

# 125 ans que ça tourne!

Depuis toujours, ABB est un pionnier de la  
technologie des moteurs et machines électriques  
Sture Eriksson



Les machines électriques tournantes sont un rouage essentiel du développement de nos sociétés. Elles sont à l'origine de la quasi-totalité de l'électricité produite et fournissent le gros de l'énergie mécanique dans les applications industrielles et tertiaires de même que dans nos habitations. Le moteur électrique est, de loin, la machine la plus polyvalente, éclipsant les moteurs à combustion, les moteurs hydrauliques et pneumatiques ou encore les différents types de turbines. Sa prédominance résulte de nombreux atouts : il est simple, non polluant, multi-applicatif et relativement économique ; il affiche un rendement et une fiabilité élevés, et est facile à commander. Ces machines électriques tournantes couvrent une gamme de puissance inégalée, allant de quelques microwatts à plusieurs gigawatts. Dans le droit fil de ses deux sociétés d'origine, ASEA et BBC, ABB a beaucoup contribué au développement des machines électriques destinées, tout particulièrement, aux applications industrielles et aux projets d'infrastructure.

## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

Les premières découvertes sur l'électromagnétisme, point de départ du développement des moteurs électriques, remontent aux décennies 1820 et 1830. Il faudra attendre le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle pour voir apparaître quelques formes primitives de machines électriques et, enfin, les années 1870 pour la production de machines utilisables. Ces machines sont à l'origine de la création à la fois d'ASEA et de BBC.

L'entreprise suédoise ASEA fut créée en 1883, suite à l'invention de la dynamo à courant continu (CC) par le jeune ingénieur Jonas Wenström (1855–1893), utilisée pour l'électrification des systèmes d'éclairage **1**. En 1890, Wenström breveta également un système triphasé constitué d'un générateur synchrone, d'un transformateur et d'un moteur asynchrone. Wenström est considéré comme un des rares inventeurs indépendants du moteur triphasé.

En 1891, Charles E. L. Brown (1863–1924) créa, avec Walter Boveri (1865–1924), l'entreprise BBC. Auparavant, il avait dirigé le département d'électrotechnique d'une autre entreprise suisse, Oerlikon, où il développa à la fois des machines à courant alternatif (CA) et à courant continu (CC), en particulier le générateur pour la première ligne de transport en triphasé au monde. Au tournant du siècle, il contribua à plusieurs autres inventions brillantes, notamment le turbogénérateur à rotor cylindrique.

### Un peu de technique

Les générateurs comme les moteurs exploitent l'interaction des courants électriques, flux magnétiques et forces mécaniques. A quelques exceptions près, ce sont des machines à flux radial formées d'un rotor et d'un stator. Leur puissance est calculée avec l'**Equation 1** dérivée des équations de Maxwell.

$$\text{Equation 1 } P = k \cdot n \cdot D^2 \cdot L \cdot A_s \cdot B_g$$

avec :

$P$  = puissance,  $k$  = constante,  $n$  = vitesse,  $D$  = diamètre de l'entrefer,  $L$  = longueur active,  $A_s$  = charge linéique,  $B_g$  = densité de flux dans l'entrefer

L'équation montre que la puissance est proportionnelle à la vitesse de rotation, aux dimensions de la machine, au diamètre de l'entrefer et à sa longueur active, à la charge linéique et à la densité de flux dans l'entrefer. Les concepteurs de machines électriques n'ont eu de cesse de développer des générateurs et des moteurs toujours plus petits et moins chers. Pour une vitesse donnée, l'**Equation 1** indique que les dimensions de la machine peuvent uniquement être réduites en augmentant la charge linéique et/ou la densité de flux. Or cette dernière est limitée par la saturation magnétique du fer dans le stator et le rotor. Reste donc la charge linéique qui entraîne une augmentation des pertes par effet Joule dans les enroulements. Telle était la méthode traditionnelle pour développer des machines de plus en plus

compactes, avec des matériaux capables de résister à des températures supérieures et dotées de solutions de refroidissement plus efficaces.

