

Les nouveaux moteurs NXR d'ABB sont le fruit d'un long travail de recherche-développement visant à optimiser différents paramètres et établir un nouveau référentiel au sein du secteur tout en élargissant la gamme existante. Outre leur puissance massique supérieure, ils

affichent des intervalles d'entretien plus espacés et une plus grande adaptabilité.

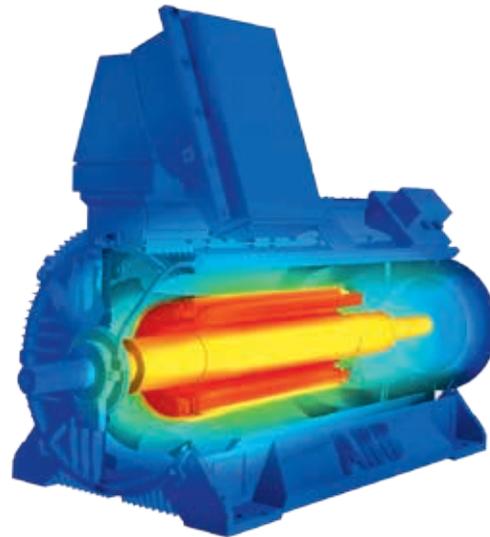
Les moteurs de puissance augmentée posent un véritable défi technique sur le plan du refroidissement.

Refroidissement interne

L'innovation qui contribue le plus à améliorer le rendement du moteur est le système de refroidissement.

Prédire le rendement thermique d'une machine étant difficile, l'équipe de développement a analysé les moteurs existants, construit des modèles numériques des écoulements CFD, fait appel à des

L'amélioration du bobinage est le fruit d'un redimensionnement et d'une meilleure utilisation de ses matériaux actifs. Plus le bobinage est compact, plus la puissance fournie est élevée.



partenaires externes pour mener les simulations et mis au point des méthodes de calcul analytique pour parfaire la conception. De plus, les modèles CFD devaient être comparés à des mesures réelles et correctement interprétés pour que la modélisation et les calculs aboutissent à des moteurs exploitables. À ce

Les flasques du moteur allient rigidité et légèreté, leur surface interne facilitant la circulation interne de l'air de refroidissement. De plus, l'interaction des canaux de refroidissement et des surfaces de refroidissement externes a été optimisée. Par exemple, les canaux d'air n'interfèrent nullement avec le refroidissement des nervures. Si la plupart des moteurs possède quatre canaux d'air, le nouveau moteur ABB n'en compte que trois.

Le système de refroidissement interne amplifie l'écoulement d'air dans le moteur, qui est forcé dans des canaux du stator et du rotor par un ventilateur.

stade, le savoir-faire et l'expérience de l'équipe ABB et de ses partenaires ont joué un rôle crucial.

Le système de refroidissement interne amplifie l'écoulement d'air dans le moteur, qui est forcé dans des canaux du stator et du rotor par un ventilateur → 1. Si d'autres moteurs ABB possédaient déjà un ventilateur interne, celui-ci n'avait jamais été mis à contribution de manière aussi poussée!

la carcasse, qui sont également plus longues. Leur écartement et leur inclinaison ont été optimisés → 2, et les éléments susceptibles de faire obstacle à l'écoulement d'air (boulons et vis de fixation des flasques) réduits. Les câbles auxiliaires sont regroupés dans une goulotte, les nervures sont faciles à nettoyer et l'emplacement des points de fixation permet de monter les accessoires sur le côté du moteur sans gêner l'écoulement d'air. Enfin, la bague externe du flasque est biseautée à 30° pour diriger l'air plus efficacement.

Refroidissement externe

Le refroidissement externe a été amélioré, notamment en augmentant le nombre de nervures de

la carcasse, qui sont également plus longues. Leur écartement et leur inclinaison ont été optimisés → 2, et les éléments susceptibles de faire obstacle à l'écoulement d'air (boulons et vis de fixation des flasques) réduits. Les câbles auxiliaires sont regroupés dans une goulotte, les nervures sont faciles à nettoyer et l'emplacement des points de fixation permet de monter les accessoires sur le côté du moteur sans gêner l'écoulement d'air. Enfin, la bague externe du flasque est biseautée à 30° pour diriger l'air plus efficacement.



Le nombre de nervures et leur longueur ont été augmentés, leur écartement et leur inclinaison optimisés.

Les efforts d'optimisation du refroidissement sont également utiles à la modélisation de moteurs spéciaux. En effet, créer des modèles CFD complets *ex nihilo* peut nécessiter des heures, voire des jours de travail, alors que l'extraction de paramètres des modèles et de valeurs des mesures accélère les calculs de variation de la température pour un moteur d'exécution spéciale. Lorsque les températures sont prédites plus précisément, les moteurs peuvent être parfaitement adaptés aux besoins de performance.

Vibrations

Les vibrations engendrées par les nouveaux moteurs de puissance augmentée ont fait l'objet d'une attention particulière car ils sont plus longs que leurs prédécesseurs. Là encore, le calcul numérique et le prototypage virtuel, en l'occurrence la méthode par éléments finis (EF), ont été mis à contribution. Pour autant, ils n'ont pas permis de prédire de manière satisfaisante les caractéristiques du nouveau moteur; des pièces comme le rotor, le stator et les flasques ont dû être modélisées, fabriquées, puis mesurées, et les modèles EF validés par rapport aux mesures de chaque pièce. Modèles et mesures ont été comparés selon un processus itératif, jusqu'à ce que l'on trouve les meilleures exécutions. La version finale est ainsi débarrassée de toutes les résonances importantes d'origines mécanique et électrique → 3.

Une rigidité accrue réduit les vibrations. Pour cela, on peut notamment augmenter les dimensions axiales et transversales des trous de montage. Mieux vaut néanmoins optimiser la conception mécanique du moteur.

Cette optimisation a pour but de réduire la quantité de matériau utilisée tout en respectant les exigences des principales normes industrielles relatives aux vibrations. Par le passé, la rigidité indispensable était tout bonnement assurée par un apport de métal. Aujourd'hui, une telle solution n'est plus acceptable; résistance et rigidité doivent être obtenues par la mise en forme judicieuse du matériau et non plus en augmentant la masse. Pour autant, la conception des différents éléments d'un moteur n'est pas une science exacte. Ainsi, par exemple, la tôle entre les pattes remplit une double fonction: elle renferme un des trois canaux d'air et accroît la rigidité en contribuant à transférer les efforts horizontaux du stator aux pattes. Bien calculer les dimensions des prises d'air à l'une ou l'autre extrémité à l'intérieur du canal ou l'épaisseur optimale de la fonte n'est pas chose aisée, surtout s'il faut réduire la quantité de matière et la masse du moteur. Les équipes de développement ont travaillé avec des fournisseurs pour mettre au point un procédé de fabrication des pièces en fonte apte à satisfaire aux exigences de conception et optimiser la consommation de matière.

Les efforts d'optimisation du refroidissement sont également utiles à la modélisation de moteurs spéciaux.



L'un des aspects examinés lors de la modélisation du nouveau moteur fut son comportement sur différents types de fondation car les problèmes de vibrations trouvent souvent leur origine dans les interactions entre le moteur et son support de montage. En effet, les choses sont très différentes si le moteur est monté sur une dalle béton ou un châssis acier. Le nouveau moteur ABB admet de nombreux types de fondations.

Bobinage

L'amélioration du bobinage est le fruit d'un redimensionnement et d'une meilleure utilisation de ses matériaux actifs. Plus le bobinage est compact, plus la puissance fournie est élevée. De nouveaux outils ont été développés afin de mieux maîtriser la mise en forme de l'extrémité du bobinage en fabrication et, donc, d'améliorer la qualité et la répétabilité. Chaque bobine est maintenant quasi parfaite.

Le nouveau procédé de fabrication du bobinage a déjà des retombées sur la production d'autres gammes de moteurs ABB.

Souplesse de montage

L'une des innovations les plus marquantes est la possibilité de monter la boîte à bornes principale de chaque côté du moteur ou à l'une de ses extrémités. Dans le cas de la hauteur d'axe CEI de 400, elle peut aussi être montée au centre. Pour tout changement d'orienta-

Un meilleur refroidissement des moteurs allonge leur durée de vie et les intervalles d'entretien, et permet d'espacer la lubrification des organes de roulement.

tion, il suffit de retirer le couvercle à l'endroit requis → 4.

Le montage de la boîte à bornes auxiliaire est également extrêmement souple : de chaque côté du moteur et en plusieurs endroits sur sa longueur.

Ainsi, tout réagencement d'un atelier n'oblige plus à acheter un nouveau moteur pour la simple raison que la prise électrique se trouve à l'opposé des bornes de raccordement. Qui plus est, là où les moteurs sont utilisés de part et d'autre d'une ligne de production (métallurgique ou papetière, par exemple), un seul moteur de secours suffit pour pallier les risques de panne. Plus besoin de retirer le moteur de la ligne ; le personnel



La version finale est débarrassée de toutes les résonances importantes d'origines mécanique et électrique.

d'ABB Service peut apporter toutes les modifications sur place.

L'exécution de base est parfaitement adaptable, raccourcissant les délais de mise en œuvre et simplifiant la personnalisation. Les flasques sont, par exemple, préconçus pour le montage d'accessoires comme une boîte de trop-plein de graisse et des capteurs.

Entretien et maintenance

L'amélioration du refroidissement des moteurs allonge leur durée de vie et les intervalles d'entretien, tout en espaçant la lubrification des organes de roulement.

Pour la détection précoce des défauts naissants, le nouveau moteur peut aussi être équipé du système ABB de surveillance et suivi d'état MACHsense-P ou de télédiagnostic MACHsense-R. Le moteur est pré-équipé pour le montage de capteurs et comporte les points de raccordement pour un système de télédiagnostic.

En outre, il est désormais possible d'examiner l'extrémité des bobines sans démonter les flasques-paliers. L'état des paliers eux-mêmes peut être vérifié au moyen d'un endoscope, toujours sans démonter les flasques.

Tous ces éléments contribuent à renforcer la fiabilité et à réduire les coûts.

Un concentré de puissance et de savoir-faire

La conception innovante du moteur NXR fait que pour une même puissance utile, on peut sélectionner un moteur jusqu'à deux hauteurs d'axe inférieures. Dans les cas extrêmes, la réduction de masse est de 40 %.

Les nouveaux moteurs associent plus de 100 ans d'expérience d'ABB dans les machines électriques tournantes à des techniques avancées de conception et de fabrication. Les développements décrits ici profitent à d'autres gammes de moteurs: le nouveau bobinage est déjà utilisé ailleurs chez ABB et les progrès en matière de refroidissement bénéficieront sans nul doute à d'autres machines. Les outils de calcul, dérivés du prototypage virtuel et validés par des mesures sur prototypes réels, devraient être adoptés au sein d'ABB.

Cette nouvelle gamme de moteurs, de hauteurs d'axe CEI de 355 et 400, sera prochainement élargie pour inclure d'autres hauteurs d'axes et fonctionnalités.

Thomas Ek

ABB Motors and Generators
Västerås (Suède)
thomas.ek@se.abb.com

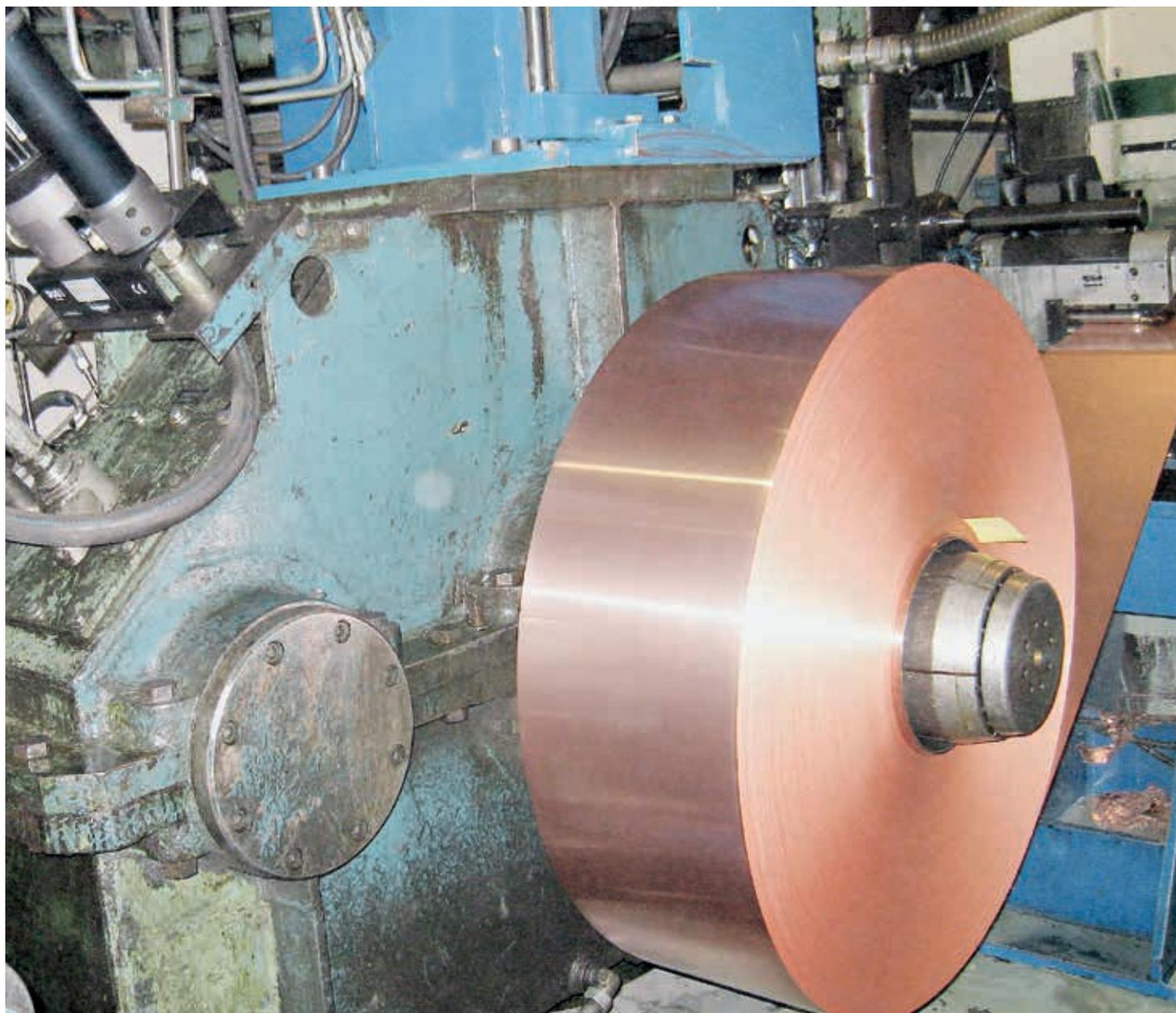
Karita Forss

Timo Holopainen

Janne Ikonen

Olli Lahtinen

ABB Motors and Generators
Helsinki (Finlande)
karita.forss@fi.abb.com
timo.holopainen@fi.abb.com
janne.ikonen@fi.abb.com
olli.lahtinen@fi.abb.com

