

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.

¹I.E.S., Université de Montpellier II - CNRS UMR 5214, 34095 Montpellier Cedex 5

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

³SAFRAN Technofan -10 Place Marcel Dassault, 31700 Blagnac

RÉSUMÉ -Ce travail porte sur les pertes par courants induits, dues à l'encoche du stator, 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 à hautes vitesses. Les frettes composites (p.e. fibre de carbone, fibre de verre) et les frettes métalliques amagnétiques (p.e. Inconel718, titane). L'avantage des frettes composites est leur conductivité électrique quasi nulle, qui limite les pertes. Dans cet article nous présentons une estimation des pertes par éléments finis 2D (Ansys Maxwell) et aussi par mesures expérimentales. En premier lieu le frettage est fait avec l'Inconel718 et en second lieu avec la fibre de carbone. Nous avons constaté, à partir des résultats du modèle éléments finis, que l'utilisation d'une frette composite réduit les pertes d'à peu près 370 W. Sur le banc d'essai nous mesurons une réduction de 330 W. Les pertes dans les aimants de la machine sont estimées à 60 W.

Mots-clés—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), p.e. 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 métallique (titane, Inconel718) ou composite (frette composite: fibre de verre, fibre de carbone). L'avantage des frettes composites non-conductrices est qu'elles 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, 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, que

dans certains cas, les fabricants privilégient une frette métallique, généralement de type Inconel718 [6][7].

Dans le cas d'une frette conductrice, à hautes vitesses, les pertes joules dans le rotor peuvent augmenter considérablement à cause des courants induits importants circulant dans la frette qui occasionnent un échauffement. Cet article présente une étude comparative entre deux types de frette 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 haute conductivité électrique (8.10^5 S/m). La deuxième frette testée est à base de résine époxy et fibre de carbone (matériau isolant, composite et anisotrope). L'étude consiste à estimer, à l'aide d'un modèle éléments finis 2D (Ansys Maxwell), les pertes par courants induits dans le rotor de la machine pour les deux cas de frette. Les résultats du modèle éléments finis sont comparés aux mesures expérimentales données 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 du stator (moins d'ondulation du champ).

2. PRESENTATION DE LA MACHINE ETUDIEE

Le moteur synchrone est constitué d'un stator fabriqué avec des tôles laminées en Fer-Cobalt (Vacoflux 48). Le rotor contient huit 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.

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

Tableau 1. Propriétés du moteur

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

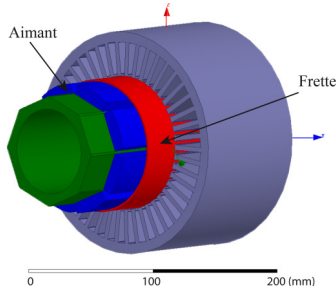


Fig.1 Image 3D éclatée du moteur étudié

3. ETUDE DES PERTES POUR LE CAS D'UNE FRETTE INCONEL718

3.1. Analyse de l'induction magnétique

L'Inconel est un alliage métallique à forte conductivité électrique: $8 \cdot 10^5$ S/m.

Pour un matériau donné (σ fixe), les pertes par courants induits dans le rotor sont étroitement liées à la forme de l'onde d'induction magnétique. L'induction spatiale au sommet de la frette et de l'aimant, calculée à l'aide du modèle éléments finis, est présentée par les figures 2 et 3. Nous remarquons que les signaux comportent des variations sur chaque pôle, qui sont dues à l'alternance dent / encoche (effet denture ou encochage), ce sont les harmoniques des pertes par courants induits.

Ces variations sont plus remarquables au sommet de la frette car l'amplitude des harmoniques augmente en se rapprochant du circuit magnétique statorique (effet d'encochage augmente).

