

Réduction des ondulations de couple d'un moteur à aimants en multi-V et bobinage sur dents

Paul AKIKI^{1,2}, Maya HAGE-HASSAN¹, Jean-Claude VANNIER¹, Philippe DESSANTE¹,
Benjamin DAGUSE², Mohamed BENSETTI¹

¹GeePs | Group of electrical engineering - Paris UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ Paris-Sud, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, 3, 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon F-91192, Gif-sur-Yvette, France

²Moteurs Leroy-Somer, 16 boulevard Marcellin Leroy 16000, Angoulême, France

RESUME - Cet article présente une étude sur la réduction des ondulations de couple d'un moteur électrique à 12 dents et 10 pôles avec des aimants intérieurs en multi-V et bobinage concentré sur dents. Ce type de machine est utilisé pour des applications qui exigent un fort couple à basse vitesse. Cependant, la combinaison 12/10 développe des ondulations de couple élevées. L'objectif de cette étude est de présenter une méthodologie de réduction des ondulations de couple en se basant sur le vrillage du rotor et l'asymétrie des pôles. Dans cet article, chaque technique est d'abord étudiée seule puis une méthode de combinaison de ces deux techniques est proposée afin de réduire certains harmoniques du couple.

Mots-clés—Aimants multi-V, ondulations de couple, vrillage, pôles asymétriques, plan d'expérience, modélisation

1. INTRODUCTION

Récemment, le développement de structures de moteurs électriques capables de fournir un fort couple avec des ondulations faibles, a gagné en importance surtout pour les applications d'entraînement direct, telles que les machines-outils, les convoyeurs, les ascenseurs, etc. Le moteur à 12 dents et 10 pôles avec des aimants enterrés au rotor en multi-V et bobinage sur dents est un bon candidat pour ce type d'utilisation à cause de son facteur de bobinage élevé. Par contre, l'inconvénient d'une telle structure à double saillance réside dans les ondulations de couple élevées. Le but de cette étude est de diminuer les ondulations de couple à une valeur inférieure à 5%. Les différentes techniques de minimisation des ondulations de couple sont essentiellement classées en deux catégories : la première concerne la géométrie de la machine alors que la deuxième est basée sur le contrôle [1].

Dans une démarche de conception de machines électriques deux techniques principales sont distinguées : le vrillage du rotor et la géométrie du circuit magnétique du rotor. La technique du vrillage a été étudiée au cours de la dernière décennie [2] et continue à faire l'objet de recherches plus récentes pour différents types de moteurs [3]–[5]. La conception du circuit magnétique du rotor tend à proposer des pôles rotoriques asymétriques [6]–[8]. Dans cet article, l'étude est faite à l'aide des simulations par éléments finis 2D. D'abord, la machine étudiée est présentée, puis les deux techniques de réduction des ondulations de couple sont analysées et une méthodologie de combinaison est proposée.

2. STRUCTURE DU MOTEUR ETUDIE

La machine considérée présente, pour chaque pôle, 2 couches d'aimants permanents en forme de V (fig. 1). Les paramètres d'une couche sont indiqués sur la fig. 2. On trouve essentiellement deux paramètres significatifs pour l'étude des ondulations de couple : il s'agit de l'angle d'inclinaison des

barrières δ et du rapport $k = \theta/\beta$ avec θ l'angle d'ouverture de la barrière et β l'angle d'un demi-pôle rotorique.

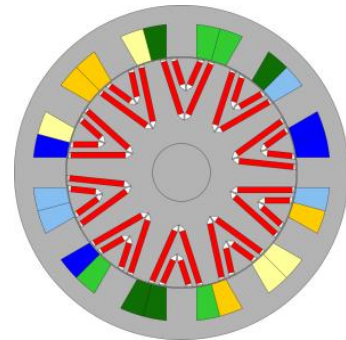


Fig. 1 Moteur 12/10 à aimants intérieurs en V

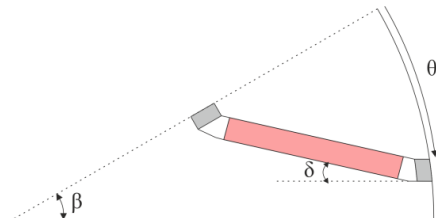


Fig. 2 Paramètres géométriques d'une couche d'aimants

La machine de référence est définie par un angle d'inclinaison des barrières $\delta = 3^\circ$, et des rapports $k_1 = 0.6$ et $k_2 = 0.3$, avec l'indice de k correspondant au numéro de la couche. L'ondulation de couple (ΔC) est calculée par l'équation (1).

