



HAL
open science

Etude des pertes par courants induits dans les deux frettes, une composite et une à base d'alliage métallique, d'une machine synchrone rapide à aimants permanents

Nadhem Boubaker, Daniel Matt, Philippe Enrici, Florent Nierlich, Guillaume Durand, Fabien Orlandini, Xavier Longere

► To cite this version:

Nadhem Boubaker, Daniel Matt, Philippe Enrici, Florent Nierlich, Guillaume Durand, et al.. Etude des pertes par courants induits dans les deux frettes, une composite et une à base d'alliage métallique, d'une machine synchrone rapide à aimants permanents. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065265

HAL Id: hal-01065265

<https://hal.science/hal-01065265>

Submitted on 18 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude des pertes par courants induits dans les deux frettes, une composite et une à base d'alliage métallique, d'une machine synchrone rapide à aimants permanents

Nadhem BOUBAKER¹, Daniel MATT¹, Philippe ENRICI¹, Florent NIERLICH², Guillaume DURAND², Fabien ORLANDINI³, Xavier LONGERE³.

¹Institut d'Électronique du Sud, groupe Énergie & Matériaux
IES 860 rue Saint Priest, Montpellier

²SAFRAN Messier-Bugatti-Dowty
Inovel parc sud 78140 Vélizy-Villacoublay

³SAFRAN Technofan
10 Place Marcel Dassault, 31700 Blagnac

RESUME- Ce travail porte sur les calculs des pertes par courants induits, dues à l'encoche, dans la frette d'une machine synchrone rapide à aimants montés en surface: 60 kW, 10000 tr/min, dédiée à une application aéronautique embarquée. Il y a deux grandes familles de frette qui sont utilisées afin d'augmenter la tenue mécanique des aimants. En effet, les frettes composites (e.g. fibre carbone) et les frettes métalliques amagnétiques (e.g. Inconel718). L'avantage des frettes composites est leurs conductivités électriques faibles, donc ce qui réduit les pertes. Dans ce papier nous présentons une estimation des pertes par courants induits, par une approche éléments finis (Ansys Maxwell) et expérimentale, pour les deux cas de figure. La première frette testée sur le moteur est à base d'Inconel718 et la deuxième est composite à base de résine époxy et fibre de carbone. Nous avons constaté, à l'aide du modèle éléments finis, que l'utilisation d'une frette composite réduit les pertes d'à peu près 370 W (330 W trouvé avec les mesures expérimentales), soit 0.6 % de la puissance du moteur. Les pertes dans les aimants de la machine sont estimées à 60 W.

MOTS-CLES- Moteur synchrone à aimants montés en surface, pertes par courants induits, frette Inconel718, frette composite, modèle éléments finis

1. Introduction

La frette est un élément indispensable, dans les machines à aimants déposés en surface, pour les applications hautes vitesses (plusieurs milliers de tr /min), eg. compresseurs, pompes, machines d'usinage... [1][2]. En effet, la frette est utilisée afin d'augmenter la tenue mécanique et éviter les conséquences graves suite au décollage des aimants (dû à la force centrifuge importante). Ainsi, la technique de frettage consiste à couvrir le rotor d'un élément, généralement de forme cylindrique, fabriqué à base d'un matériau amagnétique, qui peut être conducteur (titane, Inconel718) ou non-conducteur (frette composite: fibre de verre, fibre de carbone). L'avantage des frettes non-conductrices est qu'ils limitent énormément la circulation des courants induits et par conséquent diminuent les pertes joules associées [3][4], néanmoins le comportement thermique de ce type de matériau est inadéquat pour certaines applications. En effet, la frette composite présente également une conductivité thermique faible, donc elle peut se comporter comme un isolant qui empêche la diffusion thermique entre le rotor et le stator, ce qui cause un échauffement excessif et rend difficile le refroidissement du moteur [5]. C'est pour cela, dans certains cas, les fabricants privilégient une frette métallique, généralement de type Inconel718[6][7].

