

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, l'étude de chacune des techniques est d'abord présentée 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'application grâce à son coefficient de bobinage élevé (0.933) [1]. Par contre, l'inconvénient d'une telle structure à double saillance est 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 [2].

Dans une démarche de conception de machines électriques, les méthodes de réduction des ondulations de couple peuvent concerner le stator [3], mais les deux techniques principales restent 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 [4] et continue à faire l'objet de recherches plus récentes pour différents types de moteurs [5]–[7]. Les auteurs dans [8]–[10] proposent la conception du circuit magnétique du rotor avec des pôles asymétriques. 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 ETUDIÉ

2.1. Bobinage de la machine 12/10

La machine étudiée est un moteur triphasé ($m = 3$) avec un bobinage concentré sur dents. Un bobinage double couche est

choisi afin de maximiser le coefficient de bobinage fondamental. Pour la structure à 12 dents et 10 pôles, ce coefficient est égal à 0.933 ce qui rend cette structure adéquate pour des applications à fort couple [1]. Toutes les dents du stator sont bobinées et l'angle mécanique entre deux bobines est de 30° . Le diagramme du bobinage stator est donné en fig. 1. Pour déterminer la phase affectée à chaque bobine, les angles mécaniques (θ_{meca}) sont convertis en angles électriques (θ_{elec}) en utilisant l'équation suivante :

$$\theta_{elec} = p \theta_{meca} \quad (1)$$

avec $p = 5$ (nombre de paires de pôles). La correspondance est ensuite réalisée entre l'angle électrique de chaque dent et l'angle le plus proche du diagramme d'un système triphasé direct (Fig. 2).

La première bobine est reliée à la phase A+, la deuxième bobine est à 150 degrés électriques donc elle sera reliée à la phase A-. Cette procédure est appliquée pour toutes les bobines statoriques ce qui conduit à la séquence suivante pour le moteur 12/10: A+ A- , B- B+ , C+ C- , A- A+ , B+ B- , C- C+ . Il est opportun de noter que le bobinage de la deuxième moitié du stator est anti-cyclique par rapport à la première moitié, car elle présente un nombre impair de pôles.

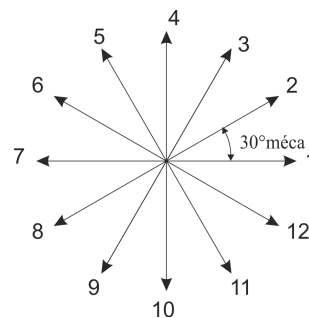


Fig.1 Diagramme du bobinage stator à 12 dents

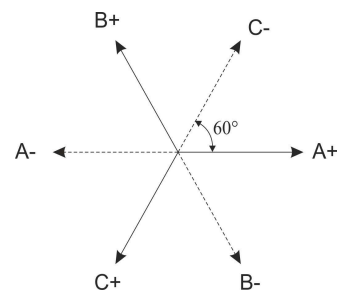


Fig.2 Diagramme des phases d'un système triphasé direct.

2.2. Géométrie de la machine étudiée

La machine considérée présente, pour chaque pôle, 2 couches d'aimants permanents en forme de V (Fig.3). On s'intéresse essentiellement à deux paramètres géométriques pour la suite de l'étude (Fig.4) : 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.

Une 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.

Les caractéristiques de cette machine sont données dans le Tableau 1.

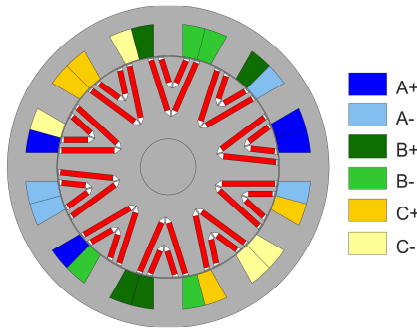


Fig.3. Moteur 12/10 à aimants intérieurs en V

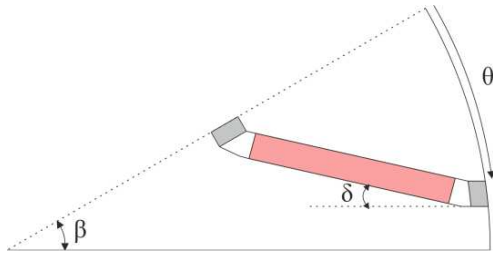


Fig.4. Paramètres géométriques d'une couche d'aimants

Tableau 1. Caractéristiques de la machine 12/10 de référence

Caractéristique	Valeur
Couple moyen visé	190 Nm
Ondulation de couple visée	5%
Vitesse de rotation	500 rpm
Courant nominal	40 A (rms)
δ	3°
k_1	0.6
k_2	0.3

