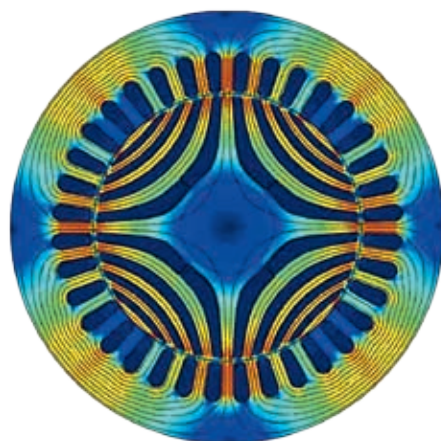




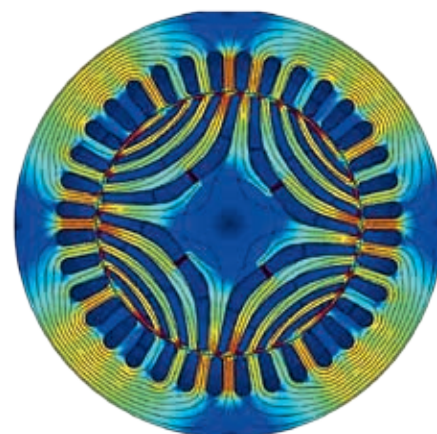
Tour de force

Des moteurs électriques sans terres rares pour des solutions d'entraînement écoénergétiques

FREDDY GYLLENSTEN, PETER ISBERG, ALESSANDRO CASTAGNINI, GIULIO SECONDO, JOUNI IKÄHEIMO, ARI TAMMI – Dans l'industrie, les moteurs électriques à haut rendement énergétique utilisent souvent des aimants permanents contenant des terres rares, comme le néodyme et le dysprosium. Or ces matériaux essentiels à leur fabrication souffrent de la volatilité des prix sur des marchés tendus. Heureusement, les récents progrès des technologies de moteurs commandés en vitesse variable permettent de s'en affranchir. À la solution des moteurs synchrones à réluctance *SynRM* d'ABB, que caractérisent un très haut rendement, une grande fiabilité opérationnelle et une remarquable facilité d'entretien, s'ajoute celle du moteur à aimants en ferrite *SynRM²*, encore plus puissant et écoperformant.



1a Rotor-champ alignés : pas de couple



1b Rotor-champ non alignés : couple dans le sens anti-horaire

Utilisés depuis plus d'un siècle, les moteurs électriques ont accompli d'immenses progrès technologiques qui se sont spectaculairement accélérés ces dernières années pour répondre aux exigences d'efficacité énergétique.

Ces moteurs jouent un rôle important dans la conversion de l'énergie en force motrice, absorbant 28 à 30 % de la production électrique. On comprend dès lors que leur rendement soit pointé du doigt ! En témoignent les exigences minimales de la réglementation MEPS (*Minimum Energy Performance Standard*) définies par la norme harmonisée de classement IE (*International Efficiency*), auxquelles se plient toutes les grandes régions industrielles ; des seuils parfois relevés dans chaque pays pour réduire encore la consommation énergétique et l'empreinte carbone de l'industrie. À terme, quasiment toute la plage de puissances (0,12 à 1000 kW) des moteurs basse tension (50 à 1000 V) directement

couplés au réseau électrique devra être de classe IE3 « premium ». Si cette obligation de haut rendement énergétique ne s'applique pas encore aux moteurs associés à un variateur de fréquence, une classification devrait bientôt voir le jour.

Moteurs asynchrones (MAS)

Le moteur à induction ou « asynchrone » est de loin le plus répandu dans l'industrie. Dépourvu de collecteur ou de balais, il concilie puissance et performance, fiabilité et maintenance allégée. Il ne cesse d'évoluer pour gagner des points de rendement.