$$\Delta C = \frac{C_{max} - C_{min}}{C_{moy}} \quad (1)$$

Pour cette machine l'ondulation de couple est $\Delta C = 33\%$, pour un courant efficace $I_{eff} = 40$ A et un angle de défluxage égal à 30° elec. La décomposition harmonique du couple (fig. 3) montre que l'harmonique 2 est le plus élevé. Dans une première étape, la méthode du vrillage du rotor par pas est appliquée afin de minimiser les ondulations de couple.

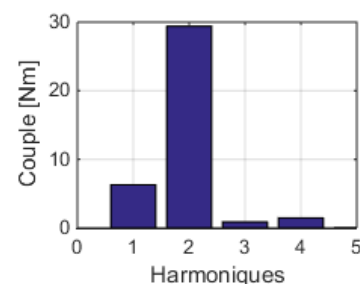


Fig. 3 Décomposition harmonique du couple

3. VRILLAGE DU ROTOR PAR PAS

La réduction de l'harmonique 2 est réalisée en la déphasant de 180° elec. Ayant une période de 30° elec, l'angle de vrillage sera : $\psi_{vrillage} = 30 \times 180 / 360 = 15^\circ$ elec cela correspond à 3° méca ($p = 5$ paires de pôles). L'ondulation de couple passe de 33% à 4.95% (fig. 4).

4. POLES ASYMETRIQUES

Plusieurs simulations ont été effectuées avec différentes valeurs de δ en maintenant la valeur des rapports k_1 et k_2 ainsi que le volume des aimants constants. Elles permettent dans un premier temps de déduire que l'influence de δ sur les ondulations de couple peut être négligée. Ainsi, ce paramètre est fixé à 15° . Les résultats complets seront présentés dans la version finale de l'article.

Afin d'étudier l'effet du paramètre k , on définit 4 variables : k_{11} , k_{12} , k_{21} et k_{22} qui correspondent à chaque barrière de chacun des pôles (Nord ou Sud). Un plan d'expérience est mis en place avec les 4 variables comme entrées, et comme sorties le couple moyen et les amplitudes du 1^{er} et du 2nd harmonique. Chaque variable est définie sur 4 niveaux. Les résultats sont donnés dans le tableau 1 :

Tableau 1. Résultats du plan d'expérience

Objectif	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	δ
Valeur minimale de l'harmonique 1	0.7	0.15	0.7	0.25	15°
Valeur minimale de l'harmonique 2	0.7	0.15	0.65	0.15	15°

La réduction de l'harmonique 2 conduit à $\Delta C = 8.2\%$ tandis que la réduction de l'harmonique 1 conduit à $\Delta C = 11.63\%$.

5. COMBINAISON DU VRILLAGE PAR PAS ET DE L'ASYMETRIE DES POLES

La 1^{ère} stratégie consiste à réduire l'harmonique 2 par l'asymétrie des pôles et l'harmonique 1 par le vrillage du rotor. L'ondulation de couple est réduite à une valeur $\Delta C = 6\%$. L'ondulation de couple ne diminue pas significativement (de 8.2% à 6%) à cause de l'angle de vrillage élevé ($\psi_{vrillage} = 30^\circ$ elec pour l'harmonique 1). En effet, le vrillage du rotor est équivalent à une augmentation de l'angle de défluxage ce qui fait diminuer le couple moyen (C_{moy}) et donc n'améliore pas le ratio donné par l'équation (1).

La 2^{ème} stratégie consiste à réduire l'harmonique 1 par l'asymétrie des pôles et l'harmonique 2 par le vrillage du rotor. L'angle de défluxage se décale de 15° elec ce qui diminue moins le couple moyen (C_{moy}) et permet de réduire plus les ondulations de couple. Le résultat est la réduction de l'ondulation de couple à une valeur $\Delta C = 4.62\%$.