Les machines électriques subissent différents types de contraintes – électriques, mécaniques, thermiques et chimiques – qui souvent se combinent. Leur isolant doit résister à une forte intensité de champ et leur rotor endurer des forces centrifuges. Parmi les autres contraintes mécaniques, citons celles dues aux forces électrodynamiques constantes et transitoires. Malgré un rendement élevé, les pertes induisent un échauffement important de différents organes de la machine. Les atmosphères explosibles, l'humidité et les poussières entrent aussi en compte. Dans ce contexte, rien d'étonnant à ce que le développement des machines électriques fasse appel à des équipes pluridisciplinaires constituées notamment de spécialistes du génie électrique, de la mécanique et de la science des matériaux.

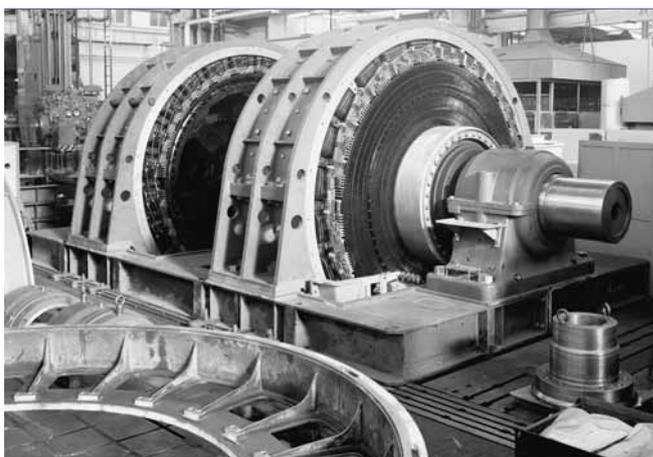
### Développement

Ces 125 dernières années, les efforts de développement visaient essentiellement à satisfaire aux impératifs de fiabilité et de rentabilité des utilisateurs. Des machines très différentes aux nombreuses variantes ont donc été conçues pour les besoins de chaque application. La plupart des entraînements industriels doit être commandée en vitesse, avec une grande précision sur une large plage de fonctionnement. D'autres sont installés dans

**1** Première dynamo de Wenström datant de 1882



**2** Moteur CC réversible à double induit pour laminoir  
Entraînement tandem BBC de 1956



des zones à risque où ils doivent être protégés des explosions. Les cahiers des charges des constructeurs de compresseurs ou de pompes, par exemple, spécifient des moteurs dont la conception diffère quelque peu de celle des constructeurs de moteurs. Nous pourrions ainsi multiplier les exemples à l'infini.

Le développement des machines électriques a toujours été tributaire des progrès accomplis dans d'autres domaines. Ainsi, dès le début, la science des matériaux a joué un rôle prépondérant. Plus récemment, l'électronique de puissance et de commande s'est invitée en force, tout comme la CAO et la simulation logicielle.

### Moteurs à courant continu (CC)

Les premières activités de développement d'ABB étaient centrées sur les générateurs et les moteurs CC; de même, ces machines représentaient une part majeure de l'offre initiale du Suisse BBC. Le moteur CC a le gros avantage d'être facile à commander en vitesse, ce qui explique qu'il ait survécu si longtemps. Sa vitesse est directement proportionnelle à la tension et inversement proportionnelle au flux magnétique comme l'indique l'Equation 2.

$$\text{Equation 2 } n = k \cdot E / \Phi$$

avec :

$n$  = vitesse,  $k$  = constante,  $E$  = force électromotrice (tension induite),  
 $\Phi$  = flux magnétique

Ces moteurs sont souvent commandés en tension jusqu'à une vitesse de base donnée et en flux au-dessus de cette vitesse, donnant une zone de couple constant aux basses vitesses et une zone de puissance constante aux vitesses supérieures.

