

Outil de prédiction et d'identification des ordres d'espace de la force magnétique radiale dans l'entrefer pour des Machines Synchrones à Aimants Permanents, (MSAP) à bobinage dentaire.

Patricio LA DELFA, Mathias FAKAM, Michel HECQUET, Frédéric GILLON

L2EP-Ecole Centrale de Lille – Cité scientifique – CS200 48 – Villeneuve d'Ascq Cedex – France.

E-mail : patricio.la_delfa@ec-lille.fr; mathias.fakam@ec-lille.fr; michel.hecquet@ec-lille.fr; frederic.gillon@ec-lille.fr.

RESUME – Cette étude présente une analyse de la force radiale de Maxwell dans l'entrefer des machines électriques synchrones à aimants permanents surfaciques (MSAP) à bobinage dentaire. Cette force radiale est le siège d'harmoniques spatio-temporels liés aux effets, de la denture, de la saturation, de l'armature, des aimants inducteurs, de leurs interactions et interactions propres. L'outil prédictif ACHFO (Analytical Calculation of Harmonics Force Orders), permet une détermination analytique de ces harmoniques spatio-temporels et plus particulièrement, l'ordre d'espace et la fréquence porteuse associée. De plus, un point important, il permet d'identifier les effets « sources » de ces harmoniques de forces à l'origine du « bruit magnétique ». Une comparaison à des simulations comportementales numériques par éléments finis (EF) et des tests expérimentaux valideront les résultats.

MOTS-CLES – Force radiale ; Harmonique ; Ordre d'espace ; Bruit magnétique ; MSAP à bobinage dentaire.

Introduction

Les MSAP sont de plus en plus utilisées dans les applications industrielles où la variation de vitesse est ou non requise. Elles présentent une structure plus compacte, une puissance massique élevée, une réponse dynamique supérieure en comparaison aux machines « classiques ». L'association d'un bobinage dentaire simple ou double couche limite également le volume de cuivre dans les têtes de bobine et donc atténue les forces de Laplace induites. Dans une approche conceptuelle notre objectif est de prédéterminer les harmoniques spatio-temporels de la force radiale de Maxwell dans l'entrefer, source du bruit magnétique sur ces machines à bobinage dentaire.

Nous verrons, dans un premier temps, comment est généré le bruit magnétique lié à ces efforts radiaux et leurs effets sur lesquels, on peut agir afin de limiter les nuisances sonores. Dans un second temps, nous identifierons ces différents effets. Enfin une comparaison à des simulations par EF validera les résultats donnés par l'outil de prédiction ACHFO.

1. Le bruit magnétique

1.1 Méthodologie et détermination de la pression acoustique

Le synoptique figure 1 illustre la démarche concernant la détermination du rayonnement acoustique généré par les machines tournantes. A partir d'une onde de courant sinusoïdale ou d'une onde de courant issue d'une stratégie MLI, le modèle électromagnétique, permet de déterminer l'induction (1) et la pression magnétique par unité de surface (2) dans le temps et l'espace. Pour le calcul de pression, notre calcul ne tient pas compte des effets tangentiels, aussi on se limitera à la pression radiale. Le modèle vibratoire permet de déterminer le déplacement dynamique (3) vibratoire de la structure, enfin à partir du modèle acoustique on obtient l'intensité acoustique (4) [1].

$$B(t, \alpha^s) = \Lambda(t, \alpha^s) * [f_{mm}^r(t, \alpha^s) + f_{mm}^s(t, \alpha^s)] \quad (1)$$

$$p(t, \alpha^s) \approx \frac{B^2(t, \alpha^s)}{2\mu_0} \quad (2)$$

$$Y_{md} = \eta_m Y_{ms} \quad (3)$$

$$I = 8200 \sigma f^2 Y_{md}^2 \quad (4)$$

$\Lambda(\alpha^s)$: Perméance d'entrefer

α^s : Angle mécanique

f_{mm}^r, f_{mm}^s : Force magnétomotrice, rotor/stator

p : Pression magnétique par unité de surface

B : induction magnétique

Y_{md}, Y_{ms} : déformation dynamique/statique

η_m : Coefficient lié à amortissement P.L Timar.

