

Étude de la Projection des Forces Magnétiques pour le Calcul des Vibrations dans les Machines Électriques

Raphaël PILE^{1,2,3}, Jean LE BESNERAIS¹, Yvonnick LE MENACH², Guillaume PARENT³,
Thomas HENNERON², and Jean-Philippe LECOINTE³

¹ EOMYS ENGINEERING, Lille-Hellemmes 59260, France

² Univ. Lille, Arts et Metiers ParisTech, Centrale Lille, HEI, EA 2697 - L2EP - Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance, F-59000 Lille, France

³ Univ. Artois, UR 4025, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE), F-62400 Béthune, France

De nombreux travaux récents traitent de calcul des forces magnétiques pour le calcul du bruit et des vibrations dans les machines électriques. La principale difficulté réside dans la méthodologie d'identification des ondes de forces rotatives les plus bruyantes. Les deux méthodes utilisées pour calculer les forces magnétiques sont le Principe des Travaux Virtuels (PTV) et le Tenseur de Maxwell (TM). Cette communication traite des vibrations obtenues sur une machine à aimants en surface grâce à une résolution électromagnétique Éléments Finis (EF) 2-D et une simulation mécanique harmonique EF 3-D. Les résultats de deux calculs distincts sont comparés : un cas avec le PTV, et l'autre cas basé sur le TM. En particulier, le but de ce travail est d'étudier l'effet de modulation mécanique. Cet effet a pour conséquence de filtrer les ondes rotatives de forces à cause de la nature discrète des dents du stator. Deux méthodes différentes pour tenir compte de l'effet de modulation sont comparées par rapport au PTV pour la machine étudiée. Ce travail montre qu'une des deux méthodes est plus pertinente que l'autre.

Vibration, Machines électriques, Force magnétique, Magnéto-mécanique, Tenseur de Maxwell, Principe des travaux virtuels.

1. INTRODUCTION

L'analyse du comportement vibro-acoustique des machines électriques est le sujet de nombreux travaux récents. Le problème, toujours pas clairement résolu, est même accru dans la mesure où l'accroissement des puissances massiques et volumiques impacte les niveaux vibratoires et sonores. Ces phénomènes doivent être pris en compte dès la conception, et l'un des moyens pour y parvenir est d'avoir recours à la simulation. Un point crucial de ces simulations est la modélisation des forces Electro-Magnétiques (EM).

Dans ce contexte, la méthode la plus couramment utilisée est le Tenseur de Maxwell (TM) : une force surfacique équivalente est estimée dans l'entrefer à partir de la connaissance du champ magnétique à cet endroit. Le TM a l'avantage d'être compatible avec les méthodes analytiques, semi-analytiques et Éléments Finis (EF). Grâce à l'analyse harmonique, le TM permet d'identifier les ondes de force rotatives les plus gênantes, et ainsi de les résoudre avec un minimum d'effet sur les performances. Pour réaliser cette analyse, le TM est décomposé dans la base de Fourier selon ses ordres angulaires (ou nombre d'onde angulaire, ou encore pulsation spatiale). Dans le cas d'un couplage avec une simulation mécanique EF, le TM est généralement intégré pour appliquer une force résultante par dent [1].

Une autre méthode utilisée est le Principe des Travaux Virtuels (PTV) : appliqué à la méthode des EF, le PTV donne une résultante d'effort magnétique nodale [2]. Le PTV est la méthode de référence pour le calcul des forces locales (notamment sur le bout des dents), mais il ne permet pas d'identifier simplement les sources de bruit EM comme dans le cas du TM.

D'après les travaux récents, la corrélation entre le TM et le PTV semble bonne pour les nombres d'onde et harmoniques les plus faibles [1, 3]. Cependant, peu d'études comparent directement les résultats vibratoires du PTV avec le TM pour les vibrations d'origine EM. En effet, le résultat du PTV donne une résultante calculée par rapport au maillage magnétique. Dans ces conditions la projection sur un maillage mécanique n'est pas immédiate, alors que les maillages magnétiques ne sont pas toujours adaptés pour calculer un résultat EF vibratoire précis. De plus, l'algorithme du PTV doit être adapté pour chaque type d'éléments et de résolution, contrairement au TM.

Pour ces raisons, cette étude propose de construire un cas qui permet de simuler directement le déplacement issu d'un chargement PTV (non-modifié). Pour réaliser cela, on conserve le maillage magnétique pour la simulation EF mécanique. La simulation magnétique a été construite afin de limiter l'impact des irrégularités et des asymétries du maillage magnétique sur le résultat mécanique. Le résultat vibratoire est comparé à différents chargements TM avec un maillage mécanique.

