



HAL
open science

Effet de l'angle de charge sur les harmoniques d'efforts magnétiques dans les machines synchrones à aimants permanents surfaciques

Jean Le Besnerais, Emile Devillers, Michel Hecquet, Jean-Philippe Lecointe

► To cite this version:

Jean Le Besnerais, Emile Devillers, Michel Hecquet, Jean-Philippe Lecointe. Effet de l'angle de charge sur les harmoniques d'efforts magnétiques dans les machines synchrones à aimants permanents surfaciques. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361695

HAL Id: hal-01361695

<https://hal.science/hal-01361695v1>

Submitted on 7 Sep 2016

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.

Effet de l'angle de charge sur les harmoniques d'efforts magnétiques dans les machines synchrones à aimants permanents surfaciques

Emile DEVILLERS^{1,2}, Jean LE BESNERAIS¹, Michel HECQUET², Jean-Philippe LECOINTE³

¹EOMYS ENGINEERING, Lille-Hellemmes, France (www.eomys.com)

²L2EP, Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France

³LSEE, Université d'Artois, Béthune, France

RESUME – Cet article étudie l'effet de l'angle de charge sur les efforts harmoniques de Maxwell (tangentiels et radiaux) dans deux machines synchrones à aimants permanents (MSAP) surfaciques d'architectures très différentes : une machine à 6 dents et 2 paires de pôles, à faible couple et très haute vitesse, et une autre à 120 dents et 58 paires de pôles, à fort couple et faible vitesse. Les efforts magnétiques en présence sont d'abord analysés de manière théorique. Des simulations numériques électromagnétiques sont ensuite réalisées à l'aide du logiciel MANATEE. On montre la difficulté d'établir a priori des règles générales pour déterminer l'angle de charge qui permet de minimiser un certain effort harmonique. Dans les deux cas étudiés, on constate cependant que l'angle de charge maximisant le couple ne minimise ni ne maximise aucun des efforts harmoniques parasites, radiaux ou tangentiels. En cas de présence d'un couple pulsatoire, il n'est pas possible de le minimiser tout en minimisant les efforts tournants de dentures. Cette étude sert de base à l'établissement d'un compromis entre performances électromagnétiques et vibro-acoustiques.

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

1. INTRODUCTION

1.1. Phénomènes de bruits et vibrations d'origine magnétiques

Les efforts magnétiques de Maxwell peuvent être caractérisés en terme de direction (composante radiale ou tangentielle), en terme de fréquence, de nombre d'onde et de sens de rotation à l'aide d'une décomposition en série de Fourier. Les ondes

1.2. 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.

D'après [3], 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 machine synchrone à grand nombre de paires de pôles et bobinage fractionnaire (générateur éolien). En revanche, l'effet sur les efforts pulsants (nombre d'onde $r=0$) 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 par l'intermédiaire de la flexion des dents.

L'injection de courants harmoniques dans les axes d et q peut permettre de réduire l'amplitude de l'effort radial pulsant [6][7]. En revanche, l'étude porte sur des harmoniques de courant et non sur l'angle du courant fondamental.

Dans [5], il est montré 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 ne présente donc l'effet généralisé de l'angle de courant sur les efforts harmoniques radiaux et tangentiels, en regard de leur effet vibratoire et acoustique.

1.3. Machines étudiées

Les deux machines étudiées diffèrent grandement par leur taille et leur application, de manière à élargir au maximum le champ de l'étude.

La première machine étudiée dans cet article, que l'on appellera MSAP *6s4p*, est une machine synchrone à aimants permanents montés en surface, à bobinage dentaire à $Z_s = 6$ dents et $2p = 4$ pôles (cf Figure 1.a)). C'est une machine destinée aux applications haute vitesse à faible couple moteur. Elle est également utilisée dans [9].

La deuxième machine, que l'on appellera MSAP *120s116p*, est aussi une machine synchrone à aimants permanents montés en surface, à bobinage distribué, avec $Z_s = 120$ dents et $2p = 116$ pôles (cf Figure 1.b)). C'est une machine destinée aux applications à faible vitesse à fort couple générateur (éolien). C'est également la machine utilisée dans [3].

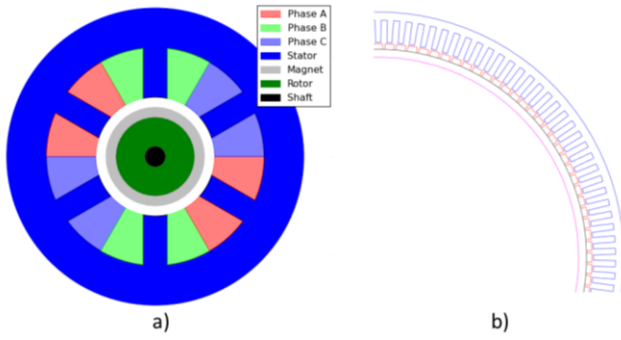


Figure 1 Géométrie des deux machines étudiées

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 spatiale le long de l'entrefer) par développement en série de Fourier :

$$\underline{A}(t, \alpha) = \sum_{f,r} A_{\omega r} \exp(i(2\pi f t - r\alpha + \varphi_{fr}))$$

La composante statique des efforts d'ordre $r=0$ donne à la fois le couple électromagnétique moyen, ainsi qu'un effort radial moyen qui tend à réduire l'entrefer. Les efforts harmoniques d'ordre $r=0$ sont dits pulsants : leur composante tangentielle ne peut rayonner directement du bruit via les vibrations tangentielles du stator, mais les conditions aux limites peuvent induire des vibrations radiales capables de rayonner du bruit ; leur composante radiale génère des déformations radiales du stator et du bruit. Les efforts harmoniques d'ordre $r=1$ sont à l'origine d'un balourd magnétique qui peut exciter le mode de flexion du rotor. Enfin les efforts radiaux et tangentiels d'ordre supérieurs à 2 peuvent tous les deux générer des déformations radiales de la culasse et rayonner du bruit [13].