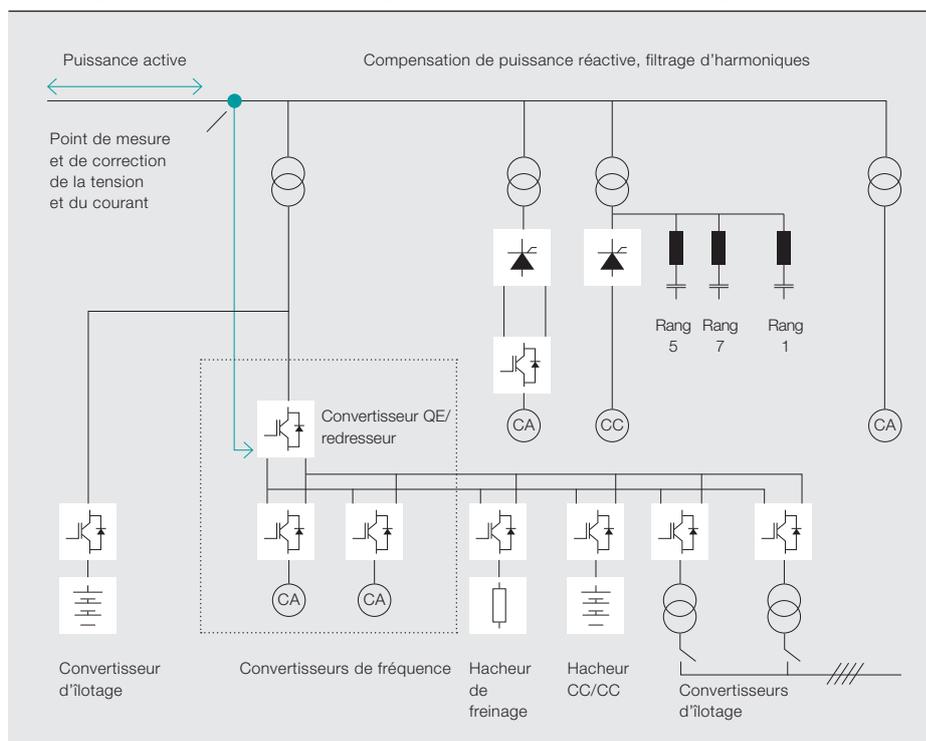


Tour de force

L'ACS800 *multidrive*,
un convertisseur ABB
aux multiples talents

REIJO KOMSI – Les convertisseurs à électronique de puissance sont un rouage essentiel de l'industrie moderne. Lorsqu'un équipement de production (machine à papier, par exemple) compte de nombreux entraînements électriques aux moteurs accouplés, la configuration multi-entraînement, ou *multidrive*, se révèle judicieuse. Grâce à des fonctions logicielles pointues et une électronique de puissance régulant l'alimentation électrique des moteurs, le convertisseur ACS800 *multidrive* d'ABB répond aux exigences différenciées de puissance. Mais au-delà de réguler la vitesse de rotation des moteurs, il peut également améliorer la qualité de l'onde électrique et permettre le fonctionnement îloté d'un réseau.

1 Synoptique d'un ACS800 multidrive standard : convertisseurs d'ilotage, hacheur de freinage, hacheur CC/CC et stockage d'énergie sont également configurables.



Le concept multidrive rencontre un vif succès auprès des industriels. Au lieu de piloter chaque entraînement séparément, des produits comme l'ACS800 multidrive d'ABB assurent la commande multi-entraînement de nombreux moteurs accouplés. Cette aptitude a toute son importance dans des secteurs comme l'industrie papetière où de nombreux entraînements doivent être coordonnés pour garantir la qualité des produits à chaque étape du procédé de fabrication. Ce type d'application, ainsi que d'autres moins contraignantes, bénéficient des avantages supplémentaires de l'ACS800 multidrive : gain de place, simplification du câblage, baisse des coûts d'installation et de maintenance, diminution du nombre d'éléments constitutifs et hausse de la fiabilité, mise en œuvre de fonctions globales de sécurité et de commande rendue possible par le point d'alimentation commun.

L'ACS800 multidrive se compose d'un module redresseur et de deux convertisseurs de fréquence ou plus interconnectés par un bus continu commun (bus CC) → 1. Le redresseur à pont d'IGBT (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*) est le produit le plus abouti d'ABB. En mode actif, son étage de puissance s'apparente à celui du convertisseur de fréquence.

Autorisant le transfert bidirectionnel de la puissance active, il peut renvoyer l'énergie de freinage dans le réseau électrique. De plus, le taux de distorsion harmonique (TGDH) de ce type de redresseur actif est beaucoup plus faible que celui d'un redresseur à pont de diodes ou de thyristors.

Le cœur du redresseur actif (6 IGBT et 6 diodes de roue libre) peut, grâce à des fonctions logicielles dédiées, assurer d'autres missions. Cet article en décrit deux : la dépollution de l'onde électrique et l'ilotage volontaire.

Dépollution de l'onde électrique

Dans cette application → 2, le redresseur remplit à la fois les fonctions de compensation de la puissance réactive et de filtrage actif

des quatre principaux courants harmoniques caractéristiques, de rangs 5, 7, 11 et 13.

Le redresseur améliore la forme de l'onde électrique en même temps qu'il fournit de la puissance active aux variateurs des moteurs. Le point de mesure et de correction de la tension et du courant peut

se situer côté basse tension (BT) ou moyenne tension (MT); ce dernier est plus avantageux car il tient compte de la puissance réactive du ou des transformateurs. Une carte spéciale mesure la tension et le courant. L'analyse, la consigne et la commande sont ensuite déterminées en interne, aucun échange d'information n'étant requis avec les automatismes externes → 1.

Les fonctions de dépollution de l'onde électrique peuvent également être utilisées parallèlement à des filtres passifs pour constituer une forme de compensa-

Grâce à des fonctions logicielles dédiées, le cœur du redresseur actif peut assurer une multitude d'applications.

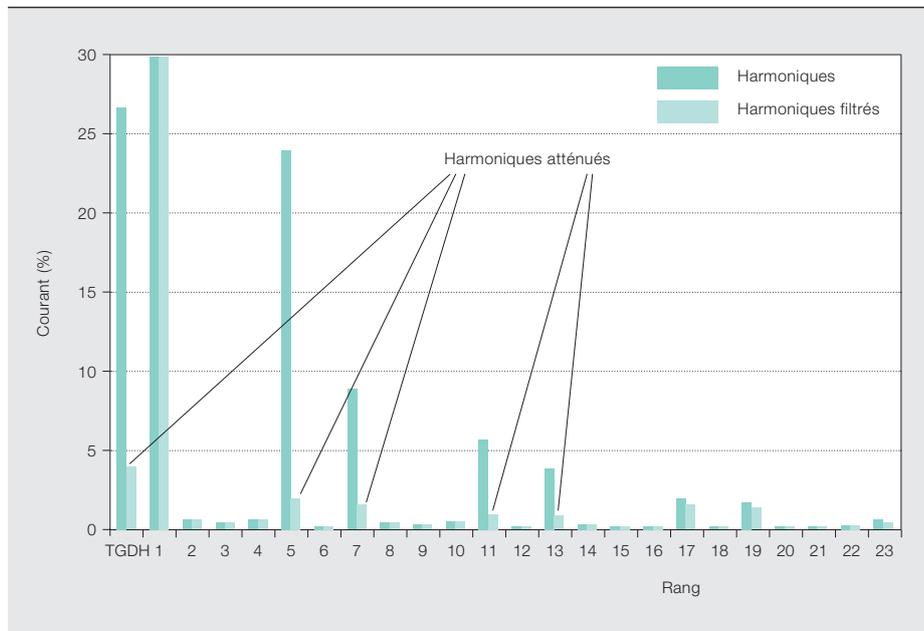
teur hybride; l'investissement total est alors moindre, sans pénaliser les performances qui restent au niveau de celles d'une compensation active complète.

Photo

Le convertisseur ACS800 d'ABB pilote des applications industrielles, mais son électronique de puissance peut assurer d'autres tâches.

Le redresseur remplit des fonctions de compensation de la puissance réactive et de filtrage actif des harmoniques.

2 Atténuation des harmoniques



La compensation de la puissance réactive et le filtrage des harmoniques peuvent considérablement réduire les courants MT appelés sur le réseau (-45 % dans un cas type). Les lignes électriques et les transformateurs MT subissent alors moins de contraintes, le $\cos\phi$ est plus élevé, les taux de distorsion harmonique sont plus faibles et la capacité de charge des lignes MT augmente. La baisse de puissance réactive se répercute directement sur la facture d'électricité. Enfin, une tension stabilisée limite le phénomène de papillotement (*flicker*).

Îlotage volontaire

L'autre logiciel applicatif décrit ici permet d'utiliser l'étage de puissance de l'ACS800 comme convertisseur d'îlotage; celui-ci produit alors une tension triphasée sinusoïdale robuste, semblable à celle d'un groupe tournant. L'îlotage volontaire consiste à fractionner le réseau électrique lors de perturbations pour éviter toute coupure d'alimentation d'une charge critique.

L'énergie nécessaire à cet îlotage peut provenir de n'importe quelle source CC : réseau CA redressé, aérogénérateur, groupe diesel, centrale solaire, pile à combustible ou batterie d'accumulateurs. Cette dernière peut être raccordée directement au bus CC ou par l'intermédiaire d'un hacheur CC/CC; le bus CC alimente les entraînements électriques. Le même concept est exploitable dans les applications de réseau électrique

intelligent (*smart grid*) où aucune ligne de transport n'est disponible alors que des îlots doivent être alimentés. Dans ce cas, le stockage d'énergie sur batteries est indispensable à l'ajustement entre production décentralisée et consommation du réseau îloté → 3.

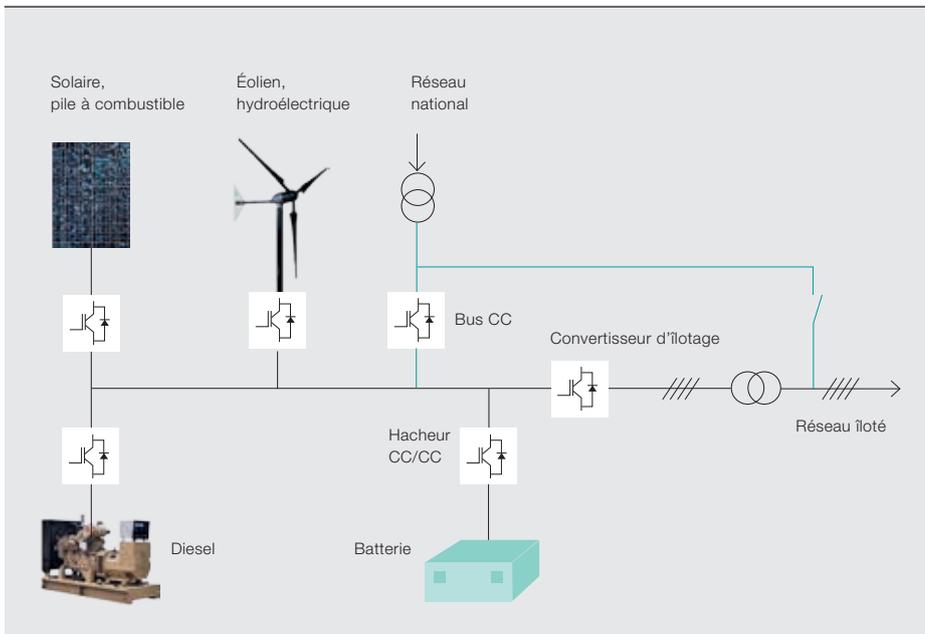
Généralement, les batteries prennent le relais lors d'une panne du réseau ou en attendant le démarrage des groupes diesel de secours. Leur dimensionnement dépend de la topologie utilisée, des besoins réels de puissance et du temps de réserve.

