Symposium	de	Génie	Electriq	ue
EF Letrebechnicer du Fatur	EP	F.		2014

8-9 juillet 2014, Cachan

Modélisation analytique d'un moteur synchro-réluctant assisté d'aimants permanents

Dany PRIETO*, Philippe DESSANTE*, Jean-Claude VANNIER*, Xavier JANNOT**, Jacques SAINT-MICHEL** *SUPELEC, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France **Moteurs Leroy-Somer, 16 Bd. Marcelin Leroy, F-16000 Angoulême, France

RESUME – L'article présente un modèle analytique électromagnétique d'un moteur synchro-réluctant assisté d'aimants permanents (MSR-AP). Le modèle est basé sur les équations de Maxwell : le théorème d'Ampère et la loi de conservation de flux. La saturation magnétique au stator ainsi qu'au rotor est prise en compte dans cette étude. L'objectif de cet article est de présenter une démarche permettant de calculer les performances du moteur (couple moyen et facteur de puissance) pour différents niveaux de courant et différents angles de pilotage. Les résultats du modèle analytique sont comparés à ceux d'un modèle numérique par éléments finis au moyen du logiciel FEMM.

MOTS-CLES – machine synchrone à aimants, machine synchro-réluctante, modèle analytique, saturation.

1. Introduction

Les moteurs synchrones à aimants permanents sont reconnus pour leurs bonnes performances et leur compacité. Les aimants en terres rares sont aujourd'hui les plus utilisés dans les applications industrielles, mais ces dernières années ils sont devenus plus onéreux, il convient donc de trouver des alternatives. Le moteur synchro-réluctant assisté d'aimants permanents (MSR-AP) est une option car le couple électromagnétique est principalement produit par la saillance du moteur, il est donc possible d'utiliser des aimants permanents moins « puissants » comme des ferrites. De plus, la présence des aimants dans le rotor augmente le facteur de puissance par rapport à des moteurs à réluctance pure [1]. Plusieurs études ont analysé les performances de ce type de machine [2]-[6].

Le besoin de réaliser une conception par optimisation demande un modèle relativement rapide en temps de résolution, d'où l'intérêt de développer un modèle analytique pour ce type de problématique [7]. Il existe des modèles analytiques d'autres structures de moteurs synchrones à aimants permanents développés par divers auteurs [3]-[6], [8]. La Figure 1 montre la structure à modéliser, où le rotor comprend 4 pôles ainsi que 3 barrières de flux par pôle. Les aimants permanents (rouge) sont insérés dans les barrières de flux. Le modèle analytique est basé sur les équations de Maxwell : le théorème d'Ampère et la loi de conservation de flux. L'objectif est d'obtenir l'allure de l'induction d'entrefer afin de calculer les performances du moteur, à savoir, le couple électromagnétique, le facteur de puissance et la tension aux bornes du moteur.



Figure 1 : Structure d'un moteur synchro-réluctant assisté d'aimants permanents

2. Modèle du MSR-AP

L'expression de la force magnétomotrice produite par un courant triphasé sinusoïdal est présentée dans [8]. La Figure 2 montre le schéma de la machine avec la forme d'onde de la force magnétomotrice et les lignes de champ. Chaque barrière de flux est constituée de deux ponts tangentiels, deux ponts radiaux et trois aimants permanents.



Figure 2 : Schéma du MSR-AP – Une paire de pôles

Le théorème d'Ampère est appliqué sur cinq chemins (Ch1 à Ch5) et est exprimé par les équations 1 à 5.

$$He(\theta).e + Amp_{t_{DS}} + Amp_{t_{CS}} + Amp_{t_{Rotor(k)}} - \sum_{j=1}^{k} H_{ap_{(j)}}.e_{ap_{(j)}} = FMM_{1}(\theta) \quad pour \ k = 1,2,3$$
(1)

$$H_{ap_{c}(k)} \cdot e_{ap(k)} - H_{fa(k)} \cdot e_{bf(k)} + Amp_{t_{2}Rotor(k)} = 0 \quad pour \ k = 1, 2, 3$$
(2)

$$H_{fa_{(k)}} \cdot e_{bf_{(k)}} - H_{pr_{(k)}} \cdot l_{pr_{(k)}} = 0 \quad pour \ k = 1, 2, 3$$
(3)

$$-H_{ap_{-}r_{(k)}} \cdot e_{ap_{(k)}} + H_{fa_{(k)}} \cdot e_{bf_{(k)}} + Amp_{-}t_{4Rotor_{(k)}} = 0 \quad pour \ k = 1,2,3$$
(4)

$$-H_{fa_{r(k)}} \cdot e_{bf_{(k)}} + H_{fa_{(k)}} \cdot e_{bf_{(k)}} + Amp_{t_{5Rotor(k)}} = 0 \quad pour \ k = 1, 2, 3$$
(5)

