Agir sur le bobinage pour réduire les pertes au rotor

Autor(en): **Besson, Christophe / Nikkola, Petri / Jaccard, Matthieu**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **102 (2011)**

Heft 6

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856820

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Agir sur le bobinage pour réduire les pertes au rotor

Pertes rotoriques et échauffements dans les moteurs synchrones à aimants permanents

L'augmentation des performances, et notamment de la vitesse, a montré que les pertes rotoriques dans les moteurs synchrones à aimants peuvent devenir importantes et causer des dégâts suite à un échauffement excessif. Une meilleure connaissance de ces pertes et de ces échauffements, selon le mode de fonctionnement, permet de proposer des solutions afin d'augmenter la fiabilité, les performances de couple, de vitesse et le rendement des moteurs.

Christophe Besson, Petri Nikkola, Matthieu Jaccard

Le moteur synchrone à aimants permanents (figure 1), appelé aussi moteur brushless, présente une puissance volumique élevée et un bon rendement. On le trouve abondamment dans le secteur des machines-outils, où il est apprécié pour les opérations de fraisage (fort couple, petite vitesse) et de tournage (faible couple, grande vitesse) ainsi que pour les applications nécessitant des vitesses extrêmes, de l'ordre de 200 000 à 600 000 t/min, pour l'entraînement de broches. Dans le domaine de la robotique, les variantes à forte dynamique, associées à un capteur de position, sont très fréquentes pour les déplacements rapides et le positionnement précis.

Le moteur synchrone à aimants est aussi employé dans des applications en très grandes séries. Dans le secteur automobile, on le trouve parfois comme moteur de traction et comme alternateur dans certains véhicules. Les équipements informatiques sont munis de nombreux « moteur brushless » (disques durs, lecteurs DVD, ventilateurs, etc.) L'utilisation en génératrice pour la récupération d'énergie lors de freinage, ou pour la production d'électricité avec des éoliennes ou des petites turbines hydrauliques, est également de plus en plus développée.

Le stator est constitué d'un empilage de tôles ferromagnétiques avec un enroulement généralement triphasé qui produit un champ magnétique tournant pour entraîner le rotor avec ses aimants. Lors de son fonctionnement, le moteur réalise une conversion électromécanique d'énergie moyennant certaines pertes par effet Joule, par hystérèse [X] et par courants de Foucault [Y], puis par frottement et ventilation. Les pertes dans les éléments rotoriques des moteurs synchrones à aimants ont souvent été négligées dans le passé. Contrairement au cas du moteur asynchrone, l'onde fondamentale du champ magnétique produit par le stator tourne à la même vitesse que le rotor. Elle n'y induit donc pas de variation de flux.

L'augmentation des performances, et notamment de la vitesse, a montré que les pertes rotoriques peuvent devenir importantes et causer des dégâts suite à l'échauffement, comme une démagnétisation ou un décollage des aimants. Lors du fonctionnement, la température et les pertes du rotor sont particulièrement difficiles à mesurer, à contrôler et à évacuer. L'échauffement transmis par conduction aux paliers et à la charge peut devenir inacceptable dans certaines applications.

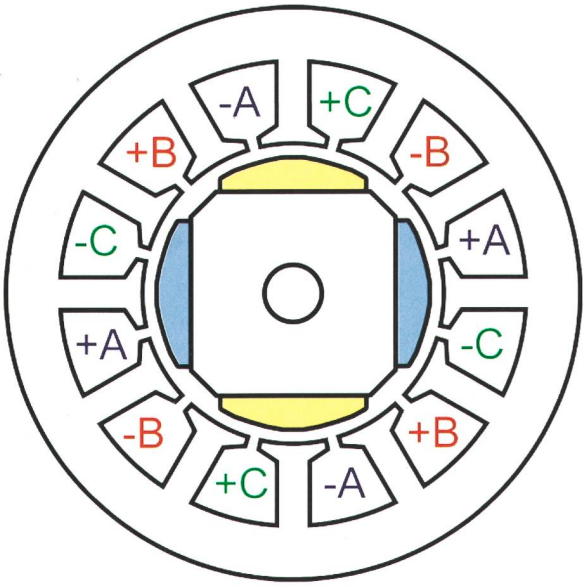


Figure 1 Moteur synchrone à aimants permanents (Brushless).

