

Effet de l'angle de charge sur le bruit d'origine électrique dans les machines synchrones à aimants surfaciques

Jean LE BESNERAIS, Emile DEVILLERS

EOMYS ENGINEERING, Lille-Hellemmes, France (www.eomys.com)

RESUME – Cet article étudie l'effet de l'angle de charge sur les efforts harmoniques de Maxwell (tangentiels et radiaux) et les bruits et vibrations d'origine magnétique dans une machine synchrone à aimants surfaciques et bobinage dentaire. L'origine des efforts magnétiques en présence sont d'abord analysés de manière théorique sur une machine à 6 dents et 2 paires de pôles. Des simulations numériques électromagnétiques et vibro-acoustiques sont ensuite réalisées à l'aide du logiciel MANATEE. Il est montré que l'angle du courant optimal permettant de minimiser le bruit de « denture » n'est pas identique à celui minimisant les couples pulsatoires ; de même l'angle du courant minimisant les efforts harmoniques radiaux n'est pas nécessairement celui minimisant les efforts harmoniques tangentiels. L'angle de courant minimisant le courant consommé (MTPA) n'est pas celui minimisant les vibrations d'origine magnétique : un compromis doit donc être effectué entre performances électromagnétiques et vibro-acoustiques.

Mots-clés—*machine synchrones, efforts magnétiques, tenseur de Maxwell, acoustique, vibrations.*

1. INTRODUCTION

1.1. Etat de l'art

L'effet de l'angle de courant (répartition Id/Iq) sur les efforts harmoniques, et plus particulièrement sur les vibrations et le bruit d'origine magnétique, est peu étudié. Dans certaines topologies de machines, et plus particulièrement les machines à bobinage dentaire, des harmoniques d'effort liés au champ d'armature (harmonique de force magnétomotrice statorique) peuvent interagir avec les harmoniques d'effort à vide, pouvant amener une réduction ou une augmentation du niveau de bruit selon la phase des courants, et donc l'angle de charge.

[3] montre que l'amplitude de l'effort harmonique radial de denture (interaction pôle / perméance statorique) est maximum pour Id maximum positif, et minimum pour Id minimum négatif dans une machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et bobinage fractionnaire. En revanche, l'effet sur les efforts pulsants n'est pas étudié, ni la distinction entre efforts harmoniques radiaux et tangentiels. Les efforts tangentiels peuvent pourtant être responsables de bruit et de vibrations supplémentaires via la flexion des dents.

[6][5] montre que l'injection de courants harmoniques dans les axes d et q permet de réduire l'amplitude de l'effort radial

pulsant. En revanche, l'étude porte sur des harmoniques de courant et non sur l'angle du courant fondamental.

[4] montre analytiquement que les efforts radiaux moyens sont à la fois influencés par les courants Id et Iq de manière quadratique, tandis que les efforts tangentiels moyens ne sont influencés que par le courant Iq et de manière linéaire. En revanche, ces considérations portent sur la composante continue des efforts et non sur leurs harmoniques.

Aucune publication de présente donc l'effet généralisé de l'angle de courant sur les efforts harmoniques radiaux et tangentiels, ni sur le bruit rayonné.

1.2. Machine étudiée

La machine étudiée dans cet article est une machine synchrone à aimants permanents montés en surface, à bobinage dentaire à $Z_s=6$ dents et $2p=4$ paires de pôles.

2. ANALYSE THEORIQUE DES EFFORTS MAGNETIQUES

2.1. Principe

Les efforts harmoniques sont caractérisés par leur fréquence électrique f et leur nombre d'onde r (fréquence spatial le long de l'entrefer) :

$$\underline{A}(t, \alpha) = \sum_{\omega, r} \underline{A}_{\omega r} \exp(i(\omega t/p - r\alpha + \varphi_{\omega r}))$$

2.2. Application

Les efforts harmoniques en présence à vide sont identiques en tangential et en radial [2]. Ils comprennent les harmoniques suivantes

- $r=2p=4, f=2f_s$: effort tournant « fondamental »
- $r=2p - Z_s = -2, f=2f_s$: effort tournant de denture
- $r=0, f=6f_s$: effort pulsatoire

On montre qu'aucun nouvel harmonique n'apparaît en charge, le spectre d'effort présente les mêmes raies principales. Les efforts harmoniques liés au champ d'armature peuvent donc interférer destructivement ou constructivement avec les efforts liés au champ des aimants seul suivant l'angle de courant.

3. SIMULATIONS ELECTROMAGNETIQUES ET VIBRO-ACOUSTIQUES

3.1. Logiciel MANATEE

En vue de valider le contenu harmonique théorique des efforts et étudier leur impact sur le niveau de vibration et de bruit selon l'angle de charge, des simulations numériques électromagnétiques et vibro-acoustiques sont réalisées à l'aide de MANATEE® [1]. Le modèle électromagnétique se base sur la méthode de sous domaines [7][8], tandis que le modèle vibroacoustique se base sur des modèles semi-analytiques. Les résultats de MANATEE sont validés favorablement par comparaison à des éléments finis et par des mesures (Figure 1) sur une machine à bobinage dentaire. On montre que deux fortes résonances se produisent, la première présente à vide est liée à une harmonique de force magnétomotrice du rotor, la seconde est due au bobinage dentaire.

