

Couplage électromagnétique vibro-acoustique

pour l'étude des émissions sonores d'une Machine Synchronisée à Rotor Bobiné (MSRB)

Hamza ENNASSIRI, Ferhat CHABOUR, Georges BARAKAT, Yacine AMARA
GREAH, EA3220, Université du Havre, France

RESUME - Cet article présente un couplage multi-physiques magnéto-vibro-acoustique direct pour une analyse transitoire des vibrations et émissions sonores d'une MSRB 4 pôles / 48 encoches dédiée à la traction électrique. Les normes dans ce domaine se traduisent par des exigences vis-à-vis de l'étude du bruit sonore rayonné par la machine. Dans la première partie, les détails du couplage entre un modèle magnétique élément finis (EF) 3D et un modèle vibro-acoustique EF 3D sont présentés. Ensuite, la méthode d'analyse utilisée pour la détermination du bruit d'origine magnétique est exposée. Cette méthode est basée sur le calcul des efforts magnétiques locaux agissant à la surface interne de l'alésage statorique en utilisant le tenseur de Maxwell, couplé à un modèle vibro-acoustique basé sur une analyse mécanique transitoire. Dans ce cas la densité de force magnétique locale sert alors d'une entrée à la simulation vibro-acoustique.

Mots-clés— Bruit acoustique, Forces électromagnétiques, Machines synchrones, Méthode des éléments finis, Vibrations.

1. INTRODUCTION

L'émergence des machines synchrones destinées aux applications embarquées impose la maîtrise de leurs performances en termes d'émissions vibro-acoustiques [1]. Ces exigences se traduisent par des normes qui s'appliquent par exemple sur les véhicules électriques et hybrides, normes définies au niveau européen et international [2]. Par conséquent, l'intégration de cette étude dès la conception est primordiale. Les vibrations et le bruit sont ainsi des aspects critiques qui peuvent être réduits soit par l'augmentation de la raideur de la structure soit par le contrôle des forces magnétiques. L'étude de la pression magnétique responsable de bruit et de vibrations a été menée par divers auteurs [1] [2] [3].

Cet article présente un couplage direct entre un modèle électromagnétique EF 3D réalisé avec « FLUX » et un modèle vibro-acoustique EF 3D réalisé avec « ANSYS Mechanical ». Ce couplage présente l'avantage de la simplicité du transfert des efforts électromagnétiques au modèle mécanique. La machine étudiée dans ce papier est une machine synchronisée à rotor bobiné 4 pôles 48 encoches ayant un bobinage triphasé imbriqué destinée à la traction électrique dont la partie active est présentée dans fig.1. Le tableau 1 donne les principales caractéristiques.

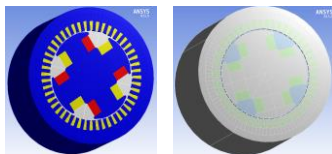


Fig.1 : Présentation de la partie active de la machine

Tableau 1. Principales caractéristiques de la machine

Nom	Valeur (unité)
Puissance mécanique (moyenne)	55 (kW)
Vitesse de rotation	7500 (tr/min) 125 (Hz)
Couple	70 (N.m)
Courant par phase	70 (A)
Courant d'excitation	10 (A)
Rayon interne stator	85 (mm)
Rayon externe stator	130 (mm)
entrefer	1 (mm)
Longueur axiale	170 (mm)
Profondeur d'encoche	17.54 (mm)

2. MODELISATION MAGNETO-VIBRO-ACOUSTIQUE

Le schéma complet du modèle multi-physique magnéto-vibro-acoustique de la MSRB proposé est donnée dans la fig.2. Il vise à obtenir, pour un profil de vitesse donné, l'induction, le couple et les efforts magnétiques délivrés par la structure ainsi que les déplacements et la pression acoustique dans l'air qui l'englobe. Afin de réaliser ce modèle, plusieurs hypothèses ont dû être formulées :

- Seul le bruit d'origine magnétique est considéré ;
- Le bruit généré par le rotor n'est pas pris en compte du fait de son confinement avec celui du stator ;
- Les contraintes sont essentiellement localisées à la surface interne de l'alésage statorique.