Malgré son universalité, le MAS présente quelques inconvénients liés précisément à sa vitesse de rotation asynchrone, génératrice de pertes rotoriques qui dégradent

le rendement, dissipent plus de chaleur et échauffent les roulements, réduisant considérablement leur durée de vie.

Moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP)

Connus de longue date, les moteurs à courant alternatif à aimants n'ont pu vraiment rivaliser avec leurs concurrents asynchrones que dans les années 1980 avec l'apparition d'une nouvelle génération d'aimants permanents à terres rares comme l'alliage néodyme-fer-bore (NdFeB), développé indépendamment en 1982 par

General Motors (États-Unis) et Sumitomo (Japon). Pour autant, l'introduction de ces nouveaux aimants dans les moteurs était tributaire du progrès parallèle de la commande en vitesse variable.

Les aimants sont montés sur le rotor ou lui sont intégrés. À la différence des moteurs asynchrones, le rotor tourne sans « glissement », en synchronisme avec le champ magnétique. D'où une régulation plus précise de la vitesse, un meilleur rendement et une température du rotor et des roulements abaissée. Sans pertes rotoriques, les MSAP subissent

28 à 30 % de l'électricité produite est convertie en énergie mécanique dans les moteurs électriques.

moins de pertes fer ou pertes par effet Joule dans le stator (surtout à cause du courant plus faible) et affichent une courbe de rendement aplatie. Ils chauffent moins que les MAS, prolongeant la durée de vie de l'isolant et des roulements. De même, ils développent plus de couple à taille égale ou un couple identique à taille inférieure.

Ils ont aussi des inconvénients : l'utilisation de métaux rares et coûteux, comme le néodyme et le dysprosium, et un champ magnétique tournant élevé qui complique

Photo p. 34

En simplifiant la structure du rotor de ses nouveaux moteurs synchrones à réductance variable SynRM et SynRM², ABB s'affranchit des terres rares, augmente le rendement comme la densité de puissance et réduit l'encombrement.

La CEI 60034-30-1 définit des seuils de rendement énergétique pour les moteurs alimentés par le réseau (moteurs asynchrones et moteurs capables de démarrer sans convertisseur de fréquence, comme les moteurs à aimants permanents à cage). Par contre, les moteurs synchrones à réluctance variable SynRM et ceux spécialement conçus pour la vitesse variable en sont exclus ; difficile dans ces conditions de spécifier le rendement de ces types de machines. Pour autant, la normalisation évolue et la future CEI 60034-30-2 en tiendra compte. Pour l'heure, la classe de rendement des SynRM d'ABB a été définie suivant les seuils CEI 60034-30-1, même si ces moteurs ont été associés à un variateur pour les essais de classification. Par rapport à une alimentation sinusoïdale, la commande en vitesse variable augmente toujours les pertes pour le même point de fonctionnement car le variateur induit dans le moteur des tensions harmoniques élevées dues à la commutation à modulation de largeur d'impulsions, associées à de plus grandes pertes moteur. En conséquence, les gains énergétiques annoncés pour les moteurs SynRM sont des estimations basses.



Le fonctionnement à froid du moteur SynRM allonge la durée de vie de l'isolant et des roulements, permettant d'espacer les intervalles de lubrification.

la maintenance, argument pénalisant pour un grand moteur industriel.

Dans ces conditions, il se peut que les applications et clients privilégiant aujourd'hui les MSAP cherchent à terme des solutions de remplacement pour parer à l'évolution des prix et du marché.

Sans terres rares

La réponse économique et écologique à ces enjeux tient dans des moteurs affranchis des aimants à terres rares. Dans cette catégorie, ABB dispose aujourd'hui de deux moteurs alliant très haut rendement et densité de puissance élevée, sans les complications liées à ces métaux critiques : le moteur synchrone à réluctance variable SynRM et le moteur synchrone à réluctance avec aimants en ferrite SynRM².