Les résultats des simulations par Eléments Finis (EF) du couple moyen en fonction de l'angle de défluxage α sont donnés sur la fig.5. Le couple maximal est égal à 200 Nm avec un angle optimal $\alpha_{opt} = 30^\circ$ elec. Le facteur de puissance est présenté sur la fig.6, il est égal à 0.66 pour $\alpha = 30^\circ$ elec. Pour la machine à 12 dents et 10 pôles, le couple est périodique avec une période égale à 60° elec soit le sixième de la période électrique (Fig.7).

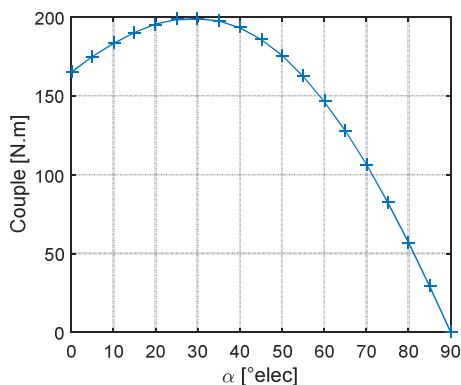


Fig.5. Couple moyen en fonction de l'angle de défluxage pour la machine 12/10 de référence

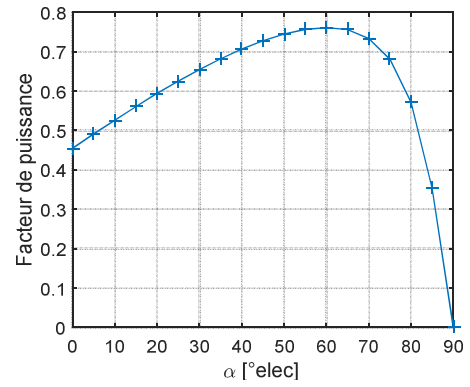


Fig.6. Facteur de puissance en fonction de l'angle de défluxage pour la machine 12/10 de référence

L'ondulation de couple (ΔC) est donnée sur la fig.7. Elle est calculée par l'équation (2).

$$\Delta C = \frac{C_{max} - C_{min}}{C_{moy}} \quad (2)$$

Pour cette machine l'ondulation de couple est de 33%, pour un courant efficace $I_{eff} = 40$ A et un angle de défluxage égal à 30° elec. Ainsi, cette machine est capable de développer un fort couple à basse vitesse avec un facteur de puissance raisonnable. Par contre, l'ondulation de couple est élevée.

La décomposition harmonique du couple (Fig.8) montre que l'harmonique 2 est le plus élevé, suivi de l'harmonique 1.

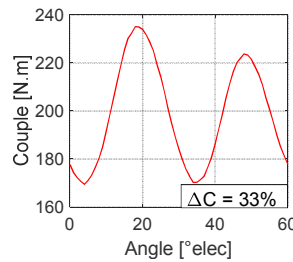


Fig.7. Ondulation de couple de la machine 12/10 de référence

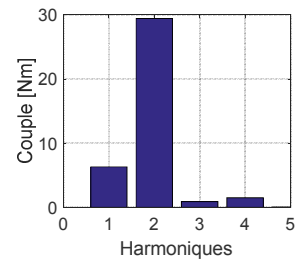


Fig.8. Décomposition harmonique du couple de la machine 12/10 de référence

L'objectif des paragraphes qui suivent est de minimiser l'ondulation de couple. Dans une première étape, la méthode du vrillage du rotor par pas est appliquée.

3. VRILLAGE DU ROTOR PAR PAS

L'harmonique 2 étant le plus élevé, l'angle de vrillage sera calculé dans le but de le minimiser en le déphasant de 180° elec. Comme l'harmonique 2 a une période de 30° elec, l'angle de vrillage sera donné par l'équation (3) :

$$\psi_{vrillage} = 30 \frac{180}{360} = 15^\circ elec \quad (3)$$

ce qui correspond à 3° méca (équation (1)). La fig.9 montre le couple sans vrillage et avec vrillage. Le couple total obtenu en additionnant les deux courbes met en évidence la réduction de l'ondulation de couple qui passe de 33% à 5%.