Le moyen de stockage peut également servir à réguler la puissance active prélevée sur le réseau dans le cas d'une application industrielle très dynamique; un redresseur plus petit suffit, du fait de la puissance crête moins élevée.

Un critère de choix majeur du convertisseur d'îlotage est sa tenue au courant de défaut. Partie intégrante du réseau îloté, c'est à lui de fournir le courant de défaut obligatoire pour supprimer le défaut et protéger les équipements et le personnel.

Le convertisseur d'îlotage peut fonctionner en parallèle avec d'autres convertisseurs d'îlotage et le réseau national. Le nombre de convertisseurs parallèles n'est pas limité; techniquement parlant, un réseau îloté commun peut être alimenté par autant de convertisseurs interconnectés que nécessaire. Toute-

3 Configuration d'une application de réseau intelligent



Les convertisseurs à électronique de puissance permettent d'élaborer et de fiabiliser des réseaux intelligents îlotés.

fois, à un moment donné, il devient plus avantageux d'utiliser un groupe tournant que d'installer une multitude de convertisseurs parallèles.

Autres applications

Les deux applications décrites s'appuient sur la plate-forme logicielle commune à tous les ACS800, à savoir le contrôle direct de couple DTC (*Direct Torque Control*), exclusivité ABB. Avec cette technique de commande des moteurs CA, la commutation des interrupteurs au cours de chaque cycle de commande suit directement l'état électromagnétique du moteur ; il n'y a pas de modulateur de largeur d'impulsion commandé en tension et fréquence séparé. Les premiers produits DTC qu'ABB développa avec succès dans les années 1980 étaient destinés aux applications de traction. Les performances de la technique DTC résultent, pour l'essentiel, du traitement numérique du signal et d'une électronique conçue pour développer des applications dédiées de conversion de puissance à partir de la commande de moteurs ACS800. Les travaux de développement sont réalisés par une équipe de spécialistes ABB du logiciel.

Dénominateur commun

Ces applications ont chacune leur logiciel, mais un dénominateur commun : la structure matérielle du module convertisseur à pont d'IGBT. Cette plate-forme présente de multiples avantages en matière de coûts, de volumes, de fiabilité,

de pièces de rechange et de réseau mondial de services après-vente.

Question de taille

La modularité de la gamme ACS800 s'avère extrêmement bénéfique et souple pour des applications de conversion de puissance complexes. Le plus petit module (taille R7i) débite 150 kVA, et le plus gros 500 kVA. Le montage parallèle de plusieurs gros modules permet de créer un convertisseur d'une puissance assignée proche de 5 MVA.

À ce jour, le plus important projet est un redresseur ACS800 multidrive à refroidissement liquide de 4,5 MVA. Testé à Helsinki (Finlande), il fournit de la puissance active à d'imposants variateurs de fréquence, assure la compensation de puissance réactive du site d'essai complet et filtre les principaux courants harmoniques caractéristiques. Après activation du convertisseur de dépollution de l'onde électrique raccordé à des redresseurs hexaphasés (6 *pulses*) de forte puissance, les courants MT mesurés ont chuté de 45 %. Cette baisse de puissance réactive induit des économies d'énergie de plusieurs milliers d'euros par mois.

Les plus gros appareils d'îlotage aujourd'hui en fonctionnement sont deux convertisseurs (redondants) à refroidissement liquide de 2,2 MVA en montage parallèle, à bord d'un navire norvégien. Ce dernier possède également deux convertisseurs d'îlotage à refroidisse-

ment liquide de 0,9 MVA qui font partie des systèmes multidrive.

Les applications présentées dans cet article prouvent que les modules matériels ACS800, pilotés par un logiciel dédié, réduisent la consommation d'énergie, améliorent la qualité de l'onde électrique et fiabilisent la fourniture de puissance en cas de perturbations. D'autres applications sont envisageables en développant des fonctionnalités logicielles ad hoc. Cette technologie est donc appelée à gagner du terrain.

Reijo Komsa

ABB Discrete Automation and Motion
Drives and Controls
Helsinki (Finlande)
reijo.komsa@fi.abb.com



Point chaud

Un nouveau capteur infrarouge mesure la température dans les disjoncteurs d'alternateur

STEPHAN WILDERMUTH, ULF AHREND, MORITZ HOCHLEHNERT, MARCO ULRICH – Le disjoncteur d'alternateur est indispensable au bon fonctionnement des centrales d'énergie. Installé entre l'alternateur et le transformateur, il protège l'équipement tout en étant capable d'interrompre des courants de plusieurs dizaines de kiloampères (kA). À ce niveau d'intensité, la moindre augmentation de résistance des conducteurs se traduit par un vif échauffement du disjoncteur, aux conséquences dramatiques. Surveiller la température est donc une tâche fondamentale qui s'avère particulièrement ardue en haute tension (HT). ABB a lancé à cette fin un programme de développement sur un nouveau concept de capteur de température pour disjoncteur d'alternateur.



Les disjoncteurs d'alternateur qui équipent les centrales thermiques ou nucléaires, à gaz ou à cycle combiné, ou encore les centrales hydroélectriques ou stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) → 1 sont mis à rude épreuve. En fonctionnement normal, ils doivent laisser passer le courant assigné total de l'alternateur, qui atteint facilement 23 kA sans refroidissement, voire plus de 30 kA en cas de refroidissement actif, sous des tensions allant jusqu'à 32 kV.

À ce niveau d'intensité, un défaut d'alignement des connexions, la présence de poussière dans le disjoncteur ou des surfaces de contact endommagées, par exemple, peuvent entraîner une hausse, même minime, de la résistance électrique des conducteurs. Cela suffit à faire grimper la température (comprise entre 70 et 90 °C en temps normal), risquant d'endommager les surfaces de contact argentées, telles que les raccordements des jeux de barres, le sectionneur réseau ou encore les contacts de la chambre de coupure. La dissipation de chaleur dans le conducteur principal s'effectue en partie par rayonnement ; on lui applique pour cela une peinture à haute émissivité, qui s'avère toutefois insuffisante en cas de forte élévation de la température.

Un échauffement excessif peut diminuer le pouvoir de coupure ou même amorcer un arc si les composants se mettent à fondre.

Supervision GMS600

Le système de surveillance de disjoncteur d'alternateur GMS600 d'ABB → 2 anticipe les besoins de maintenance pour éviter les arrêts intempestifs. Il se base sur une multitude de paramètres (coupures de courant cumulées, nombre total de manœuvres, temps écoulé depuis la dernière révision, supervision de l'actionneur, densité de SF₆, etc.) pour calculer le temps restant avant la prochaine intervention. Jusqu'à présent, il manquait à cet inventaire la surveillance de la température. Et pour cause : aucun capteur du marché ne remplissait la totalité du cahier des charges technique, commercial et fonctionnel d'un suivi thermique précis et fiable des disjoncteurs d'alternateur en fonctionnement.

Cette lacune n'a rien d'étonnant quand on sait la difficulté à surveiller la température de composants HT : le capteur doit notamment endurer de fortes contraintes électromagnétiques et d'importants gradients thermiques, typiques d'un climat désertique, par exemple.

Il fallait donc mettre au point un nouveau capteur de température.

Conception et développement

À l'issue d'une étude technique approfondie, ABB opta pour une mesure de la température par détection de rayonnement infrarouge (IR), le but étant d'utiliser un capteur IR du marché qui serait protégé par une enveloppe permettant un fonctionnement fiable dans l'environnement contraignant du disjoncteur d'alternateur.

Au niveau d'intensité d'un disjoncteur d'alternateur, une hausse même infime de la résistance des conducteurs fait grimper la température.

L'élément sensible du capteur est une thermopile sur substrat silicium non refroidie, choisie pour son bon rapport coût/performance. Pour assurer une détection performante en conditions difficiles (gradients thermiques spatiaux et temporels, champs électromagnétiques

Photo p. 58

La surveillance précise et fiable de la température dans un disjoncteur d'alternateur (ci-contre, le HEC 8 d'ABB) est essentielle à la protection des centrales d'énergie.

ABB a adapté un capteur infra-rouge du marché à l'environnement difficile du disjoncteur d'alternateur.



importants avec transitoires rapides), il fallait loger le capteur, son boîtier et l'électronique dans une enveloppe adéquate.

La deuxième fonction est assurée par une conception autorisant une grande constante de temps thermique, de l'ordre de plusieurs minutes. On peut

Outre un circuit ASIC, le capteur intègre des composants électroniques qui convertissent en Modbus le signal de sortie du bus numérique SMBus. L'élec-

tronique doit aussi supporter les fortes perturbations électromagnétiques de l'environnement d'un disjoncteur.

L'enveloppe du capteur IR assure donc trois grandes fonctions :

- Suppression des importants gradients thermiques spatiaux, au niveau de l'élément sensible ;
- Suppression des importants gradients thermiques temporels, au niveau de l'élément sensible ;
- Protection électromagnétique du disjoncteur.

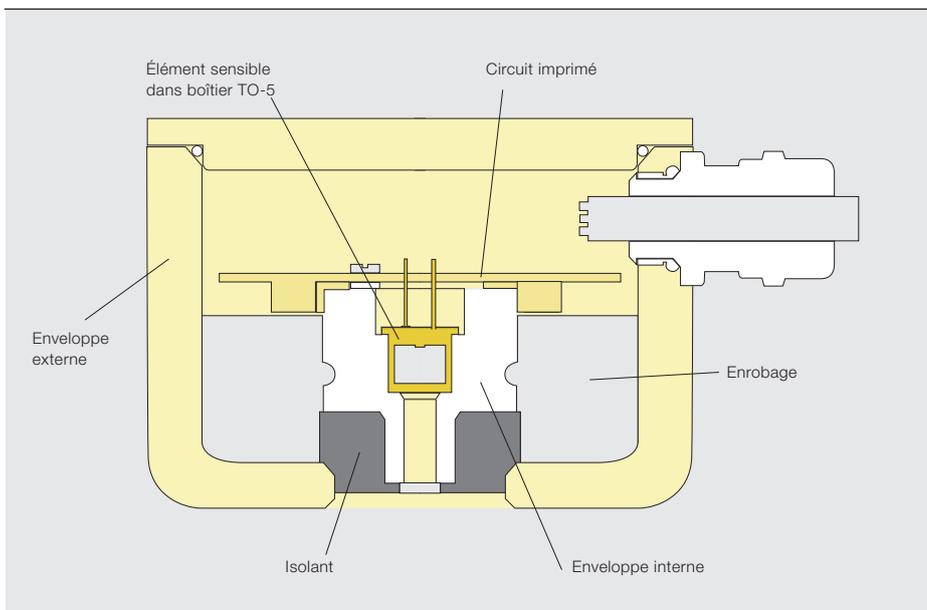
Pour remplir la première fonction, le boîtier de l'élément sensible est recouvert d'un matériau à haute conductivité thermique → 3 : les gradients thermiques s'équilibrent immédiatement, garantissant une température homogène tout autour du composant.

L'enveloppe du capteur IR est enrobée d'un matériau à haute conductivité thermique.

augmenter la constante de temps du boîtier en donnant au capteur et à son ouverture une importante masse thermique, et en abaissant la conductivité thermique autour du capteur pour retarder son échauffement.

ABB a pour cela conçu une enveloppe en deux parties à faible couplage thermique → 3, qui a l'avantage de lever les contraintes diélectriques et d'assurer la protection électromagnétique : l'enveloppe externe fait office de cage de Faraday, et l'isolation thermique, d'isolant électrique et de barrière thermique. Pour renforcer l'immunité électromagnétique, l'enveloppe externe est mise à la terre par l'intermédiaire de l'enveloppe du disjoncteur d'alternateur et l'enveloppe interne est raccordée à un potentiel de masse local.

Le dimensionnement de l'enveloppe s'est appuyé sur des simulations thermiques transitoires par éléments finis



L'enveloppe externe fait office de cage de Faraday, et l'isolation thermique, d'isolant électrique et de barrière thermique.

d'un modèle thermique simplifié → 4. La constante de temps thermique visée en conception et prédite par la simulation (plus de 10 minutes) fut confirmée par des essais en conditions réelles.

Prototypes et essais

Des essais de choc thermique permirent de vérifier le bon couplage thermique entre l'élément sensible et son milieu, et

chambre climatique. On testa notamment la réponse du capteur à une température du corps noir comprise entre 30 et 120 °C, à une température ambiante constante de 25 °C. Le capteur afficha un comportement linéaire, l'erreur de linéarité ne dépassant pas 3 °C sur toute la plage. L'écart-type entre prototypes fut de 0,8 °C à 75 °C, et de 1,2 °C à 120 °C.

Pour éviter les importants gradients thermiques temporels, le capteur IR doit afficher une constante de temps thermique de plusieurs minutes.

de valider la conception. Le capteur IR fut soumis à une hausse de température de 25 à 70 °C, par pas de 5 °C/min (limité par la puissance de chauffe de la chambre climatique). Pendant toute la durée de l'essai, il fut placé face à un radiateur parfait ou *corps noir* maintenu constamment à 80 °C. Le capteur se révéla très performant (erreur inférieure à 2 °C) si le couplage thermique avec l'enveloppe interne était assuré par une colle ou une graisse haute température.