Les premiers moteurs CC étaient commandés manuellement au moyen de résistances, méthode singulièrement onéreuse. Un progrès majeur fut l'introduction de la commande Ward-Léonard par laquelle l'induit du moteur CC est alimenté en tension variable par un groupe convertisseur constitué d'un moteur CA et d'un générateur CC. Si ce système était avantageux à double titre – bonne commande en vitesse et récupération

de l'énergie de freinage – il était coûteux et volumineux avec ses trois machines. A la fois ASEA et BBC utilisèrent le groupe Ward-Léonard dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle pour alimenter des machines à papier, des laminoirs, des treuils de mine, des engins de levage et des machines-outils. La montée en puissance des moteurs fut rapide : pour preuve la fourniture, en 1915, d'un moteur CC de 7000 kW maxi à un laminoir réversible suédois.

Les entraînements CC à convertisseurs statiques apparurent dans les années 1930 avec l'avènement des redresseurs à vapeur de mercure commandés par grille. On gagna ainsi 4 à 5% de rendement par rapport au groupe Ward-Léonard, mais les redresseurs coûtaient cher et étaient réservés aux moteurs relativement puissants. Néanmoins, ces deux systèmes d'entraînement restèrent incontournables pour les applications contraignantes (laminoirs et machines à papier) jusqu'à l'apparition des convertisseurs à semi-conducteurs de puissance autour de 1960 (redresseurs à diodes pour commencer et à thyristors ensuite). Les premiers thyristors étaient trop peu puissants pour les très gros systèmes d'entraînement (300 kW maxi). Toutefois, les progrès furent rapides avec des moteurs de 12000 kW fabriqués dès la fin des années 1960. Les moteurs CC ont également investi les moyens de transport : trams et trolleybus, chariots élévateurs et voitures électriques, locomotives et autres matériels roulants. Ces moteurs de traction étaient en général à excitation série jusqu'à ce que l'excitation séparée s'impose pour les moteurs alimentés par convertisseurs.

Toutes les machines CC étaient à pôles extérieurs avec l'enroulement d'induit placé dans le rotor et raccordé au collecteur. Il s'agissait souvent de machines ouvertes ventilées ou fermées, refroidies par un ventilateur externe. Pendant longtemps, la tôle stator et les pôles furent en fer massif. Les besoins de commande rapide et l'introduction des redresseurs à thyristors, qui engendrent beaucoup d'harmoniques, ont abouti à l'utilisation d'acier feuilleté pour le stator. La commutation a toujours été un paramètre

critique et restrictif des performances des machines CC, même après les améliorations apportées par les pôles auxiliaires et les enroulements de compensation début 1900. Les entraînements réversibles (ex., laminoirs) exigeaient des inversions de sens de rotation tellement rapides que de gros efforts furent faits pour développer des moteurs à faible inertie. Dans de nombreux cas, il était même nécessaire de répartir la puissance entre deux moteurs couplés mécaniquement en série (entraînements tandem) 2.

Au milieu des années 70, ASEA livra à l'URSS un moteur CC extraordinaire, destiné à une centrifugeuse pour les tests médicaux des cosmonautes. Capable d'accélérer la centrifugeuse avec un couple de 1100 tm, ce moteur CC à arbre vertical est probablement le plus gros jamais construit. Avant cela, les plus puissants moteurs de laminoirs développaient au maximum 400 tm environ.

Alors que la fin du moteur CC est annoncée depuis des décennies, il résiste encore bien dans un marché qui, certes, s'est fortement réduit. Il est facile à commander avec précision et de nombreux clients lui restent fidèles pour entraîner des équipements comme les engins de levage, les treuils de mine, les mélangeurs, les extrudeuses, les remontées mécaniques, les bancs d'essais, etc. Aujourd'hui, l'offre ABB de moteurs CC va de 1 à 2000 kW. Les plus récents, introduits il y a seulement quelques années, couvrent des puissances de 25 à 1400 kW.

### Moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones se répartissent en plusieurs groupes selon leur mode de refroidissement, leur forme de montage, leur niveau de tension, etc. On distingue ainsi deux grandes catégories :

- les moteurs à rotor en court-circuit ou moteurs à cage d'écureuil ;
- les moteurs à rotor bobiné ou moteurs à bagues.