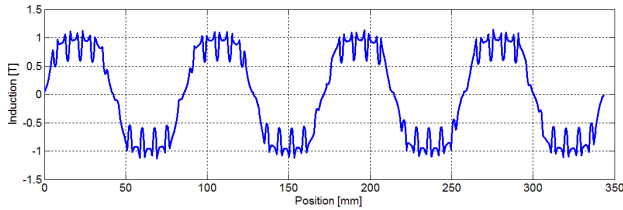


Fig.2 Induction magnétique au sommet de la frette

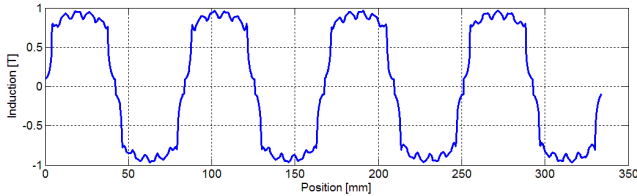


Fig.3 Induction magnétique au sommet de l'aimant

Les harmoniques des pertes sont caractérisées par une amplitude (ΔB) et une fréquence (f_h).

$$\Delta B = f(\text{entrefer, ouverture d'encoche} \dots)$$

$$f_h = f(\text{nombre d'encoche, vitesse} \dots)$$

Le phénomène d'encochage est équivalent à une modulation analogique dont la porteuse est la fréquence dentaire f_d et la modulante est la fréquence polaire f_p (induction due aux aimants). Par conséquent les harmoniques des pertes sont de rangs: $\frac{N_e}{p} \pm 1$.

Alors, le champ spatial peut s'écrire comme suit:

$$B(x) = B_{\text{moy}} + B_{\text{max}} \sin(2\pi f_p x) + \Delta B \sin(2\pi (f_e \pm f_p)x) + \dots \quad (1)$$

$$B(x) = B_{\text{moy}} + B_{\text{max}} \sin(2\pi f_p x) + \Delta B \sin(2\pi f_p (\frac{N_e}{p} \pm 1)x) + \dots \quad (2)$$

$$B(x) = B_{\text{moy}} + B_{\text{max}} \sin(\frac{\pi}{\tau_p} x) + \Delta B \sin(\frac{\pi}{\tau_p} (\frac{N_e}{p} \pm 1)x) + \dots \quad (3)$$

$$B(x) = B_{\text{moy}} + B_{\text{max}} \sin(\frac{p}{N_e \tau_e} x) + \Delta B \sin(\frac{2\pi}{\tau_e} (1 \pm \frac{p}{N_e})x) + \dots \quad (4)$$

Fondamental
Harmoniques des pertes
Harmoniques impaires

Avec, τ_p : pas polaire, τ_e : pas dentaire, ΔB : amplitude harmonique due à l'encochage, p : paire de pôles, N_e : nombre d'encoche.

Pour estimer les amplitudes de deux harmoniques des pertes, nous étudions la décomposition en série de Fourier des signaux présentés dans les figures 2 et 3.

Dans notre cas, pour des raisons d'optimisation du couple de détente, le moteur présente un nombre d'encoche par pôle et par phase non entier. Il comporte 45 encoches et 4 paires de pôles, alors il n'y a pas de périodicité entre les dents et les aimants (N_e / P est non entier), nous étudions donc la FFT du signal entier (sur 360°). Les harmoniques des pertes sont alors de rangs $N_e \pm p$, soit 41 et 49.

La figure 4 présente le spectre du champ spatial au sommet de la frette (à 0.5 mm du stator). L'amplitude du fondamental est égale à 1.05 T. Les amplitudes des harmoniques 41 et 49 sont égales respectivement à: 0.0669 T et 0.0829 T, soit alors 6 % et 8 % du fondamental.

La figure 5 présente le spectre du champ spatial au sommet de l'aimant (à 1.8 mm du stator). L'amplitude du fondamental est égale à 1.09 T. Les amplitudes des harmoniques 41 et 49 sont égales respectivement à: 0.0243 T et 0.0273 T.

Alors, un déplacement de 1.3 mm par rapport au stator, réduit la variation du champ d'environ 3 fois, pour les deux harmoniques 41 et 49.