Pour vérifier la performance du capteur, ABB réalisa 21 prototypes qu'il soumit à différents environnements simulés en

Le système de surveillance thermique a pour mission première de détecter la surcharge du disjoncteur d'alternateur quand la température du conducteur principal avoisine 120 °C. Ce

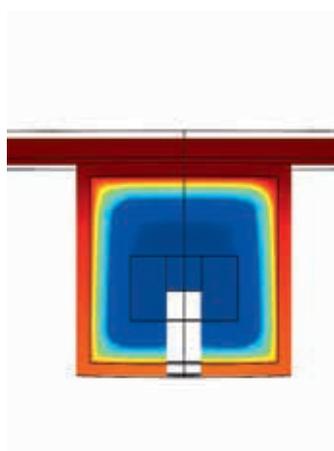
scénario fut simulé en faisant passer la température de 80 à 120 °C → 5 : le capteur détecta cette hausse avec précision, l'écart de mesure restant dans la plage d'incertitude requise de ± 3 °C.

Pour connaître l'influence des variations de température ambiante, les capteurs subirent trois cycles consécutifs de hausse de -5 à +60 °C, suivant une rampe de 0,1 °C/min, pour simuler une alternance jour/nuit type.

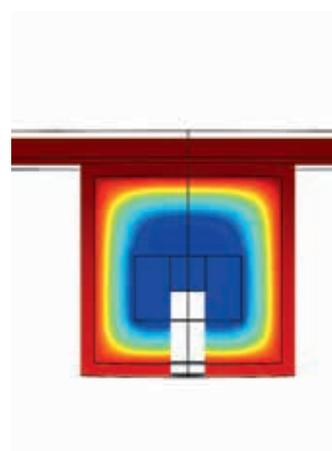
Là encore, l'écart de mesure resta inférieur à 3 °C ; lors des tests d'hygrométrie, il descendit même en dessous de

Seul moyen de garantir une détection performante dans des conditions ambiantes extrêmes : protéger le capteur, le boîtier et l'électronique par une enveloppe adéquate.

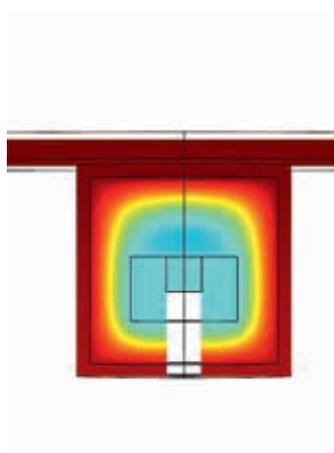
4 La simulation par éléments finis de l'échauffement de l'enveloppe du détecteur donne une première estimation de sa constante de temps thermique, utile au dimensionnement.



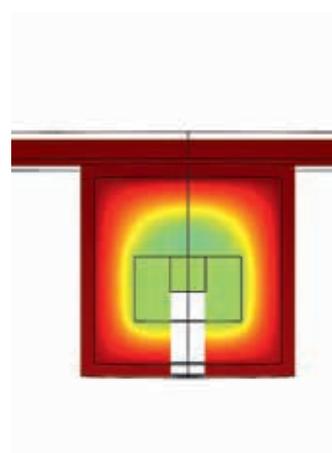
4a Au bout de 73 s



4b Au bout de 200 s



4c Au bout de 400 s



4d Au bout de 600 s

2,5 °C, pour une humidité relative maximale de 90 % à une température ambiante de 60 °C.

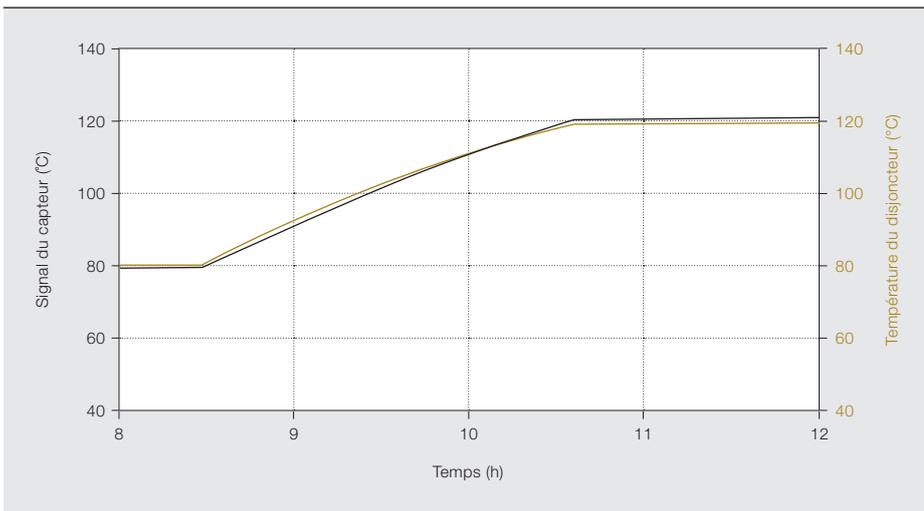
Des essais vérifièrent également la tenue des capteurs IR à d'autres facteurs de perturbation du disjoncteur et d'arrêt de l'installation : campagne complète de tests vibratoires pour simuler les chocs mécaniques de manœuvre ; conformité CEM selon CEI 61000-4 (immunité aux champs électromagnétiques aux fréquences radioélectriques, aux décharges électrostatiques et aux transitoires électriques rapides en salves, niveau de sécurité 3) et CEI 61000-6. Tous furent concluants et permirent de qualifier ce système de détection pour disjoncteur d'alternateur.

Feu vert

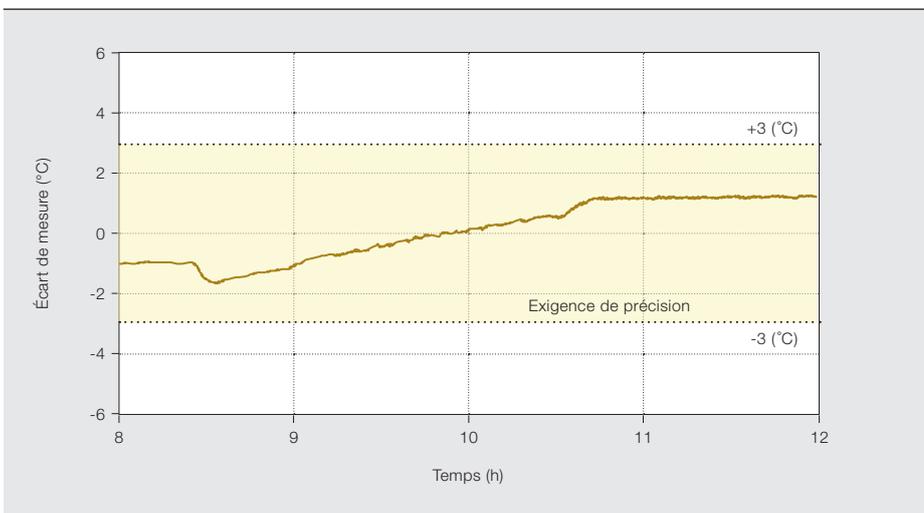
L'entreprise envisagée pour fabriquer le capteur s'étant très tôt investie dans ce projet, le démonstrateur afficha un très haut degré de maturité technologique, nonobstant quelques modifications pour lancer la production.

La mise en production se fit parallèlement aux tâches d'ajustement : assemblage des capteurs, étude des faisceaux de câbles, intégration mécanique dans l'enveloppe du disjoncteur, cheminement des câbles et mise à jour du logiciel de surveillance GMS600 pour enregistrer, stocker et afficher les mesures de neuf capteurs (trois par phase). La chaîne logistique fut élaborée avec le fabricant ; capteurs et câbles sont pré-assemblés chez lui, sur châssis, pour accélérer l'installation dans le disjoncteur.

5 Réponse du capteur IR à la surchauffe du disjoncteur d'alternateur simulée en chambre climatique



5a Signal du capteur quand la température du disjoncteur passe de 80 à 120 °C en plusieurs heures



5b Maintien de l'écart de mesure dans la plage d'incertitude requise (± 3 °C), sur toute la rampe de température

Des essais de choc ont vérifié le couplage thermique entre l'élément sensible et son milieu, et validé la conception.

Le service en plus

Des stratégies efficaces, évolutives et durables de maintenance prédictive ou de gestion du cycle de vie produit constituent des services à valeur ajoutée qui améliorent beaucoup l'attrait économique de la solution. Encore faut-il rapatrier les signaux utiles de l'instrumentation.

Ce capteur thermique robuste et peu coûteux permet de surveiller avec précision la température des disjoncteurs d'alternateur en fonctionnement. En associant ses signaux à d'autres données remontées du terrain (vibrations ou ablation de contact), il est possible de poser un diagnostic précis de l'appareil et d'en déduire les stratégies de maintenance prédictive. Cela est d'autant plus important pour un disjoncteur d'alternateur où une surchauffe du conducteur

principal peut provoquer un arrêt de la centrale d'énergie, aux conséquences financières et matérielles désastreuses.

Ce suivi d'état contribue également à l'élaboration de nouvelles offres de services et de modèles économiques, et fournit de précieux renseignements à la conception de nouveaux produits. Enfin, l'analyse statistique des données de tout un parc permet d'accéder à des informations impossibles à obtenir d'un seul appareil. ABB entend mettre à profit cette démarche pour enrichir son portefeuille de services clients.

Stephan Wildermuth

Ulf Ahrend

Marco Ulrich

ABB Corporate Research

Ladenbourg (Allemagne)

stephan.wildermuth@de.abb.com

ulf.ahrend@de.abb.com

marco.ulrich@de.abb.com

Moritz Hochlehnert

ABB Power Products, High Voltage Products

Zurich (Suisse)

moritz.hochlehnert@ch.abb.com





Montée en grade

Une alimentation sans interruption
moyenne tension pour une protection
électrique globale

SOPHIE BENSON-WARNER – ABB a mis au point une gamme d'alimentations statiques sans interruption (ASI) dimensionnées jusqu'à 6 MVA pour le secours des installations industrielles et des grosses infrastructures informatiques (*datacenters*). Cette offre PCS100 « moyenne tension » vient avantageusement compléter son catalogue d'ASI basse tension et de produits pour améliorer la qualité de l'onde électrique délivrée aux charges alternatives sensibles.

Photo

La progression des ASI en moyenne tension bénéficie aux sites industriels et aux *datacenters*.

1 ASI moyenne tension PCS100 d'ABB pour la protection des charges sensibles



Notre société veut disposer quasi instantanément d'énormes quantités de données. Presque tous les acteurs économiques (organismes de santé, banques, services publics, commerces, entreprises, etc.) ont aujourd'hui besoin de stocker en toute sécurité ces montagnes d'informations. Même l'industrie et la sphère domestique sont tributaires d'une kyrielle d'appareils et de machines électriques. La progression des énergies renouvelables et leur intégration au réseau électrique ajoutent à la difficulté en multipliant les défauts d'alimentation (pics et creux de tension, surtensions, parasites et harmoniques), lourds de conséquences pour tous les utilisateurs.

La nécessité d'une alimentation électrique de qualité irréprochable a fortement dopé ces dernières années le marché des ASI et des conditionneurs de tension. Ces équipements, que l'on trouve habituellement en basse tension (BT), posent souvent problème si la place pour les loger est comptée. De même, quand il faut protéger un grand nombre d'appareils, la multiplication des ASI ne

va pas sans difficultés de gestion, de supervision, de maintenance et de disponibilité. La solution ? Les installer en moyenne tension (MT).

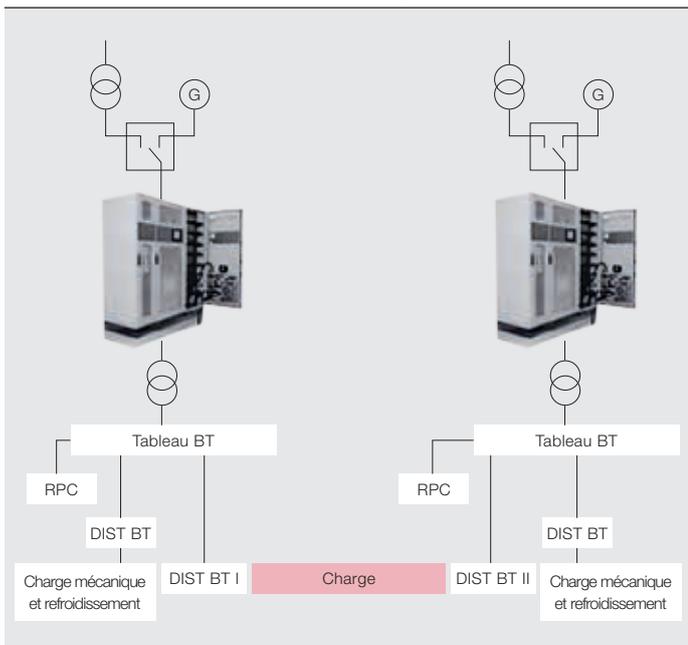
L'ASI peut alors être implantée dans des emplacements moins encombrés, à distance des matériels à protéger (en local ou poste électrique MT, par exemple), libérant ainsi de la place pour les infrastructures plus importantes comme les serveurs ou les équipements de production.

En moyenne tension, l'ASI peut se loger dans un local ou un poste électrique, par exemple, loin des charges à protéger.

