



**HAL**  
open science

## Optimisation Géométrique d'une Machine à Commutation de Flux à Aimants Permanents en utilisant un Modèle Analytique Magnéto-Acoustique

Julien Boisson, François Louf, Ojeda Javier, Mininger Xavier, Mohamed Gabsi

### ► To cite this version:

Julien Boisson, François Louf, Ojeda Javier, Mininger Xavier, Mohamed Gabsi. Optimisation Géométrique d'une Machine à Commutation de Flux à Aimants Permanents en utilisant un Modèle Analytique Magnéto-Acoustique. 1er Symposium de Génie Électrique (SGE 2014), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065346

**HAL Id: hal-01065346**

**<https://hal.science/hal-01065346>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimisation Géométrique d'une Machine à Commutation de Flux à Aimants Permanents en utilisant un Modèle Analytique Magnéto-Acoustique

Julien BOISSON<sup>(1)</sup>, François LOUF<sup>(2)</sup>, Javier OJEDA<sup>(1)</sup>, Xavier MININGER<sup>(3)</sup> & Mohamed GABSI<sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup> SATIE, ENS CACHAN, Cachan ; <sup>(2)</sup> LMT, ENS CACHAN, Cachan ; <sup>(3)</sup> LGEP, Gif-sur-Yvette

**RESUME** - Cet article présente une optimisation de la géométrie d'une Machine à Commutation de Flux à Aimants Permanents (MCF-AP) possédant 12 dents statoriques et 10 dents rotoriques. L'optimisation, utilisant un algorithme bi-objectifs avec la théorie des essais particuliers, est basée sur un modèle entièrement analytique magnéto-acoustique. Il vise à obtenir, pour une alimentation et un profil de vitesse de la machine donnés, la meilleure géométrie possible permettant de maximiser le couple électromagnétique tout en minimisant le bruit acoustique rayonné par la structure statorique. Le modèle analytique permet un gain de temps non négligeable par rapport aux modèles numériques, même simples, obtenus à l'aide de méthodes éléments finis. Dans un premier temps, la construction du modèle magnéto-acoustique analytique sera détaillé. Les résultats d'optimisation d'une machine MCF-AP utilisant ce modèle seront ensuite présentés et discutés.

**MOTS-CLES** - Machine à Commutation de Flux ; Optimisation ; Modèle Analytique ; Magnéto-Statique ; Fréquences Propres ; Vibration ; Acoustique

## 1 Introduction

La Machine à Commutation de Flux à Aimants Permanents (MCF-AP) est un convertisseur électromécanique qui possède la particularité d'avoir tous ses éléments actifs - enroulements et aimants permanents - au niveau du stator. Le rotor, constitué uniquement de tôles ferromagnétiques, est quant à lui passif [1][2][3]. Ces structures, si elles possèdent des caractéristiques intéressantes - possibilité de fonctionner à haute vitesse [4] et couple massique important [5][6] - ont un défaut majeur : le bruit acoustique qu'elles génèrent en fonctionnement [7][8]. Pour limiter ce bruit rayonné, trois méthodes sont classiquement envisagées : la première consiste à agir sur la commande de la machine [9]. La seconde consiste à réduire les amplitudes vibratoires par compensation active aux moyen d'actionneurs piézoélectriques [10][11]. La troisième, enfin, consistent à prendre en compte ces contraintes, en amont, dès la conception de la machine. C'est cette approche qui est privilégiée dans ce travail.

La plupart des optimisations réalisées sur la géométrie des MCF-AP l'ont été sur des critères exclusivement électromagnétiques comme avec l'optimisation de la forme des FEM [12] ou la maximisation du couple électromagnétique [13]. De plus, les quelques modèles prenant en compte également des aspects vibratoires et acoustiques - en plus des aspects magnétiques - ont été réalisés la plupart du temps sur des modèles entièrement numériques [14][15] qui certes donnent des résultats satisfaisants, mais demandent un temps de calcul très important, limitant la possibilité d'une intégration dans une boucle d'optimisation.

Cet article propose un modèle entièrement analytique prenant en compte les aspects magnétiques, vibratoires et acoustiques des MCF-AP et son implantation dans une boucle d'optimisation afin de déterminer la meilleure géométrie des MCF-AP permettant de maximiser le couple électromagnétique tout en minimisant le bruit acoustique rayonné pour une commande et un profil de vitesse de la machine donnés. Dans un premier temps, le modèle analytique magnéto-acoustique est présenté (partie 2) puis utilisé dans le cadre d'une optimisation géométrique (partie 3).