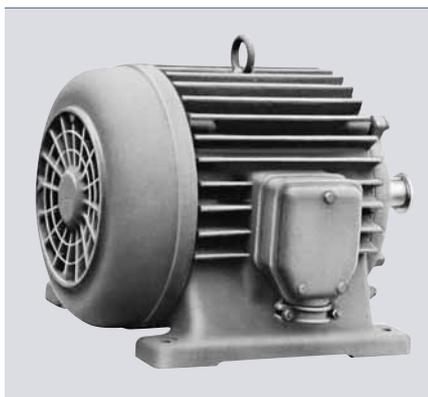
Ces deux catégories étaient déjà fabriquées par ASEA, BBC et plusieurs autres constructeurs avant la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Plus économiques et extrêmement robustes, ces moteurs se sont très vite imposés dans l'industrie

## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

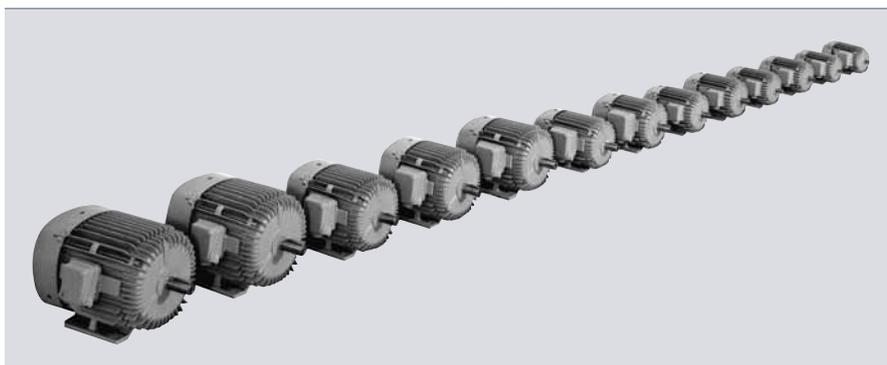
comme de véritables «bêtes de somme». A l'époque, les constructeurs commencent à développer leurs propres gammes standards de petits moteurs, présentées dans des catalogues.

Les anciennes générations de moteurs asynchrones étaient, pour la plupart, des moteurs ouverts ventilés, à carcasse fonte et roulements à coussinet. ASEA introduisit les roulements à billes dans les petits moteurs dès 1910, ce type de roulements se généralisant dans les décennies 1920 et 1930. Pour les atmosphères industrielles poussiéreuses ou explosibles, les besoins de sécurité débouchèrent sur le développement des moteurs fermés, avec déclassement par rapport aux moteurs ouverts. La situation s'améliora cependant avec l'introduction, en 1930, de la ventilation forcée avec un ventilateur externe monté sur l'arbre qui refroidit la carcasse du stator dotée d'ailettes **3**. Dans un premier temps, l'isolant des encoches était fabriqué à partir de carton (presspahn) et de tissu de coton im-

**3** Moteur triphasé fermé à cage avec roulements à billes et refroidi par ventilateur externe (1934)



**4** Petits moteurs normalisés CEI de 0,12 kW à 7,5 kW (1961)



prégné; dès le milieu des années 1920, ceux-ci furent remplacés par des matériaux isolants moins hydrophiles.

Parallèlement, l'isolation de chaque fil de cuivre fut améliorée. Les enroulements rotatifs des moteurs à cage étaient constitués de barres de cuivre placées dans des encoches circulaires et mises en court-circuit à leurs extrémités sur des bagues. Des barres de forme rectangulaire furent introduites au cours des années 1920, améliorant considérablement les performances au démarrage. Le brasage remplaça le soudage pour l'assemblage des barres sur les bagues en court-circuit.

Les moteurs à bagues restèrent très répandus tant que les réseaux électriques étaient trop fragiles pour autoriser un démarrage direct sur le réseau. Une résistance externe raccordée sur l'enroulement rotorique via les bagues limitait le courant et augmentait le couple. La valeur de résistance était progressivement réduite jusqu'à la mise en court-circuit des bagues. Au début des années 1920, BBC développa un démarreur centrifuge constitué d'une résistance tournante et d'un contacteur qui court-circuitait la résistance dès que le rotor avait atteint une certaine vitesse. Cette invention améliora les performances au démarrage comparées à celles des moteurs à cage d'écureuil, facilitant l'utilisation de rotors bobinés et de résistances de démarrage tout en supprimant les bagues et les auxiliaires externes. Ces moteurs se sont banalisés pendant plusieurs décennies.