Pertes dans le rotor des moteurs brushless

Les pertes rotoriques sont dues aux variations de champ magnétique à l'intérieur des matériaux. Les pertes par hystérèse et les pertes par courants de Foucault, dans les éléments rotoriques, produisent un échauffement qui est d'autant plus important que la vitesse augmente. Bien qu'elles soient généralement relativement faibles par rapport aux pertes Joule et aux pertes fer statoriques, dans certains cas de

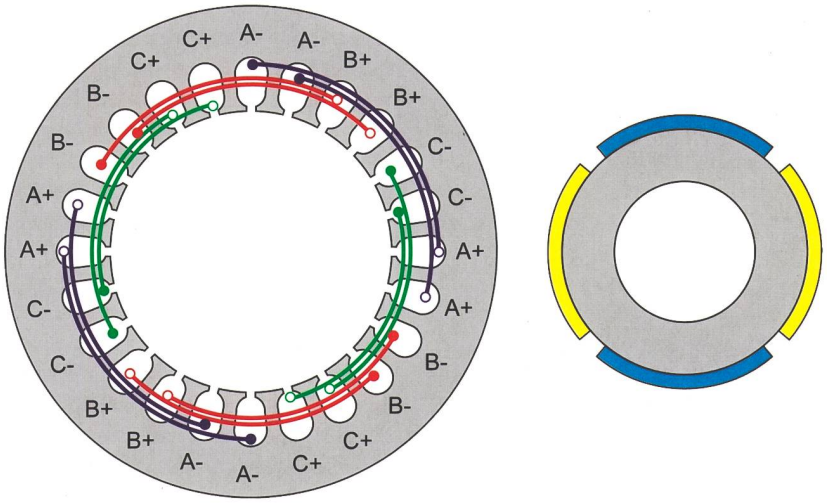


Figure 2 Bobinage réparti (24 dents et 2 paires de pôles).

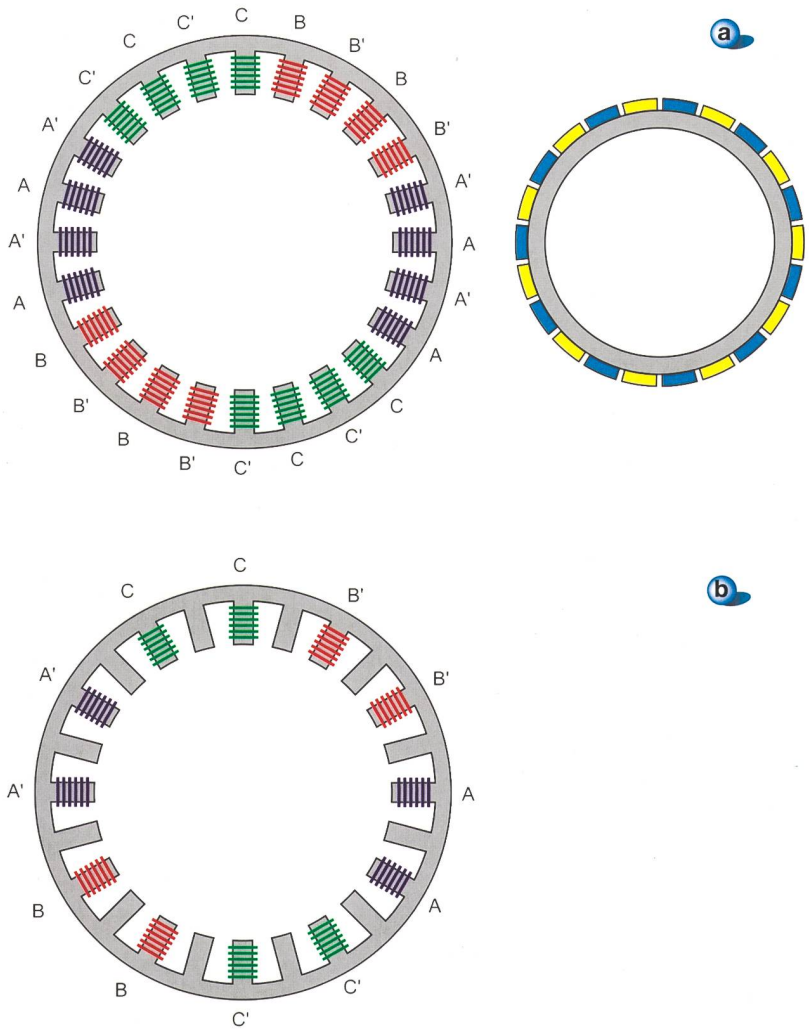


Figure 3 Bobinages concentriques (24 dents et 11 paires de pôles)
(a) bobine sur chaque dent (« all teeth »)
(b) bobine une dent sur deux (« alternate »)

fonctionnement, les pertes rotoriques peuvent avoir des effets dommageables. Ces dernières sont principalement dues aux phénomènes suivants :