## 2 Présentation du modèle analytique magnéto-acoustique des MCF-AP

Le synoptique complet du modèle analytique magnéto-acoustique des MCF-AP proposé dans cet article est introduit sur la Figure 1-(a). Il vise à obtenir, pour une commande, une géométrie et un profil de vitesse de la machine donnés, le couple électromagnétique délivré par la structure ainsi que la puissance acoustique rayonnée. Pour réaliser ce modèle, plusieurs hypothèses ont dû être formulées :

- Seul le bruit d'origine magnétique est considéré
- La déformation du rotor induite par les contraintes magnétiques génère une onde acoustique non prise en compte du fait de son confinement au sein du stator
- Les contraintes magnétiques sont essentiellement localisées au niveau de l'entrefer et seule la composante radiale est considérée
- Les modes propres du stator sont des modes 2D d'ovalisation

**Le modèle analytique magnéto-statique** permet de connaître l'état magnétique de la MCF-AP. A partir d'une géométrie et d'une commande données, le modèle calcul le couple électromagnétique et les contraintes magnétiques radiales dans l'entrefer à l'origine des déformations les plus importantes de la machine. Ce modèle est basé sur une résolution formelle des équations de Maxwell. Les différentes grandeurs magnétiques (potentiel vecteur, induction et champ magnétiques) sont décomposées sous la forme de séries de Fourier développées jusqu'à un certain rang d'harmoniques. Cette méthode est décrite dans [16][17] et est appliquée aux MCF-AP dans [18].

**Le modèle analytique modes propres du stator** permet d'obtenir les fréquences de résonances du stator des MCF-AP à partir de la seule connaissance de sa géométrie et des paramètres des matériaux. Il est basé sur le calcul et la minimisation du quotient de Rayleigh en utilisant une approche énergétique de la théorie des poutres appliquée aux stators. Ce modèle prend en compte les bobinages et les dents statoriques et est présenté dans [19].

**Le modèle analytique vibratoire** permet d'obtenir les déplacements radiaux de la surface extérieure du stator à partir de la connaissance des contraintes magnétiques, des fréquences propres du stator et du profil de vitesse.

**Le modèle analytique acoustique** permet d'obtenir le champ de pression acoustique généré par les déformations du stator. Il est basé sur la résolution de l'équation aux dérivées partielles de l'acoustique linéaire.

### 3 Optimisation des MCF-AP

Le modèle analytique magnéto-acoustique qui a été présenté dans la partie précédente est maintenant utilisé dans le cadre d'une optimisation de la conception des MCF-AP triphasées possédant 12 dents statoriques et 10 dents rotoriques. L'objectif de cette optimisation est d'obtenir, pour une commande et un profil de vitesse données, la meilleure géométrie de la machine :

- maximisant le couple électromagnétique moyen ;
- minimisant le bruit acoustique généré par la structure statorique de la machine.

L'algorithme utilisé pour cette optimisation est un algorithme d'optimisation stochastique bi-objectifs (couple électromagnétique et bruit acoustique) utilisant la théorie des essais particuliers. La commande de la machine se fait à pertes Joules constantes. Le profil de vitesse est un profil allant de 0 à 10 000 *tr/min*. Les machines ont toutes le même diamètre extérieur (75 mm) et toutes la même longueur active (40 mm). Les résultats de cette optimisation sont présentés sur la Figure 1-(b) avec le front de Pareto ainsi que quatre machines de ce front de Pareto.

