

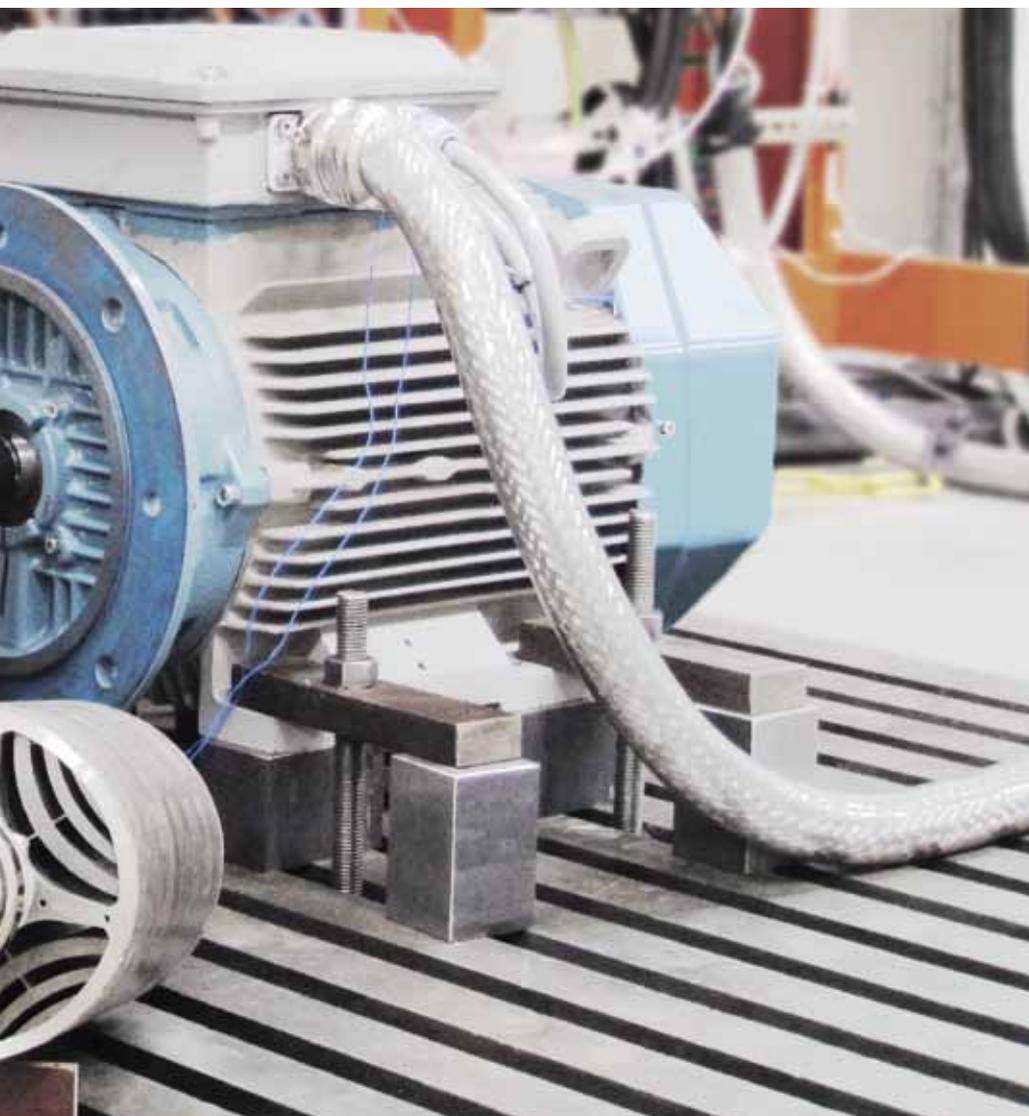


Régime moteur

Les moteurs synchrones commandés en vitesse variable musclent le bilan énergétique des applications industrielles