2.2. Application

Les efforts harmoniques en présence à vide sont identiques (en termes de fréquences et de nombre d'onde) en tangential et en radial [2]. Pour la MSAP $6s4p$, ils comprennent les harmoniques suivants :

- $r = 2p = 4, f = 2f_s$: effort tournant « fondamental », lié au champ fondamental au carré,

- $r = Z_s - 2p = 2, f = 2f_s$: effort tournant de denture, donné par $r = GCD(Z_s, 2p)$,

- $r = 0, f = 6f_s$: effort pulsatoire, dont la fréquence est donnée par $f = LCM(Z_s, 2p)f_s/p$,

Pour la MSAP $120s116p$, ils comprennent les harmoniques suivantes :

- $r = Z_s - 2p = 4, f = 2f_s$: effort tournant de denture, donné par $r = GCD(Z_s, 2p)$,

- $r = 4p - 2Z_s = -8, f = 2f_s$: effort tournant de denture, d'ordre 2.

Comme la MSAP $120s116p$ présente un grand nombre de pôles, l'effort fondamental se situe à haute fréquence : $f = LCM(2p, Z_s) f_s/2 = 60f_s$ et ne sera donc pas pris en compte, la structure ayant des fréquences naturelles très basses.

On montre qu'aucun nouvel harmonique n'apparaît en charge dans les deux machines, le spectre d'effort présentant 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, qui va agir sur le déphasage relatif du fondamental du champ d'armature et du fondamental du champ des aimants.

3. DETERMINATION DES EFFORTS ELECTROMAGNETIQUES

3.1. Logiciel MANATEE

En vue de valider le contenu harmonique théorique des efforts et étudier leur impact sur les efforts magnétiques, les vibrations induites et le niveau 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 exacte des sous domaines [8][9][11], validée au préalable par la méthode des éléments finis

Le modèle vibro-acoustique se base sur des modèles semi-analytiques [12]. Les résultats de MANATEE sont validés favorablement par comparaison à des éléments finis et par des mesures (Figure 2) 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.

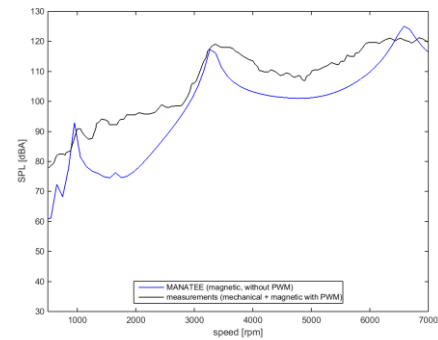


Figure 2 : comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de MANATEE

3.2. Calcul du champ dans l'entrefer

Dans un premier temps, le champ est calculé à vide (NL : *No-Load, circuit ouvert*), uniquement avec champ d'armature (AL : *Armature-Load, champ d'armature uniquement*) et en charge (FL : *Full-Load, en charge*) avec angle de charge nul pour vérifier que le spectre varie peu entre à vide et en charge. La méthode des sous-domaines et des éléments finis sont utilisées, et donnent des résultats de précision équivalente.

L'induction magnétique est calculée dans l'entrefer pour 1024 pas angulaires et 2048 pas temporels pour la MSAP $6s4p$ (respectivement 8192 pas angulaires et 1024 pas temporels pour la MSAP $120s116p$), et pour 41 valeurs différentes de l'angle de charge. Les efforts magnétiques sont obtenus par la méthode du tenseur de Maxwell. La discrétisation fine du champ dans l'espace et dans le temps permet de calculer la transformée de Fourier 2D (FFT2D) des efforts magnétiques. L'utilisation du modèle de sous-domaines permet d'obtenir des temps de calculs très intéressants : environ 58 sec pour la petite machine et environ 220 sec pour l'autre, pour l'ensemble des points de charge.

Pour la MSAP 6s4p :

Les Figure 3, Figure 4 et Figure 5 présentent le champ d'entrefer dû aux aimants, dû à l'armature et le champ total en charge pour un pas de temps donné en comparant les sous domaines et les éléments finis. Malgré des géométries d'encoches non polaires le modèle sous domaine donne d'excellents résultats.