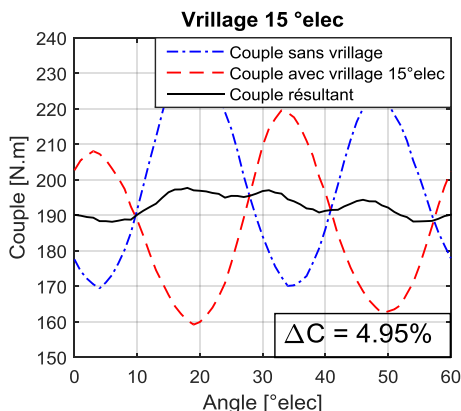


Fig. 4 Ondulations de couple sans et avec vrillage du rotor de 15° elec

6. METHODOLOGIE ADOPTEE

Suite à l'analyse faite ci-dessus, la seconde stratégie est retenue. Par ailleurs, d'après l'équation (1) une augmentation de C_{moy} conduirait à une diminution de ΔC si ($C_{max} - C_{min}$) reste invariable. Ceci peut être atteint en diminuant δ ce qui permet d'augmenter le volume des aimants. Le résultat avec $\delta = 5^\circ$ est montré sur la fig. 5 avec $\Delta C = 3.44\%$.

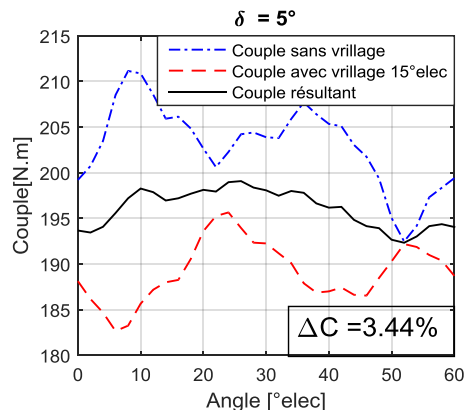


Fig. 5 Ondulation de couple avec la 2^{ème} stratégie et $\delta = 5^\circ$

7. CONCLUSIONS

Dans cet article, différentes combinaisons de méthodes pour la réduction des ondulations de couple pour les moteurs 12/10 avec des aimants en multi-V et bobinage sur dents ont été présentées. La méthodologie proposée consiste à réduire l'harmonique d'ordre faible par l'asymétrie des pôles et celle d'ordre supérieure par le vrillage du rotor. L'augmentation du volume des aimants conduit à une amélioration de cette stratégie. Les détails des différentes méthodes et les résultats du plan d'expérience seront présentés et analysés dans l'article final.

8. REFERENCES

- [1] T. M. Jahns and W. L. Soong, "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives—a review," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 321–330, Apr. 1996.
- [2] R. P. Deodhar, D. A. Staton, and T. J. E. Miller, "Modeling of skew using the flux-MMF diagram," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1339–1347, Nov. 1996.
- [3] W. Q. Chu and Z. Q. Zhu, "Reduction of On-Load Torque Ripples in Permanent Magnet Synchronous Machines by Improved Skewing," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 3822–3825, Jul. 2013.
- [4] J. Richnow, D. Gerling, and P. Stenzel, "Torque ripple reduction in permanent magnet synchronous machines with concentrated windings and pre-wound coils," in *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, pp. 2501–2507.
- [5] Y. Li, D. Bobba, and B. Sarlioglu, "A Novel Dual-Stator Flux Switching Permanent Magnet Machinewith Six Stator Slots and Four Rotor Poles Configuration," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 1566–1572.
- [6] M. Sanada, K. Hiramoto, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Torque ripple improvement for synchronous reluctance motor using an asymmetric flux barrier arrangement," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 4, pp. 1076–1082, Jul. 2004.
- [7] T. Lange, B. Kerdsup, C. Weiss, and R. W. De Doncker, "Torque ripple reduction in Reluctance Synchronous Machines using an asymmetric rotor structure," in *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, 2014, pp. 1–5.
- [8] A. Pina and L. Xu, "Modeling of Synchronous Reluctance Motors Aidedby Permanent Magnets with Asymmetric RotorPoles," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 412–418.