Cette simulation PTV de référence permet d'étudier de manière purement numérique l'effet de modulation mécanique [4, 5] : des relevés expérimentaux ont mis en évidence un repliement des ordres élevés de forces sur les ordres plus faibles. Cette étude propose de vérifier numériquement l'ampleur de cet effet. Pour cela les modèles de modulation proposés sont comparés par rapport au calcul direct basé sur le PTV, en particulier pour un nombre d'onde de force égal au nombre d'encoches au stator $Z_s = 36$ comme dans l'étude [5].

2. CALCULS DES FORCES D'ORIGINE MAGNÉTIQUE

2.1. Tenseur de Maxwell

Cette section présente le principe du calcul des forces magnétiques avec le tenseur de Maxwell, ainsi que la méthode d'application des efforts sur le modèle mécanique. La méthode classique consiste à prendre un contour circulaire dans l'entrefer sur lequel est défini l'effort surfacique à la position angulaire $\alpha \in [0, 2\pi]$ et l'instant t à partir de la perméabilité du vide μ_0 et de la densité de flux magnétique radial B_r et tangentiel B_t [3] :

$$\sigma_r(\alpha, t) = \frac{B_r(\alpha, t)^2 - B_\theta(\alpha, t)^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

En appliquant une décomposition de Fourier selon le temps et la position angulaire, on obtient les harmoniques selon :

$$\sigma_r(\alpha, t) = \sum_n \sum_\omega \hat{\sigma}_r(n, \omega) e^{jn\alpha} \quad (2)$$

avec j le nombre imaginaire, ω la pulsation, n le nombre d'onde. Ainsi, cette force surfacique est définie dans l'entrefer sans être

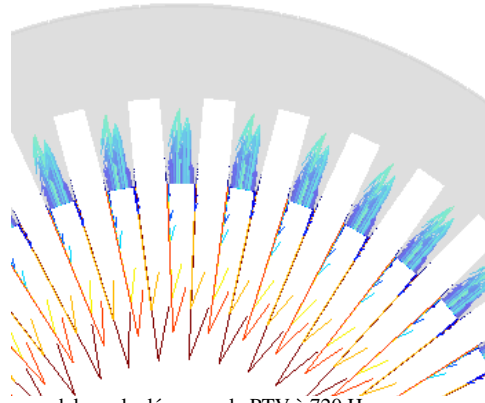


Fig. 1. Forces nodales calculées avec le PTV à 720 Hz.

rattaché à une surface. Une méthode consiste alors à intégrer le morceau de l'onde qui correspond à chaque dent de position angulaire $\alpha_i, i \in [1, Z_s]$ [1] en ne considérant qu'un seul ordre spatial $\hat{\sigma}(n, \omega)$. On obtient alors une onde de force radiale tournante intégrée par dent.

2.2. Effet de modulation

De récentes études ont mis en évidence la présence d'un effet dit de modulation : un nombre d'onde n élevé va être aussi perçu par la culasse comme un nombre d'onde $m = n \pm Z_s$ plus petit. Ainsi le déplacement $Y_{r,i}(n, \omega)$ peut être calculé grâce à $Y_{r,i}(m, \omega)$ selon :

$$Y_{r,i}(n, \omega) = K_{\text{mod}}(n, m) Y_{r,i}(m, \omega) \quad (3)$$

L'amplitude K_{mod} du repliement est différente selon la source. Cela dépend principalement de la méthode d'échantillonnage de l'onde de force. Ainsi, dans la méthode de [4] appelée TM-FANG, la force radiale tournante est intégrée sur le pas dentaire, de sorte que :

$$K_{\text{mod}}(m, n) = \frac{m \sin(n\pi/Z_s)}{n \sin(m\pi/Z_s)} \quad (4)$$

Tandis que dans la méthode appelée TM-WANG [5], l'intégration se fait par rapport à la l'ouverture angulaire β du bout de la dent :

$$K_{\text{mod}}(m, n) = \frac{m \sin(n\beta/2)}{n \sin(m\beta/2)} \quad (5)$$

Néanmoins aucune de ces deux études n'effectue de comparaison avec le PTV : c'est ce que la Section 3 propose de faire.

2.3. Principe des Travaux Virtuels

Le PTV utilisé est le même que dans [3]. Un exemple de résultat des forces radiales à un instant t obtenu pour cette étude est présenté dans la Fig.1. Afin de réaliser une simulation mécanique harmonique avec le même chargement, le maillage de triangles 2-D est extrudé en 3-D sur 8 couches de même longueur, afin d'obtenir un maillage prismatique. Le chargement PTV est ensuite dupliqué sur les nœuds, excepté aux extrémités pour éviter les effets de bords.

