

Modélisation par réluctances du flux dans l'entrefer d'une machine à rotor à aimants en surface

Alix BERNOT^{1,2}, François BERNOT³, Jean-Claude VANNIER¹

¹GEEPS, CentraleSupélec, Gif-sur-Yvette, France, ²Zodiac Aerospace, Auxerre, France, alix.bernot@zodiac aerospace.com

³Francecol Technology, Luynes, France

RÉSUMÉ – L'objectif de cette étude est d'obtenir un modèle par circuit magnétique équivalent d'une machine associant un stator à griffes à un rotor à aimants en surface. La problématique de la circulation du flux dans l'entrefer est isolée, avec une réduction à une machine 2D à dents de même largeur que les aimants ; la circulation tridimensionnelle du flux dans le fer faisant l'objet d'une étude ultérieure. Le premier modèle, avec un flux radial dans l'entrefer, ne rend pas bien compte du comportement du couple à vide. Un second modèle introduit alors une hypothèse d'inclinaison du flux principal dans l'entrefer afin de mieux rendre compte du comportement de la machine autour de 90° (angle électrique).

Mots-clés—Machine à aimants en surface, Machine à griffes, Circuit magnétique équivalent, Réseau de réluctances

1. INTRODUCTION

L'objectif de cette étude est la modélisation d'une machine électrique associant un stator à griffes en SMC à un rotor à aimants permanents en surface. Ces structures à grand nombre de paires de pôles ont plusieurs avantages pour des machines de vitesses faibles à moyennes [1]. Le stator, de réalisation économique, est à base de SMC, qui permet une circulation tridimensionnelle du flux.

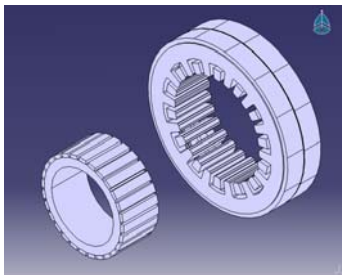


Figure 1 : Rotor et stator de la machine étudiée

2. PROBLÉMATIQUE ÉTUDIÉE

2.1. Choix de la méthode de modélisation

La circulation du flux à l'intérieur de la machine étudiée est tridimensionnelle, en particulier à l'intérieur du stator, à l'intérieur duquel le flux se reboucle en circulant dans la direction de l'axe de rotation. La modélisation de cette machine par éléments finis est donc nécessairement tridimensionnelle ; elle est précise mais prend un temps important. La circulation du flux dans le fer du stator est complexe, avec un effet de concentration de flux dans le pied de dent, ce qui rend difficile l'usage des modèles analytiques de calcul de champ dans l'entrefer, souvent basés sur les calculs des premiers harmoniques [2]. Cette étude s'oriente donc vers l'utilisation d'une modélisation par circuit magnétique équivalent, de complexité intermédiaire, avec un temps de calcul contenu [3].

2.2. Réduction du problème

Un premier aperçu de la circulation des flux dans la machine fait apparaître deux problématiques distinctes, assez spécifiques à la machine à griffes : la circulation des flux dans le fer du stator, tridimensionnelle et fortement non linéaire d'un côté, et la circulation des flux dans l'entrefer, essentiellement linéaire mais complexe en raison des transitions brutales aux frontières latérales des dents du stator et des aimants du rotor.

Nous choisissons donc de modéliser dans un premier temps la circulation des flux dans l'entrefer, selon une coupe orthogonale à l'axe de rotation de la machine. Le fer est supposé parfait, de perméabilité infinie, la courbure de l'entrefer est négligée, et une seule paire de pôles est modélisée. Le modèle réduit considéré est donc une machine plane, munie au stator de deux grandes dents portant chacune un bobinage, avec un rotor se déplaçant en translation ; cette machine réduite est représentée sur la figure 2.