- lors de la rotation, les encoches statoriques produisent une variation de champ dans les éléments rotoriques ;
- les harmoniques spatiales de la force magnétomotrice statorique (f.m.m) ne tournent pas à la même vitesse que le rotor ;
- les convertisseurs électroniques produisent des harmoniques temporelles sur les courants d'alimentation qui engendrent des variations de champ au rotor.

L'échauffement du rotor peut devenir inacceptable, dans certains cas, pour les principales raisons suivantes :

- les parties rotoriques sont difficiles à refroidir ;
- l'échauffement des aimants réduit l'induction rémanente et donc le couple ;
- les aimants ne peuvent pas s'échauffer au-delà d'une certaine température sous peine d'une désaimantation partielle ;
- l'échauffement excessif peut endommager certaines colles, ou certaines résines, et conduire à un décollage des aimants.

Effet des encoches statoriques

Sans courant, lorsqu'on fait tourner le rotor, l'induction magnétique à l'intérieur des aimants change en raison de la perméance variable créée par l'alternance de dents et d'encoches. Cette variation induit des courants et donc un échauffement. La densité des courants induits augmente avec la vitesse et crée des pertes.

Effet des harmoniques de f.m.m

L'allure spatiale du champ magnétique tournant n'est pas parfaitement sinusoïdale. Seule la composante fondamentale tourne à la même vitesse que le rotor. Les harmoniques tournent à des vitesses différentes, dans le même sens ou en sens opposé, ce qui génère des variations de champ et donc des pertes dans les éléments rotoriques. Ce phénomène est plus ou moins prononcé selon la configuration du bobinage [1]. En pratique, de très nombreux moteurs sont réalisés avec un bobinage réparti, appelé aussi imbriqué ou distribué **(figure 2)**.

Les bobinages concentriques sont fréquemment employés pour la réalisation de moteurs avec un nombre de pôles élevé, destinés à fournir de forts couples

à relativement basses vitesses. Cette technique se prête bien à la fabrication du bobinage en série. Les têtes des bobines sont relativement courtes, ce qui est favorable pour réduire les pertes Joule et le coût du volume de cuivre.

Usuellement, dans un bobinage concentrique, chaque bobine est enroulée autour d'une seule dent. Il existe des variantes avec une bobine sur chaque dent (« all teeth »). Dans ce cas, le bobinage a deux bobines par encoche **(figure 3a)**. Dans certains cas, les bobines sont placées toutes les deux dents **(figure 3b)**. Le bobinage est alterné (« alternate ») avec une seule bobine par encoche. L'indication A´, de la **figure 3**, signifie que le sens de la bobine est inversé par rapport à la bobine A.

L'alimentation par un système triphasé de courants sinusoïdaux produit une force magnétomotrice tournante. Dans les variantes de bobinage réparti, la f.m.m ne comporte pas de sous-harmoniques, c'est-à-dire des harmoniques qui tournent moins rapidement que le rotor. Par contre, les variantes à bobinage concentrique présentent des sous-harmoniques d'amplitude en général relativement importante, particulièrement dans le cas du bobinage avec une dent sur deux. Les deux moteurs à bobinage concentrique de la **figure 3** ont le même paquet de tôles et le même rotor. Les spectres de la f.m.m sont relativement similaires sauf que l'amplitude des harmoniques sont plus importantes, particulièrement pour le sous-harmonique de rang 1, dans le cas du bobinage avec les bobines une dent sur deux. Dans cette configuration, les pertes au rotor peuvent être largement réduites, de l'ordre de 50% pour certains points de fonctionnement, avec le bobinage concentrique sur toutes les dents. Un choix judicieux du bobinage, avec un nombre de dents favorable pour un nombre de pôles donné, permet de réduire les pertes rotoriques [1].