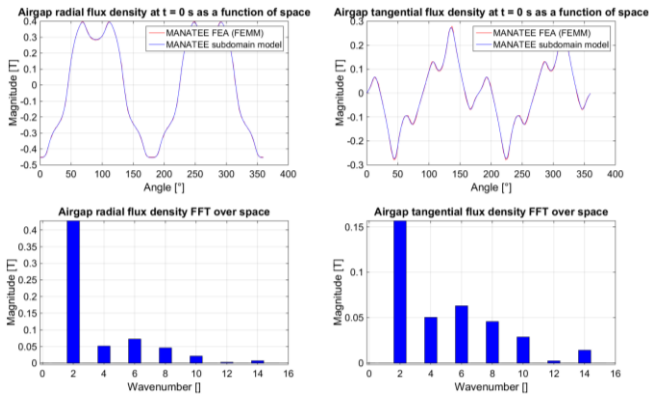


Figure 3 Induction magnétique dans l'entrefer due aux aimants

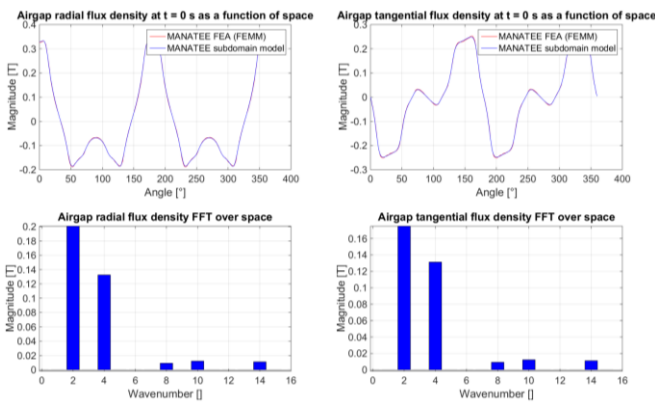


Figure 4 Induction magnétique dans l'entrefer due au champ d'armature

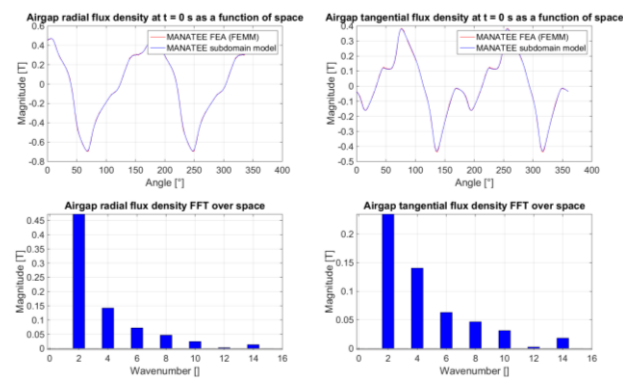


Figure 5 Induction magnétique totale dans l'entrefer, en charge ($\varphi = 90^\circ$)

Pour la MSAP 120s116p :

Les Figure 6, Figure 7 et Figure 8 présentent les mêmes résultats pour la seconde machine. Elles peuvent être comparées favorablement aux résultats éléments finis de [3].

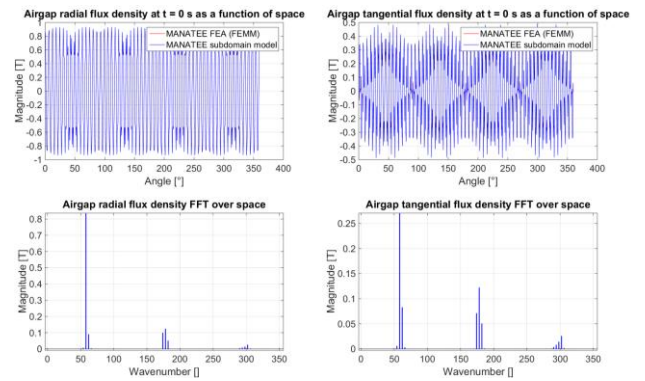


Figure 6 Induction magnétique dans l'entrefer, moteur à vide

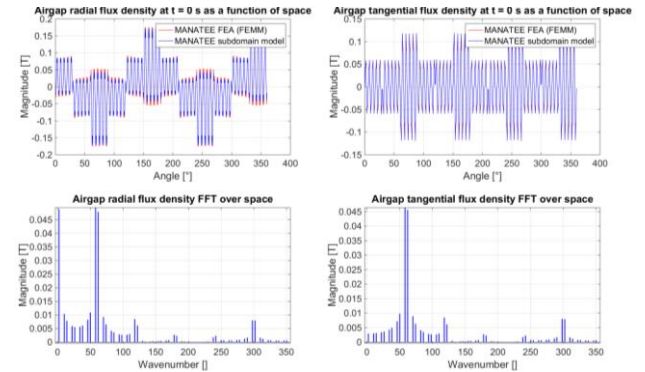


Figure 7 Induction magnétique dans l'entrefer, charge statorique

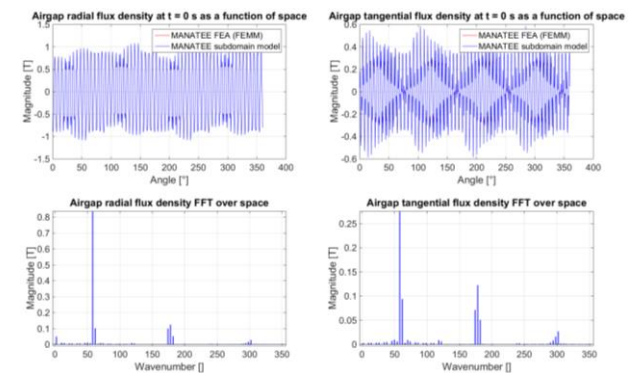


Figure 8 Induction magnétique dans l'entrefer, en charge ($\varphi = 90^\circ$)

3.3. Calcul et FFT2D des efforts magnétiques

La distribution spatiale et temporelle des composantes radiales et tangentielles de l'induction magnétique permet de calculer les efforts magnétiques dans l'entrefer et de retrouver les résultats de l'analyse théorique. L'étude qui suit est faite en charge, pour un angle de courant nul. Les efforts magnétiques sont directement représentés sous forme d'une FFT2D de manière à expliciter les fréquences spatiales et temporelles en jeu.

Les croix rouges et noirs sont les modes de structures du stator, et sont donc indépendants de la fréquence d'excitation magnétique.

Pour la MSAP 6s4p :

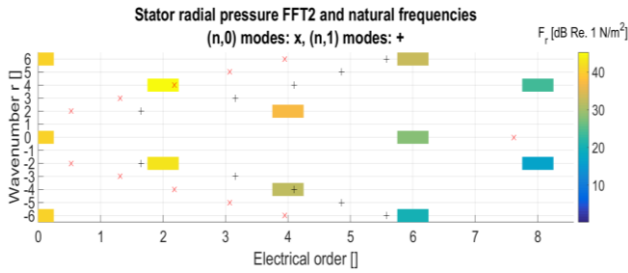


Figure 9 FFT2D de la pression magnétique radiale d'entrefer

Les fréquences sont exprimées en ordre électrique. Il faut les multiplier par f_s , fréquence électrique fondamentale, pour les convertir en Hz. Les fréquences d'ordre électrique supérieur à 8 ne sont pas retenues dans cette étude.