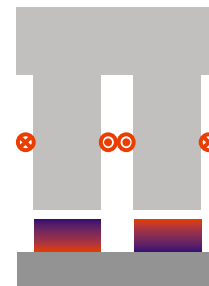


Figure 2 : Machine réduite modélisée

3. MODELE A FLUX RADIAL

3.1. Présentation du modèle

Le premier modèle de réseau de réluctances suppose que le flux est vertical dans l'aimant et dans la partie de l'entrefer situé entre l'aimant et la dent stator. Le flux situé en-dessous de la dent stator mais pas à l'aplomb de l'aimant est négligé. Le flux situé au-dessus de l'aimant mais entre les deux dents stator est modélisé vertical sur la hauteur de l'entrefer, puis se séparant en deux chemins (chacun modélisé par une réluctance dans le circuit équivalent) formant des arcs de cercle, comme présenté à la figure 3.

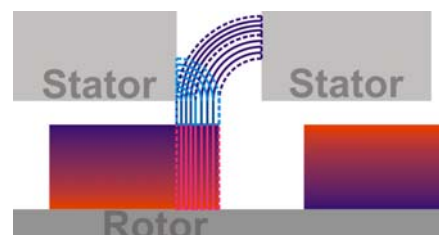


Figure 3 : Modèle de circulation du flux entre les dents stator

Ce modèle donne lieu à l'établissement d'un circuit magnétique équivalent linéaire, dans lequel le fer est représenté par un simple court-circuit. Les aimants sont modélisés par une réductance d'air associé à une bobine équivalente. La force de translation du rotor est déterminée en calculant la variation de la coénergie magnétique du système. Le bobinage est alimenté par un courant sinusoïdal en phase avec le déplacement du rotor, nul lorsque les aimants du rotor sont exactement en face des dents du stator (comme sur la figure 2).

3.2. Résultats

Les figures 4 et 5 présentent la force calculée par le premier modèle à flux radial, comparée à une simulation aux éléments finis : force à vide, en l'absence de courant (figure 4), et force utile, différence entre la force à vide et la force en présence de courant (figure 5)

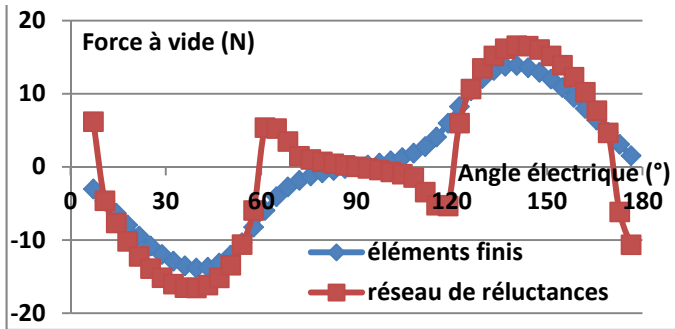


Figure 4 : Force à vide

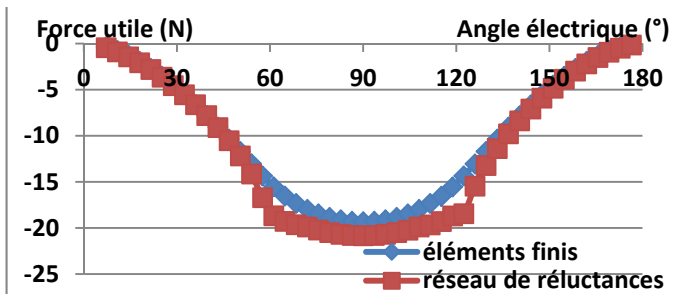


Figure 5 : Force utile

La force utile est assez bien modélisée, avec une erreur inférieure à 10%. La force à vide est bien modélisée lorsque chaque aimant rotor est sous une seule dent stator, mais ce premier modèle donne des résultats opposés à la simulation lorsque l'aimant rotor est simultanément sous les deux dents stator. Un second modèle permettant de mieux rendre compte de la force à vide est donc nécessaire.

4. MODELE A FLUX INCLINÉ

4.1. Modifications du premier modèle

L'étude de la circulation des flux aux éléments finis, présentée sur la figure 6, fait apparaître que le flux principal, entre la dent stator et l'aimant, est incliné de manière significative autour de 90° (angle électrique), sous l'influence de la partie d'aimant située entre les deux dents du stator.