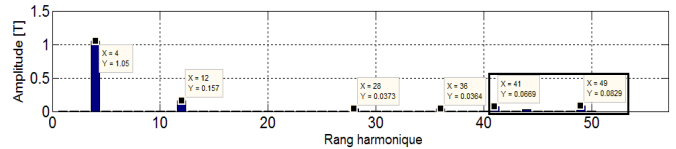


Fig.4 Harmoniques spatiales du champ magnétique, au sommet de la frette.

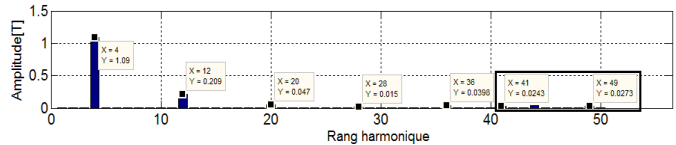


Fig.5 Harmoniques spatiales du champ magnétique, au sommet de l'aimant.

3.2. Résultats des pertes par courants induits

Les pertes par courants induits, calculées par éléments finis, dans le rotor avec une frette Inconel718 sont égales 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, les figures 6 et 7 montrent les zones de dissipation des pertes.

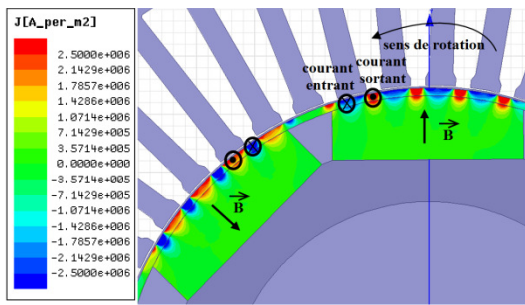


Fig.6 Densité et sens des courants induits

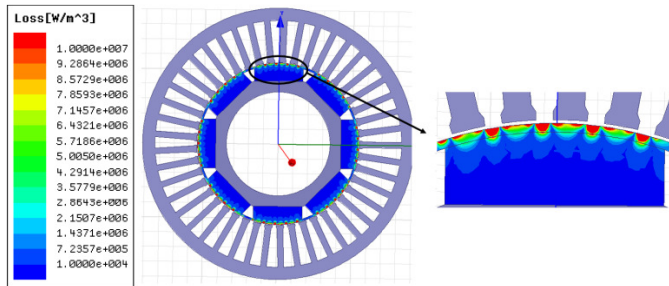


Fig.7 Répartition des pertes dans le rotor

La densité volumique moyenne des pertes dans la frette Inconel718 est égale à $7,75 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$, soit à peu près 945 W/kg .

La densité massique moyenne des pertes dans les huit aimants est de l'ordre de 25 W/kg .

La densité des courants induits dépasse 2 A/mm^2 , dans la frette et au sommet de l'aimant.

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 ($10^4 < \sigma_{tr} < 10^5 \text{ S/m}$) [4][8]. La conduction dans le sens axial est limitée par la forte résistivité électrique de la résine époxy ($\rho_a \approx 10^6 \Omega.m$).

Les courants induits suivent principalement le sens axial, donc la frette composite peut être modélisée par un matériau isotrope de résistivité égale à celle de la résine époxy.

En utilisant la frette composite, les pertes totales dans le rotor, calculées par éléments finis, sont égales à peu près à 61 W . Ces pertes sont quasi égales aux pertes dans les aimants, nous en concluons donc que les pertes par courants induits dans la frette composite sont 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 .

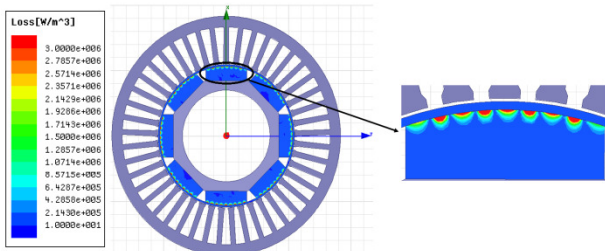


Fig.8 Répartitions des pertes dans le rotor avec la frette composite

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'expérimentation consiste à mesurer, à l'aide d'un banc d'essai (figure 9), les pertes à vide totales du moteur (puissance active à vide), pour les deux frettes Inconel718 et composite.