Moteurs synchrones à réluctance pour la vitesse variable

Les moteurs à réluctance variable (MRV) fonctionnent selon un principe connu et apprécié de longue date, mais il a fallu attendre l'essor de la variation électronique de vitesse pour pleinement exploiter leurs très hauts rendements. Le rotor du SynRM est conçu pour produire la réluctance (résistance au flux d'un champ magnétique) la plus faible possible dans une direction, et la plus élevée

dans la direction perpendiculaire → 1 ; il tourne à la même fréquence que le champ statorique, comme dans un MSAP. Présentés à la Foire de Hanovre 2011, les SynRM d'ABB sont des moteurs dédiés à la vitesse variable. La même année, ils remportaient le prix de l'automatisation au Salon SPS/IPC/Drives de Nuremberg (Allemagne).

Plus performants que les asynchrones classiques, les SynRM sont conçus pour offrir un haut rendement ou une densité de puissance supérieure dans un encombrement moindre. Ils se démarquent également par une maintenance allégée, une inertie réduite et une fiabilité exceptionnelle.

Sans aimants ni cage, le rotor est plus simple que celui des MAS ou des MSAP.

Le fonctionnement à basse température d'un SynRM allonge la durée de vie de l'isolant et des roulements, permettant d'espacer les intervalles de lubrification : un atout décisif quand on sait que les défaillances de roulement figurent parmi les premières causes de panne moteur.

À l'exception du rotor, le moteur SynRM d'ABB est de construction identique à son homologue asynchrone ; la fourniture de pièces détachées et la mainte-



Les atouts des moteurs SynRM sont connus de longue date mais il a fallu attendre les progrès de la vitesse variable pour pleinement exploiter leurs très hauts rendements.

nance, tout comme le remplacement d'un MAS existant, s'en trouvent simplifiés.

Les gains en rendement des SynRM d'ABB ont été si rapides que la classifi-

rentiel applicable aux moteurs alimentés par le réseau, qui ne reflète pas convenablement le fonctionnement en vitesse variable, notamment les excellentes performances à charge partielle et les pertes

harmoniques nettement inférieures à celles des MAS pilotés par variateur.

Prolongement de l'offre de moteurs à réluctance variable SynRM, la gamme SynRM² a été lancée à Hanovre en 2014 avec un modèle de 15 kW, premier moteur IE5 d'ABB.

Deux gammes de moteurs à réluctance variable sont au catalogue ABB : SynRM IE4 (5,5 à 315 kW) et SynRM à haut rendement «HO» compact (1,1

cation IE a été largement dépassée → 2. Si l'Union européenne impose au minimum la classe IE3, ABB dispose d'ores et déjà d'une offre SynRM IE4 «super premium». Le potentiel de ces moteurs n'ayant pas encore été totalement exploré, des rendements supérieurs sont tout à fait envisageables.

Rappelons que la classification IE ne concerne que les moteurs fonctionnant en direct sur le réseau; les entraînements à vitesse variable en sont exclus. Dans ces conditions, quand les solutions moteur-variateur d'ABB sont soumises au classement «IEx», c'est selon le réf-

à 350 kW). L'offre se décline en plusieurs associations moteur-variateur → 3, 4 :

- SynRM IE4 + ACS880 pour les industriels et utilisateurs finaux ;
- SynRM IE4/HO + ACS850 pour les constructeurs de machines et équipementiers OEM ;
- SynRM IE4 + ACQ810 pour les métiers de l'eau et de l'assainissement ;
- SynRM IE4/HO + ACH580 pour les applications de chauffage, ventilation et climatisation (CVC).

Les SynRM affichent un haut rendement ou une densité de puissance supérieure tout en occupant moins de place qu'un moteur asynchrone équivalent.