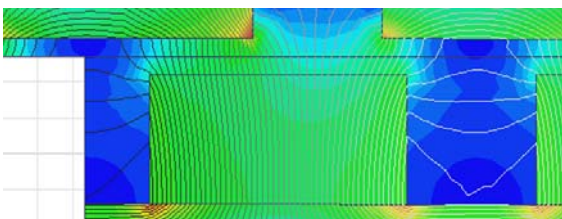


Figure 6 : Circulation du flux simulée aux éléments finis

Dans ce nouveau modèle, le flux principal dans l'entrefer est désormais représenté incliné d'un facteur proportionnel au volume d'aimant situé entre les deux dents stator. Un chemin de flux supplémentaire est également ajouté entre la partie d'aimant située entre les deux dents stator et la partie inférieure de la dent stator, en bleu foncé sur la figure 7.

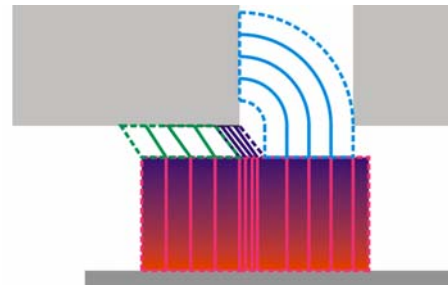


Figure 7 : Modèle de circulation à flux incliné

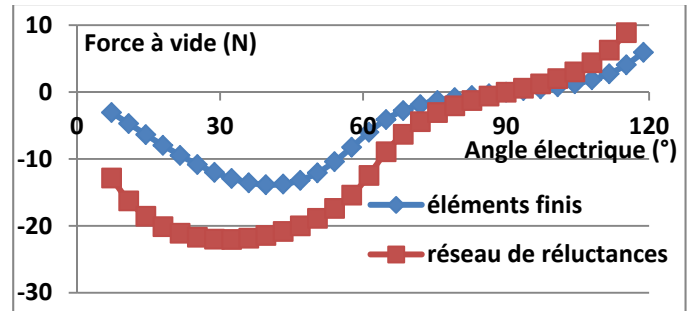


Figure 8 : Force à vide du modèle à flux incliné

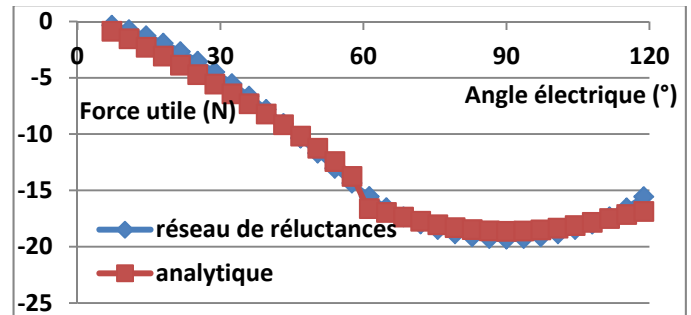


Figure 9 : Force utile du modèle à flux incliné

5. CONCLUSIONS

Les premiers résultats de ce nouveau modèle à flux incliné montrent que la force utile est bien modélisée (erreur maximale 3%), et que la forme générale de la force à vide est désormais mieux modélisée, bien que surestimée de 50% ; la prise en compte des flux de fuite et de la perméabilité du fer devrait permettre de réduire cet écart. Ce modèle constitue une première étape dans le développement d'un modèle complet par circuit magnétique équivalent de la machine à stator à griffes associé à un rotor à aimants en surface.

6. RÉFÉRENCES

- [1] J. Cros, P. Viarouge, « New structure of polyphase claw-pole machines », IEEE transactions on industry applications, Vol 40, Issue 1, Jan-Feb 2004
- [2] K. Y. Lu, E. Ritchie, P. O. Rasmussen, P. Sandholdt, « Modelling a single phase surface mounted permanent magnet transverse flux machine based on Fourier series method », IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003
- [3] M-F. Hsieh, Y-C. Hsiu, « A Generalized Magnetic Circuit Modeling Approach for Design of Surface Permanent-Magnet Machines », IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 59, n°2, Feb 2012