Le programme développé dans le cadre du projet et mis en oeuvre sous Matlab (W), dont l'interface est représentée à la **figure 4**, permet une comparaison de bobinages afin de faciliter la sélection de structures bien appropriées en vue de réduire les pertes rotoriques. En agissant sur le bobinage, pour réduire les pertes au rotor, il faut évidemment prendre garde de ne pas dégrader les autres performances. Dans ce but, le programme permet aussi de comparer certaines performances caractéristiques du moteur.

Effet de l'allure des courants d'alimentation

L'alimentation électronique et la stratégie de commande employées sont à l'origine de variation de champ dans les éléments rotoriques et donc de pertes.

Le moteur synchrone auto-commuté, appelé AC-Brushless, est généralement dimensionné de sorte que la tension induite de mouvement produite par la rotation des aimants soit sinusoïdale. Les phases sont alimentées, en fonction de la position du rotor, par des courants d'allure sensiblement sinusoïdale. Avec une commande par modulation de largeur

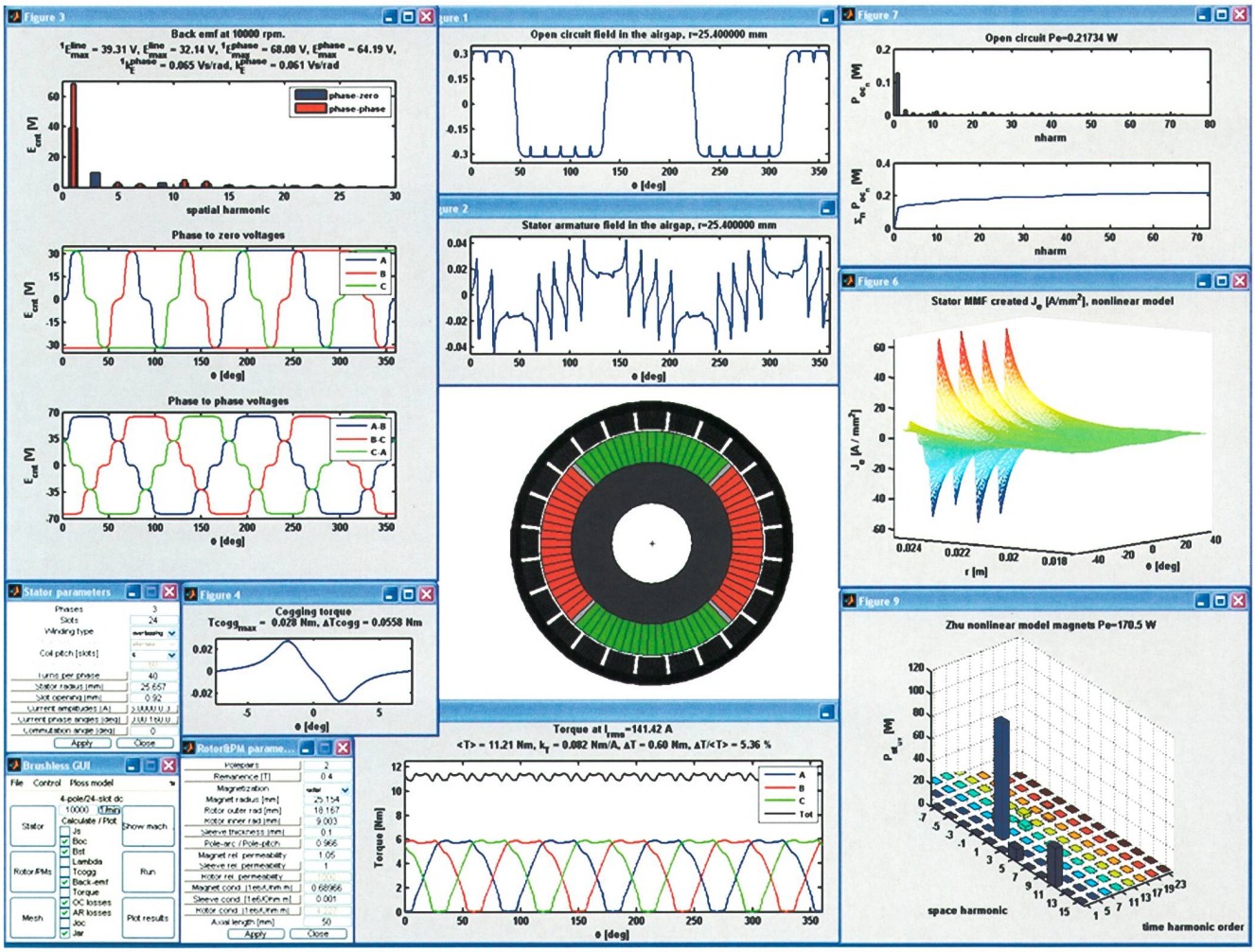


Figure 4 Modélisation analytique – Interface sous Matlab.