D'autre part, on remarque des ordres $r = \pm 6, f = 0$ en haut à gauche et en bas à gauche de la figure 9, qui n'étaient pas prédits lors de l'étude théorique. En réalité, ces ordres s'annulent car ils sont de même amplitude et en opposition de phase, comme le montre la Figure 10.

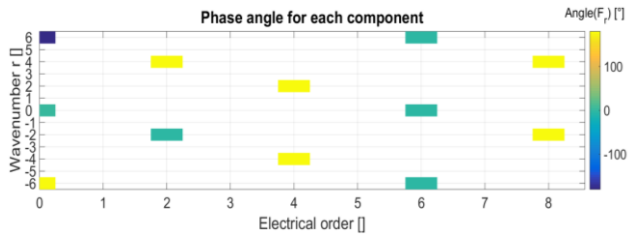


Figure 10 Angle de phase des composantes de la pression radiale

On remarque aussi que les ordres temporels et spatiaux sont les mêmes pour les forces radiales (Figure 9) et tangentiels (Figure 11) [2].

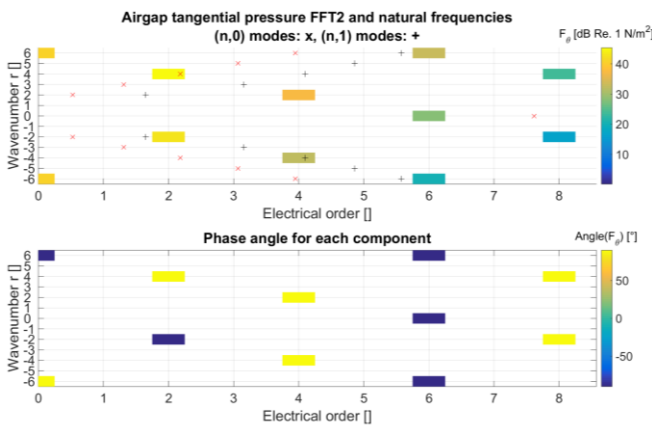


Figure 11 FFT2D de la pression magnétique tangentielle d'entrefer

On voit que lorsque la vitesse varie les efforts d'ordre 2 et 4 peuvent coïncider avec des modes de structures. La déformée radiale de la culasse peut être causée à la fois par les efforts harmoniques tangentiels (dents sollicités en torsion) et radiaux (dents sollicités en traction / compression); le comportement à la résonance dépend à la fois du déphasage « électrique » (déphasage des ondes d'effort magnétique) et « mécanique » (déphasage des ondes de déformation résultante).

Pour la MSAP 120s116p :

La représentation en FFT2D des efforts radiaux (Figure 12) et tangentiels (Figure 13) est moins probante pour les machines à grand nombre de pôles et de dents. En effet, on observe uniquement les deux harmoniques de dentures. Le spectre est

très riche pour des ordres électriques supérieurs qui ne sont pas considérés dans cette étude.

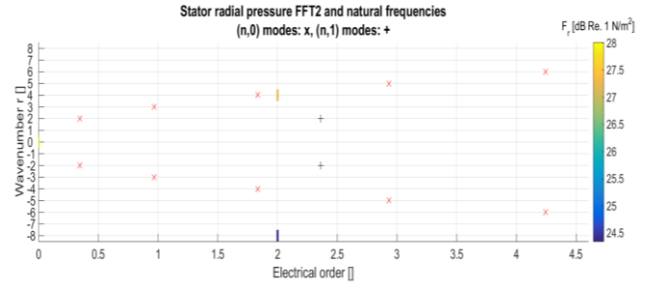


Figure 12 FFT2D de la pression magnétique radiale d'entrefer

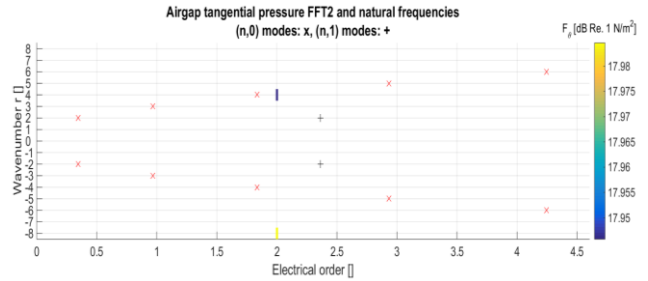


Figure 13 FFT2D de la pression magnétique tangentielle d'entrefer

On remarque également qu'une résonance peut se produire entre la structure et les efforts magnétiques.

4. EFFET DE L'ANGLE DE CHARGE

Une étude de sensibilité est réalisée en évaluant 41 valeurs de l'angle de courant, qui est également l'angle de charge pour les MSAP.

Dans un premier temps l'angle de charge varie de 0 à 360° et l'amplitude des sources d'efforts harmoniques est calculée à amplitude de courant constante. 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.

La comparaison entre circuit ouvert (NL) et en charge (AL) permet de montrer comment les efforts à angle de charge variable interfèrent avec les efforts dus aux aimants seuls.

4.1. Pour la MSAP 6s4p :

Le couple est présenté en Figure 14 et Figure 15. Il est naturellement maximal pour un angle de 90°.