3. APPLICATION À UNE MACHINE SYNCHRONE

Une comparaison numérique des méthodologies est réalisée sur une machine synchrone à aimants en surface. Avec le PTV, on conserve le maillage magnétique pour la simulation EF mécanique grâce à une extrusion, alors qu'avec le TM on utilise un maillage mécanique composé d'hexaèdres. La topologie choisie est constituée de 36 encoches au stator, et de 18 paires de pôles. Les 36 aimants sont régulièrement placés sans interstices. Cette topologie donne presque uniquement les ordres (0, 36, -36) dans le spectre des forces : cela permet une comparaison fiable avec

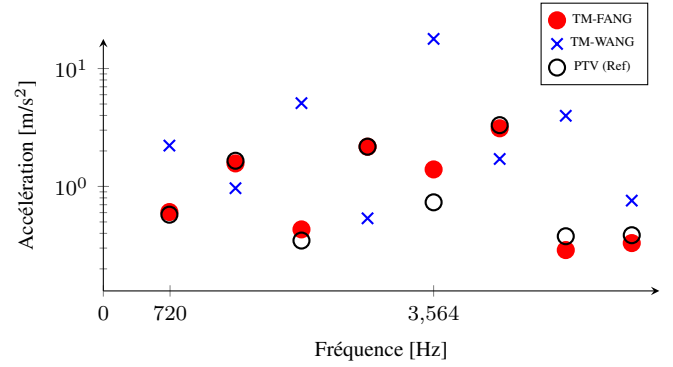


Fig. 2. Amplitude des déplacements (RMS) en fonction de la fréquence.

le PTV en l'absence d'ordres qui parasitent le résultat. D'après l'effet de modulation de la Section 2.2, on voit que les ordres de force (36, -36) sont susceptibles de se replier sur l'ordre 0.

Grâce aux symétries, la simulation EF est réduite à une seule encoche : cela permet de symétriser le maillage afin de réduire le bruit numérique sur la simulation EF mécanique. Pour la même raison, on utilise 306000 éléments triangulaire au total. De plus l'utilisation d'une bande de glissement entre le rotor et le stator permet de conserver le même maillage à tous les pas de temps.

Le résultat de la comparaison est présenté sur la Fig.2. L'accélération du TM est obtenue en simulant seulement le nombre d'onde 0, et en reconstruisant la contribution des ordres 36/-36 grâce aux formules (4) et (5). On observe que la méthode TM-FANG donne un résultat beaucoup plus proche de la référence calculée avec le PTV par rapport à la méthode TM-WANG, en particulier pour la raie à 3564 Hz. La méthode de TM-FANG permet d'obtenir un résultat similaire au PTV avec une erreur inférieure à 5dB (Ref : 1e-6 m²) jusqu'à 6000 Hz.

4. CONCLUSIONS

Lors de cette étude, une méthodologie de validation pour le couplage magnéto-mécanique a été proposée dans le cadre de la simulation numérique du bruit et des vibrations dans les machines électriques. Les résultats de cette étude permettent de mieux expliquer l'intérêt du tenseur de Maxwell. Un cas particulier permettant une comparaison entre un chargement dentaire classique du tenseur de Maxwell et un chargement local calculé avec le principe des travaux virtuels a été réalisé. En particulier, l'effet de modulation et les différentes méthodes pour le prendre en compte furent étudiés. L'une des deux méthodes étudiées est clairement plus précise pour l'application étudiée. La version étendue de ce papier détaillera les paramètres de simulation de la machines et proposera d'améliorer les différences pour prendre en compte les nombres d'ondes plus élevés à l'aide de l'effet de modulation.

5. RÉFÉRENCES

- [1] A. Saito, M. Kuroishi, & H. Nakai, « Vibration Prediction Method of Electric Machines by using Experimental Transfer Function and Magnetostatic Finite Element Analysis », in Journal of Physics : Conference Series, 744(1). 2016
- [2] J. Coulomb, & G. Meunier, « Finite Element Implementation of Virtual Work Principle for Magnetic or Electric Force and Torque Computation », in IEEE Transactions on Magnetics, 20(5), p. 1894-1896, 1984.
- [3] R. Pile, E. Devillers, & J. Le Besnerais, « Comparison of Main Magnetic Force Computation Methods for Noise and Vibration Assessment in Electrical Machines », in IEEE Transactions on Magnetics, 54(7), p. 1-13, 2018
- [4] H. Fang, D. Li, R. Qu, & P. Yan, « Modulation Effect of Slotted Structure on Vibration Response in Electrical Machines », in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66(4), p. 2998-3007, 2019.
- [5] S. Wang, J. Hong, Y. Sun, & H. Cao, « Analysis of Zeroth-Mode Slot Frequency Vibration of Integer Slot Permanent-Magnet Synchronous Motors », in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(4), 2954-2964, 2020.