HEINZ LENDENMANN, REZA R. MOGHADDAM, ARI TAMMI, LARS-ERIK THAND – Dans l'industrie, les moteurs électriques absorbent à eux seuls 60 à 65 % de l'électricité consommée. Augmenter leur rendement est une des pistes suivies pour optimiser leurs performances et améliorer le bilan énergétique des usines. Leur commande en vitesse variable constitue également une source majeure d'économies d'énergie ; aujourd'hui, 30 à 40 % des nouvelles installations de moteurs adoptent cette technologie. Enfin, la nécessité de pérenniser les

investissements et les équipements productifs impose d'accroître la fiabilité et la durée de vie des moteurs. En simplifiant la structure du rotor de ses moteurs synchrones à réluctance, ABB supprime les pertes rotoriques, augmente leur rendement et réduit leur encombrement. L'obtention des valeurs normalisées de puissance et de couple avec un échauffement limité de classe A (60 K) améliore la durée de vie de l'isolant, permettant de prolonger celle des roulements ou d'espacer les intervalles de lubrification.



Pouvant fonctionner à des vitesses supérieures, les moteurs synchrones à réluctance permettent d'éliminer certains organes mécaniques de transmission comme les réducteurs.

Les moteurs électriques sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles aux exigences souvent analogues : rendement élevé, longévité, maintenance allégée et fiabilité accrue. Le faible encombrement des moteurs synchrones à réluctance ABB permet aux constructeurs de machines de concevoir des équipements plus compacts, plus légers et plus efficaces. En outre, pouvant fonctionner à des vitesses supérieures, ces moteurs permettent de s'affranchir de certains organes mécaniques de transmission (notamment les réducteurs), ce qui favorise leur intégration dans les machines, une revendication de plus en plus forte des constructeurs.

Pour proposer un moteur en phase avec les besoins du marché et parfaitement adapté à la commande en vitesse variable, ABB a remis à plat tous ses choix technologiques. Deux critères offraient des perspectives de simplification des moteurs et de gain de rendement : d'une part, le démarrage d'un

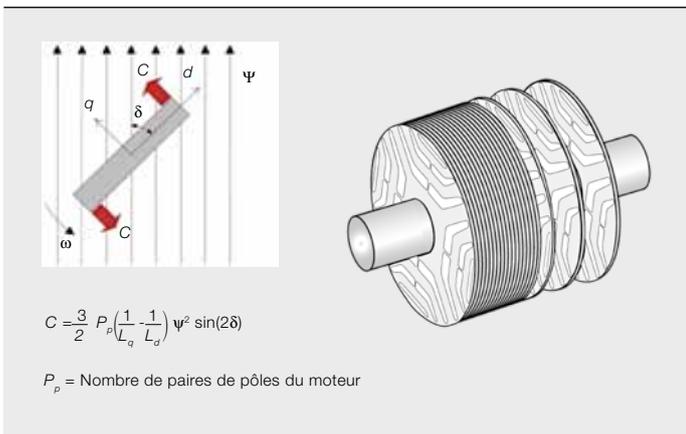
moteur alimenté par un variateur de vitesse est très différent de celui d'un moteur directement couplé au réseau électrique et, d'autre part, la modification des conditions aux limites. Les avantages des moteurs synchrones sont bien connus. En effet, un moteur synchrone avec un rotor 4 pôles alimenté à 50 Hz est en synchronisme avec cette alimentation très précisément à 1 500 tr/min alors qu'un moteur asynchrone équivalent de 30 kW, par exemple, ne tourne qu'à 1 475 tr/min du fait des pertes par glissement. Dans les moteurs asynchrones modernes à cage en court-circuit, les pertes rotoriques représentent 20 à 35% des pertes totales. La rotation en synchronisme avec le réseau permet donc d'en supprimer une grosse partie.