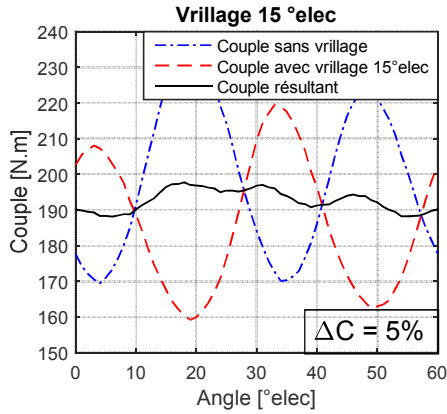


Fig.9. Ondulation de couple sans et avec vrillage du rotor de 15°elec

4. POLES ASYMETRIQUES

Lors de la conception d'un moteur électrique, l'ondulation de couple peut être réduite en adoptant des pôles rotoriques asymétriques. Les paramètres essentiels d'un pôle sont l'angle d'inclinaison des barrières δ et le rapport de l'angle d'ouverture k (Fig.4).

4.1. Influence du paramètre δ

Plusieurs simulations EF sont effectuées avec différentes valeurs de δ en maintenant la valeur des rapports k_1 et k_2 ainsi que le volume des aimants constants. L'angle de défluxage est fixé à 30°elec. Les résultats donnés sur la fig.10 montrent que le fait de varier δ entre 0 et 15° fait varier ΔC entre 35% et 38.5% donc l'ondulation de couple reste pratiquement inchangée. Ceci permet 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°.

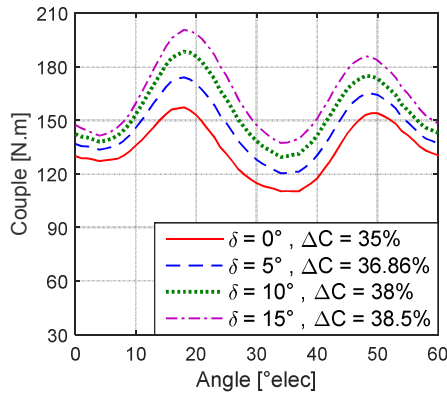


Fig.10. Ondulation de couple en fonction de δ à volume d'aimant constant

4.2. Influence du paramètre k

Afin d'étudier l'effet de l'angle d'ouverture de la barrière, on définit 4 variables : k_{ij} avec $i = \{1, 2\}$ et $j = \{1, 2\}$. L'indice "i" correspond au pôle magnétique (Nord ou Sud) et l'indice "j" correspond au numéro de la barrière.

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 2^{ème} harmonique. Chaque variable est définie sur 4 niveaux variant dans les intervalles suivants :

- k_{12} et $k_{22} \in [0.1, 0.3]$
- k_{11} et $k_{21} \in [0.5, 0.7]$

Les intervalles de variations ont été choisis de façon à garantir le non-chevauchement des deux barrières qui

constituent chaque pôle. Le niveau des différentes variables est donné dans un intervalle centré réduit $[-1, -0.5, 0.5, 1]$. Par exemple, pour la variable k_{12} le centre de l'intervalle est 0.2 donc cette variable prendra les valeurs suivantes : 0.1, 0.15, 0.25 et 0.3. Les simulations EF sont réalisées avec un courant efficace de valeur 40 A et un angle de défluxage $\alpha_{opt} = 30^\circ$ elec. Les résultats des interactions du premier ordre entre les entrées et les sorties sont donnés sur les fig.11, fig.12 et fig.13.