Dans le cas d'une frette conductrice, aux hautes vitesses, les pertes joules dans le rotor peuvent augmenter considérablement à cause des courants induits importants circulant dans la frette (aussi bien dans les aimants) et

donc qui occasionnent un échauffement. Ce papier présente une étude comparative entre deux types de frettes testées sur un rotor d'une machine synchrone rapide et puissante: 60 kW; 10000 tr/min, dédiée à une application aéronautique. La première frette utilisée est de type Inconel718, c'est un alliage métallique à grande conductivité électrique (8.10^5 S/m). La deuxième frette testée est à base de résine époxy et fibre de carbone (matériau composite et anisotrope). L'étude consiste à estimer, à l'aide des calculs par éléments finis (Ansys Maxwell), les pertes par courants induits dans le rotor de la machine pour les deux cas de figure. Les résultats du modèle éléments finis relatifs aux deux frettes sont comparés aux résultats expérimentaux donnés par un banc d'essai. Le modèle éléments finis permet aussi d'estimer les pertes par courants induits localisées dans les aimants (samarium-cobalt). Le samarium-cobalt présente également une conductivité électrique importante ($12,5.10^5$ S/m), donc les aimants présentent aussi des pertes mais qui n'atteignent pas celles de la frette, car ils sont plus loin vis-à-vis du stator.

2. Présentation de la machine

La machine synchrone étudiée est constituée d'un stator fabriqué avec des tôles laminées en Fer-Cobalt (FeCo). Le rotor contient 8 aimants permanents en Samarium-Cobalt (Sm_2Co_{17}) et une frette (Inconel718 ou composite). Les principales caractéristiques de la machine sont résumées dans le tableau 1.

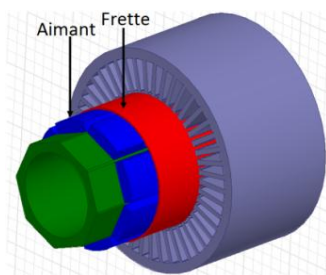


Figure 1: Image 3D éclatée du moteur étudié

| Propriété | Valeur |
|------------------------------|--------|
| Vitesse de rotation [tr/min] | 10000 |
| Puissance [kW] | 60 |
| Paires de pôles | 4 |

Tableau 1: Propriétés du moteur

La modélisation éléments finis de ce moteur est faite sous Ansys Maxwell.

3. Etude des pertes pour le cas d'une frette Inconel718

L'Inconel est un alliage métallique à forte conductivité électrique: 8.10^5 S/m. L'induction spatiale au sommet de la frette, calculée à l'aide du modèle par éléments finis, est donnée par la figure 2. Elle peut s'écrire comme suit:

$$B(x) = B_{\text{moy}} + \underbrace{B_{\text{max}} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)}_{\text{Onde fondamentale}} + \underbrace{\frac{\Delta B}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_e} x\right)}_{\text{Onde créatrice de la majorité des pertes}} + \dots \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Harmoniques}}$$

Avec: τ : pas polaire, τ_e : pas dentaire, ΔB est la variation de champ due à l'encoche.

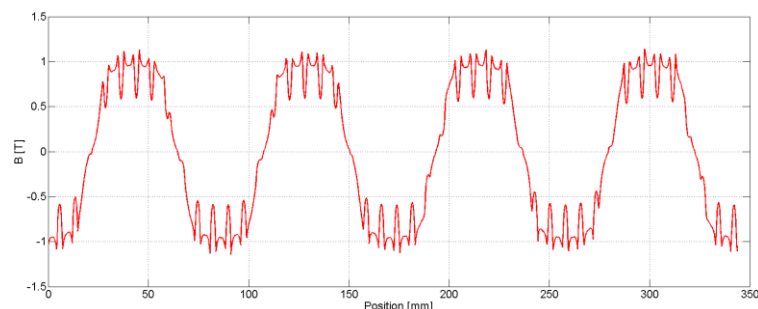


Figure 2: Induction magnétique spatiale, au sommet de la frette Inconel718, en fonction de la position

D'après la courbe de la figure 2, ΔB est égale à peu près 0.34T. C'est la variation maximale dans le rotor car le sommet de la frette est la partie la plus proche des encoches. Nous supposons que cette variation engendre la majorité des pertes par courants induits dans le rotor. Ainsi, les pertes par courants induits dans le rotor avec une frette Inconel, calculées par éléments finis, égalent à: **428 W**, dont **368 W** sont focalisées dans la frette, le reste des pertes est dissipé dans les aimants (60 W).