La suppression des pertes par glissement induit un gain de rendement de l'ordre de 0,6% dans le cas d'un moteur de 220 kW et jusqu'à 8% pour un moteur de 3 kW. Parallèlement, elle permet d'augmenter de 20 à 40% la densité de puissance et de

couple pour la même classe d'isolation. Il existe différents types de moteur synchrone : moteur à excitation bobinée sans balais, moteur à aimants permanents, moteur à réluctance. Fonctionnant selon le principe de la réluctance magnétique, le rotor de ce dernier est dépourvu de cage en court-circuit (cas du moteur asynchrone), d'aimants permanents et d'excitation bobinée.

Moteur synchrone à réluctance

La réluctance magnétique est l'équivalent magnétique de la résistance dans les circuits électriques. Le rotor consiste en un sens de la résistance magnétique la plus faible possible d et un sens perpendiculaire q avec une réluctance magnétique élevée ou une bonne « isolation » magnétique → 1. Le moteur produit un couple lorsque le rotor tente de s'aligner sur le champ magnétique du stator. La valeur de ce couple est directement fonction du rapport de saillance, soit le rapport d'inductance entre les deux sens magnétiques du rotor.



Le moteur synchrone à réductance a été inventé en 1923. Ne pouvant être démarré directement sur le réseau, il était inadapté à l'usage industriel. Aujourd'hui, son alimentation par un variateur de vitesse a permis de lever cet obstacle → 2.

La découverte des aimants NdFeB date de 1982. La technologie innovante des moteurs à aimants permanents fut adaptée aux servomoteurs; ils trouvent aujourd'hui leur place dans de nombreuses applications industrielles spéciales, notamment sous la forme de moteurs couplés à basses vitesses sans réducteurs [1]. À nouveau, le moteur synchrone à réductance, pourtant de conception plus simple, fut relégué au second plan!

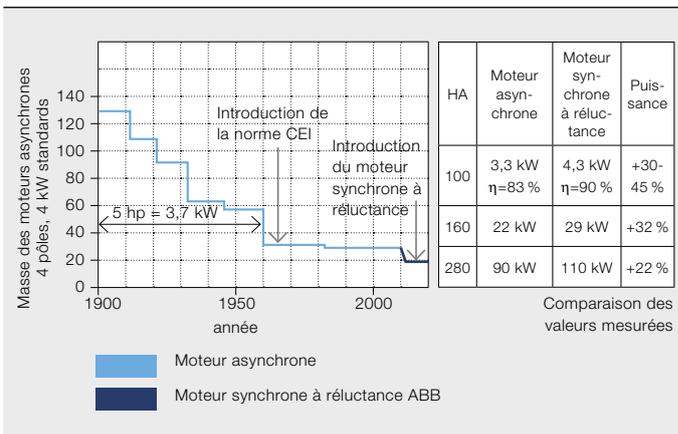
Parallèlement, des travaux plus anciens publiés sur les moteurs synchrones à réductance ne parvinrent pas tous à démontrer la supériorité de leurs performances en termes de couple ou de rendement par rapport aux moteurs asynchrones, comme le laissaient présager les calculs. Les experts et le monde académique s'entendent sur ce point pour expliquer le peu de succès du moteur synchrone à réductance. Il semblerait que les calculs initiaux résultaient d'une commande électronique sous-optimisée. En effet, certaines publications faisaient état de résultats très encourageants avec un examen très approfondi des différentes conceptions électromagnétiques [2], [3]. Il faut préciser que le moteur synchrone à réductance se distingue du moteur à réductance commuté, ou moteur pas à pas, par un concept d'enroulement statorique totalement différent et des ondes de courant non sinusoïdales; un moteur souvent considéré comme inadapté aux applications industrielles parce que bruyant. Inconvénient évoqué du moteur synchrone à réductance par rapport au moteur à aimants permanents :

la nécessité d'un niveau de courant plus élevé pour fournir le même couple, car le rotor doit être magnétisé au travers du stator. Toutefois, le facteur de puissance vu côté réseau est déterminé par le convertisseur de puissance et est proche de l'unité à tous les régimes de marche, même pour le moteur synchrone à réductance.