Les moteurs basse tension (BT) et les plus grosses machines haute tension (HT) diffèrent considérablement sur

plusieurs points. Les premiers sont des produits normalisés dont le développement était axé principalement sur les besoins applicatifs. Ils sont fabriqués en grande série à la fois dans des usines ASEA et BBC installées, au fil des ans, dans de nombreux pays. 1935 marque une étape importante dans l'évolution des produits et des procédés de fabrication avec l'introduction, par BBC, d'une cage rotor en fonte d'aluminium pour ses moteurs jusqu'à 3 kW. ASEA lançait en 1945 sa première série de petits moteurs à carcasse stator et cage rotor en fonte d'aluminium. Les systèmes modernes à isolant synthétique à base de polyuréthane et de polyester remplacèrent les anciens systèmes quelques années plus tard.

Les petits moteurs asynchrones se banalisant, les utilisateurs désiraient pouvoir changer de fournisseurs. Ce besoin d'interchangeabilité déboucha sur la normalisation des caractéristiques dimensionnelles (hauteur d'axe, taille, etc.) et électriques (puissance, tension et vitesse). Les normes furent élaborées par la Commission électrotechnique internationale (CEI) en 1959 et par la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) aux Etats-Unis quelques-années plus tôt **4**. Au fil des ans, ces normes ont bien évidemment évolué tout en conservant leurs exigences de base. Si la réduction des coûts a toujours été un objectif majeur des projets de développement, les efforts actuels sont principalement axés sur les gains de rendement et la baisse du niveau sonore.

Les méthodes de commande en vitesse des moteurs à bagues par régulation de glissement, longtemps utilisées, présentaient de sérieux inconvénients. Dans ce domaine, la technologie qui connut le plus de succès était le moteur Schrage introduit en 1910 avec des applications types dans les machines textiles, les presses d'imprimerie, etc. **5**. L'arrivée des thyristors dans les années 1960, autorisant la commutation forcée des variateurs, a permis de développer, presque du jour au lendemain, des entraînements à vitesse variable commandés en fréquence. En 1964, deux ingénieurs de BBC présentèrent la technique de

modulation par largeur d'impulsions (MLI) qui ultérieurement s'imposa dans les variateurs de fréquence. Plusieurs années de travaux furent nécessaires avant le lancement commercial de cette technique, BBC livrant les premiers systèmes d'entraînement CA au cours des années 1970 alors qu'ASEA préférait se concentrer sur les moteurs CC. L'entreprise finlandaise Oy Strömberg Ab, rachetée par ASEA un an avant la création du Groupe ABB, était un des pionniers de la variation de fréquence. Son savoir-faire et ses ressources permettent à ABB d'être aujourd'hui le leader mondial des variateurs électroniques de vitesse. Ces variateurs, en particulier les premières générations, ont l'inconvénient d'engendrer des harmoniques de courant et de tension, qui mettent à mal les moteurs. Les harmoniques de courant induisent des courants de Foucault, sources de pertes supplémentaires et d'échauffement, et facteurs de déclassement des moteurs. Parmi les autres problèmes, citons les fortes pointes de tension qui dégradent l'isolant et les courants de palier capacitifs qui érodent les roulements à billes. Les dernières générations de variateurs de fréquence et de moteurs se sont pratiquement affranchies de ces défauts.

Dans certaines applications, le moteur synchrone à aimants permanents se substitue au moteur asynchrone, plus spécialement dans les entraînements fonctionnant à vitesse réduite et couple élevé. Cette évolution résulte du développement d'aimants de terres rares très puissants dans les années 1980. ABB a lancé une série de

moteurs de ce type, destinée principalement à l'industrie papetière. Même si des concurrents existent, le moteur asynchrone continuera de dominer le marché pour ses qualités exceptionnelles dans les applications à fréquence constante et pour son prix dans les applications à vitesse variable.