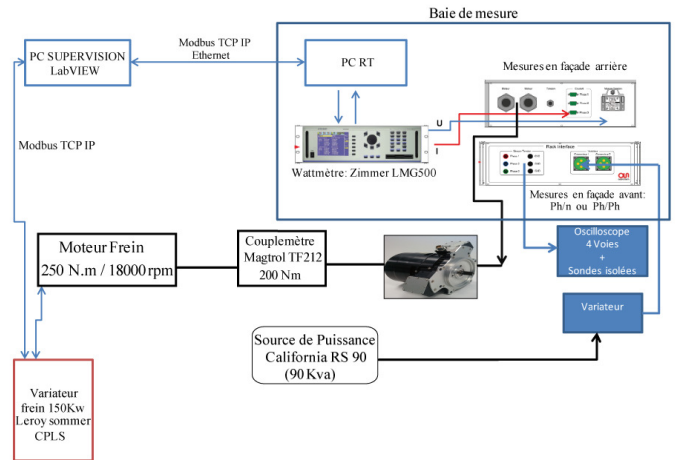


Fig.9 Schéma bloc du banc d'essai

Nous avons obtenu, 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 **1.5 %**. Cela, correspond à une différence de pertes de **330 W** (figure 10)[9]. Ces résultats sont bien corroborés par les calculs éléments finis qui donnent une réduction des pertes égale à **370 W**.

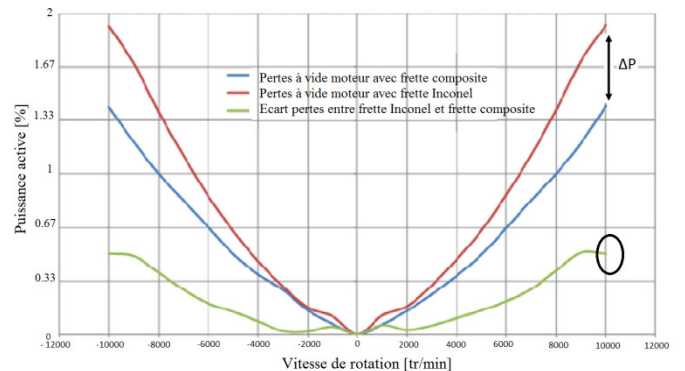


Fig. 10 Pertes à vide du moteur (en % par rapport à la puissance nominale) en fonction de la vitesse de rotation, pour les deux cas de frettes

La frette composite diminue aussi la diffusion du flux de chaleur entre le rotor et le stator. Nous mesurons 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 .

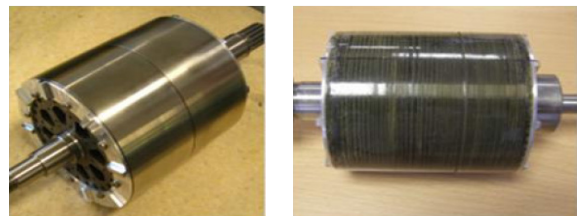


Fig. 11 Images de deux frettes testées, à gauche la frette Inconel718, à droite la frette composite

6. EFFET DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE LA FRETTE SUR LES PERTES DANS LES AIMANTS

Afin d'étudier l'effet du type de matériau de la frette sur les pertes par courants induits dans les aimants, nous calculons, par éléments finis, les pertes dans un aimant pour différentes valeurs de conductivité électrique (couvrant les matériaux isolants et les matériaux fortement conducteurs). D'après la figure 12 nous remarquons que les pertes dans un aimant stagnent sur une large plage de conductivité électrique de la frette, s'étendant de 0 S/m à 10^5 S/m. À partir de 10^6 S/m il y a un effet d'écran magnétique qui apparait et limite les pertes par courants induits dans les aimants, par exemple pour une conductivité électrique de frette égale 2.10^7 S/m les pertes sont réduites de 60 %, soit alors 24 W dans les huit aimants au lieu de 60 W à 0 S/m. Néanmoins, pour les hautes conductivités où l'effet d'écran est important, les pertes dans la frette sont colossales, par exemple pour 10^7 S/m, $P_{frette} \approx 3$ kW (figure 13).