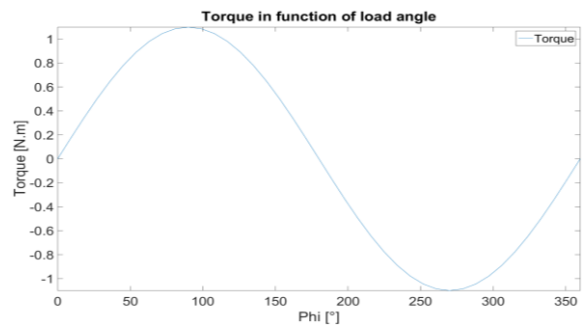


Figure 14 : courbe du couple en fonction de l'angle de courant pour la MSAP 6s4p

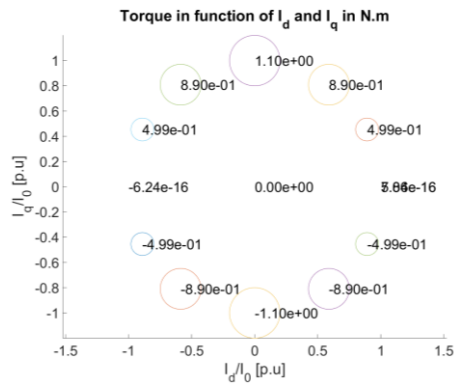


Figure 15: représentation polaire du couple ($r=0$, $f=0$, tangentiel) en fonction des courants I_d et I_q pour la MSAP $6s4p$

L'évolution des efforts harmoniques radiaux est présentée en Figure 16 et Figure 17. Cette dernière figure reprend la représentation utilisée dans [3]. Pour effectuer des considérations vibro-acoustiques il peut être utile de rappeler que le bruit et les vibrations varient avec l'amplitude de l'effort F en $20 \log_{10}(F)$. Ainsi un facteur 2 donne 6 dB de variation et un facteur 10 donne 20 dB de variation.

On peut effectuer les conclusions suivantes :

- L'effort radial moyen est maximisé pour I_q maximal ($\varphi = 180^\circ$) et ne s'annule pas pour I_q nul ($\varphi = 0^\circ$) au point considéré
- L'effort radial « fondamental » ($f = 2f_s, r = 4$) est maximal en $\varphi = 180^\circ$ et minimal en $\varphi = 45^\circ$
- Le minimum des efforts liés au champ fondamental ($f = 0, r = 0$) et ($f = 2f_s, r = 4$) est atteint pour des angles de courant proches de 45° et 55°
- L'effort pulsant radial à $6f_s$ a une évolution opposée aux autres harmoniques et est minimisé pour $\varphi = 180^\circ$
- L'angle de charge maximisant le couple ne minimise ni ne maximise aucun des efforts harmoniques radiaux parasites
- L'angle de charge fait varier l'harmonique de denture jusqu'à 6 dB
- L'effet de l'angle de charge est le plus important sur l'effort pulsant radial (20 dB de variation)

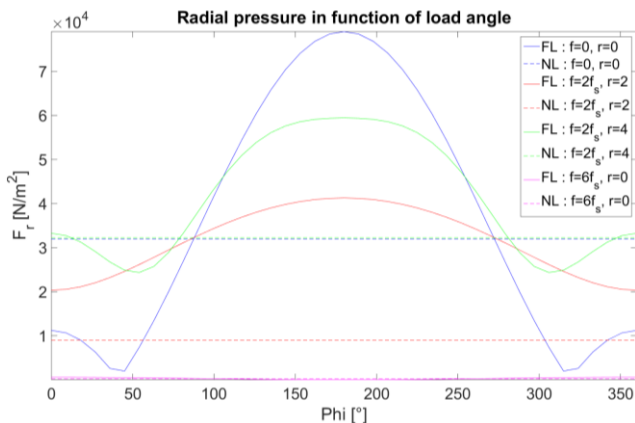
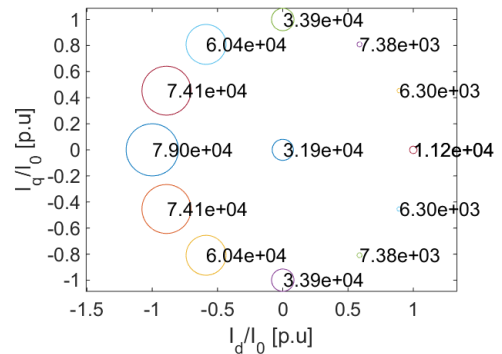
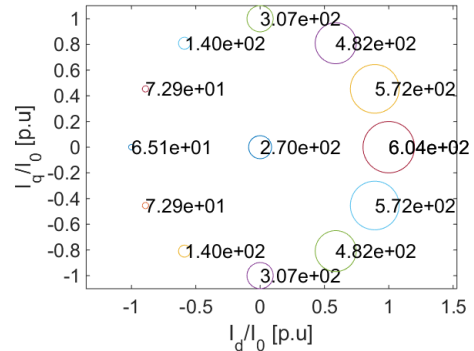


Figure 16: courbe de l'amplitude des efforts radiaux harmoniques en fonction de l'angle de courant pour la MSAP $6s4p$ (FL : en charge, NL : en circuit ouvert)

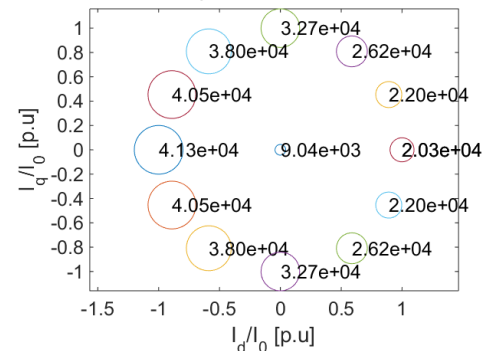
Radial force for $f=0f_s, r=0$ in function of load angle in N