Un moteur commandé en vitesse variable pour l'industrie

Dans le moteur synchrone à réductance ABB à commande électronique, le courant moteur, proportionnel à l'inverse du facteur de puissance et du rendement ($\propto 1/(\eta \cdot \cos(\rho))$) est en réalité inférieur à celui d'un petit moteur asynchrone aux mêmes valeurs de couple et de vitesse. Cela résulte, essentiellement, du rendement nettement plus élevé. Dans les gros moteurs uniquement, le courant du convertisseur est plus élevé que dans un moteur asynchrone à la même valeur de couple. En général, le moteur synchrone à réductance ABB est piloté par un variateur de même calibre (ACS 850, par exemple) que le moteur asynchrone aux mêmes niveaux de puissance et de couple, mais avec une densité de puissance et un rendement supérieurs à ce dernier. Ce gain de rendement induit des économies d'énergie pratiquement identiques au niveau du système d'entraînement.

Autre avantage majeur du moteur synchrone à réductance ABB: le rotor de structure plus simple qui, sans aimants ni cage, est plus robuste que celui des moteurs asynchrones ou à aimants permanents. De plus, il n'y a aucun risque de

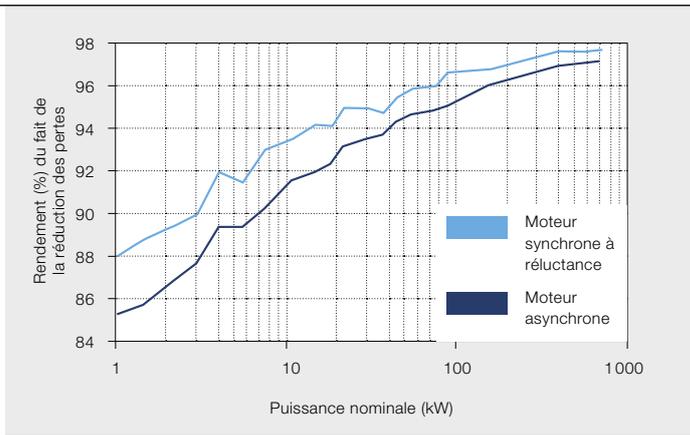
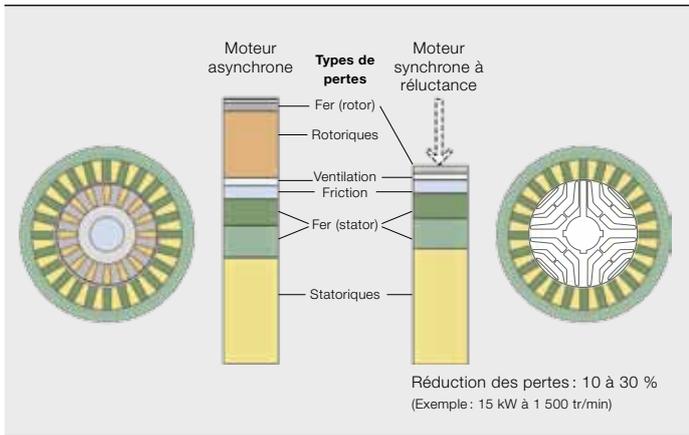


perte constante de performance du fait de la démagnétisation potentielle en cas de défaillance ou d'échauffement anormal. Le moteur est fonctionnellement sûr car, sans aimants, aucune tension de force contre-électromotrice n'est induite et le convertisseur ne doit plus être protégé des surtensions. Enfin, les terres rares utilisées pour les aimants permanents sont des matériaux relativement chers et à la disponibilité limitée sur certains marchés, du fait de la concentration géographique des sources d'approvisionnement.