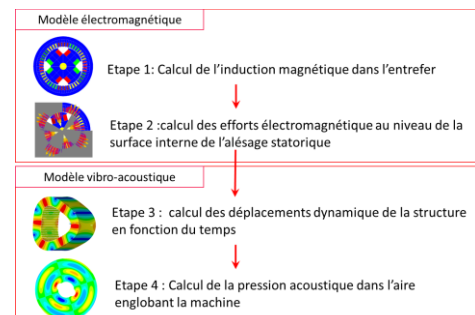


Fig.2 Schéma complet du modèle magnéto-vibro-acoustique

2.1. Couplage magnéto-vibro-acoustique

Un couplage direct entre un modèle électromagnétique EF 3D réalisé avec un logiciel élément finis commerciale « FLUX » et un modèle vibro-acoustique EF 3D réalisé avec un logiciel élément finis commerciale « ANSYS Mechanical » est présenté. Ce couplage présente l'avantage que le transfert des efforts électromagnétiques calculés via le modèle électromagnétique vers le modèle mécanique vibro-acoustique se fait avec une indépendance entre les deux maillages magnétique et mécanique. Cela devient possible en utilisant le calcul des efforts aux nœuds ayant une surface élémentaire via

le formalisme de Maxwell voire Fig.3. Ces efforts servent de paramètres d'entrées pour le modèle mécanique et s'appliquent de la même manière sur des points clés créés sur la structure mécanique au niveau du rayon interne de l'alésage statorique et se transfère par la suite au maillage mécanique lors de la résolution du problème multi-physiques vibro-acoustique.

2.2. Modèle électromagnétique

2.2.1. Calcul de l'induction dans l'entrefer

La machine présente un rapport longueur sur diamètre relativement faible et les effets 3-D de bords engendrent une variation de la pression magnétique selon la direction axiale. Pour cela un modèle EF 3D a été considéré, la simulation est faite en pas-à-pas dans le temps afin de déterminer la répartition de l'induction dans l'entrefer à vitesse nominale, en charge. Dans ce cas, les courants de l'induit sont sinusoïdaux et en pleine charge. La Fig.4 présente le dégradé d'induction de l'ensemble stator-rotor. L'acier magnétique utilisé permet la prise en compte de la saturation magnétique.

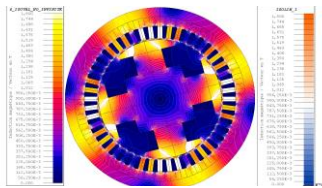


Fig.3 Dégradé de l'induction magnétique

2.2.2. Calcul des efforts électromagnétiques locaux

La détermination de la force magnétique à partir du tenseur de Maxwell (TM) implique le calcul des efforts magnétiques présents sur une surface fermée imaginaire située dans l'air englobant l'objet d'étude. La fig.3 montre la surface attribuée aux nœuds. L'intégration de ces efforts sur une surface résulte en une force totale transmise par le champ magnétique. Le TM donne la force sous la forme de l'expression (1), en fonction de l'induction \vec{B} .

$$\vec{F}_{mag} = \iint_S \left[(\vec{B} \cdot \vec{n})\vec{H} - \frac{1}{2} \mu_0 (\vec{H} \cdot \vec{B})\vec{n} \right] dS \quad (1)$$

En développant, les composantes de la pression électromagnétique s'expriment selon (2).

$$\begin{cases} \vec{F}_n = \iint_S \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} B_n^2 - \mu_0 H_t^2 \right) \right] dS \\ \vec{F}_t = \iint_S [H_t B_n] dS \end{cases} \quad (2)$$

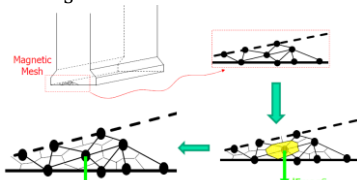


Fig.4 Calcul des efforts au nœuds du maillage magnétique

2.3. Modèle vibro-acoustique

Le modèle mécanique EF 3D vibro-acoustique a été réalisé avec ANSYS. Les dents et le noyau sont un assemblage de tôles de fer feuilletées de module de Young équivalent. Le cuivre des encoches avec l'isolant donne un module de Young équivalent pour les régions des encoches. La Fig.4 montre la structure modélisée et le tableau 2 donne les propriétés orthotropique des matériaux utilisés pour la modélisation. Les têtes

de bobines ainsi que la carcasse et les flasques en aluminium sont pris en considération.