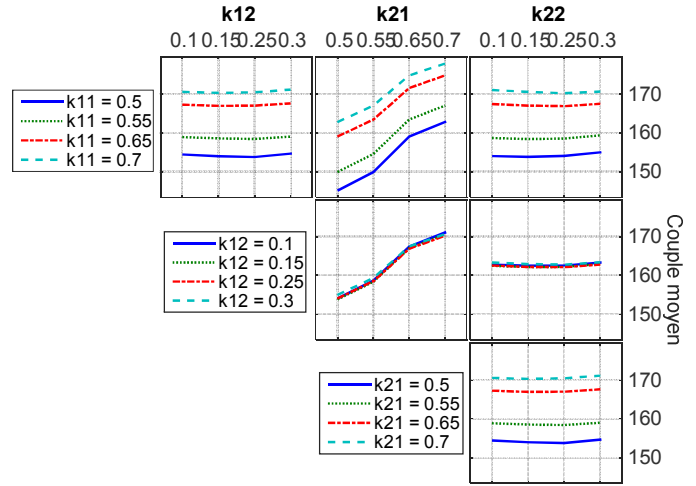


Fig.11. Résultats du plan d'expérience pour le couple moyen

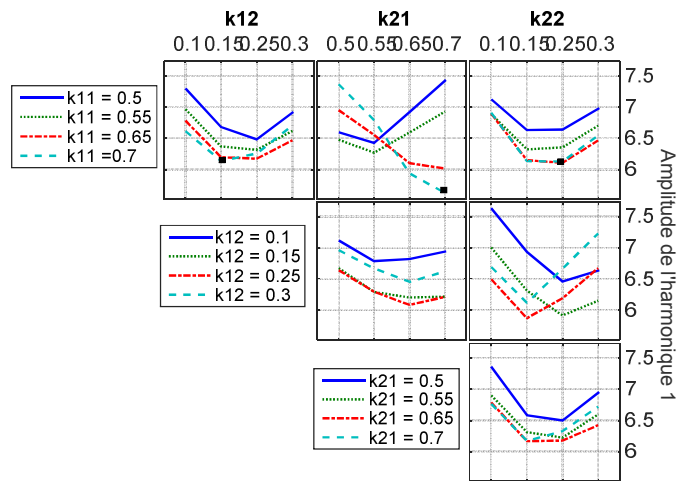


Fig.12. Résultats du plan d'expérience pour le 1^{er} harmonique

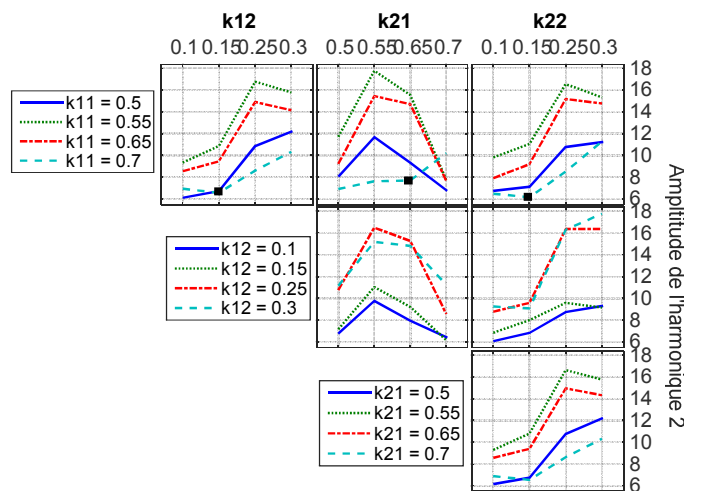


Fig.13. Résultats du plan d'expérience pour le 2^{ème} harmonique

D'après la fig.11, le couple maximal est obtenu pour $k_{11} = 0.7$ (ligne en tirets bleus) et $k_{21} = 0.7$. Par contre, les variables k_{12} et k_{22} gardent des valeurs constantes quel que soit la valeur choisie pour k_{11} et k_{21} .

Pour $k_{11} = 0.7$, la première ligne de la fig.12 montre que la valeur minimale de l'harmonique 1 est obtenue pour $k_{12} = 0.15$, $k_{21} = 0.7$ et $k_{22} = 0.25$. La deuxième ligne suggère une valeur minimale de l'harmonique 1 pour $k_{12} = 0.25$ (ligne rouge) ce qui contredit l'analyse faite pour la 1^{ère} ligne et fait augmenter l'amplitude du 1^{er} harmonique. Ainsi, les résultats de la 1^{ère} ligne marqués par des carrés en noir sont retenus.

Pour l'harmonique 2, la fig.13 montre que pour k_{11} fixé à 0.7, l'amplitude minimale est obtenue pour $k_{12} = 0.15$, $k_{22} = 0.15$ et $k_{21} = 0.5$. Par contre, la valeur $k_{21} = 0.5$ fait décroître le couple moyen d'après la fig.11. Un compromis est fait entre maximiser le couple moyen et minimiser l'amplitude du 2^{ème} harmonique. Ainsi, la variable k_{21} serait égale à 0.65. Des carrés en noir sont utilisés pour indiquer les valeurs choisies sur la fig.13.

Un récapitulatif des résultats du plan d'expérience est donné dans le tableau 2:

Tableau 2. Résultats du plan d'expérience

Objectif	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	δ
Valeur maximale du couple moyen	0.7	Pas d'influence	0.5	Pas d'influence	15°
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°

Les configurations qui minimisent le 1^{er} ou bien le 2^{ème} harmonique conduisent à des structures à pôles asymétriques.