I : Intensité acoustique

f : fréquence de la vibration

σ :Facteur de rayonnement Sphérique/Cylindrique

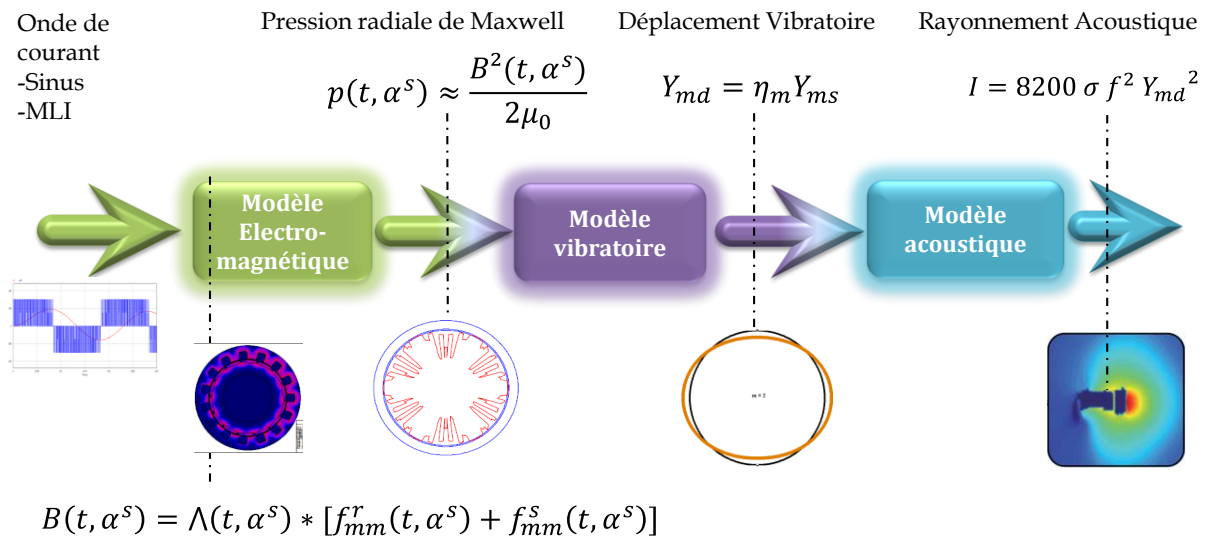


Figure 1 : Méthodologie de détermination de la pression acoustique

1.2 Exemple d'allure de la pression radiale magnétique, effet de denture seul.

La figure 2 illustre dans le temps et l'espace la pression radiale dans l'entrefer d'une machine 4 pôles au rotor et 24 encoches au stator. Cette représentation obtenue analytiquement à partir d'une onde d'induction sinusoïdale idéale, à laquelle on associe un effet de denture, laisse apparaître distinctement la distorsion apportée par l'encochage au stator. A cet effet, s'ajoute celui de la répartition du bobinage (harmoniques en lien avec les Forces Magnétomotrice) et celui de la saturation magnétique. Ces différents harmoniques se combinent et il n'est pas aisé lors de l'analyse des efforts radiaux, d'identifier l'origine des raies pour chacun de ces effets.