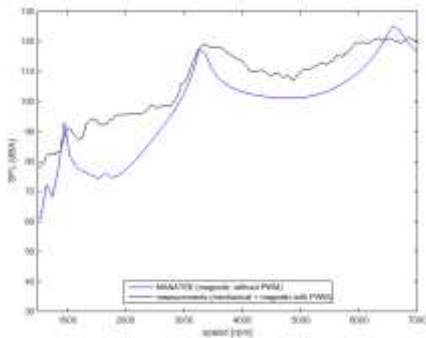


Figure 1 : comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de MANATEE

3.2. Effet de l'angle de charge

Dans un premier temps l'angle de charge est varié de 0 à 360° et l'amplitude des trois sources d'efforts harmoniques est calculée. L'amplitude des efforts tangentiels moyens (représentatifs du couple électromagnétique) et des efforts radiaux moyens sont également calculés, bien qu'ils n'aient pas d'effet vibratoire, étant de fréquence nulle.

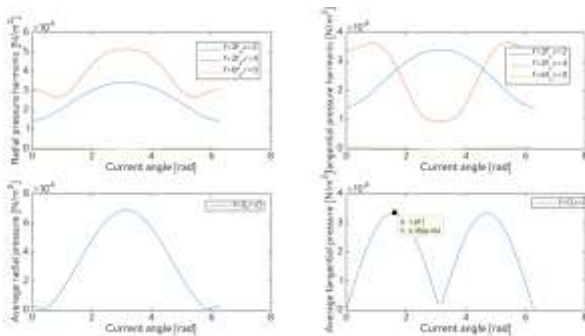


Fig.2 effet de l'angle de charge sur les différents efforts harmoniques

Dans un second temps, l'effet de l'angle de charge sur le bruit est étudié. Il est constaté qu'un compromis doit être effectué entre l'angle de courant optimal pour les performances électromagnétiques et le niveau de bruit à la résonance.

4. CONCLUSIONS

L'effet général de l'angle du courant sur les efforts harmoniques radiaux et tangentiels est étudié dans une machine synchrones à aimants permanents. L'étude montre que l'angle optimal n'est pas le même suivant le type d'onde de vibration (pulsante ou tournante, radial ou tangentielle) à amortir, et qu'un compromis doit être effectué entre minimisation du bruit électrique et maximisation du couple par ampère consommé.

5. REFERENCES

- [1] MANATEE software ("Magnetic Acoustic Noise Analysis Tool for Electrical Engineering"), <http://www.eomys.com>, may 2015 build
- [2] Le Besnerais, J., "Vibroacoustic Analysis of Radial and Tangential Air-Gap Magnetic Forces in Permanent Magnet Synchronous Machines," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.51, no.6, pp.1-9, June 2015
- [3] M. Valavi, A. Nysveen, R. Nilssen, and T. Rolvag, "Slot Harmonic Effect on Magnetic Forces and Vibration in Low-Speed Permanent Magnet Machine with Concentrated Windings," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 9994, no. c, pp. 1-1, 2014.
- [4] Zhu, W.; Pekarek, S.; Fahimi, B., "On the effect of stator excitation on radial and tangential flux and force densities in a permanent magnet synchronous machine," in *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.346-353, 15-15 May 2005
- [5] M. Kanematsu, T. Miyajima, T. Enomoto, M. Kondou, H. Komiya, K. Yoshimoto, and T. Miyakawa, "Suppression control of radial force vibration due to fundamental permanent-magnet flux in IPMSM," *2013 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 2821-2826, Sep. 2013.
- [6] Kanematsu, M.; Miyajima, T.; Fujimoto, H.; Hori, Y.; Enomoto, T.; Kondou, M.; Komiya, H.; Yoshimoto, K.; Miyakawa, T., "Proposal of 6th radial force control based on flux linkage," in *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International*, vol., no., pp.2421-2426, 18-21 May 2014
- [7] L. J. Wu, Z. Q. Zhu, D. Staton, M. Popescu, and D. Hawkins, "Subdomain Model for Predicting Armature Reaction Field of Surface-Mounted Permanent-Magnet Machines Accounting for Tooth-Tips," vol. 47, no. 4, pp. 812-822, 2011.
- [8] Z. Q. Zhu, L. J. Wu, and Z. P. Xia, "An Accurate Subdomain Model for Magnetic Field Computation in Slotted Surface-Mounted Permanent-Magnet Machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 4, pp. 1100-1115, 2010.