Radial force for $f=6f_s, r=0$ in function of load angle in N



Radial force for $f=2f_s, r=2$ in function of load angle in N



Radial force for $f=2f_s, r=4$ in function of load angle in N

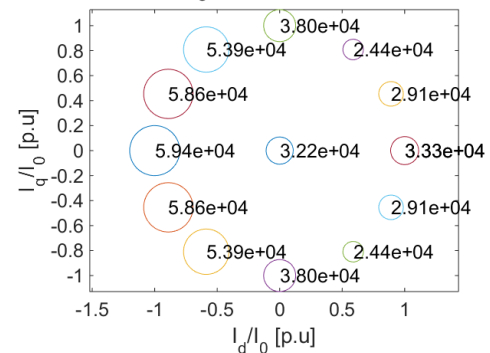


Figure 17: représentation polaire des efforts harmoniques radiaux en fonction des courants I_d et I_q pour la MSAP $6s4p$

Les résultats sur les efforts harmoniques tangentiels sont présentés dans les Figure 18 et Figure 19. On constate que :

- L'effort tangentiel « fondamental » ($f = 2f_s, r = 4$) est maximal en $\varphi = 60^\circ$ et minimal en $\varphi = 150^\circ$, et donc décorrélé de l'effort radial « fondamental ».
- L'effort pulsant tangentiel à $6f_s$ est minimisé pour $\varphi = 180^\circ$, tout comme l'effort pulsant radial
- L'évolution des efforts tangentiels de denture ($f = 2f_s, r = 2$) et pulsant ($f = 6f_s, r = 0$) est en phase

avec les efforts radiaux correspondants, et maximum pour $\varphi = 180^\circ$

- L'angle de charge maximisant le couple ne minimise ni ne maximise aucun des efforts harmoniques tangentiels parasites, comme c'est le cas sur les efforts radiaux
- L'effet de l'angle de charge est le plus important sur l'effort pulsant tangential, comme c'est le cas sur les efforts radiaux

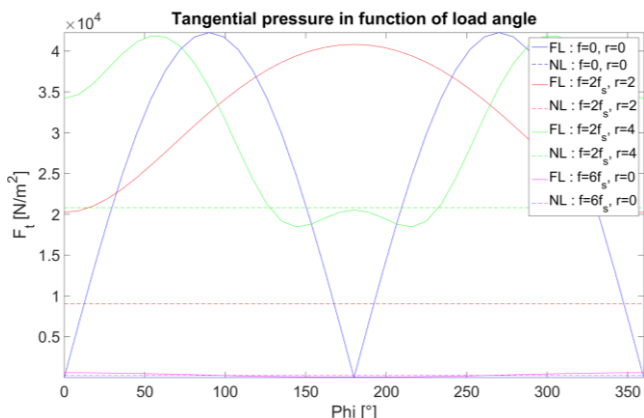
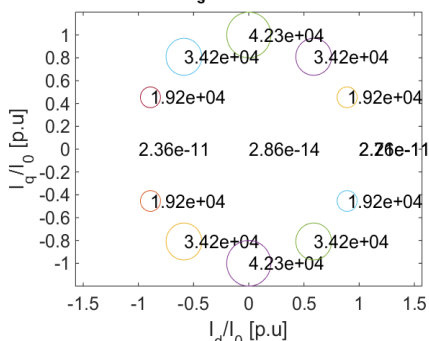
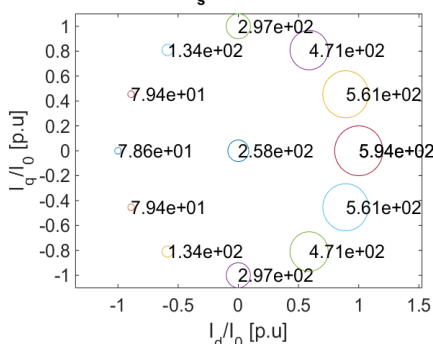


Figure 18: courbe de l'amplitude des efforts tangentiels harmoniques en fonction de l'angle de courant pour la MSAP 6s4p

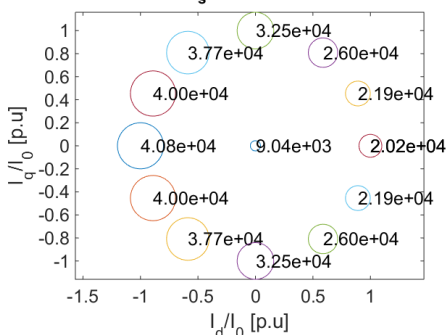
Tangential force for $f=0f_s, r=0$ in function of load angle in N



Tangential force for $f=6f_s, r=0$ in function of load angle in N



Tangential force for $f=2f_s, r=2$ in function of load angle in N



Tangential force for $f=2f_s, r=4$ in function of load angle in N

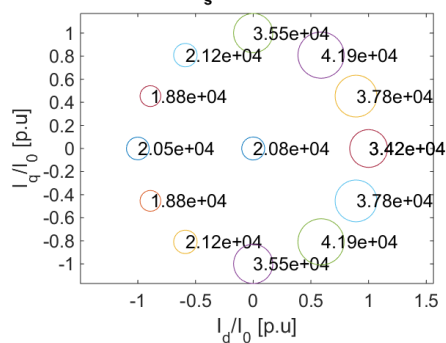


Figure 19 : représentation polaire des efforts harmoniques tangentiels en fonction des courants Id et Iq pour la MSAP 6s4p

4.2. Pour la MSAP 120s116p :

Le couple est présenté en Figure 1420 et Figure 1521 et son évolution est similaire à celui de la MSAP 120s116p.