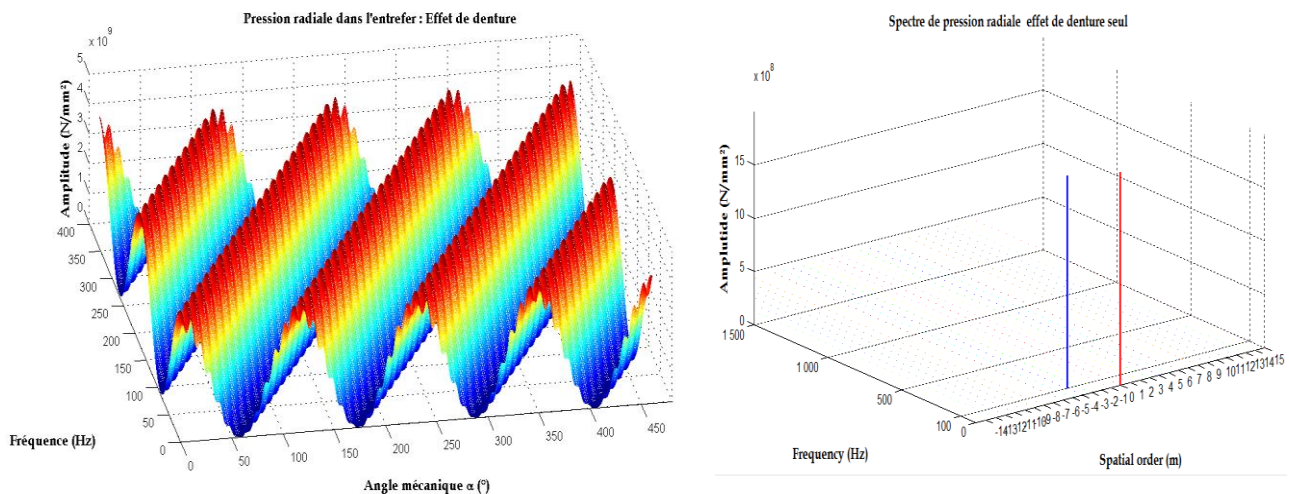


Figure 2 : Pression radiale dans l'entrefer et spectre associé: effet de denture

2. Outil de prédiction ACHFO :

L'outil développé détermine les ordres d'espace et leur fréquence porteuse associée, également les origines de ces ordres, c'est-à-dire les interactions entre les effets de la saturation liée à l'armature, les aimants, la denture et leurs interactions propres.[3] identifie les ordres d'espace uniquement causés par les aimants et la saturation. L'outil est capable d'identifier chaque effet distinctement sur les ordres faibles, les plus importants car potentiellement dangereux en termes de nuisance sonore. Le tableau 1 donne une formulation des principaux effets utilisée par ACHFO dans le calcul des ordres faibles de la force radiale.

Tableau 1. Ordre d'espace et fréquence de la force radiale

Ordre	Fréquence : f^*	
Due aux aimants : $2p(1\pm 2k)$ Interaction propre : $(\nu_1\pm\nu_2)p$	$2f(1+2k)$ $(\nu_1\pm\nu_2).f$	$\nu_1\pm\nu_2$: Harmoniques p : paire de pôles
Due à la saturation : $2\nu_1, 2\nu_2$ Interaction propre : $(\nu_1\pm\nu_2)$	$2f$ $2f$	ν_1, ν_2 : Harmoniques
Due à la denture : $2(\mu_{th} p \pm \mu_{th} Z_s)$ Interaction propre : $(\mu_{th1} \pm \mu_{th2}) p \pm (k_2 \pm k_1) Z_s$	$2\mu_{th} f$ $2f(\mu_{th1} \pm \mu_{th2})$	$\mu_{th1} \pm \mu_{th2}$: Harmoniques Z_s : nb d'encoches
* f : fréquence de rotation.		$k_1, k_2 = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$

3. Résultats :

Le tableau 2 donne le panel des ordres faibles de la force radiale réalisés à partir de simulations de structures de machines modulaires et asymétrique [2]. L'analyse des résultats identifie les origines des ordres faibles, pour exemple l'ordre 1 de la machine asymétrique, est lié à l'interaction de l'effet de denture et des aimants, également à l'interaction de l'effet de denture et de la saturation.

Tableau 2. Résumé des ordres faibles et fréquence.

pôles/encoche	12s		15s		12s		15s	
	Ordre	Freq	Ordre	Freq	Ordre	Freq	Ordre	Freq
10	0,2,4	2f,4f			0,2,4	2f,4f		
14	0,2,4	2f,4f	0,1,2,3,4	2f,4f	0,2,4	2f,4f	1,2,3,4	2f, 4f
	Calculs ACHFO				Eléments finis			

Différents cas seront présentés et validés par simulations EF. De plus, une validation expérimentale sur une machine 10 pôles 12 dents sera présentée permettant ainsi de renforcer notre analyse.

Conclusion

L'objectif de cette étude est d'analyser les différents harmoniques de la pression magnétique dans l'entrefer sources de bruit magnétique. Cette étude compare différentes configurations de MSAP à bobinage dentaire. Les harmoniques de pression radiale d'ordres faibles peuvent être sources de bruit d'origine magnétique. En effet, l'ordre et la fréquence de ces harmoniques ne doit pas correspondre au mode naturel de la structure pour une même fréquence. L'outil ACHFO nous donne toutes les combinaisons spatio-temporelles de ces ordres et une identification précise des effets pour chacune d'elles. Il sera étendu au MSAP à bobinage réparti et aimants enterrés.

Références

- [1] J.Ph Lecointe, Thèse de doctorat « Etude et réduction active du bruit d'origine magnétique des machines à reluctance variable à double saillance ». Université d'Artois, Béthune, France, Jul.2007.
- [2] R. Islam and I. Husain, "Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 6, pp. 2346–2354, Nov. 2010.
- [3] Zhu, Z.Q.Xia, Z.P.; Wu, L.J.; Jewell, G.W. "Influence of slot and pole number combination on radial force and vibration modes in fractional slot PM brushless machines having single- and double-layer windings" Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE. Page(s): 3443 - 3450