Nous constatons aussi que pour des conductivités supérieures à 2.10^7 S/m les pertes par courants induits dans la frette deviennent quasi constantes.

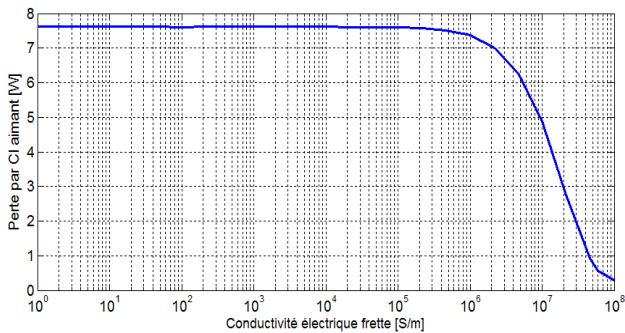


Fig.12 Pertes dans un aimant en fonction de la conductivité électrique de la frette.

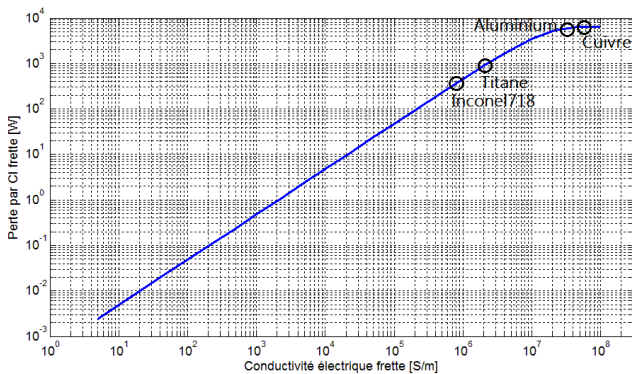


Fig.13 Pertes dans la frette en fonction de sa conductivité électrique.

7. PERTES EN REGIME DE ROTATION VARIABLE

L'étude précédente est faite pour la vitesse de rotation nominale (10000 tr/min). Dans cette partie nous varions la vitesse pour deux objectifs:

- * estimer les pertes par courants induits qui correspondent à d'autres points de fonctionnement du moteur (arrêt, démarrage...)

- * étudier l'impact du changement de la fréquence (vitesse) sur l'évolution des pertes par courants induits dans les aimants et dans la frette.

L'étude est faite pour 30 vitesses de rotation (rotor avec frette Inconel718) entre 100 tr/min et 60000 tr/min, ce qui correspond à une fréquence électrique entre 6 Hz et 4 kHz.

Les figures 14 et 15 montrent l'évolution des pertes, dans un aimant et dans la frette, en fonction de la vitesse. Les deux courbes présentent une inflexion aux alentours de 30000 tr/min ce qui modifie la tendance de l'augmentation des pertes. Ce changement de tendance est expliqué par l'effet d'écran magnétique dû aux courants induits importants circulant dans les aimants et dans la frette. Par conséquent, il atténue les variations du champ (harmoniques 41 et 49).

Pour les très hautes vitesses (> 40000 tr/min) les pertes sont quasiment constantes et indépendantes de la vitesse.



Fig.14 Evolution des pertes d'un aimant en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

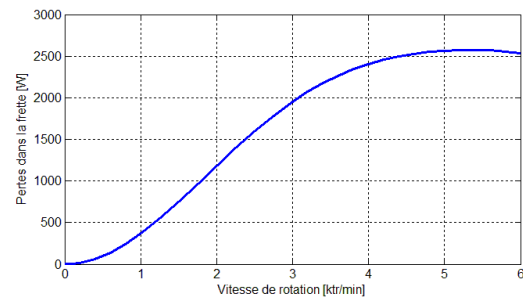


Fig.15 Evolution des pertes de la frette en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Pour mieux éclaircir ce phénomène, nous traçons dans la figure 16 des différences de pertes qui correspondent à deux vitesses de rotation successives, ramenées à la valeur supérieure: $| P_{i+1} - P_i | / P_{i+1}$, avec P_i et P_{i+1} sont les pertes pour les vitesses V_i et V_{i+1} ($V_i < V_{i+1}$).