La suppression de la plupart des pertes rotoriques et la structure plus simple du rotor confèrent un certain nombre d'avantages à ce moteur et à la machine entraînée → 3. Il peut en effet fonctionner aux puissances normalisées CEI pour une hauteur d'axe donnée. Dans ce cas, le gain de rendement de l'entraînement à vitesse variable peut dépasser 5% pour les moteurs de puissance unitaire et approcher 0,5% pour les plus gros moteurs (hauteur d'axe 315). Par conséquent, alors qu'un moteur asynchrone fonctionnerait à un échauffement de classe F (105 K), le moteur synchrone à réductance ABB ne fonctionnerait qu'à un échauffement de classe A (60 K) → 4. À titre

Pour les petits moteurs de 3 ou 4 kW, le gain de puissance peut atteindre 60 % pour le même échauffement.

de comparaison, prenons un compresseur tournant à 4 500 tr/min : lorsqu'il fonctionne à un échauffement réel de classe H (125 K), le moteur synchrone à réductance ABB



affiche des températures de roulement encore inférieures à celles du plus gros moteur asynchrone fonctionnant à un échauffement de classe F (105 K). C'est pourquoi ce moteur était aussi appelé *CoolMotor* → 5. Ce fonctionnement à basse température améliore la durée de vie de l'isolant du moteur et, donc, celle des roulements ou autorise des intervalles de lubrification plus longs. Les organes de roulement des moteurs exigent, en particulier, un entretien régulier ; selon certaines études, leur défaillance est à l'origine de près de 70 % des arrêts intempestifs des moteurs. Le moindre échauffement des roulements a un impact direct sur les intervalles de lubrification, la simplicité de maintenance et la fiabilité. Même si un roulement se dégrade, l'absence de forces magnétiques (contrairement à un moteur à aimants permanents) fait que son remplacement est aussi simple que celui d'un moteur asynchrone.

La technologie du moteur synchrone à réductance autorise une bonne régulation du couple aux vitesses plus élevées, tout en conservant un fonctionnement avec échauffement traditionnel, souvent de classe B ou F. Les pertes rotoriques étant difficiles à dissiper, comparées aux pertes statoriques, leur quasi-suppression a un impact particulièrement important sur les performances en couple. Pour les petits moteurs de 3 ou 4 kW, le gain de puissance par rapport à un moteur asynchrone peut atteindre 60 % pour le même échauffement. Dans le cas d'un moteur de 60 kW, ce gain tourne autour de 40 % et de 20 % pour un moteur de 220 kW. Le plus souvent, la même puissance peut être obtenue avec un moteur d'une, voire deux hauteurs d'axe inférieures à celle d'un moteur asynchrone. La réduction d'encombrement s'apprécie dans toutes les applications pouvant tirer profit de moteurs plus petits ou de calibres

inférieurs. Autre avantage : le moindre transfert thermique sur les équipements à proximité, en particulier dans les armoires fermées. Même à cette densité de puissance très accrue, l'élimination des pertes rotoriques diminue les calories transmises par l'arbre moteur, réduisant la température des roulements, en particulier côté commande. Si l'on compare un moteur synchrone à réductance ABB de 6 kW à un moteur asynchrone de même puissance, cette réduction peut atteindre 30 K, avec une moyenne de 15 à 20 K sur la plage complète. L'impact est particulièrement prononcé aux vitesses élevées de même qu'en fonctionnement aux classes d'échauffement supérieures. Le rendement élevé est conservé même à cette puissance supérieure. De surcroît, le moteur ABB affiche une courbe de rendement à charge partielle exceptionnelle, typique des machines synchrones et très appréciée pour la commande en vitesse variable des ventilateurs et des pompes.

Enfin, l'inertie de ces rotors est réduite de 30 à 50 % du fait de l'absence de cage et d'aimants. Dans les applications très dynamiques comme l'entraînement d'engins de levage, cette réduction offre des avantages supplémentaires en termes d'efficacité énergétique et de cycles de levage en raison du raccourcissement des temps de rampe de vitesse.