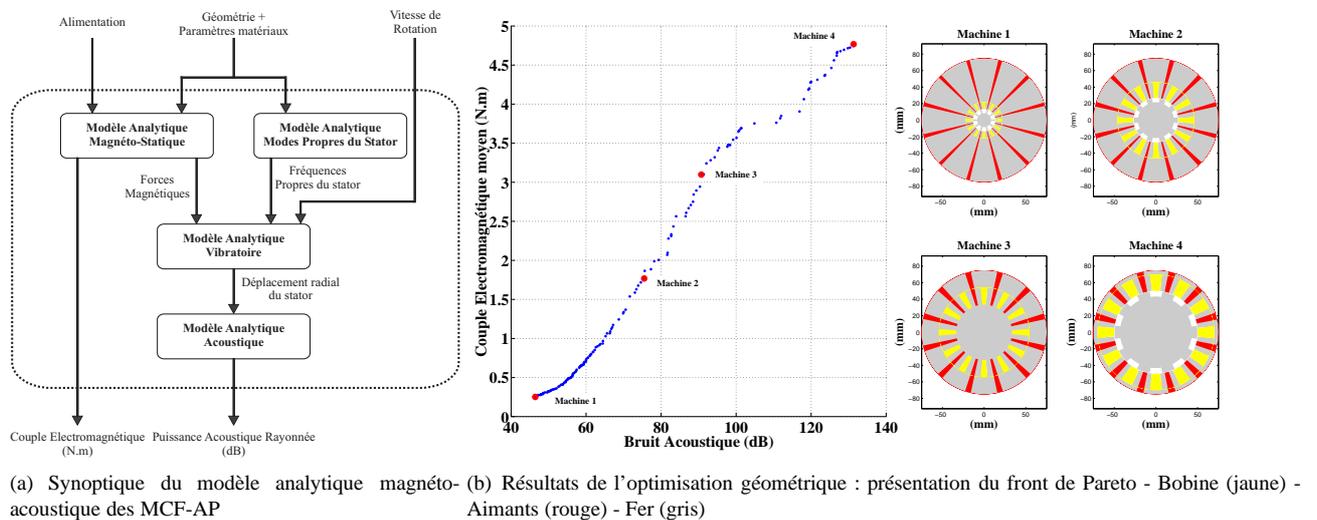


FIGURE 1 – Optimisation de la conception des MCF-AP

### 4 Conclusion

Dans cet article, une optimisation géométrique des machines à commutation de flux à aimants permanents prenant en compte des critères magnétique, vibratoire et acoustiques a été présenté. Cette optimisation, basée sur un modèle entièrement analytique, a été appliquée à des MCF-AP triphasées possédant 12 dents statoriques et 10 dents rotoriques. L'algorithme utilisé est un algorithme bi-objectifs par essais particuliers. L'intérêt d'utiliser un tel modèle provient de son coût en terme de temps de calcul bien plus faible que les modèles numériques. Dans le papier final, nous détaillerons le modèle et les résultats obtenus seront analysés.

## Références

- [1] S. E. Rauch and L. Johnson, "Design principles of flux-switch alternators," *Power apparatus and systems, part iii. transactions of the american institute of electrical engineers*, vol. 74, no. 3, pp. –, 1955.
- [2] E. Hoang, H. Ben Ahmed, and J. Lucidarme, "Switching flux permanent magnet polyphased synchronous machines," in *EPE 97, Trondheim, Norvège, Sep. 1997*. [Online]. Available : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00533004>
- [3] Z. Zhu, "Switched flux permanent magnet machines ; innovation continues," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1–10.
- [4] Z. Zhu and J. Chen, "Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 6, pp. 1447–1453, 2010.
- [5] W. Zhao, M. Cheng, W. Hua, H. Jia, and R. Cao, "Back-emf harmonic analysis and fault-tolerant control of flux-switching permanent-magnet machine with redundancy," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 5, pp. 1926–1935, 2011.
- [6] J. Chen and Z. Zhu, "Winding configurations and optimal stator and rotor pole combination of flux-switching pm brushless ac machines," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 2, pp. 293–302, 2010.
- [7] N. Larsen, A. Gensior, and P. Hein, "Torque ripple reduction based on current control for a flux switching permanent magnet machine," in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on*, 2012, pp. 712–717.
- [8] J. Boisson, F. Louf, J. Ojeda, X. Mininger, and M. Gabsi, "Magnetic forces and vibrational behavior analysis for flux switching permanent magnet machines," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, 2012, pp. 2988–2993.
- [9] J.-W. Ahn, S.-J. Park, and D.-H. Lee, "Hybrid excitation of srm for reduction of vibration and acoustic noise," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 2, pp. 374–380, 2004.
- [10] X. Ojeda, M. Gabsi, M. Lecrivain, and X. Mininger, "Noise reduction using piezoelectric active control on high speeds switched reluctance drives," in *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, 2007, pp. 2204–2209.
- [11] X. Ojeda, X. Mininger, M. Gabsi, C. Kulcsar, H.-F. Raynaud, and M. Lecrivain, "Design of controllers : Vibration damping of switched reluctance machine by piezoelectric actuators," in *Advanced Electromechanical Motion Systems Electric Drives Joint Symposium, 2009. ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on*, 2009, pp. 1–6.
- [12] W. Hua, M. Cheng, Z. Zhu, and D. Howe, "Analysis and optimization of back-emf waveform of a novel flux-switching permanent magnet motor," in *Electric Machines Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International*, vol. 2, 2007, pp. 1025–1030.
- [13] Z. Zhu and X. Liu, "Individual and global optimization of switched flux permanent magnet motors," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1–6.
- [14] G. He, Z. Huang, R. Qin, and D. Chen, "Numerical prediction of electromagnetic vibration and noise of permanent-magnet direct current commutator motors with rotor eccentricities and glue effects," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 5, pp. 1924–1931, 2012.
- [15] D. Torregrossa, B. Fahimi, F. Peyraut, and A. Miraoui, "Fast computation of electromagnetic vibrations in electrical machines via field reconstruction method and knowledge of mechanical impulse response," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 2, pp. 839–847, 2012.
- [16] B. L. J. Gysen, K. Meessen, J. J. H. Paulides, and E. Lomonova, "General formulation of the electromagnetic field distribution in machines and devices using fourier analysis," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 1, pp. 39–52, 2010.
- [17] B. Gaussens, O. De la Barriere, E. Hoang, J. Saint-Michel, P. Manfe, M. Lecrivain, and M. Gabsi, "Magnetic field solution in doubly slotted airgap of conventional and alternate field-excited switched-flux topologies," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 9, pp. 5083–5096, 2013.
- [18] B. L. J. Gysen, E. Ilhan, K. Meessen, J. J. H. Paulides, and E. Lomonova, "Modeling of flux switching permanent magnet machines with fourier analysis," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 6, pp. 1499–1502, 2010.
- [19] J. Boisson, F. Louf, J. Ojeda, X. Mininger, and M. Gabsi, "Analytical approach for mechanical resonance frequencies of high-speed machines," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2013.