5 Comparaison des performances des moteurs asynchrones, SynRM et SynRM²

Classe de rendement ²	IE2	IE3	IE4	IE5 ³
Données moteur¹ (essais avec variateur de fréquence)				
Modèle ABB	M3BP (160)	M3BP (160)	M3BL (160)	- (160)
Technologie de moteur	MAS	MAS	SynRM	SynRM ²
Puissance utile (kW)	15	15	15	15
Vitesse (tr/min)	1 500	1 500	1 500	1 500
Tension (V)	380	380	380	380
Intensité (A) ⁴	29,9	29,5	31,5	25,2
Facteur de puissance	0,845	0,838	0,763	0,949
Rendement (%)	90,6	92,2	94,7	95,2
Données variateur (tension réseau 400 V)				
Variateurs ABB utilisés lors des essais	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS880-087A
Variateurs ABB préconisés	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A
Commande moteur	DTC	DTC	DTC	DTC
Comparaison avec la solution moteur IE2 et variateur (référence)				
Charges à couple constant (75 %), utilisation 8 585 heures/an en cycle de marche				
Consommation électrique annuelle (kWh)	74 846	73 536	71 924	70 745
Économies d'électricité annuelles (kWh)	0	1 310	2 922	4 100
Économies annuelles sur la facture électrique ⁵ (€)	0	197	440	615
Puissance utile moyenne (kW)	7,6	7,6	7,6	7,6
Rendement moyen (%)	87,1	88,7	90,6	92,2
Amortissement (mois)	-	< 10	< 10	< 11
Charges à couple quadratique, utilisation 8 585 heures/an en cycle de marche				
Consommation électrique annuelle (kWh)	56 386	55 335	54 089	53 275
Économies d'électricité annuelles (kWh)	0	1 050	2 296	3 110
Économies annuelles sur la facture électrique ⁵ (€)	0	158	345	467
Puissance utile moyenne (kW)	5,7	5,7	5,7	5,7
Rendement moyen (%)	86,7	88,4	90,4	91,8
Amortissement (mois)	-	< 12	< 13	< 15

1 Essais au point de fonctionnement nominal

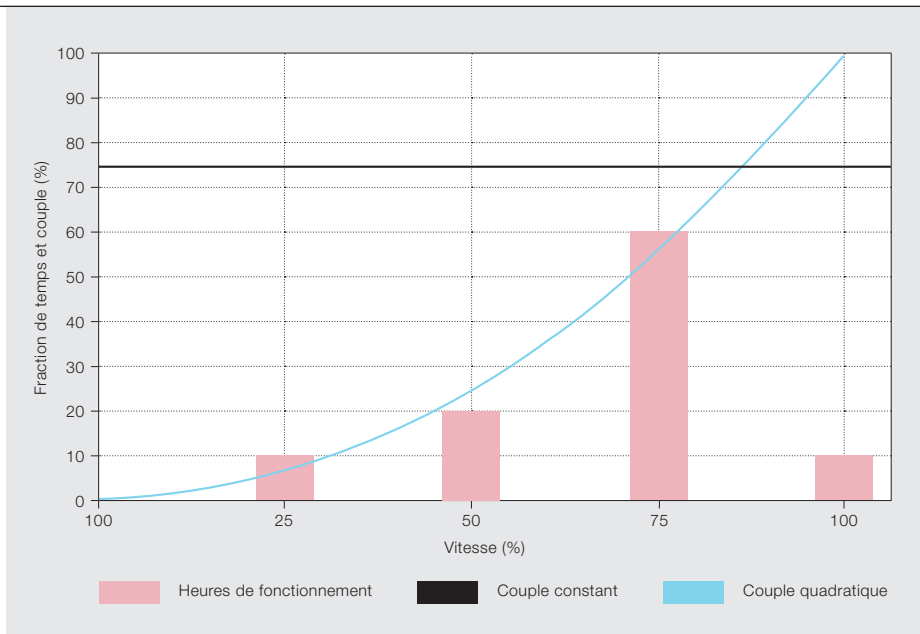
2 Seuils normalisés NF EN CEI 60034-30-1