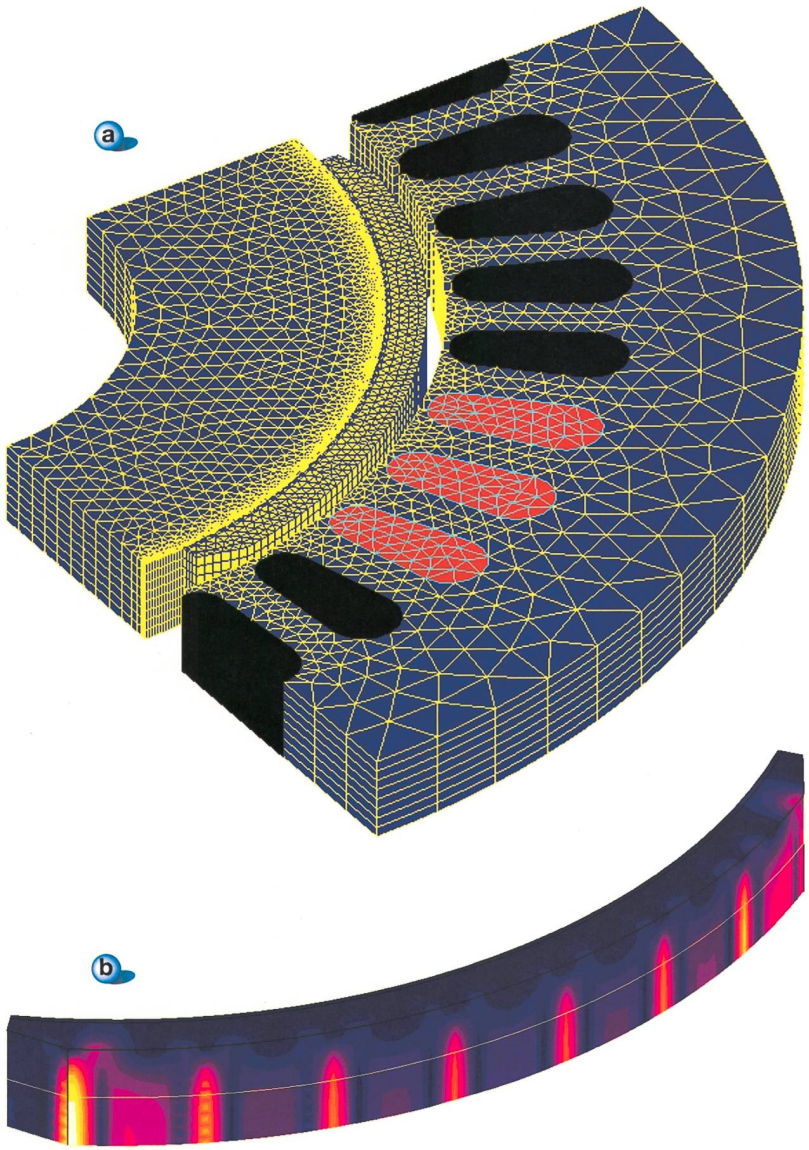


Figure 5 Modélisation avec Flux3D et répartition de la densité des courants dans un aimant [3].

Zusammenfassung **Läuferverluste und Heisslaufen bei Permanentmagnet-Synchronmotoren**

Eingriff in die Läuferwicklung zur Verlustreduzierung im Läufer

Die Leistungssteigerung und insbesondere die erhöhte Geschwindigkeit haben gezeigt, dass bei Magnet-Synchronmotoren die Verluste im Läufer eine wichtige Rolle spielen und bei übermässiger Erhitzung Schäden hervorrufen können. Eine bessere Kenntnis dieser Verluste und Erhitzung je nach Betriebsart ermöglicht uns die Ausarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Steigerung der Verlässlichkeit, des Drehmoments, der Geschwindigkeit und des Wirkungsgrads.