4.3. Réduction du 2^{ème} harmonique

L'harmonique 2 est le plus dominant comme le montre la Fig.8. La configuration qui réduit son amplitude est simulée avec $k_{11} = 0.7$, $k_{21} = 0.65$ et $k_{12} = k_{22} = 0.15$. L'ondulation de couple et sa décomposition harmonique sont données sur les fig.14 et fig.15. ΔC passe de 33% à 8.2%.

Le 2^{ème} harmonique est diminué de façon significative. Par contre, le 1^{er} harmonique devient responsable de la valeur de l'ondulation de couple qui reste supérieure à 5%. Différentes stratégies de combinaison du vrillage et des pôles asymétriques seront étudiées afin de réduire davantage l'ondulation de couple.

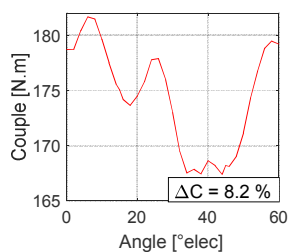


Fig.14. Ondulation de couple avec la réduction du 2^{ème} harmonique par pôles asymétriques

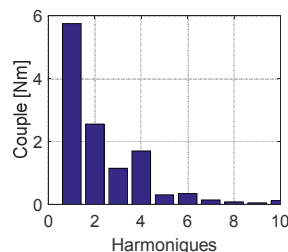


Fig.15. FFT de l'ondulation de couple avec la réduction du 2^{ème} harmonique par pôles asymétriques

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

5.1. 1^{ère} stratégie : Réduction de l'harmonique 2 par l'asymétrie des pôles et de l'harmonique 1 par le vrillage du rotor

La réduction de l'amplitude du 2^{ème} harmonique par pôles asymétriques a conduit à $\Delta C = 8.2\%$ comme déjà montré au paragraphe 4.3. Le reste de l'ondulation de couple est essentiellement causé par l'harmonique 1 (Fig.15). Ainsi, le vrillage du rotor est utilisé pour réduire l'amplitude du 1^{er} harmonique dont la période est de 60°elec. Un déphasage de 180°elec est alors obtenu avec l'angle de vrillage donné par l'équation (4) :

$$\psi_{vrillage} = 60 \frac{180}{360} = 30^\circ elec = 6^\circ meca \quad (4)$$

ΔC est réduite de 8.2% à 6% (Fig.16). L'ondulation de couple ne diminue pas significativement à cause de l'angle de vrillage élevé. En effet, le vrillage du rotor est équivalent à une augmentation de l'angle de défluxage.

L'ajout de 30°elec à $\alpha_{opt} = 30^\circ elec$ conduit à un angle de 60°elec ce qui fait diminuer le couple moyen (C_{moy}) qui passe de 200 Nm à 145 Nm (Fig.5). Ainsi, le ratio donné par l'équation (2) n'est pas amélioré.

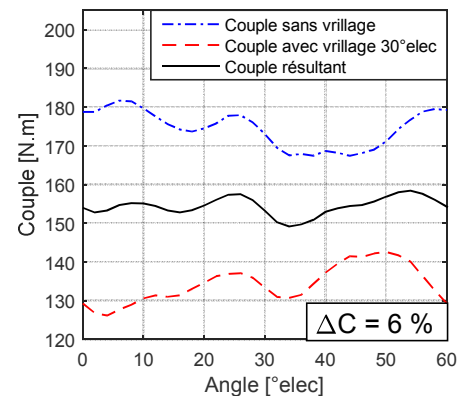


Fig.16. Ondulation de couple avec la 1^{ère} stratégie

5.2. 2^{ème} stratégie : Réduction de l'harmonique 1 par l'asymétrie des pôles et de l'harmonique 2 par le vrillage du rotor.

Les analyses précédentes permettent de proposer une autre stratégie. L'amplitude du 1^{er} harmonique est réduite en utilisant les pôles asymétriques (Tableau 2) et conduit à $\Delta C = 11.63\%$. Le rotor de cette structure est ensuite vrillé avec un angle de 15°elec soit 3°meca.

Le résultat donné sur la fig.17 monte que ΔC passe à 4.62%. L'angle de défluxage se décale de 15°elec ce qui diminue moins le couple moyen (C_{moy}) qui passe de 200 Nm à 187 Nm (Fig.5) et permet de réduire plus les ondulations de couple.