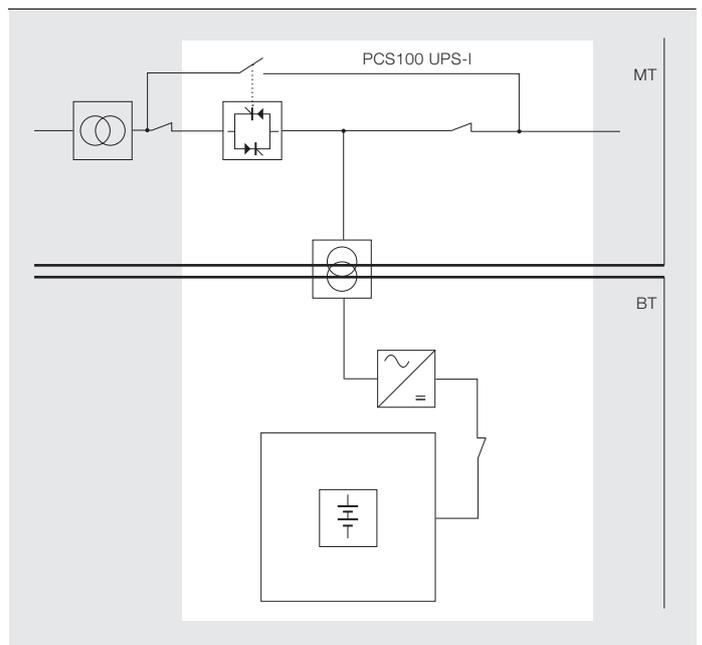
La gamme d'ASI moyenne tension PCS100 d'ABB vise ce segment de marché. Elle a été spécialement conçue pour fournir une alimentation « propre », fiable et performante, et réduire la facture des sites industriels stratégiques et des grands datacenters confrontés à des charges critiques.

La PCS100 est en mesure de protéger toute l'alimentation du lieu ou une sélection de charges sensibles → 1, y compris les charges mécaniques d'un datacenter → 2. Cette configuration présente le meilleur rendement énergétique puisque

2 Une ASI moyenne tension peut être configurée pour protéger tout un datacenter ou seulement les charges mécaniques.



3 Conversion de puissance et stockage d'énergie restent en BT, un transformateur assurant le couplage BT-MT.



les courants plus faibles à ce niveau de tension ont pour effet de diminuer les pertes.

La première version de la PCS100 est calibrée à 6,6 kV/6 MVA maxi. Elle sera suivie d'autres ASI à 15 kV (options 11 kV et 13,2 kV), offrant des puissances encore supérieures.

Technologie

La simple conversion est la topologie reine en moyenne tension; les pertes y sont infimes et, par conséquent, les rendements nettement supérieurs à 99,5%. Elle permet de maintenir la conversion de puissance et le stockage d'énergie en basse tension, moyennant un transformateur de couplage BT-MT → 3. Le niveau MT comporte également un sectionneur à thyristors qui empêche la réinjection de courant dans le réseau en cas de perte secteur ou de creux de tension.

Économie

Au-delà de l'investissement initial, toujours important, c'est le coût global de possession d'un équipement qui constitue pour l'acheteur un critère de choix prépondérant. Le rendement incomparable de la PCS100 moyenne tension, ses frais de maintenance réduits et son faible encombrement allègent la facture. L'installation en BT du stockage d'énergie et du convertisseur simplifie également beaucoup la maintenance et abaisse le coût de l'ensemble. Enfin,

l'ASI offre de nombreuses possibilités de rénovation de l'existant, notamment pour s'adapter au cas par cas aux sites industriels non protégés ou remplacer des solutions traditionnelles à base de groupes tournants.

Réserve d'énergie

Le stockage de l'énergie au niveau BT élargit le champ des possibles, des supercondensateurs aux batteries lithium-ion en passant par les batteries étanches plomb-acide à forte décharge, parmi les plus courants. Les supercondensateurs, appréciés pour leur longévité et leur compacité, sont appelés à se déployer massivement dans l'industrie. Pour les applications nécessitant plus d'autonomie, les batteries lithium-ion, semblables à celles équipant les véhicules électriques, présentent le double avantage sur les solutions plomb-acide les plus économiques d'un encombrement réduit et d'une durée de vie accrue. Le Li-ion affiche d'excellentes performances qui lui ouvrent la voie du soutien des réseaux électriques intelligents, avec des fonctions comme le délestage de consommation.

La PCS100 protège au choix toute l'alimentation d'un site ou seulement quelques charges sensibles.

Sophie Benson-Warner

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



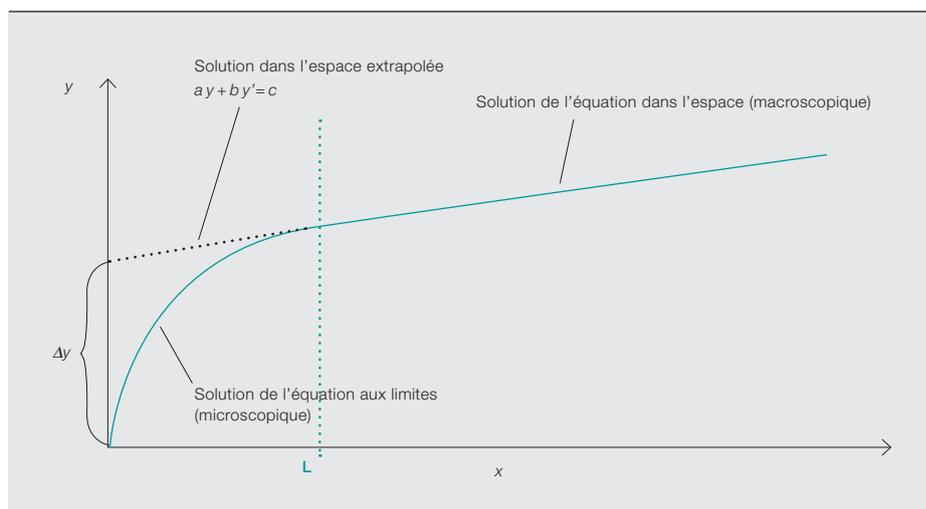
Repousser les frontières de la connaissance

Une meilleure connaissance des conditions aux limites fiabilise les simulations

KAI HENCKEN, THOMAS CHRISTEN – Les équations aux dérivées partielles (EDP) sont la langue naturelle des physiciens pour décrire quantité de phénomènes électromagnétiques, acoustiques, fluidiques et thermodynamiques. Les EDP qui régissent la physique dans un domaine spatial d'intérêt, également appelées « équations en tout point de l'espace » (*bulk equations*), sont indispensables aux simulations numériques des produits ABB [1]. Néanmoins, aux limites de nombreux systèmes, la variété des processus

physiques sous-jacents est bien plus riche que dans tout l'espace. De plus, ces limites dictent souvent le résultat d'une simulation, même si elles n'occupent qu'une petite partie du système entier. D'où le rôle décisif que jouent des conditions aux limites appropriées dans l'obtention de simulations numériques significatives. Les décrire en termes mathématiques n'est en général pas une tâche aisée et passe par une étude approfondie des problèmes physiques qui les sous-tendent.

1 Dérivation des conditions aux limites pour une équation macroscopique à partir de la physique sous-jacente microscopique



Les EDP décrivent le comportement de propriétés ou de grandeurs physiques dans l'espace et dans le temps. À chaque caractéristique étudiée, son équation : équation de la chaleur pour la température, équation de Laplace pour le potentiel électrique, équations de l'écoulement pour la masse, la quantité de mouvement et l'énergie, etc.

La présence de dérivées (mathématiques) spatiales dans ces EDP est associée à un couplage d'un point donné dans l'espace avec son voisinage, souvent dû à un phénomène de transport. Pour obtenir des solutions d'EDP bien définies, c'est-à-dire uniques, il convient de spécifier des conditions limites, tout comme il faut une condition initiale pour résoudre un processus temporel ; par analogie, les conditions au point de départ d'une simulation peuvent être interprétées comme une condition aux limites pour l'axe du temps. La forme mathématique générale de conditions aux limites spécifiques dépend principa-

lement de deux propriétés structurelles des équations dans tout l'espace.

La première est l'ordre de l'EDP, qui désigne l'ordre le plus élevé des dérivées partielles intervenant dans l'équation ; l'équation de la chaleur, par exemple, est du second ordre puisqu'apparaît une dérivée de la forme $\partial^2 T / \partial x^2$. Les conditions aux limites seront généralement une relation entre les grandeurs physiques et leurs dérivées (spatiales) avec un ordre inférieur de 1 à l'ordre de l'EDP elle-même car les dérivées d'ordre supérieur peuvent être éliminées avec l'EDP dans l'espace. Exemple : dans l'équation de la chaleur en régime permanent $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$, la condition aux limites pourrait en principe contenir des dérivées spatiales arbitraires, et pas seulement T et ses dérivées. Or les termes de la forme $\partial^2 T / \partial x^2$ ou plus élevée peuvent être supprimés avec $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$.

La seconde propriété concerne la façon dont l'information se propage dans tout l'espace, autrement dit, comment une perturbation ou un changement de grandeur physique en un point influence sa valeur à une distance, dans le même temps ou postérieurement.

L'exemple le plus simple est une EDP d'ordre 0 ; dérivées spatiales et propagation sont alors absentes, et les condi-

tions aux limites, superflues. Dans ce cas, l'équation est un système (distribué) d'équations aux dérivées ordinaires (EDO) plutôt qu'une EDP. Un exemple physique est donné par la polarisation électrique induite dans un milieu diélectrique, qui peut être décrite par un processus de relaxation de la densité locale de charges de polarisation.

Il existe d'autres cas où une condition aux limites est inutile, même en présence de dérivées spatiales. L'état d'un fluide supersonique en sortie de tuyère, par exemple, est totalement déterminé par l'information issue de l'espace tout entier.

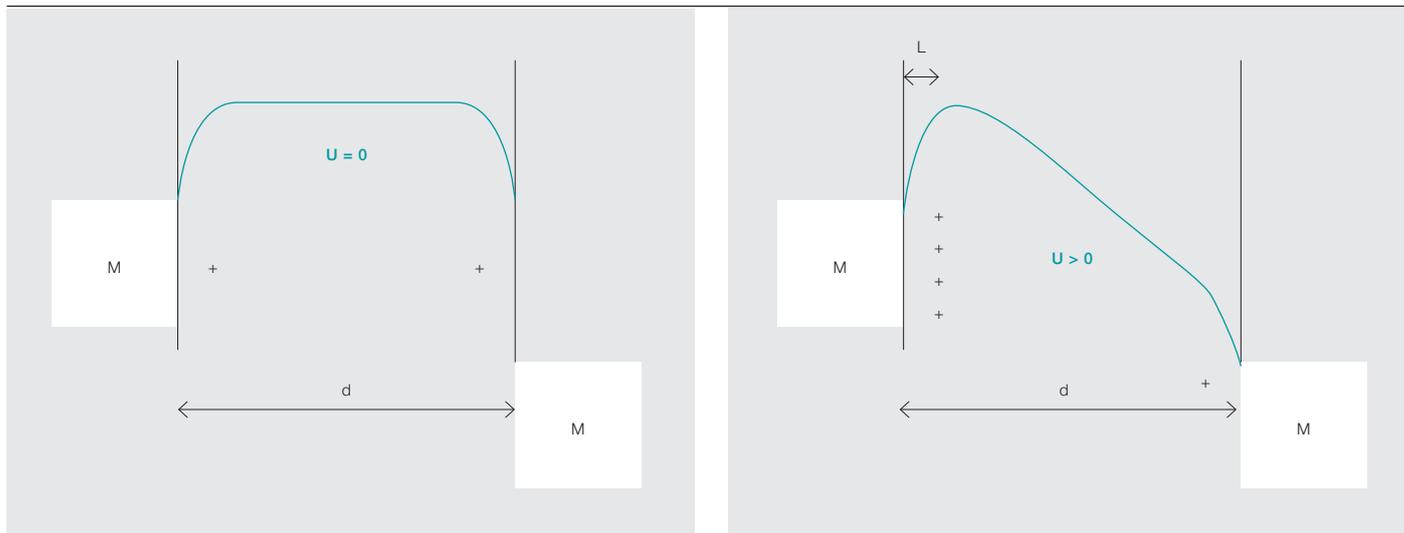
Qui dit simulations numériques significatives implique des modèles dans tout l'espace enrichis de conditions aux limites appropriées.

Le fluide s'écoulant plus rapidement que la vitesse du son, qui constitue ici la vitesse de l'information, aucune information ne peut refluer de la limite à l'espace ; cette limite n'affectera donc pas l'état dans l'espace.

Les conditions aux limites sont normalement nécessaires et classées selon la nature de la propagation des EDP : diffusive, instantanée, convective ou ondulatoire. La propagation instantanée, par exemple, correspond à des solutions en régime permanent ; on suppose implici-

Photo p. 68

Nombreuses sont les limites internes, les surfaces et les interfaces d'un produit qui conditionnent sa performance et doivent faire l'objet de simulations intégrant précisément ses conditions aux limites.



2a Isolant sans porteurs de charge intrinsèques mais avec porteurs de charge injectés (trous «+») à partir des deux contacts d'électrode (bleu: potentiel d'équilibre)

2b L'application d'une tension fait basculer le potentiel d'énergie vu par les porteurs, entraînant un maximum à proximité de l'électrode d'injection.

Les conditions aux limites doivent être formulées de façon à bien « poser » le modèle pour déboucher sur une solution physiquement raisonnable.

tement que la propagation et, donc, l'équilibrage dans le système sont bien plus rapides que l'échelle de temps étudiée. C'est le cas notamment de la formation d'un champ électrique (dans le vide, par exemple), habituellement décrite par l'équation instantanée de Laplace. En pratique, on peut souvent écarter les transitoires puisque le champ se déplace à la vitesse de la lumière.

Les conditions aux limites doivent être formulées de façon à bien « poser » le modèle ; autrement dit, une solution physiquement raisonnable existe. Cela peut entraîner des restrictions sur le nombre et les types de conditions requises à chaque limite.