Caractéristiques constructives et fiabilité du rotor

La plupart des éléments du système d'entraînement ABB à moteur synchrone à réductance est issue de technologies existantes. Le carter, la boîte à bornes, le stator, la conception et la technologie du bobinage ainsi que les types de roulement sont identiques à ceux des moteurs asynchrones. Les courants triphasés étant sinusoïdaux,

Le fonctionnement à basse température améliore la durée de vie de l'isolant du moteur et, donc, celle des roulements, ou autorise des intervalles de lubrification plus longs.

La température ambiante d'un moteur est celle de son milieu environnant lorsqu'il est à l'arrêt et complètement refroidi.

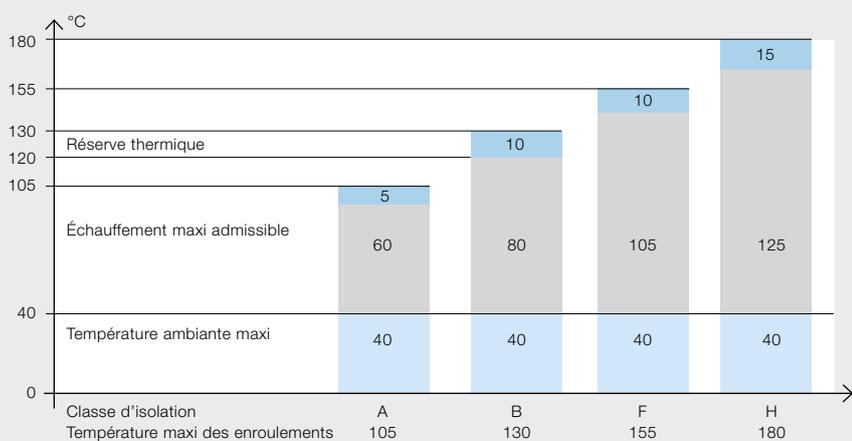
L'échauffement est l'élévation de la température interne d'un moteur fonctionnant à pleine charge : c'est l'écart entre sa température au démarrage et la température stabilisée à chaud.

Cet échauffement est mesuré par la méthode normalisée de variation de résistance des enroulements. Il s'agit d'une moyenne de la variation de température de l'enroulement complet, y compris les conducteurs du moteur, les têtes de bobines et les fils se trouvant au fond des encoches du stator. Sachant que certains points sont plus chauds que d'autres, un facteur de marge utilise la température moyenne pour indiquer la température probable au point le plus chaud. C'est ce qu'on appelle la réserve thermique.

Les classes d'isolation regroupent les isolants selon leur résistance au vieillissement thermique et à la défaillance. On distingue 4 classes d'isolation (A, B, F et H). Pour chacune d'elles, la capacité thermique désigne la température maximale à laquelle l'isolant peut fonctionner avec une durée de vie moyenne de 20 000 heures.

En faisant fonctionner un moteur à une valeur d'échauffement inférieure à celle admise par la classe d'isolation, on modifie sa capacité thermique. Il peut alors résister à des températures supérieures aux températures ambiantes normales. Ce faisant, on prolonge sa durée de vie.

Le graphique ci-dessous spécifie les températures nominales, les échauffements admissibles ainsi que les réserves thermiques pour des moteurs standard de différentes classes d'isolation.



Les performances de l'entraînement dans différentes applications (pompage, ventilation, compression, exploitation minière et levage) furent vérifiées lors d'essais de vieillissement très accéléré.

on a recours à la même gamme de variateurs pour commander ce type de moteur ; leur logiciel doit uniquement être optimisé et prendre en compte ce nouveau moteur. En réalité, seul le rotor est différent.