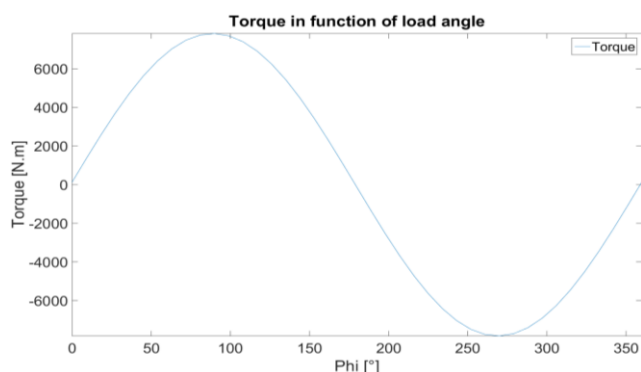


Figure 20: courbe du couple en fonction de l'angle de courant pour la MSAP 120s116p

Torque in function of Id and Iq in N.m

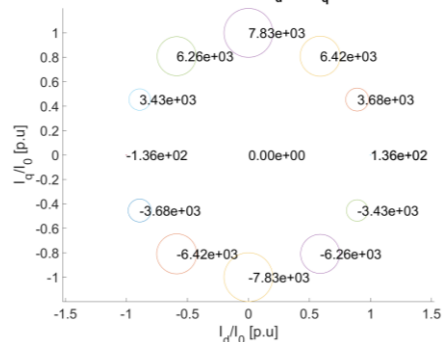


Figure 21: représentation polaire du couple ($r=0, f=0$, tangential) en fonction des courants Id et Iq pour la MSAP 120s116p

Dans le cas de la MSAP 120s116p, l'évolution des efforts harmoniques radiaux est présentée en Figure 16 et Figure 1723. Les conclusions suivantes peuvent être faites :

- Contrairement à la machine MSAP 6s4p l'harmonique radiale de denture est minimisée pour $\varphi = 180^\circ$
- L'harmonique de denture ($f = 2f_s, r = 8$) varie très peu en fonction de l'angle de charge

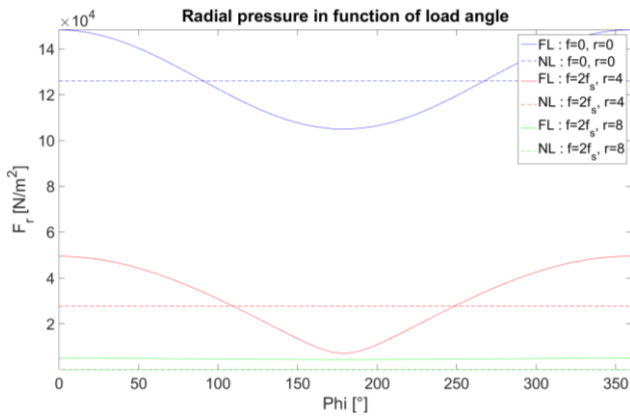


Figure 22: courbe de l'amplitude des efforts radiaux harmoniques en fonction de l'angle de courant pour la MSAP 120s116p

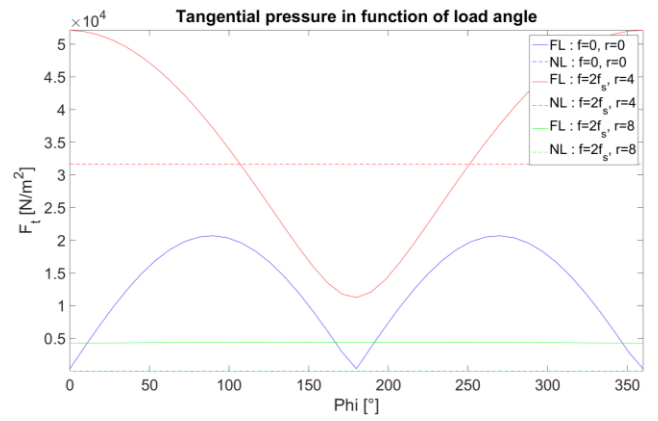
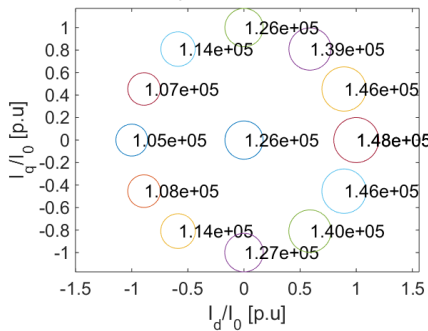
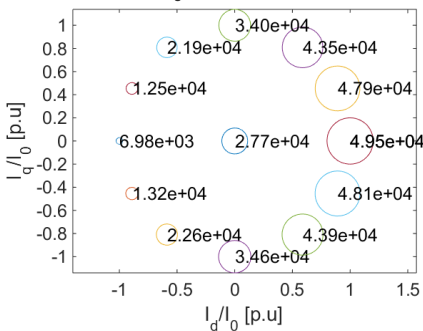


Figure 24: courbe de l'amplitude des efforts tangentiels harmoniques en fonction de l'angle de courant pour la MSAP 120s116p

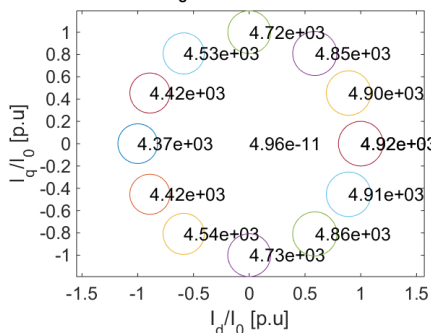
Radial force for $f=0f_s, r=0$ in function of load angle in N



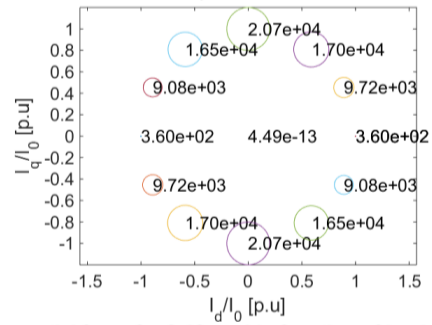
Radial force for $f=2f_s, r=4$ in function of load angle in N