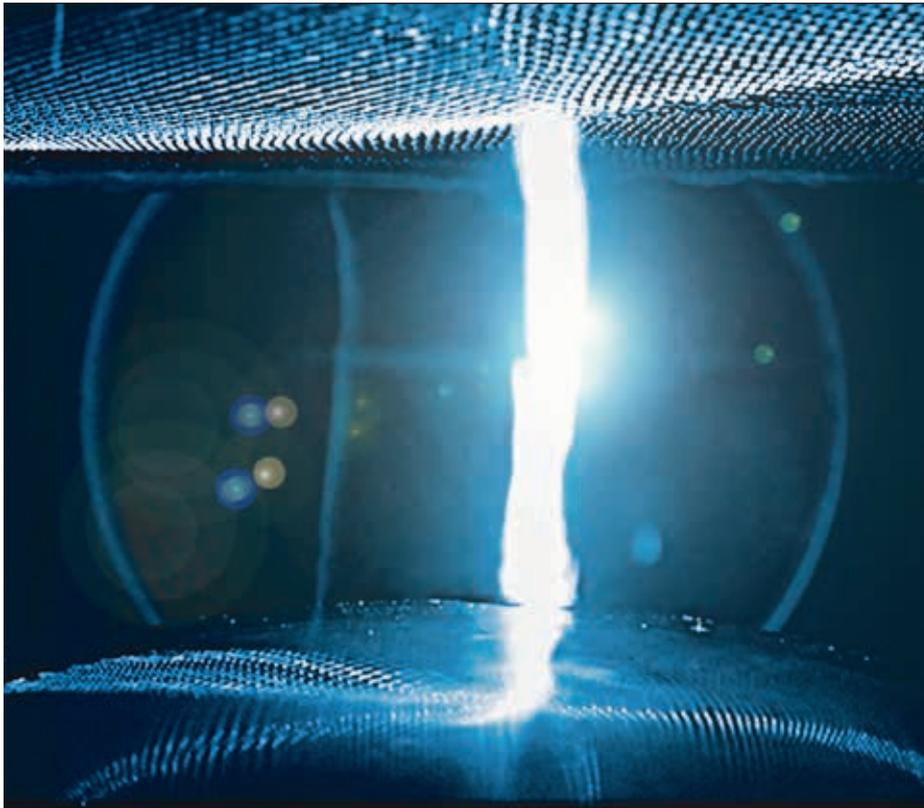
Plus loin que la physique dans l'espace

Nous l'avons vu, les équations dans l'espace contraignent et prescrivent la forme fonctionnelle des conditions aux

limites. Pourtant, les valeurs des coefficients ou paramètres intervenant dans ces équations sont toujours libres et doivent être déterminées par la physique sous-jacente. La tâche peut être ardue car les conditions aux limites ont besoin d'une vue plus détaillée du système physique que les EDP dans l'espace ; celles-ci sont dérivées de grandeurs moyennées, comme l'énergie thermique, sur de petits éléments de volume dans lesquels ces grandeurs sont considérées homogènes. Aux limites, les propriétés changent brutalement, obligeant à prendre en compte une échelle plus courte, microscopique par exemple. En conséquence, la modélisation des conditions aux limites exige de la physique une plus grande finesse de détail et variété de phénomènes que l'équation dans l'espace.

Cela est bien illustré par les équations dans l'espace pour un gaz, dans l'hypothèse d'un équilibre thermodynamique local, où la température est définie et les vitesses des particules obéissent à la distribution de Maxwell. À mesure que l'on s'approche de la limite, cette distribution de vitesse dévie de celle dans l'espace, à cause des effets de surface, et l'équilibre thermodynamique n'est plus avéré → 1. En d'autres termes, les équations macroscopiques de la grandeur physique $y(x,t)$ le long de l'axe x sont valables pour des distances supérieures à une certaine longueur microscopique L , mais pas en dessous. L'ampleur de cette région limite est supposée beaucoup plus petite que l'échelle réso-

3 Phénomène d'arc entre deux électrodes : la racine d'arc forme une limite intéressante mais complexe.



lue dans la simulation numérique. L'extrapolation de la solution dans l'espace à

de la couche limite microscopique. Un exemple intéressant nous est donné

par une condition limite glissante pour la vitesse (macroscopique) d'écoulement d'un gaz dans une conduite, où l'on suppose une vitesse finie tout au long du parcours jusqu'à la paroi, même si, à l'échelle microscopique,

c'est-à-dire dans une très fine couche limite visqueuse, elle décroît rapidement pour atteindre zéro à la paroi.

La physique sous-jacente dont il faut tenir compte aux limites est bien plus riche que celle des équations dans l'espace.

la limite ne coïncide pas forcément avec la solution microscopique. Néanmoins, la condition aux limites doit satisfaire la relation mathématique établie par l'équation dans l'espace. Dans ce cas, elle est donnée par une relation générale de la forme

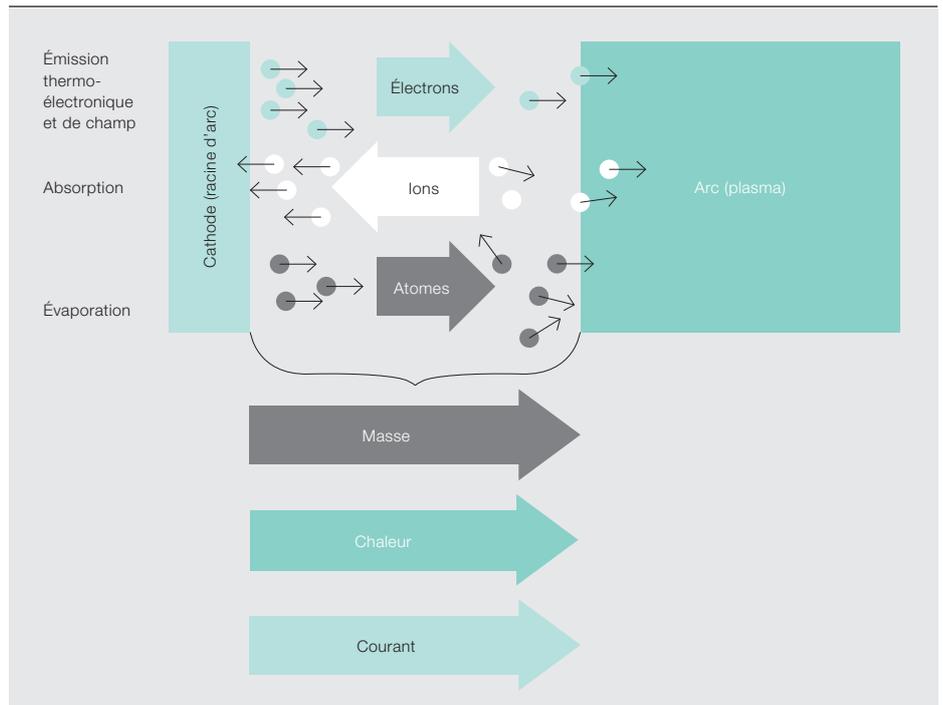
$$ay + by' = c.$$

Les coefficients a , b et c doivent être obtenus en appliquant une transition progressive du microscopique au macroscopique. Par exemple, même si la physique fondamentale microscopique exige $y = 0$ à la limite ($x = 0$), la condition limite macroscopique peut afficher une discontinuité en raison de la physique

Conduction du courant continu dans les isolateurs

Dans les câbles à courant alternatif, la distribution du champ électrique à 50 Hz est habituellement calculée en résolvant une équation de Laplace pour le potentiel électrique dans les matériaux diélectriques, avec des conditions aux limites appropriées sur les parties conductrices. La propriété correspondante du matériau est la permittivité diélectrique; toute accumulation de charges dans les diélectriques est négligeable.

4 Seule une vue microscopique montre l'interdépendance des phénomènes physiques survenant dans une racine d'arc.



L'injection de charges provenant des électrodes est très importante quand on conçoit des câbles et accessoires CCHT.

Dans une isolation en courant continu, les calculs de champ sont autrement plus complexes car des charges d'espace peuvent s'accumuler dans le matériau. Ce processus, parfois très lent, fait que la distribution du champ électrique peut beaucoup évoluer dans le temps. On trouve une bonne illustration de l'interaction couplée limite-espace dans la formation d'un courant limité par la charge d'espace. Supposons un matériau initialement dépourvu de tout porteur de charge et flanqué de chaque côté d'un contact métallique → 2. Même en l'absence de tension, les porteurs de charge (pour simplifier ici, des trous « + ») passeront des électrodes à l'isolant pour y former une fine couche d'accumulation de charges entraînant une distribution de potentiel accrue, quasi plane, à l'intérieur de l'isolant. Le champ électrique

(fondamentalement, la pente négative du potentiel) vaut donc pratiquement zéro partout entre les plaques, sauf à proximité des contacts → 2a. L'application d'une tension élevée aux bornes des électrodes induit un net basculement du potentiel, entraînant un maximum près de l'une d'elles → 2b.

Normalement, cette distance, trop faible pour être résolue dans la simulation macroscopique, est exclue. Or ce maximum a d'importantes conséquences. Le champ électrique est nul au maximum car c'est, par définition, la pente du potentiel. Ce point est appelé « électrode virtuelle » et les électrodes présentant cette propriété de champ « évanouissant » dans ces conditions sont qualifiées d'« ohmiques ». Le courant électrique (proportionnel au produit du champ électrique et de la densité et mobilité des porteurs de charge) restant fini, un champ électrique évanouissant ainsi qu'un courant non nul impliquent que la densité de porteurs de charge diverge (devient infinie) au niveau de l'électrode virtuelle. En réalité, la densité demeure évidemment finie en raison de l'action de diffusion qui était, dans cette simplification, négligée. L'électrode injecte un grand nombre de porteurs de charge, entraînant une telle densité de charges au contact que le champ électrique est supprimé. Cela peut conduire à une augmentation du

Les disjoncteurs dépendent beaucoup des effets aux limites (vaporisation de métal dans les disjoncteurs à vide, ablation de buse dans les disjoncteurs à gaz, par exemple).

champ à un autre endroit ou après inversion de polarité.

L'injection et l'accumulation de charges sont primordiales quand on conçoit des dispositifs d'isolation en courant continu haute tension (CCHT). Principale conséquence : la distribution du champ électrique n'est pas seulement déterminée par une conductivité dans l'espace mais aussi influencée par les contacts et la limite entre eux, ce qui demande des mesures spéciales pour renforcer l'isolation CCHT [2].

Racines d'arc dans les disjoncteurs à vide

La coupure du courant dans le vide [3] se fait par formation et extinction d'un arc électrique → 3. Le matériau dans l'espace étant ici le vide, l'importance de conditions aux limites appropriées est d'abord évidente car le plasma dans le disjoncteur émane totalement du métal des électrodes. L'exemple pose ensuite un problème complexe de limites multiphysiques mettant en jeu un certain nombre de phénomènes physiques différents qui peuvent être traités indépendamment dans l'espace, mais reliés au niveau inférieur.

Les racines d'arc sont les points de connexion arc-électrodes métalliques. Une couche électrique s'y forme ; cette gaine non neutre engendre une tension entre l'espace du plasma et l'électrode (chute de tension de l'électrode, semblable à celle illustrée en → 2a). La chute de tension entraîne un fort champ électrique en surface, nécessaire pour faire passer un important courant du métal au plasma en obligeant les électrons à quitter la cathode ou à pénétrer l'anode, et les ions à migrer en surface → 4. Ce sont principalement ce déplacement et cette recombinaison d'ions qui chauffe le métal. La surface de l'électrode dans la racine d'arc devient si chaude que le métal s'évapore. L'arc dans le

vide est en fait un arc de vapeur métallique qui se nourrit spontanément du matériau émis par les racines d'arc. L'équilibre entre l'échauffement de surface par le plasma et le refroidissement par évaporation métallique détermine la température de l'électrode et, ce faisant, la performance du disjoncteur.

Chacun de ces processus est complexe en soi. Pourtant, les mêmes particules (électrons, ions, atomes) étant vecteurs de différentes propriétés (masse, chaleur et courant électrique), les conditions aux limites sont interdépendantes ; il convient d'en tenir compte pour obtenir une simulation cohérente.

On trouve un autre exemple de la pertinence des effets aux limites dans l'ablation de matériau induite par le rayonnement de l'arc dans les disjoncteurs à gaz, qui permet la montée en pression nécessaire au processus de coupure [1].

Les capteurs, appareillages haute tension isolés dans l'huile, etc. constituent également de bons exemples.

Simulations fiables

Des simulations numériques significatives passent donc par des modèles dans l'espace obligatoirement complétés de conditions aux limites appropriées. Ces dernières influent souvent beaucoup sur le résultat, même si elles n'occupent qu'une petite partie du système complet. De plus, la variété des processus physiques sous-jacents, qui doivent être pris en compte dans les limites, est bien plus grande que dans tout l'espace, dont les équations obéissent souvent, par souci de simplification, aux lois de conservation.

À l'heure de valider les résultats de la simulation, il est donc judicieux d'étudier de près les conditions aux limites utilisées. À cela, deux raisons : tout d'abord, par leur effet important, il est parfois

facile d'obtenir les résultats souhaités en ajustant leurs paramètres ; ensuite, la physique qui les sous-tend, souvent très complexe, peut induire en erreur. S'il n'est pas simple de choisir une bonne condition aux limites puisqu'il faut bien connaître la physique sous-jacente, le jeu en vaut la chandelle au vu des résultats de simulation, beaucoup plus fiables. Sans compter que la compréhension des lois physiques régissant ces conditions limites est une précieuse source d'innovation technique.