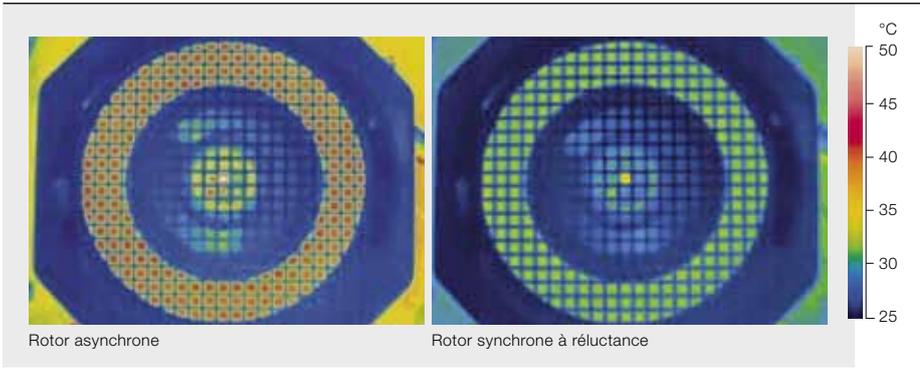
Moins complexe que celui des moteurs asynchrones et à aimants permanents, le rotor est composé de tôles d'acier électriques feuilletées et calées sur l'arbre. Sa complexité réside, en fait, dans sa conception qui a nécessité de très nombreuses simulations par éléments finis pour déterminer ses propriétés électriques et mécaniques. Parmi les choix prioritaires, citons le nombre de sections magnétiques ainsi que la forme exacte de l'entrefer, qui déterminent le couple produit et le courant d'aimantation du moteur. Il était capital de minimiser ce courant réactif si l'on voulait conserver un calibre de variateur avantageux. Le positionnement précis des sections le long de la périphérie contribue pour beaucoup à une bonne régulation du couple pendant la rotation du moteur et, donc, au maintien d'un niveau sonore comparable à celui des moteurs traditionnels. Les nombreux efforts d'optimisation au moyen de simulations par éléments finis et d'algorithmes analytiques et génétiques ont permis de concevoir une configuration 4 pôles idéale pour la plage de vitesse complète jusqu'à 6 000 tr/min.

Pour valider la fiabilité de ce nouveau rotor, des essais poussés ont accompagné le développement du système d'entraînement (cf. photo p. 56-57). Ses performances dans différentes applications (pompage, ventilation, compression, exploitation minière et levage) furent vérifiées lors d'essais de vieillissement très accéléré avec des cycles d'essais spécifiques à ce moteur pour valider sa robustesse sur sa durée de vie complète. Ainsi, par exemple, un essai avec arrêts et démarrages répétés du moteur à des vitesses supérieures aux valeurs maximales des catalogues fut mené avec succès. Le nombre de cycles et les conditions de surcharge imposées correspondaient à plus de 20 ans d'exploitation en régime nominal.

Commande en vitesse variable

La technologie standard ABB de contrôle direct de couple DTC des moteurs asynchrones et à aimants permanents a fait l'objet de développements supplémentaires pour inclure les moteurs synchrones à réluctance. Malgré de nombreuses similitudes avec le moteur à aimants perma-

5 Mesure des températures par imagerie thermique



6 Spécification du système d'entraînement (moteur + variateur)

Performances du nouveau système d'entraînement à vitesse variable (spécifiées pour 3 hauteurs d'axe normalisées)

Moteur, échauffement classe F								Variateur, 400 V				
Hauteur d'axe mm	PN kW	nN tr/min	PN kW	nmaxi tr/min	Rend. % (1/1)	CN Nm	Masse kg	Code type ACS-850-04	N A	Bruit dBA	Taille	Masse kg
100	4	1500	4	2250	84,3	25	22	010A-5	10,5	39	B	5
100	7,5	3000	7,5	4500	88,7	23	22	018A-5	18	39	B	5
100	13	4500	13	6000	90,5	27	22	030A-5	30	63	C	16
100	17,5	6000	17,5	6000	91,3	27	22	044A-5	44	71	C	16
160	26	1500	26	2250	91,7	165	180	061A-5	61	70	D	23
160	50	3000	50	4500	94,0	159	180	144A-5	144	65	E0	35
160	70	4500	70	5300	94,6	148	180	166A-5	166	65	E	67
280	110	1500	110	1800	96,0	700	640	260A-5	260	65	E	67
280	130	1800	130	2200	95,9	689	640	290A-5	290	65	E	67