Les pertes par courants induits ne se répartissent pas d'une façon homogène dans le rotor, la figure 3 montre les zones de dissipation des pertes.

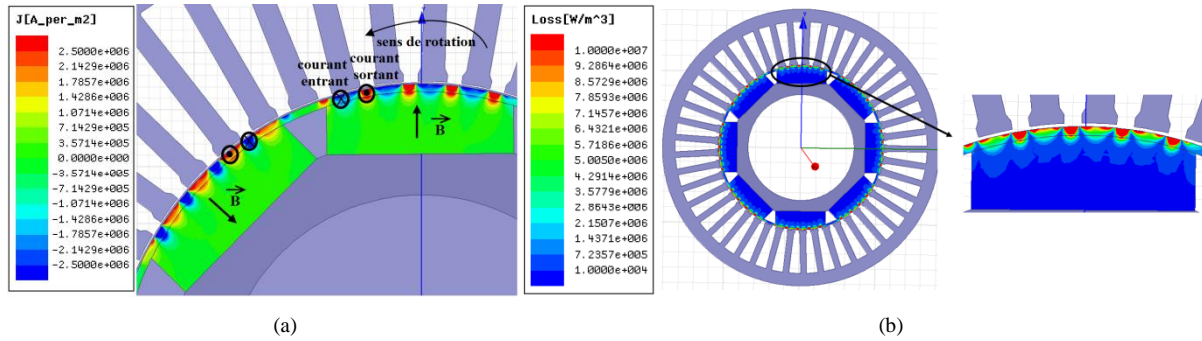


Figure 3 : (a) Profil des courants induits, (b) répartition des pertes dans le rotor, avec une frette Inconel718

4. Etude des pertes pour le cas d'une frette composite

La frette composite est constituée de couches de fibre de carbone matricées par une résine époxy. Les fibres de carbone sont conductrices dans le sens tangential et radial ($10^4 < \sigma_{t,r} < 10^5$ S/m) [4][8], la résine époxy est conductrice dans le sens axial.

Les pertes totales dans le rotor trouvées en utilisant la frette composite sont égales à peu près **61 W**. Ces pertes sont égales aux pertes par courants induits dans les aimants, donc, nous concluons que les pertes par courants induits dans la frette composite sont quasiment négligeables.

Alors, l'intégration d'une frette composite en lieu et place d'une frette Inconel718 amène une réduction des pertes dans la frette du rotor de l'ordre de **370 W**.

5. Résultats expérimentaux

L'expérimentation consiste à mesurer les pertes à vide totales du moteur, monté sur un banc d'essai, pour les deux frettes Inconel718 et composite.

Nous avons trouvé, avec la frette Inconel718, des pertes à vide qui représentent **2 % de la puissance nominale du moteur**. Tandis qu'avec la frette composite nous trouvons un pourcentage de **1.5 %**. Cela, correspond à une différence de pertes de **330 W** (figure 5)[9]. Ces résultats sont bien corroborés par les calculs éléments finis qui donnent une réduction des pertes égale à **370 W**.

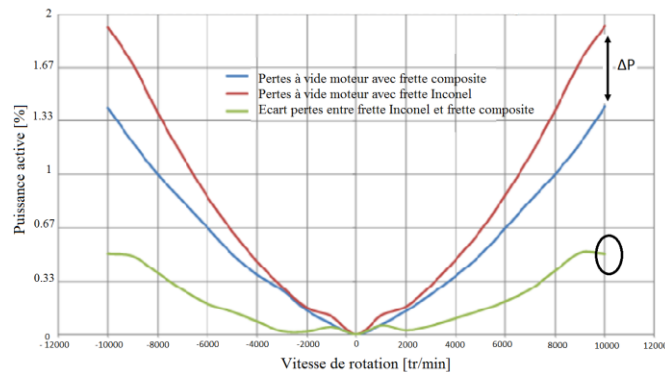


Figure 5: Évolution des pertes à vide du moteur (en % par rapport à la puissance nominale) en fonction de la vitesse de rotation, pour les deux cas de frettes.