Kai Hencken

Thomas Christen

ABB Corporate Research

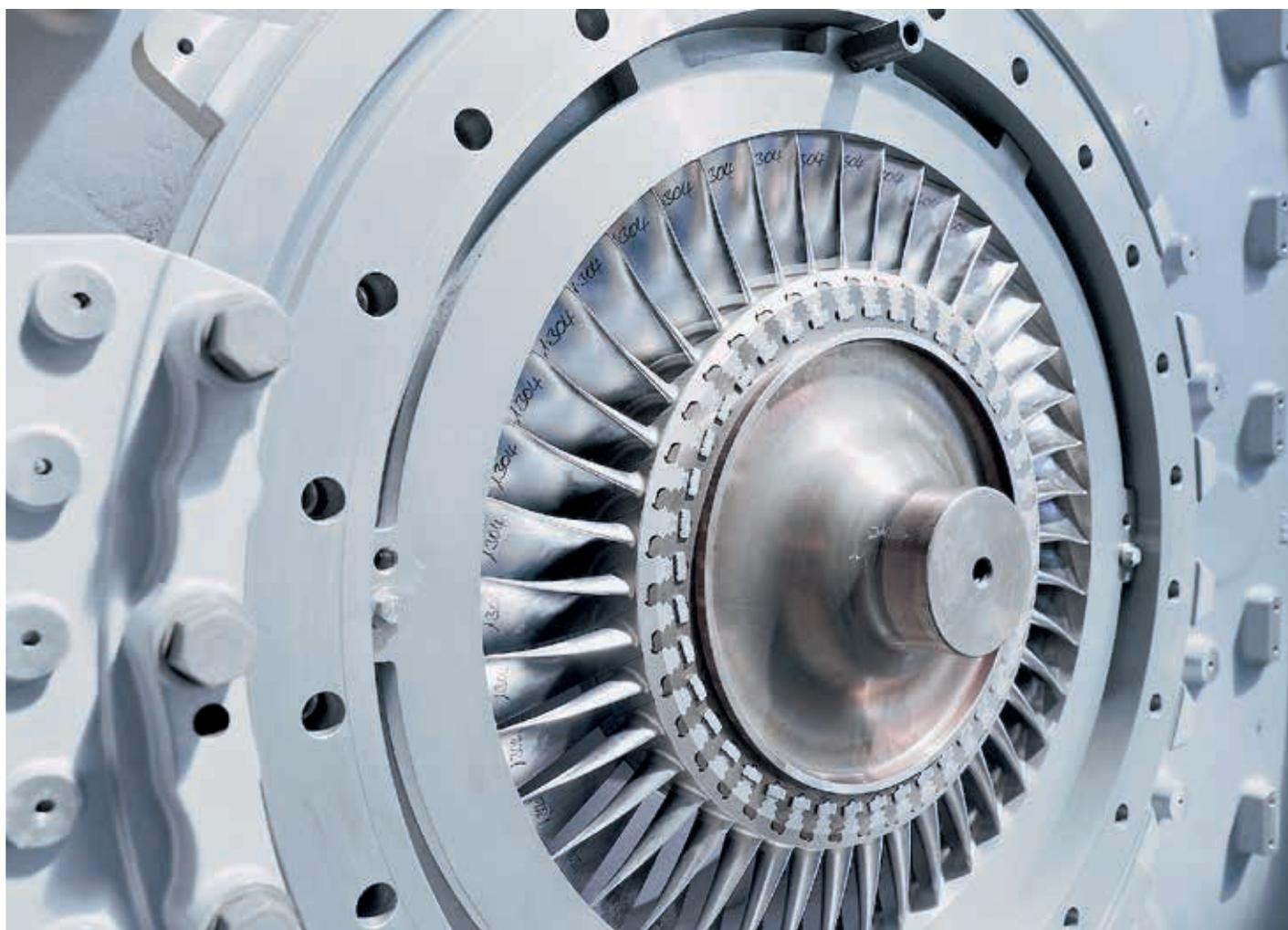
Baden-Dättwil (Suisse)

kai.hencken@ch.abb.com

thomas.christen@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] « Simulation », *ABB review*, 3/2013, p. 1–84.
- [2] Christen, T., « Characterization and Robustness of HVDC Insulation », *IEEE Conference on Solid Dielectrics*, p. 238–241, Bologne, 2013.
- [3] Kleberg, I., Shang, W., « Comprendre les phénomènes d'arc : simulation d'arcs à fort courant dans le vide », *Revue ABB*, 1/2004, p. 22–24.

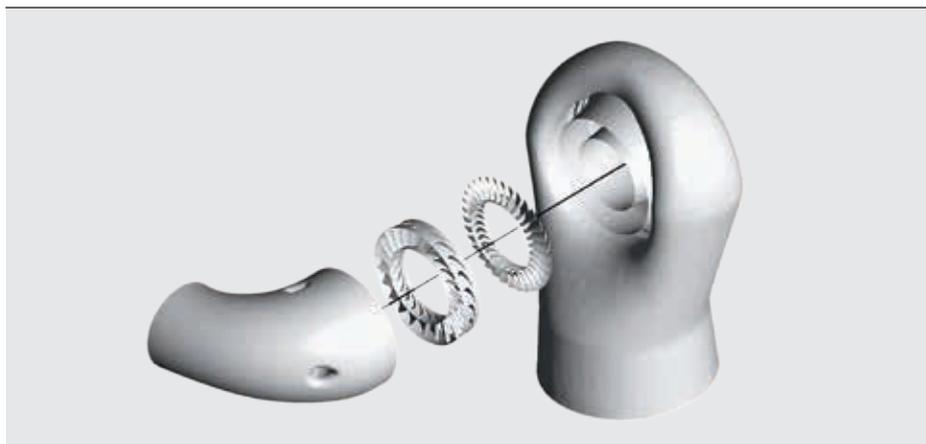


Le turbo met les gaz

Les turbines
en équation

KWOK-KAI SO, BENT PHILLIPSEN, MAGNUS FISCHER – La mécanique des fluides numérique CFD (*Computational Fluid Dynamics*) est aujourd'hui un outil abouti de conception et de développement, indispensable pour étudier les écoulements aérodynamiques et optimiser les performances des rotors et stators axisymétriques de turbomachines. Des mesures sur banc d'essai de turbines de turbocompresseurs ont montré que la déflexion de l'écoulement symétrique en entrée et en sortie de turbine peut dégrader le rendement de la machine. Des simulations CFD de l'étage turbine complet, de la section d'entrée à la section de sortie, ont confirmé ce résultat et débouché sur une géométrie de turbine moins sensible aux déformations. C'est là un nouveau champ d'action pour le calcul CFD.

1 Modèle numérique de l'étage turbine avec (de gauche à droite) conduite d'entrée, distributeur, roue et collecteur d'échappement



2 Démultiplier la puissance

ABB est le chef de file mondial de la fabrication et de la maintenance de turbo-compresseurs pour moteurs diesel et gaz de 500 kW à plus de 80 MW. La technologie et l'innovation ABB améliorent le fonctionnement des installations clientes tout en produisant moins d'émissions polluantes, même dans les environnements les plus difficiles. Quelque 200 000 turbo-compresseurs ABB équipent aujourd'hui des navires, des centrales d'énergie, des groupes électrogènes, des locomotives diesel et de gros engins tout terrain dans le monde entier. Avec plus de 100 centres de maintenance dans une cinquantaine de pays, ABB garantit l'approvisionnement en pièces d'origine et des services de qualité.

Un turbocompresseur se compose généralement → 3 d'une turbine (partie orange), qui récupère l'énergie perdue des gaz d'échappement, et d'un compresseur solidaire (partie bleue), qui crée une dépression dans laquelle s'engouffre l'air extérieur à la pression atmosphérique ; cet air, comprimé, est poussé vers les cylindres du moteur. Un moteur diesel suralimenté développe ainsi quatre fois plus de puissance que son homologue atmosphérique. La suralimentation est en outre le principal facteur de réduction de la consommation de carburant et des émissions d'oxydes d'azote dans les moteurs diesel et gaz.

Un turbocompresseur pour application de forte puissance se compose généralement d'un étage de turbine axiale constitué d'un distributeur annulaire fixe (stator) et d'une roue mobile (rotor). La conduite d'entrée du turbocompresseur dirige le flux de gaz vers l'étage turbine, à l'amont du distributeur ; les gaz s'y détendent et entraînent la roue. À l'aval, le collecteur d'échappement joue le rôle de diffuseur, primordial pour la performance de l'étage turbine → 1-2. L'écoulement fluide qui traverse ces éléments doit être étudié pour maximiser les performances de la turbomachine. La simulation numérique CFD est à cette fin un outil de développement irremplaçable.

Enjeux

Les simulations numériques d'un étage turbine portent habituellement sur deux éléments, le distributeur et la roue. En général, on ne simule que l'écoulement à l'intérieur d'un seul segment de distributeur et de roue, selon l'hypothèse simplificatrice d'un profil d'écoulement périodique axisymétrique. De même, les collecteurs (*manifolds*) d'admission et d'échappement sont toujours simulés et conçus

Photo p. 74

Comment tirer le meilleur de la simulation CFD pour affiner la conception des turbines de turbocompresseurs ?

Les écoulements fluides doivent être soigneusement étudiés pour maximiser la performance de la turbine. Le calcul CFD est pour cela indispensable.

à part. Cette démarche séquentielle a l'avantage de se contenter d'une puissance de calcul relativement faible pour simuler l'écoulement d'un seul canal de distributeur et de roue. Elle est également bien adaptée aux écoulements entrant et sortant axiaux réguliers. Reste

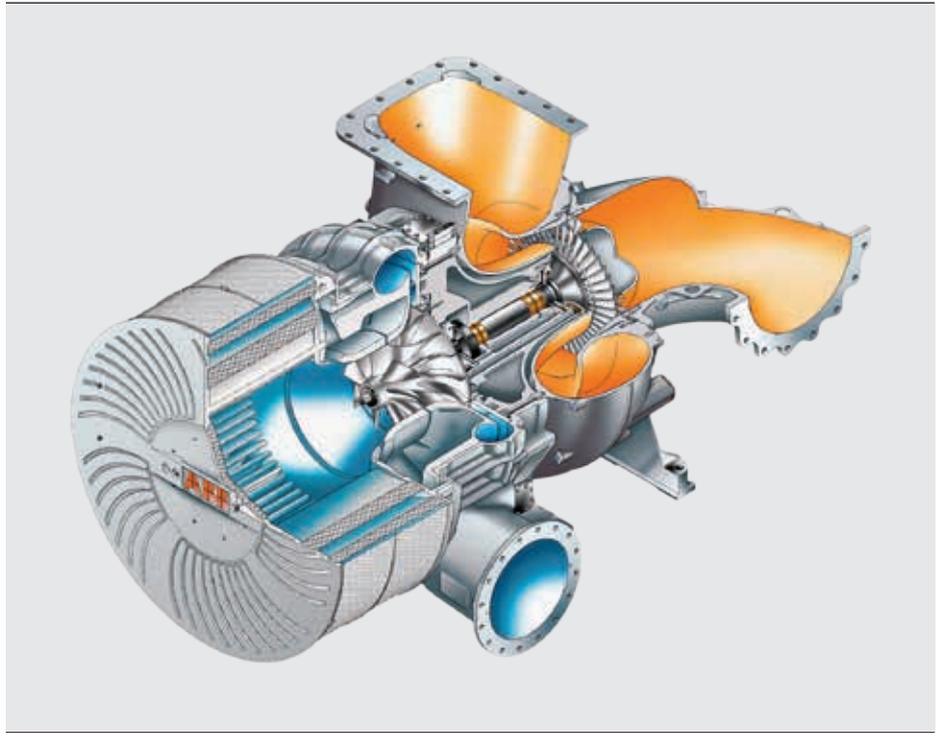
que la simulation des collecteurs seuls, hors turbine, n'est pas complète car elle ne tient pas compte de l'interaction des deux étages.

La difficulté augmente quand les conduites d'admission et d'échappement décrivent de nombreux tours et coudes pour limiter leur encombrement géométrique ; le cas échéant, l'hypothèse de flux entrant et sortant axisymétriques ne tient plus. Ces déviations risquent de dégrader les performances du diffuseur et de la turbine, des débits de recirculation et de séparation indésirables pouvant se produire dans le diffuseur et faire ainsi chuter le rendement de la turbine. Jusqu'à présent, la recherche d'un diffuseur adapté impliquait plusieurs itérations de conception et des campagnes d'essais complètes.

L'étude de l'écoulement de l'étage turbine axial couplé à différents collecteurs d'admission ou d'échappement, sans tester sur banc ces variantes de concep-

La simulation CFD multicomposant a besoin d'une grande puissance de calcul car elle demande un domaine numérique complet à 360°.

3 Turbocompresseur A175-L d'ABB



tion, oblige à recourir à des simulations CFD multicomposants. À cet effet, on effectue des simulations du collecteur

machine et, en particulier, d'étudier précisément l'effet couplé en sortie de roue turbine sur les régimes d'écoulement

La difficulté augmente quand les tubulures d'admission et d'échappement décrivent plusieurs tours et coudes.

d'admission radial et du distributeur pour étudier l'inhomogénéité de l'écoulement venant du collecteur et, en particulier, la performance de l'écoulement dans le diffuseur du collecteur d'échappement, dans des conditions de flux entrant et sortant non axisymétriques. La simulation CFD multicomposant a néanmoins l'inconvénient de nécessiter une plus grande puissance de calcul puisqu'elle requiert un domaine numérique complet à 360°, l'hypothèse de flux axisymétrique ne tenant plus. Une bonne concordance du maillage, des modèles numériques adaptés aux configurations multicomposants et une définition fiable des conditions aux limites sont essentiels.