#### Machines synchrones

Le développement des machines synchrones était axé avant tout sur les grosses machines HT comme les alternateurs de centrale électrique, les moteurs de forte puissance et les compensateurs synchrones. A de nombreux égards, les générateurs (des turbogénérateurs à grande vitesse aux alternateurs de centrales hydroélectriques à petite vitesse) guidaient les travaux de développement. Au cours des ans, ASEA et surtout BBC ont construit un grand nombre de machines imposantes qui marquent des dates importantes à l'échelle mondiale dans l'évolution des générateurs de centrales. Des machines de 30 MVA furent construites au début des années 1920 et les 100 MVA furent dépassés au cours de la décennie suivante. Plus tard, les deux entreprises construiront des générateurs beaucoup plus puissants.

Les carcasses stator, les noyaux et les rotors de même que les supports de palier des anciennes machines à pôles saillants étaient en fonte. Très vite, l'acier moulé remplaça la fonte pour les pièces tournantes, renforçant la résistance à la rupture. Les assemblages soudés firent leur apparition dans les années 1930, augmentant la résistance mécanique et réduisant la masse

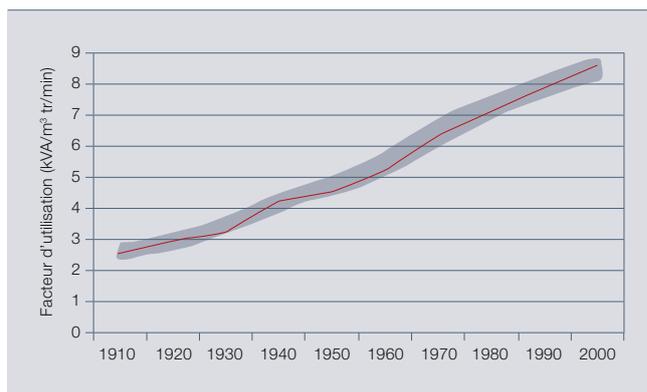
de la structure. Différents types d'enroulement statorique furent utilisés ; les enroulements à bobines concentriques avec un côté de bobine par encoche s'imposèrent dans les machines multipolaires jusqu'à la fin des années 1930, lorsque les enroulements imbriqués avec deux côtés de bobine par encoche se répandirent. Ces enroulements ont longtemps été utilisés pour les turbogénérateurs, permettant de rationaliser la production. Dans les plus grosses machines, les côtés de bobine étaient souvent des barres Roebel dans lesquelles les câbles de cuivre très fins étaient transposés dans le côté de bobine. Cette méthode utilisée dans le monde entier fut inventée et brevetée en 1912 par l'ingénieur de BBC Ludwig Roebel (1878-1934). A l'origine, les entreprises utilisaient des feuilles de mica imprégnées de shellac pour isoler les enroulements statoriques HT. Les isolants bitume et mica furent ensuite utilisés autour de 1930, principalement pour les machines de tensions supérieures. Un nouveau système d'isolant à base de résines synthétiques fut développé et commercialisé par BBC en 1955 sous la marque MICADUR®. ASEA lança des systèmes correspondants au cours des années 1960 : d'une part, un système d'isolant par imprégnation sous vide et pression du ruban mica et verre et, d'autre part, un système à base de ruban pré-imprégné et semidurci.

Le bon refroidissement des machines électriques est crucial : plus elles sont grosses, plus les systèmes de refroidissement sont complexes. On est ainsi passé de machines ouvertes ventilées

5 Moteurs triphasés shunt à collecteur, canalisation d'air et régulateurs du filage (1965)



6 Facteur d'utilisation des grosses machines synchrones à pôles saillants refroidies à l'air



## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

aux machines fermées à refroidissement forcé soit par ventilateur externe, soit par ventilateur interne monté sur l'arbre avec circulation de l'air au travers d'échangeurs de chaleur intégrés **5** (plus couramment dans les grosses machines synchrones). Plus tard, entre 1940 et 1970, des systèmes très efficaces comme le refroidissement à l'hydrogène ou direct à l'eau, furent développés pour les très grosses machines, à savoir les générateurs et les compensateurs synchrones.