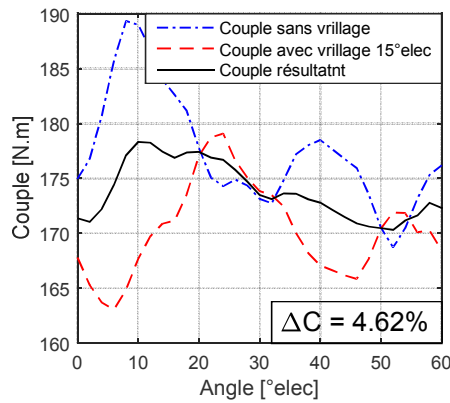


Fig.17. Ondulation de couple avec la 2^{ème} stratégie

6. METHODOLOGIE ADOPTÉE

Suite aux résultats du paragraphe 5, la seconde stratégie est retenue. Par ailleurs, d’après l’équation (2) une augmentation de C_{moy} conduirait à une diminution de ΔC si le couple crête-à-crête $C_{cc} = (C_{max} - C_{min})$ reste invariable. Ceci peut être atteint en diminuant δ ce qui permet d’augmenter le volume des aimants. Le résultat de la 2^{ème} stratégie avec $\delta = 5^\circ$ est montré sur la fig.18 avec $\Delta C = 3.44\%$. Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour différentes valeurs de δ .

Tableau 3. Ondulation de couple obtenue avec la 2^{ème} stratégie et différentes valeurs de δ

δ [°]	C_{cc} [Nm]	C_{moy} [Nm]	ΔC [%]
15	8	174	4,6
10	7,1	183	3,8
7,5	6,92	189,6	3,65
5	6,7	196	3,44

La variation de δ affecte peu la valeur du couple crête-à-crête mais augmente le couple moyen ce qui fait diminuer davantage l’ondulation de couple.

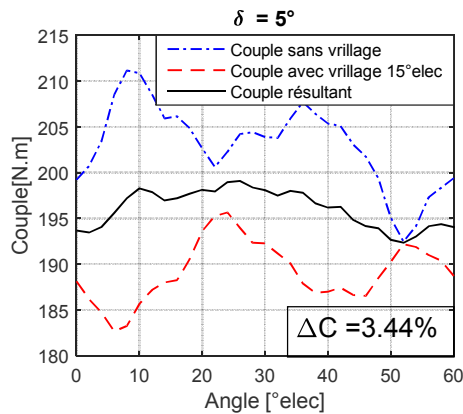


Fig.18. Ondulation de couple avec la 2^{ème} stratégie et $\delta = 5^\circ$

7. CONCLUSIONS

Dans cet article, un moteur électrique à double saillance a été étudié. Il s’agit d’une machine à 12 dents et 10 pôles avec des aimants en multi-V et bobinage sur dents. Cette structure est capable de produire un fort couple à basse vitesse mais présente des ondulations de couple élevées. Cependant, la qualité du couple peut être améliorée par le vrillage du rotor qui réduit l’ondulation de couple mais aussi fait diminuer le couple moyen.

Un plan d’expérience a été mis en place pour analyser l’impact des paramètres des barrières de flux. En effet, la conception du rotor avec des pôles asymétriques permet aussi de réduire les ondulations de couple mais pas en dessous de l’objectif fixé à 5%.

Dans cet article, différentes combinaisons de méthodes pour la réduction des ondulations de couple pour les moteurs 12/10 ont été présentées. De plus, une méthodologie a été proposée. Elle consiste à réduire l’harmonique d’ordre faible par l’asymétrie des pôles et celle d’ordre supérieure par le vrillage du rotor.

Enfin, la diminution de l’angle d’inclinaison des barrières, permet d’augmenter le volume des aimants ce qui conduit à une amélioration de cette stratégie proposée et réduit l’ondulation de couple à 3.44% sans compromettre la valeur du couple moyen.

8. REFERENCES

- [1] F. Meier, “Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications,” Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, 2008.
- [2] 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, 1996.
- [3] M. Belhadi, G. Krebs, C. Marchand, H. Hannoun, and X. Mininger, “Réduction des ondulations de couple et des efforts radiaux dans une machine à reluctance variable,” in *Symposium de Génie Électrique 2014*, Cachan, France, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Y. Li, D. Bobba, and B. Sarlioglu, “A Novel Dual-Stator Flux Switching Permanent Magnet Machine with Six Stator Slots and Four Rotor Poles Configuration,” in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 1566–1572.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] A. Pina and L. Xu, “Modeling of Synchronous Reluctance Motors Aided by Permanent Magnets with Asymmetric Rotor Poles,” in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 412–418.