Pour les spécifications complètes, rendez-vous sur www.abb.com/motors&generators.

ments, à l'exception du flux rotor nul, d'importants efforts ont été consentis pour optimiser la production de couple avec une fonction innovante de maximisation du

L'installation et l'exploitation du variateur électronique de vitesse avec ce type de moteur se font comme pour les moteurs asynchrones et à aimants permanents.

Autre avantage : le moindre transfert thermique sur les équipements à proximité, en particulier dans les armoires fermées.

couple par ampère qui garantit le maintien du courant minimal du variateur à chaque point de fonctionnement. Le variateur assure également la commande au régime de défluxage (plage de vitesse au-delà de la vitesse nominale). Une vitesse maximale pouvant atteindre 1,5 fois la valeur nominale est possible dans la majeure partie de la plage de fonctionnement du moteur. Cette possibilité revêt une importance particulière pour ABB car elle permet à son moteur synchrone à réluctance d'atteindre des densités de couple sensiblement supérieures à celles des moteurs asynchrones.

précision en régulation de vitesse et la dynamique en régulation de couple. Le variateur peut même être dimensionné pour des valeurs de surcharge et des cycles de charge spéciaux.

Des performances au rendez-vous

Comme le moteur à aimants permanents, le moteur synchrone à réluctance qu'ABB vient de développer peut uniquement être alimenté par un variateur; les catalogues fournissent donc des tableaux spécifiant les associations moteur/variateur pour différentes puissances et vitesses → 6.

Les données moteur sont identifiées et paramétrées à partir des valeurs de la plaque signalétique. De même, aucun capteur de vitesse ne doit être monté sur l'arbre moteur pour conserver la

Ce nouveau moteur répond aux besoins de puissance, de rendement, de compacité et de simplicité de maintenance du marché. Avec une densité de puissance de 20 à 40% supérieure à celle d'un moteur asynchrone, un rotor sans cage en court-circuit ni aimants permanents et un échauffement inférieur, ABB propose une solution d'entraînement à vitesse variable moins encombrante avec un rendement global supérieur. Les fonctions spéciales ajoutées par ABB à son variateur standard améliorent le bilan énergétique et la puissance des systèmes d'entraînement à moteurs synchrones à réluctance, désormais comparables à ceux d'un entraînement à moteur à aimants permanents, mais avec un moteur plus simple et plus robuste. L'utilisateur gagne donc sur les deux tableaux.

Heinz Lendenmann

Reza Rajabi Moghaddam

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

heinz.lendenmann@se.abb.com

reza.r.moghaddam@se.abb.com

Ari Tammi

ABB Discrete Automation and Motion,

Motors & Generators

Vaasa (Finlande)

ari.tammi@fi.abb.com

Lars-Erik Thand

ABB Discrete Automation and Motion,

Motors & Generators

Västerås (Suède)

lars-erik.thand@se.abb.com

Bibliographie

- [1] Haikola, M., « Effets démultiplicateurs – La solution *Direct Drive* d'ABB découple les performances des procédés industriels les plus contraignants au monde », *Revue ABB*, 4/2009, p. 12–15.
- [2] Bloglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., Vagati, A., « Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance », *Conf. Rec 40th IEEE IAS ANNU. Meeting*, vol. 1, p. 474–479, octobre 2005.
- [3] Germishuizen, J. J., Van der Merwe, F. S., Van der Westhuizen, K., Kamper, M. J., « Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units », *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting*, vol. 1, p. 316–323, 8–12 octobre 2000.

Photo p. 56–57

Essais de vieillissement très accéléré sur moteurs commandés en vitesse variable.