La consommation des Ampères-tours au stator et au rotor est prise en compte dans les équations. La variable k représente le rang de la barrière de flux. Les Ampères-tours consommés par les dents et la culasse du stator sont exprimés en fonction de l'induction d'entrefer. Les Ampères-tours consommés par le rotor sont exprimés en fonction des inductions dans les barrières de flux. Ces expressions seront davantage détaillées dans l'article final et en tenant compte du fait que le nombre de barrières de flux est une variable. Ainsi un système d'équations est construit avec l'induction d'entrefer comme variable. Après la résolution de ce système, le flux dans le repère d-q, le couple électromagnétique, le facteur de puissance et la tension aux bornes du moteur sont calculés. Cette méthodologie sera également détaillée dans l'article final. Les courbes de la Figure 3 montrent une comparaison entre le modèle analytique et le modèle par élément finis (FEMM) pour un moteur de courant nominal de 15A. Ces courbes sont en fonction de l'angle de pilotage (angle de calage).



Figure 3 : Comparaison entre les modèles analytique et éléments finis

Au niveau du couple, la courbe du modèle analytique est très proche de celle des éléments finis. Au niveau du facteur de puissance, la courbe du modèle analytique est légèrement supérieure que celle des éléments finis, cet écart est produit par l'influence des fuites d'encoches, ces dernières n'étant pas prises en compte par le modèle analytique pour le calcul du facteur de puissance.

3. Conclusion

L'article a présenté un modèle analytique magnétique pour un moteur synchro-réluctant assisté d'aimants permanents. Il est basé sur le théorème d'Ampère et la loi de conservation de flux. Ce modèle a pris en compte la saturation du stator et du rotor. La résolution du système a donné comme résultat l'induction d'entrefer, le couple électromagnétique et le facteur de puissance sont ensuite déduits. Le modèle analytique a été validé par un modèle numérique pour un moteur au courant nominal de 15A. Les résultats ont montré une bonne cohérence entre le modèle analytique et le modèle par éléments finis. L'article final présentera la comparaison pour différents niveaux de courant. Ce modèle analytique sera important pour la conception par optimisation de ce type de moteur.

4. Références

- [1] D. PRIETO, B. DAGUSE, Ph. DESSANTE, P. VIDAL, J.-C. VANNIER, "Effect of magnets on average torque and power factor of synchronous reluctance motors," IEEE 20th International Conference on Electrical Machines, 2012, ICEM'2012, Marseille (France).
- [2] A. VAGATI, M. PASTORELLI, G. FRANCESCHINI, S. CORNEL PETRACHE, "Design of Low-Torque-Ripple Synchronous Reluctance Motors", IEEE Transactions on industry applications, July/August-1998.
- [3] N. BIANCHI, S. BOLOGNANI, D. BON, M.-C. DAI PRE, "Rotor flux-barrier design for torque ripple reduction in synchronous reluctance motors," IEEE Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006, vol. 3, pp. 1193-1200, Oct. 2006.
- [4] N. BIANCHI, S. BOLOGNANI, D. BON, M.-C. DAI PRE, "Torque Harmonic Compensation in a Synchronous Reluctance Motor", IEEE Transactions on energy conversion, June-2008.
- [5] M. BARCARO, N. BIANCHI, "Air-Gap Flux Density Distortion and Iron Losses in Anisotropic Synchronous Motors", IEEE Transactions on magnetics, Jan-2010.
- [6] K.-C. KIM, J. S. AHN, S. H. WON, J.-P. HONG, J. LEE, "A study on the optimal design of SynRM for the high torque and power factor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, N° 6, pp. 2543-2545, June. 2007.
- [7] S. BRISSET, « Démarches et outils pour la conception optimal des machines électriques », Habilitation à diriger des recherches de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Décembre 2007, (France).
- [8] X. JANNOT, J.-C. VANNIER, J. SAINT-MICHEL, M. GABSI, C. MARCHAND, D. SADARNAC, "An analytical model for IPM synchronous machine with circumferential magnetization design", Electromotion 09 EPE Chapter « Electric Drives », Lille (France).