La figure 16 confirme que le rythme d'augmentation des pertes diminue rapidement avec la fréquence.

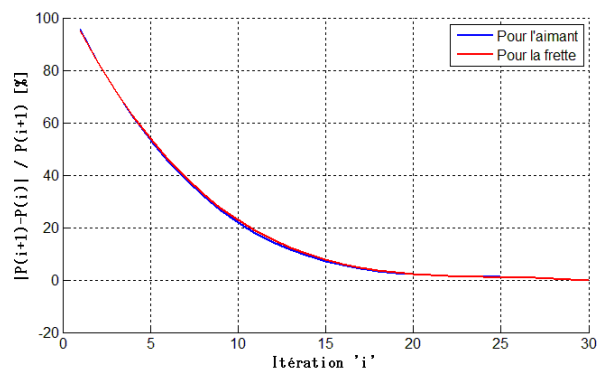


Fig. 16 Tendance de l'augmentation des pertes, dans les aimants et dans la frette, en fonction de la vitesse de rotation.

8. CONCLUSION

Le bilan des pertes par courants induits dans les frettes (Inconel718, composite) et dans 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 la température (échauffement) dans les différents éléments du rotor (c.à.d. une réduction de 20°C à 10000 tr/min au niveau du chignon et du roulement arrière).

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

Pour une frette Inconel718, les pertes par courants induits totales dans le rotor de la machine (8 aimants + frette Inconel718) sont égales à peu près à 430 W. La densité des courants induits dans le rotor atteint 3 A/mm² (frette + sommets des aimants).

Ces pertes ne se répartissent pas d'une manière homogène dans le rotor. En effet, elles se concentrent dans la partie supérieure du rotor (sommets aimant + frette), cette partie est plus proche du stator et donc l'effet d'encoche est considérable.

Nous constatons aussi que les pertes dans les aimants permanents sont très peu sensibles au changement de la frette, elles sont estimées à 60 W. Même si les aimants et la frette tournent à la même vitesse et la conductivité électrique du SmCo est supérieure à celle de l'Inconel718, les pertes dans les aimants sont moins importantes. Car, les aimants sont plus éloignés par rapport au stator et donc l'effet de la denture est moins important, notamment à la base des aimants.

Suite à cette étude, nous avons remarqué qu'il existe un effet d'écran crée par les frettes fortement conductrices et qui cause une diminution des pertes dans les aimants pour $\sigma_f > 10^6$ S/m, et une stagnation des pertes dans la frette pour $\sigma_f > 2.10^7$ S/m.

L'effet d'écran se crée aussi à haute vitesse et limite le rythme d'augmentation des pertes dans les aimants et dans la frette pour $V > 30000$ tr/min. À partir de 40000 tr/min les pertes stagnent.

9. PERSPECTIVES/ LIMITES

Cette étude est focalisée sur les pertes par courants induits dues à l'effet de la denture statorique. Nous considérons que cet effet génère une grande partie des pertes. Mais, il existe deux autres origines de pertes, sont les harmoniques d'espace et les harmoniques de découpage des courants d'induit. Une étude globale sur ces trois origines de pertes peut apporter plus de précision.

Les courants induits sont un phénomène tridimensionnel. Toutefois, dans cette étude nous nous contentons du modèle

éléments finis 2D, car la machine est relativement longue et donc l'effet de la répartition azimutale des courants induits est négligeable. En outre, les résultats du modèle 2D sont corroborés par les résultats expérimentaux. La modélisation 3D est gourmande en terme de temps de calcul.

Les pertes par courants induits peuvent être optimisées par la diminution de l'ouverture d'encoche et/ou par l'augmentation de l'entrefer. La première technique est la plus intéressante et doit être étudiée en fonction de flux de fuite et de la faisabilité du bobinage. La deuxième technique est plus compliquée car elle nécessite une compensation de couple par la hauteur des aimants et/ou par le courant d'induit.

10. REFERENCES

- [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.