Das mit Matlab getestete Programm, das auf einem analytischen Modell basiert, ermöglicht eine schnelle Auswertung der Verluste in den Magneten und ein Erkennen der Einflussgrössen. Zudem erlaubt es einen Vergleich mehrerer Läuferwicklungen und erleichtert so die Auswahl der richtigen Strukturen, um die Verluste im Läufer zu reduzieren. Die Messungen der Läufererwärmung mit Prüfstand (mehrere Motortypen, unterschiedliche Betriebsbedingungen) liefern uns wichtige Informationen zur Anpassung und Validierung der Modelle. Gn

d'impulsion (PWM), les harmoniques temporelles du courant, d'ordre élevé, engendrent des composantes de champ qui ne tournent pas à la même vitesse que le rotor.

Le moteur à courant continu sans collecteur, appelé moteur DC-Brushless, est généralement dimensionné de manière à obtenir une tension induite de mouvement trapézoïdale. Les courants sont continus, en régime permanent, et dirigés vers l'une ou l'autre des phases par le convertisseur électronique selon la position des aimants. Avec ce type d'alimentation, sur les intervalles de temps, entre deux commutations, les courants dans les phases peuvent être considérés sensiblement constants. Ils produisent alors un champ magnétique stationnaire sur l'intervalle de temps considéré bien que le rotor tourne, ce qui produit des courants induits dans les éléments rotoriques. Les variations de champ à haute fréquence générées par les commutations du PWM et les brusques variations de champ lors des commutations du courant dans les phases produisent des courants induits dans les aimants et dans la culasse rotorique.

Méthodes analytiques pour l'évaluation des pertes rotoriques

L'étude analytique des pertes rotoriques dans les moteurs synchrones à aimants permanents est un thème abondamment traité dans les publications scientifiques récentes [2]. Les programmes basés sur les méthodes analytiques nécessitent des temps de calculs relativement courts. L'introduction de la géométrie est simple et rapide. Par contre, ces méthodes présentent certaines limitations imposées par les hypothèses simplificatrices nécessaires. Elles sont le plus souvent limitées aux géométries classiques avec des aimants collés sur la culasse rotorique. Les caractéristiques des matériaux sont linéaires et l'effet du champ produit par les courants induits au rotor est souvent négligé.

Les méthodes analytiques sont basées sur la détermination du champ magnétique créé par les aimants dans l'entrefer et du champ produit par le bobinage, en fonction de la position et du temps, en prenant en compte l'effet de la denture. L'expression numérique de ces champs permet d'obtenir les principales grandeurs caractéristiques du moteur, comme la tension induite de mouvement, le couple électromagnétique et le couple de détente (couple sans courant).

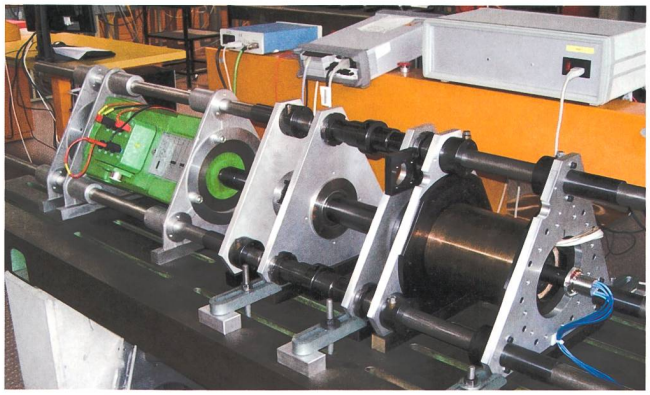
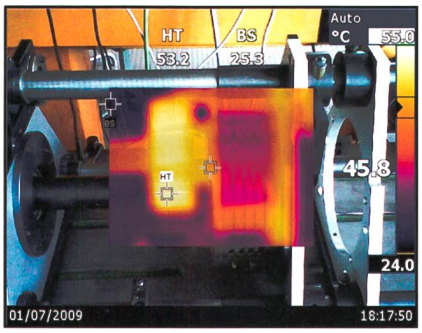


Figure 6 Banc d'essais avec deux degrés de liberté [4].



Figures : HEIG-VD

Figure 7 Mesure de la température rotorique [4].

La densité des courants induits au rotor est calculée à partir de la variation temporelle du champ dans le matériau selon la loi de l'induction électromagnétique de Faraday. La puissance dissipée peut alors être obtenue par intégration sur le volume considéré avec la relation bien connue des pertes par effet Joule ou à l'aide du vecteur de Poynting [Z]. Il est possible de déterminer les pertes pour le fonctionnement en génératrice à vide, sans courant, ou pour le fonctionnement en moteur avec les harmoniques du courant.