3 En attente de spécification CEI (réduction des pertes estimée à 20 % par rapport à la classe IE4)

4 Valeurs mesurées mises à l'échelle pour harmonisation avec une tension égale de 380 V (pour comparaison seulement)

5 Au prix du kilowattheure industriel d'environ 0,15 € en Allemagne

5a Données d'essais



5b Bases de calcul de la consommation énergétique

Nous l'avons dit, le rendement énergétique est aujourd'hui un critère déterminant pour les fabricants de moteurs et de systèmes motorisés. La réglementation européenne, américaine et asiatique tendant à se durcir, non seulement pour les moteurs mais aussi pour le système auquel ils s'intègrent, ABB anticipe le mouvement avec sa technologie SynRM².

SynRM²

Prolongement de l'offre SynRM, la gamme SynRM² a été lancée à Hanovre en 2014 avec un modèle de 15 kW à hauteur d'axe CEI de 160 mm (« SH160 »), premier démonstrateur ABB de sa technologie de moteurs IE5. Cette classe de rendement, qui n'est pas encore définie par la CEI 60034-30-1, annonce une

Ce moteur se singularise par l'emploi d'aimants en ferrite (oxyde de fer Fe₂O₃), matériau normalement moins coûteux et moins vulnérable aux aléas d'approvisionnement que les terres rares ; on gagne ainsi durablement sur les deux tableaux de l'économie et de l'écologie.

Par le passé, les ferrites étaient utilisées dans des applications de faible puissance. Dans l'industrie, un moteur à base de ferrite ne pouvait pas à lui seul rivaliser avec un MSAP. Pour développer assez de puissance, un moteur doit avoir une réluctance dominante, assistée par des aimants en ferrite. Les progrès rapides et l'« électronique » croissante des variateurs de fréquence permettent aujourd'hui de maîtriser le pilotage et le

fonctionnement de ces moteurs, à l'instar des SynRM.

Le SynRM² IE5 vise les clients avides de rendement et de densité de puissance. De surcroît, ses niveaux de facteur de puissance, identiques à ceux

des MSAP, et ses excellentes propriétés d'affaiblissement du champ autorisent de nouvelles solutions moteur-variateur plus compactes. ABB travaille sur une gamme SynRM² de 0,55 à 15 kW, notamment pour la CVC. Cette technologie

Après dix années de service, le coût à l'achat ne représente qu'environ 2 à 3 % de la facture électrique, tous systèmes moteur-variateur confondus.

diminution des pertes de 20 % par rapport à l'IE4, typique des baisses constatées au passage d'un niveau réglementaire à l'autre.

ABB est en mesure de répondre aux exigences des moteurs directement couplés au réseau avec le dernier-né de sa gamme de moteurs à réluctance, DOLSynRM, présenté à la Foire de Hanovre 2015.

avantageuse est aussi proposée aux grands OEM d'autres segments applicatifs.

Comparatif des performances

Les classes de rendement IE normalisées CEI 60034-30-1 [2] sont spécifiées au point de fonctionnement nominal (c'est-à-dire à pleine charge et à vitesse maximale) des moteurs directement alimentés par le réseau. Naturellement, les valeurs de rendement des moteurs alimentés par des variateurs ne sont pas uniquement tirées de cette classification, puisque les performances à charge partielle et à vitesse variable, de même que les pertes harmoniques dans les moteurs dues aux convertisseurs de fréquence et les pertes dans ces derniers ne sont pas prises en compte. C'est pourquoi les rendements d'un système utilisant différents types de moteur et classes de rendement sont caractérisés lors d'essais, qui mettent en œuvre deux profils de charge typiques des applications industrielles à couple constant (convoyage, par exemple) et quadratique (pompage et ventilation) → 5b.