Cette réduction des pertes permet une forte réduction de la température des points chauds du moteur notamment au niveau du chignon et du roulement arrière avec une réduction de **20°C à 10000 tr/min**.



Figure 6: Images de deux frettes testées, à gauche la frette Inconel718, à droite la frette composite

6. Conclusion

Le bilan des pertes par courants induits dans les frettes (Inconel718, composite) et les aimants ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$), est présenté dans le tableau suivant.

Tableau 2: Bilan des pertes

| | | Pertes [W] |
|--|-------------------|-----------------|
| Calcul Eléments Finis | Frette Inconel718 | 368 |
| | Frette composite | négligeables |
| | Réduction | ≈ 370 W |
| Expérimentation | Réduction | 330 W |

En vertu des résultats des pertes, nous concluons que l'intégration d'une frette composite apporte une diminution de pertes de l'ordre de 330 W, cet écart est non négligeable, nous détectons sur le banc d'essai qu'il apporte aussi une réduction de température (échauffement) dans les différents éléments du rotor (e.g une réduction de 20°C à 10000 tr/min au niveau du chignon et du roulement arrière).

La frette en composite amène aussi une réduction de la masse de la frette de 80 % allégeant ainsi le rotor de **300g** environ.

Nous constatons aussi que les pertes dans les aimants permanents sont indépendantes de type de la frette utilisée, elles sont estimées à 60 W. Ainsi, dans le cas d'une frette conductrice, les pertes par courants induits totales dans le rotor de la machine (8 aimants + frette Inconel718) égalent à peu près 430 W.

Les pertes dans le rotor ne se répartissent pas d'une manière cohérente dans le rotor. En effet, elles se concentrent dans la partie supérieure du rotor (sommet aimant + frette), où l'effet d'encochage est considérable.

7. Références

- [1] M.A. Rahman, A. Chiba, T. Fukao, «Super High Speed Electrical Machines », IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, pp. 1272-1275, 2004.
- [2] N. Bianchi, S. Bolognani, F. Luise, «Potentials and Limits of High-Speed PM Motors», IEEE Transactions On Industry Applications, vol. 40, N°6, pp. 1570-1578, 2004.
- [3] H. Cho, S. Jang, S. Choi, «A Design Approach to Reduce Rotor Losses in High-Speed Permanent Magnet Machine for Turbo-Compressor», IEEE Transactions On Magnetics, vol.42, N°10, pp.3521-3523, 2006.
- [4] M. van der Geest, J.J. Wolmarans, H. Polinder, J.A Ferreira, D. Zeilstra, « Rotor Losses In Lamination Magnets And An Anisotropic carbon fiber sleeve», Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 2012.
- [5] T. Heikkilä, «Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications-analysis and design», Thèse de doctorat, Lappeenranta University of Technology, 2002.
- [6] J.F. Gieras, A.C. Koenig, L.D. Vanek, «Calculation of Eddy Current Losses in Conductive Sleeves of Synchronous Machines», International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2008, Vilamoura (Portugal).
- [7] R. Shah, A.M. EL-Refai, « Eddy-Current Loss Minimization in Conducting Sleeves of Surface PM Machine Rotors With Fractional-Slot Concentrated Armature Windings by Optimal Axial Segmentation and Copper Cladding», IEEE Transactions On Industry Applications, vol. 45, N°2, pp. 720-728, 2009.
- [8] W. Li, H. Qui, X. Zhang, J. Cao, R. Yi, «Analyses on Electromagnetic and Temperature Field of Super High Speed Permanent Magnet Generator with Different Material Sleeves», IEEE Transactions on Industrial Electronics, N°99, 2013
- [9] SAFRAN Technofan, «Rapport d'essai comparatif frette composite / inconel», Technofan, 2013