Mis à part ces contraintes, la simulation CFD multicomposant permet vraiment de mieux comprendre le comportement des écoulements qui traversent une turbo-

machine dans le diffuseur. De plus, la simulation CFD de tout l'étage turbine, de disque à disque, correspondant à la mesure sur banc d'essai classique, les résultats CFD

peuvent être confrontés aux données expérimentales et validés.

Ces simulations complètes pour étudier l'influence des régimes d'écoulement entrant et sortant non axiaux imposent néanmoins de trouver un compromis entre effort de calcul et précision de la solution.

Haute fidélité

Tenir ces objectifs de simulation oblige à définir en conséquence les mailles CFD, indispensables à la modélisation et au calcul numérique. On utilise pour cela deux mailleurs: l'un, spécifique, prend en charge la géométrie des aubages du distributeur et de la roue turbine → 4; l'autre, généraliste, est assez souple pour traiter efficacement les courbures des tubulures d'admission et d'échappement.

4 Maillage CFD



4a Pales du distributeur fixe



4b Aubes de la roue mobile

5 Étage turbine sur banc de mesure



Dans les simulations CFD en régime permanent, ce sont les équations de Navier-Stokes moyennées RANS (*Reynolds-Average Navier-Stokes*) qui régissent les écoulements. Le modèle de transport de contrainte de cisaillement $k-\omega$, associé à une loi de paroi, est adopté pour prédire la turbulence, l'entrée et la séparation des flux. La CFD est paramétrée pour éviter la résolution des effets transitoires sur une courte échelle de temps.

Le distributeur fixe et la roue en rotation du domaine de calcul sont couplés par un modèle d'interface à « rotor gelé » (*frozen rotor*), puissant algorithme de résolution CFD en régime permanent pour parties fixe et mobile.

Ce modèle numérique et cette configuration sont basés sur une plate-forme CFD très répandue dans l'industrie et réputée pour sa précision. Le domaine de calcul compte environ 20 millions de mailles et de nœuds. Une plate-forme de calcul intensif ABB permet, en

quelques semaines, de mener à bien les simulations des grandes échelles des différents composants de la turbine, dans différentes conditions d'exploitation et d'essai.

Validation physique

Le paramétrage et l'exécution du modèle CFD ne font pas tout : il reste à confronter les résultats de la simulation aux observations physiques (mesures d'essais) pour s'assurer qu'ils décrivent avec précision la physique du problème.

Un banc → 5 permet de mesurer une longue liste de grandeurs caractéristiques de l'étage turbine : pression et température statiques et totales en différents points de la turbine, débit massique, travail, puissance et rendement de la machine, etc. C'est là un excellent moyen de définir précisément les conditions aux limites du modèle CFD et de poser les bases de la comparaison et de la validation des résultats de simulation.

La simulation numérique de l'étage turbine complet correspondant à la configuration sur banc de mesure, les résultats CFD peuvent être confrontés aux données expérimentales et validés.

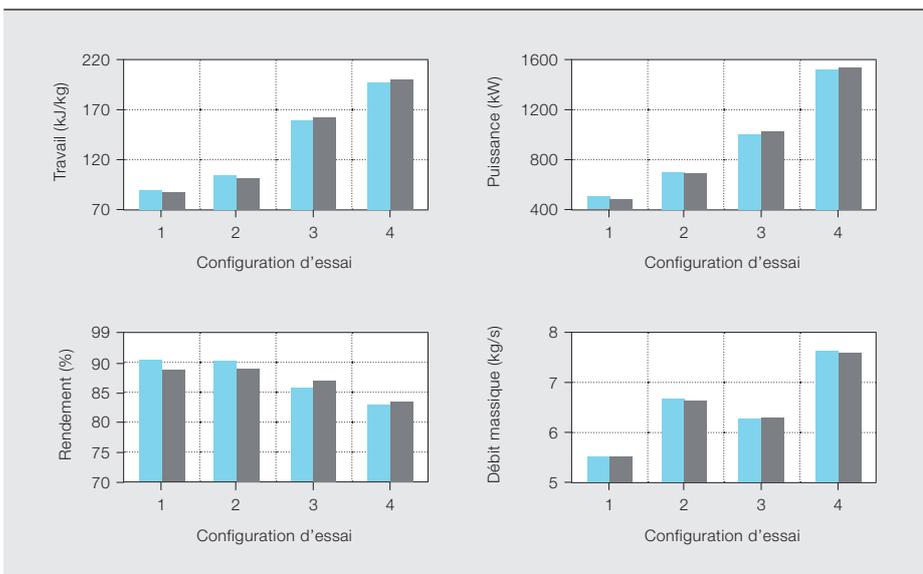
Résultats CFD

Plusieurs scénarios furent simulés par le modèle CFD, faisant intervenir différentes conceptions et géométries de distributeur, roue turbine, collecteur d'admission et collecteur d'échappement, ainsi que divers régimes de fonctionnement et conditions d'essais de gaz froids et chauds.

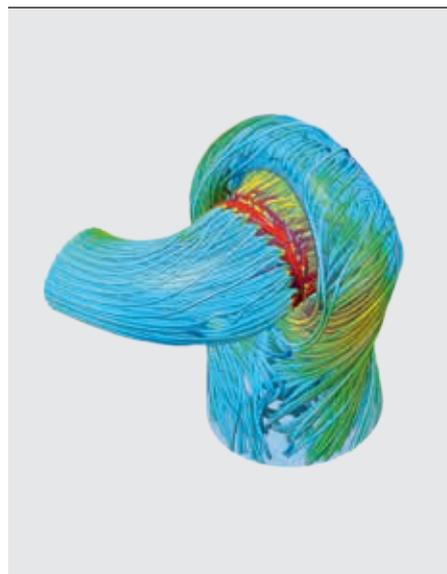
Ils révélèrent en général une très bonne concordance des mesures d'essais et des simulations CFD des grandeurs caractéristiques de l'étage turbine → 6. La vérification et la validation des simulations CFD par rapport aux mesures d'essais, pour un certain nombre de configurations, permettent en effet de bien connaître les écoulements interdusques dans l'étage turbine → 7.

Simulons par exemple un collecteur d'admission radial et un coude à 90° dans l'ouverture du collecteur d'échappement. Cette configuration présente un risque élevé de séparation et de recircu-

6 Comparaison de quatre grandeurs caractéristiques de la turbine sur banc de mesure (en bleu) et en simulation CFD (gris)



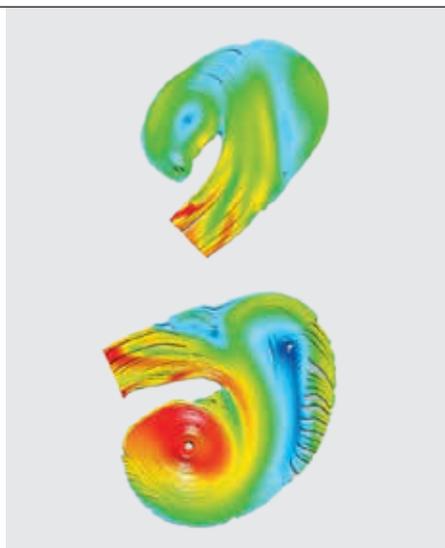
7 Lignes de courant de disque à disque ; la couleur indique la vitesse d'écoulement.



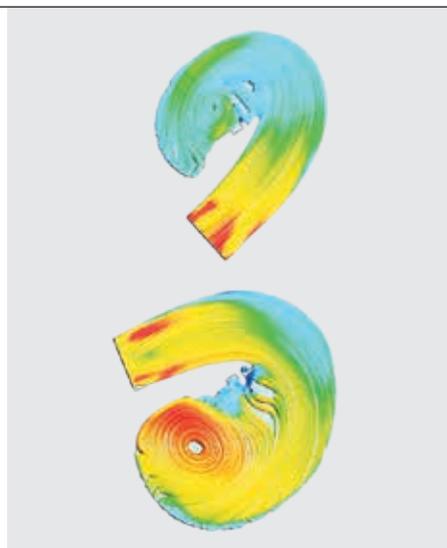
8 Lignes de courant pour différentes exécutions de collecteur d'échappement



8a Plans étudiés dans le diffuseur



8b Séparation et recirculation indésirables des écoulements



8c Détente souhaitée

lution indésirables des écoulements dans la zone du diffuseur. Il ressort des mesures d'essais que la performance de l'étage turbine se dégrade dans certaines conditions de fonctionnement à cause des flux entrants non symétriques. La chute de rendement de la turbine peut être prise en compte et reproduite par simulations CFD, et les profils d'écoulement dans le diffuseur sont encore mieux analysés en étudiant ces simulations, comme l'illustrent en → 8a les plans susceptibles de séparation et de recirculation de l'écoulement dans le diffuseur. On peut alors simuler les collecteurs d'échappement avec différentes exécutions de diffuseur pour identifier les géométries évitant la séparation de l'écoulement dans le diffuseur → 8b–8c.

Ainsi, les performances de la turbine sont maintenues même dans les conditions restrictives de collecteurs d'admission et d'échappement radiaux et de régimes d'écoulement entrant et sortant défavorables.

Repousser les limites de la connaissance

Chez ABB, le calcul CFD est utilisé pour affiner la compréhension de nouveaux domaines de la technique de suralimentation comme, par exemple, la simulation des échanges de chaleur et l'analyse thermique pour la conception du refroidissement et le choix des matériaux, ainsi que la simulation acoustique pour la réduction du bruit. En parallèle, le site de développement ABB (outils CFD, centre

d'essais et plate-forme de calcul intensif) ne cesse de progresser pour poser les jalons de la prochaine génération de turbocompresseurs.

Kwok-Kai So

Bent Phillipsen

Magnus Fischer

ABB Process Automation, Turbocharging
Baden (Suisse)

kwok-kai.so@ch.abb.com

bent.phillipsen@ch.abb.com

magnus.fischer@ch.abb.com

Rédaction

Claes Ryttoft

Chief Technology Officer and
Group Senior Vice President

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



Dans le numéro 3114

Mine de tout

Notre planète bleue est riche d'une immense variété de
composés et minéraux dont beaucoup ont trouvé des usages
ingénieux dans la main de l'homme. Si l'exploitation minière
suscite des débats et souvent la controverse, force est de
reconnaître que les matériaux de valeur marchande, y compris
ceux constituant les objets du quotidien, ont pour la plupart
été extraits de la croûte terrestre ou du moins fabriqués à
l'aide d'équipements eux-mêmes faits de cette matière.
Peu ou prou, la mine plonge au cœur de l'activité humaine.

ABB est présent dans ce secteur au travers d'une multitude
d'équipements, depuis les alimentations électriques qui mettent
la mine en action aux outils et machines comme les treuils,
les ventilateurs et les moteurs et variateurs qui les entraînent.
Bref, un catalogue complet d'instruments, de systèmes de
contrôle-commande et autres matériels, à l'affiche de notre
prochain numéro.

Sur le Web

Retrouvez *ABB review* sur vos tablettes, à l'adresse
www.abb.com/abbreview.

Toujours et partout

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.



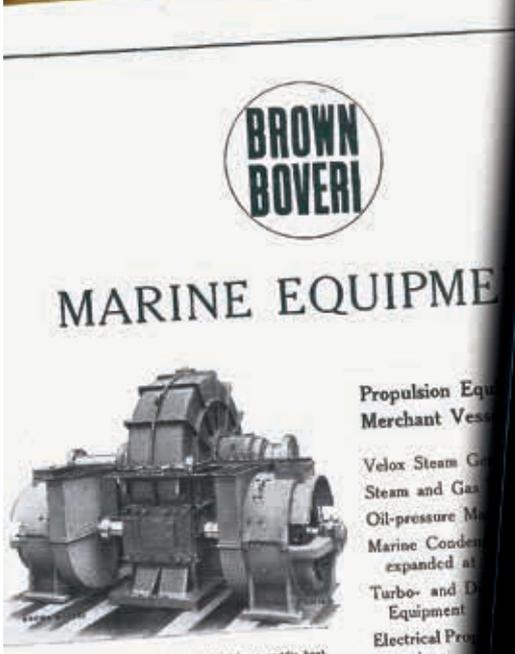


ABB REVIEW
LIMITED, BADEN (SWITZERLAND)
No. 9/10

is permitted subject to full acknowledgment.

	Page
...ing Plants	271
...sing? How can the Singing be avoided?	284
... Marine Auxiliaries	290
... Military Machines and Apparatus for Ships	294
... of Four-stroke-cycle Marine Diesel Engines	300
... on Ship Machinery	304
...rverting 1--	
...r-wave Transmitter for Ship to Shore Traffic	309
... Bessel Primitives as High-capacity Substituting	309
...board Ship	310
...ent Gear Coupling	310
...olding Machines for Shipyards and Shipowners	313

MACHINERY DEVELOPMENT.

Decimal Index 629.12-8 (2011)
629.13-96 (2011)

Brown Boveri not only took a leading part in the developments of the marine turbine on the continent, e. g., in its application to torpedo-boat and battle-cruisers, and battle-ships,

Les temps changent, la qualité reste.



Retrouvez-nous sur l'appli *ABB review* pour tablette et smartphone. Riche en fonctionnalités et en contenus interactifs (recherche intégrale, galeries photos, vidéos, animations...), cette version mobile est téléchargeable en quatre langues sur votre magasin d'applications préféré.
<http://www.abb.com/abbreview>