Simulations par éléments finis

Les simulations par éléments finis 2D permettent de bien illustrer les phénomènes en jeu pour différentes conditions de fonctionnement et différentes géométries. La prise en compte de matériaux non linéaires est possible et la modélisation de géométries plus ou moins complexes ne pose généralement pas de difficulté. Les simulations 3D des pertes rotoriques conduisent à des temps de calculs particulièrement longs. Les problèmes de convergence rendent la modélisation tridimensionnelle des courants induits dans les pièces massives rotoriques délicate. Le résultat des simulations est particulièrement sensible au maillage, à la finesse de la discrétisation temporelle et au type de formulation employée pour la résolution (figure 5).

Mesure des échauffements

Le banc d'essais de la figure 6 a été développé pour mesurer les échauffements rotoriques dans différentes conditions de fonctionnement, afin d'évaluer les pertes et particulièrement celles du rotor. Avec ses deux degrés de liberté, la structure permet la rotation du moteur et le déplacement axial du rotor à l'aide d'un système vis/écrou. Il est alors possible de sortir le rotor, après une période de fonctionnement, pour mesurer la température des aimants. Des sondes thermiques sont collées sur le rotor et reliées à un ordinateur par l'intermédiaire d'un dispositif de bagues et de balais, placé en bout d'arbre, associé à un système d'acquisition. Les relevés des températures (figure 7), pour plusieurs types de moteurs, dans différentes conditions de fonctionnement, donnent des informations permettant d'adapter et de valider les modèles.

La mesure directe des pertes rotoriques n'est pas possible. Une estimation peut être obtenue par l'intermédiaire de l'échauffement lors des premiers instants de fonctionnement. En réalité, l'échauffement du rotor est produit non seulement par les pertes induites à l'intérieur de ses composants mais aussi par le transfert de chaleur du stator au rotor via l'entrefer. En raison de sa constante de temps thermique relativement longue, dans les premiers instants, le stator n'a pas encore atteint une température importante et sa contribution à l'échauffement du rotor est assez faible. Pour évaluer les pertes au rotor, il est possible d'exploiter la pente initiale de la courbe temporelle de l'échauffement.

Solutions technologiques pour réduire les pertes rotoriques

Différentes approches technologiques sont proposées dans la littérature et réalisées en pratique pour réduire les pertes rotoriques. Parmi les solutions les plus étudiées, on peut mentionner :

- l'utilisation d'un paquet de tôles au rotor, avec des aimants collés en surface ou encastrés ;
- une segmentation axiale et/ou radiale des aimants ;
- un bobinage approprié avec un choix judicieux du nombre de dents et du nombre de pôles ;
- une géométrie de dents adéquate ;
- l'emploi d'une chemise conductrice rotorique pour les petits moteurs ;
- l'utilisation de matériaux avec une grande résistivité pour réduire les courants de Foucault ;
- le dimensionnement judicieux des parties ferromagnétiques afin de réduire les variations de champs ;
- une distribution particulière des aimants, par exemple de type Halbach ;
- une action sur la stratégie d'alimentation en vue de réduire les harmoniques temporelles du courant.

Dans certains cas, ces méthodes s'accompagnent d'une réduction de certaines performances ou d'une augmentation de la complexité au détriment de la fabrication et donc du coût.

Réussite commune

Le projet, soutenu par le Réseau de Compétences lié aux Techniques Énergétiques (RCSO-TE) de la HES-SO, a été réalisé à l'Institut d'Energie et Systèmes Electriques (IESE) de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) en collaboration avec l'Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg (EIA-FR) et avec la société Landert Motoren AG.

Le programme mis en oeuvre sous Matlab, basé sur une modélisation analytique, permet une évaluation rapide des pertes dans les aimants et la mise en évidence des paramètres influents. Par ailleurs, il permet une comparaison de plusieurs bobinages afin de faciliter la sélection de structures bien appropriées en vue de réduire les pertes rotoriques. Les mesures de l'échauffement rotorique avec le banc d'essais, pour plusieurs types de moteurs, dans différentes conditions de fonctionnement, donnent des informations pour adapter et valider les modèles.