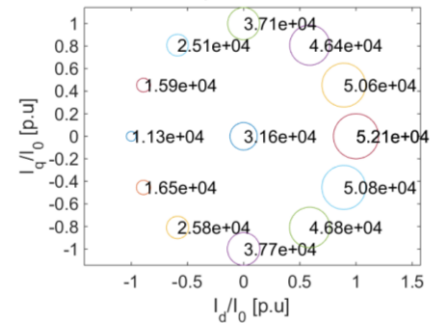
Radial force for $f=2f_s, r=8$ in function of load angle in N



Tangential force for $f=0f_s, r=0$ in function of load angle in N



Tangential force for $f=2f_s, r=4$ in function of load angle in N



Tangential force for $f=2f_s, r=8$ in function of load angle in N

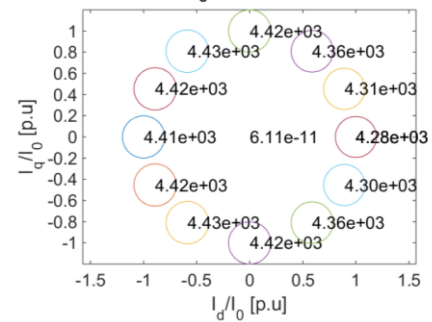


Figure 25: représentation polaire des efforts harmoniques tangentiels en fonction des courants Id et Iq pour la MSAP 120s116p

Figure 23: représentation polaire des efforts harmoniques radiaux en fonction des courants Id et Iq pour la MSAP 120s116p

Les résultats sur les efforts harmoniques tangentiels sont présentés dans les Figure 1824 et Figure 1925. On constate que :

- L'effort tangential de denture ($f = 2f_s, r = 4$) est en phase avec l'effort radial équivalent
- Le rapport d'amplitude entre l'effort tangential de denture ($f = 2f_s, r = 4$) et l'effort moyen est inversé par rapport aux efforts radiaux correspondants.

On constate que la figure obtenue pour ($f = 2f_s, r = 4$) est exactement celle calculée dans [4] à l'aide d'un modèle éléments finis (voir Figure 26) particulièrement lourd puisque la machine présente peu de symétries. Les ordres de grandeurs des amplitudes sont également respectés.

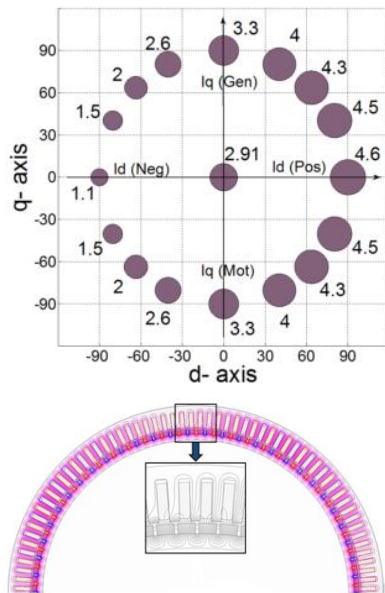


Figure 26: évolution de l'effort radial harmonique d'ordre 4 en fonction de l'angle de courant (en haut, en 10^4 N/m^2) obtenu à l'aide du modèle éléments finis (en bas) par [4]

La sensibilité par rapport à l'amplitude du courant à angle de charge fixe sera exposée dans un futur article. On peut néanmoins préciser que les efforts dépendent aussi de l'amplitude du courant, et que c'est un paramètre à prendre en compte pour minimiser un certain effort.

5. CONCLUSIONS

L'effet de l'angle du courant sur les efforts statiques et harmoniques radiaux et tangentiels est étudié dans deux machines synchrones à aimants permanents à l'aide de modèles électromagnétiques de type sous domaines implémentés dans le logiciel électromagnétique et vibro-acoustique MANATEE [1]. En quelques secondes de simulation, des résultats trouvés dans [4] par éléments finis sont retrouvés et généralisés.

Au vu des résultats obtenus, on montre qu'il n'y a a priori pas de lois générales pour déterminer l'angle de charge qui permet de minimiser un certain effort harmonique. Dans les deux cas étudiés, on constate cependant que l'angle de charge maximisant le couple ne minimise ni ne maximise aucun des efforts harmoniques parasites, radiaux ou tangentiels. Pour la MSAP $6s4p$, l'angle de charge a le plus d'influence sur les efforts pulsants puis sur les efforts de denture en amplitude relative. D'autre part, l'angle de charge qui minimise les efforts pulsants est différent de celui qui minimise les efforts de denture. Pour la MSAP $120s116p$, on note la prépondérance de l'effort tangentiel de denture sur l'effort moyen.

En couplant cette étude des efforts magnétiques avec une étude structurelle, on déduit les vibrations et le bruit générés par la machine. Ainsi, on peut établir une stratégie d'optimisation du couple et du bruit généré par le pilotage de l'angle de charge et de l'amplitude du courant.

6. 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] M. Valavi, A. Nysveen, and R. Nilssen, "Effects of Loading on Radial Magnetic Forces in Low-Speed Permanent Magnet Machine with Concentrated Windings."
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] 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," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 4, pp. 812–822, 2011.
- [9] 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.
- [10] A. Gilson, S. Tavernier, M. Gerber, C. Espanet, F. Dubas and D. Depernet, "Design of a cost-efficient high-speed high-efficiency PM machine for compressor applications," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, 2015, pp. 3852-3856.
- [11] E. Devillers, J. Le Besnerais, M. Hecquet and J.P. Lecoq, "A review of subdomain modeling techniques in electrical machines: performances and applications", *Submitted to the International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016
- [12] J. Le Besnerais, "Fast prediction of acoustic noise and vibrations due to magnetic forces in electrical machines," *Submitted to the International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016.
- [13] J. Le Besnerais, P. Pellerey, V. Lanfranchi et M. Hecquet, « Bruit audible d'origine magnétique dans les machines synchrones », *Techniques de l'Ingénieur*, D3581, nov 2013