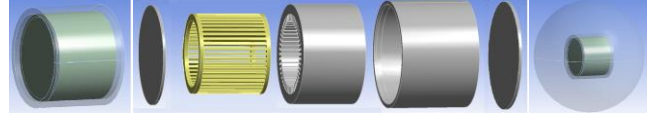


Fig.5 Vue éclatée de l'ensemble des éléments de la structure

Paramètre	Lamination	bobinage	carcasse
E_x (GPa)	200	9.4	71
E_y (GPa)	200	9.4	71
E_z (GPa)	0.8	9.4	71
G_{xy} (GPa)	79.3	3.5	26.7
G_{xz} (GPa)	0.3	3.5	26.7
G_{yz} (GPa)	0.3	3.5	26.7
ν_{xy}	0.3	0.35	0.33
ν_{xz}	0.0012	0.35	0.33
ν_{yz}	0.0012	0.35	0.33
ρ (kg.m ⁻³)	7700	8890	2700

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

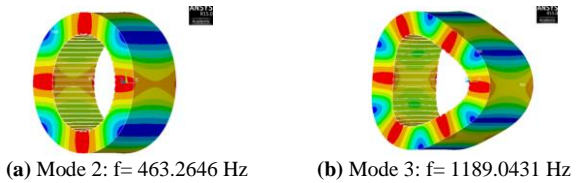


Fig.6 Exemple des déformations du core statorique

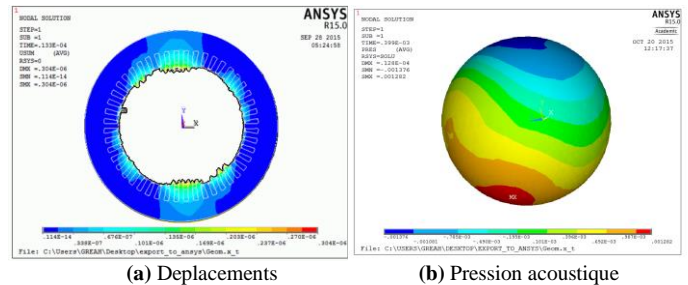


Fig.7 Résultats de l'analyse vibro-acoustique mappé sur la structure pour le premier pas de temps

4. CONCLUSIONS

Cet article présente les résultats de l'analyse vibro-acoustique pour une MSRB dédiée à la traction électrique.

Deux modèles éléments finis, électromagnétique 3-D et vibro-acoustique 3-D, sont directement couplés de manière à déterminer avec précision le bruit d'origine électromagnétique au sein de ce type machines. L'originalité apportée par ce travail, d'un point de vue modélisation, réside dans la méthode d'analyse et du couplage qui permettent de quantifier et de conclure efficacement sur l'adaptabilité acoustique de la structure pour une application embarquée.

5. REFERENCES

- [1] G. Verez, G. Barakat, O. Bennouna, G. Hoblos, Y. Amara, « Vibrations et bruit d'origine électromagnétique dans les machines synchrones à aimants permanents ayant des combinaisons nombre de pôles / nombre d'encoches différents », SGE, 2014, ENS Cachan. (France)
- [2] J.F. Gieras, C. Wang, J.C.S. Lai, « Noise of polyphase electric motors », CRC Press, 2005.
- [3] M. Fakam, M. Hecquet, V. Lanfranchi, P. Brochet, A. Randria « Etude vibro-acoustique de machines synchrones à aimants à bobinage dentaire », EF.2011, Belfort.(France)