Références

[1] N. Bianchi, E. Fornasiero, Impact of MMF space harmonic on rotor losses in fractional-slot permanent magnet machines. IEEE Transactions Energy Conv., Vol. 24, 2009, p.323.

[2] Z.Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield, and D. Howe, Improved analytical modelling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface mounted permanent magnets. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, 2004.

[3] Matthieu Jaccard, Simulation 3D d'un moteur brushless et analyse des pertes dans les aimants. Travail pratique de diplôme HES, HEIG-VD, 2008.

[4] Mario Hermann Momo Kenfack, Banc de tests pour moteurs synchrones à aimants. Travail pratique de diplôme Bachelor, HEIG-VD, 2009.

[W] MATLAB (matrix laboratory) est à la fois un langage de programmation et un environnement de développement. Il est utilisé pour le calcul numérique mais aussi dans les phases de développement de projets.

[X] La caractéristique magnétique B(H) des matériaux ferromagnétiques présente un comportement non linéaire, selon un cycle d'hystérèse. Ces matériaux ont un retard à l'aimantation et à la désaimantation. L'aimantation de la matière absorbe de l'énergie. Comme l'aimantation n'est pas réversible, l'énergie n'est que partiellement restituée lors de la désaimantation. Une partie se dissipe sous la forme de chaleur dans le matériau, il s'agit des pertes pas hystérésis.

[Y] Courants électriques parasites, induits par les variations d'un champ magnétique dans les corps métalliques massifs, particulièrement dans les noyaux des armatures des machines tournantes et des transformateurs. Ils sont la cause d'une dissipation d'énergie.

[Z] Produit vectoriel du champ électrique par le champ magnétique. Le flux du vecteur de Poynting à travers une surface fermée quelconque est égal à la puissance électromagnétique instantanée à travers cette surface.

Liens

- www.hes-so.ch

Informations sur les auteurs

Christophe Besson enseigne les machines électriques et les simulations électromagnétiques à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) depuis 2002. Son expérience professionnelle débute dans l'entreprise MMT SA et se poursuit chez ETEL SA. Il développe des activités de Ra&D et des mandats industriels, au sein de l'Institut d'Energie et Systèmes Electriques (IESE), dans le domaine des moteurs et des générateurs électriques.

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD)
Christophe.Besson@heig-vd.ch

Petri Nikkola est collaborateur scientifique à la HEIG-VD. Docteur en physique de l'EPFL, il a réalisé une thèse dans le domaine de la physique des plasmas. Ses activités de recherche actuelles concernent la modélisation de systèmes électromagnétiques et les dispositifs de réfrigération magnétique.

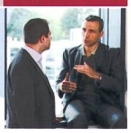
Matthieu Jaccard a obtenu un diplôme d'ingénieur HES à la HEIG-VD. Il est collaborateur scientifique pour des activités de Ra&D et pour des mandats industriels dans le domaine des moteurs électriques et des simulations électromagnétiques.

Anzeige

iimt
University of Fribourg
international institute
of management in technology

Weiterbildung im Energiebereich

Executive CAS in Utility Management



In 10 Modulen erhalten Sie praxinahes Fachwissen und Know-How um den täglichen Herausforderungen in einem liberalisierten Markt erfolgreich entgegenzutreten. Das iimt bietet einzigartige Lehrgänge in Energie-Management an.

- **Flexibel**: Starten Sie, wann immer Sie wollen und nehmen Sie sich die Zeit, die Sie brauchen (Studiendauer 1 - 2 Jahre).
- **Massgeschneidert**: In 10 Modulen erhalten Sie das betriebswirtschaftliche Know-How für einen liberalisierten Markt.
- **Aufbauend**: Vom CAS zum Executive MBA. Ihre Kursmodule werden an Ihr weiteres Studium angerechnet.
- **Von Praktiker zu Praktiker**: Lernen Sie die Theorie in der Praxis anzuwenden und setzen Sie Gelerntes direkt um.

In 10 Modulen zum CAS
Utility Technology
Managerial Finance
Project Management I
Project Management II
Marketing Management
Organisational Behaviour & HRM
Strategy & Innovation Management
Process & Excellence Management
Management Accounting & Control
National & International Economics
Kurssprache: Englisch

iimt - international institute of management in technology - University of Fribourg
Bd de Pérolles 90 - CH-1700 Fribourg - Phone +41 26 300 84 30 - Fax +41 26 300 97 94 - e-mail info@iimt.ch - www.iimt.ch