Les économies d'énergie sont également calculées sur la base d'un ensemble moteur asynchrone IE2-variateur installé en Allemagne, avec un kilowattheure industriel d'environ 15 centimes d'euros. Sachant que la facture énergétique représente l'essentiel du coût global (achat plus exploitation) d'un moteur durant son activité, la solution à haut

rendement est amortie en moins de 12 mois pour l'asynchrone IE3, 13 pour le SynRM IE4 et 15 pour le SynRM² IE5 → 5a, tous trois assistés du variateur ACS880-032A d'ABB. Au terme de cette période relativement courte, les systèmes à rendement élevé permettent de réaliser des économies durant tout le cycle de vie : après dix années de service, le prix d'achat de toutes les associations moteur-variateur du tableau ne représente qu'environ 2 à 3 % de la note électrique.

Exemple à l'appui

Au Royaume-Uni, les services de l'eau comptent parmi les activités les plus éco-énergétiques du pays. Malgré une dépense électrique annuelle totalisant quelque 13 millions de dollars, dont 90 % destinés au pompage, la station de Somerford de la société South Staffordshire Water ne fait pas exception. Pour accroître l'efficacité énergétique de ses installations, l'industriel a décidé de remplacer un moteur asynchrone de 115 kW âgé de 20 ans (piloté par un variateur ACS800 d'ABB plus moderne) par une solution associant un nouveau SynRM IE4 de 110 kW et un ACS850. Le système entraîne une pompe de forage qui débite 2,5 millions de litres par jour. Le client voulait à la fois améliorer le rendement et abaisser les coûts de maintenance en déployant le dernier cri de la technologie moteur-variateur. Les résultats ont largement dépassé ses attentes : économie d'énergie de 6 %, réduction de 58 % des points chauds sur la carcasse moteur, baisse de 28 % de la température des roulements côté commande et réduction de 75 % des nuisances sonores.

L'innovation en marche

L'offre de moteurs ABB satisfait à tous les besoins, usages et impératifs de l'industrie. Elle s'enrichit aujourd'hui de nouveaux modèles synchrones à réluctance offrant plus de puissance, de rendement et de facilité de maintenance, dans un encombrement réduit. Les vertus écologiques des moteurs SynRM et SynRM² ne se limitent pas aux économies d'énergie ; elles résident aussi dans le recours à des procédés de fabrication classiques et à des matériaux courants, à faible empreinte environnementale. ABB est également prêt à répondre aux exigences des moteurs directement couplés au réseau avec le dernier-né de la

gamme des moteurs à réluctance, DOLSynRM, présenté à la Foire de Hanovre 2015. Cette technologie associant une cage spéciale (semblable à celle des MAS) et une structure SynRM est encore à l'étude mais elle a déjà prouvé que l'on pouvait atteindre des rendements IE4, et même IE5 moyennant une optimisation soignée, sans utiliser d'aimants à terres rares ou d'autres matériaux spéciaux. Cette conception ultramoderne de moteur synchrone à réluctance est au fondement de la sobriété, de la robustesse et de la longévité des moteurs électriques du futur.

Freddy Gyllensten

Peter Isberg

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Västerås (Suède)
freddy.gyllensten@se.abb.com
peter.j.isberg@se.abb.com

Alessandro Castagnini

Giulio Secondo

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vittuone (Italie)
alessandro.castagnini@it.abb.com
giulio.secondo@it.abb.com

Jouni Ikäheimo

Ari Tammi

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vaasa (Finlande)
jouni.ikaheimo@fi.abb.com
ari.tammi@fi.abb.com

Bibliographie

- [1] Meza, M., « Industrial LV Motors & Drives: A Global Market Update – January 2014, IHS », communication *Motor & Drive Systems 2014 – Advancements in Motion Control and Power Electronic Technology*, Orlando (Floride, États-Unis), 2014.
- [2] Norme NF EN CEI 60034-30-1, *Machines électriques tournantes – Partie 30-1 : classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau*, 2014.