Le courant d'excitation des machines synchrones était généralement fourni à l'enroulement rotorique, via des balais et des bagues, par des excitatrices entraînées par l'arbre ou séparées (génératrices CC). Dans les années 1960, l'avènement des diodes au silicium permit à ASEA et à BBC de fabriquer des systèmes d'excitation sans balais «zéro maintenance» composés d'un générateur triphasé avec un enroulement d'induit tournant et un redresseur tournant raccordé directement à l'enroulement rotorique de la machine principale. Ces diodes devaient supporter des forces centrifuges élevées, atteignant parfois 5 000 g. Ce type de système d'excitation devint très répandu.

Les grosses machines synchrones sont utilisées comme des générateurs entraînés par des turbines à vapeur et

à gaz, des turbines hydrauliques, des moteurs Diesel et des turbines éoliennes. Elles servent principalement à entraîner des compresseurs, des pompes et des ventilateurs de grosses puissances, des raffineurs, des laminoirs, des treuils de mine et les hélices des navires. Leur rendement est supérieur à celui des moteurs asynchrones; si leur facteur de puissance peut être régulé, elles sont cependant plus difficiles à démarrer. Par le passé, ASEA et BBC développèrent des méthodes de démarrage asynchrone des moteurs synchrones qui les amenaient à leur vitesse de synchronisme en les excitant pratiquement à vitesse nominale. Ces méthodes sont encore utilisées pour les grosses machines à pôles saillants avec plaques polaires massives, malgré un mode de fonctionnement très contraignant.

Les valeurs de puissance, de vitesse et autres paramètres des grosses machines couvrent un champ tellement large qu'il était difficile de les normaliser. Alors qu'au départ elles étaient intégralement fabriquées sur mesure, l'évolution va dans le sens de la modularité et de la standardisation des éléments constitutifs avec une baisse des coûts et une hausse de leur puissance spécifique **6**. Les plus gros moteurs synchrones qu'ABB ait jamais construits atteignent 55 MW. (Le Groupe

a construit des turbogénérateurs de 1 350 MVA et des générateurs à pôles saillants de 850 MVA.)

En 1998, ABB lançait un type de générateur synchrone radicalement différent pour des tensions très élevées, baptisé Powerformer<sup>®</sup>, suivi, deux ans après, d'un moteur de technologie correspondante, le Motorformer<sup>™</sup>. Leur enroulement statorique est composé d'un câble HT isolé au polyéthylène réticulé (PR) autorisant des tensions entre 50 et 200 kV, très supérieures à celles des machines traditionnelles **7**. Ces machines peuvent ainsi être raccordées directement à une ligne électrique et un transformateur abaisseur (ou élévateur), supprimant les jeux de barres et une partie de l'appareillage de connexion. Avant cette date, la plus haute tension atteinte pour un générateur de centrale hydroélectrique était 155 kV. Des années plus tôt, les champions toutes catégories incluaient un générateur 20 kV livré par ASEA en 1906 et une machine 36 kV conçue par BBC en 1930.

A plusieurs reprises, ces dernières décennies, des efforts ont été entrepris pour développer des machines synchrones à enroulements d'excitation en matériaux supraconducteurs. L'arrivée de supraconducteurs à haute température refroidis par azote liquide a récemment entraîné un regain d'intérêt pour ces machines, ces matériaux montrant peut-être la voie à suivre pour l'avenir des machines électriques. Pour autant, leur arrivée sur le marché n'est pas pour demain et leur avenir à court terme passe par l'amélioration de leurs performances tant techniques qu'économiques.

**7** Type de moteur HT bobiné à câble utilisé pour alimenter la plate-forme Troll en mer du Nord.



### Sture Eriksson

Anciennement chez ABB Generation à Västerås (Suède)  
sture.ja.eriksson@telia.com

### Lecture complémentaire

Eriksson, S., 2007, *Electrical machine development: A study of four different machine types from a Swedish perspective*, Universitetsservice US-AB