



HAL
open science

Comparaison de modifications géométriques d'une MRV pour la traction électrique

M'Hamed Belhadi, Guillaume Krebs, Claude Marchand, Hala Hannoun,
Xavier Mininger

► To cite this version:

M'Hamed Belhadi, Guillaume Krebs, Claude Marchand, Hala Hannoun, Xavier Mininger. Comparaison de modifications géométriques d'une MRV pour la traction électrique. 2nd Symposium de Génie Électrique (SGE 2016), Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361660

HAL Id: hal-01361660

<https://hal.science/hal-01361660>

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.

Comparaison de modifications géométriques d'une MRV pour la traction électrique

M'Hamed BELHADI^{1,2}, Guillaume KREBS¹, Claude MARCHAND¹, Hala HANNOUN² and Xavier MININGER¹

¹: GeePs, Laboratoire de génie électrique et électronique de Paris

UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ Paris-Sud, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06
3, 11 rue Joliot Curie, Plateau de Moulon France-91192 Gif-sur-Yvette CEDEX

²: Renault, 1 avenue du Golf, 78288 Guyancourt, France

mhbelhadi@yahoo.fr, guillaume.krebs@geeps.centralesupelec.fr

RÉSUMÉ- Ce travail a comme objectif d'analyser un ensemble de modifications géométriques d'une machine à réluctance variable à double saillance (MRV DS). L'application visée est la traction d'un véhicule tout électrique (VE). Ces modifications ont pour but de faire face simultanément aux deux inconvénients majeurs de la MRV, à savoir les efforts radiaux importants et les ondulations de couple. Une démarche a été mise en place afin d'étudier ces modifications dans les régimes statique et de fonctionnement.

Mots-clés—Machine à réluctance variable, ondulations de couple, efforts radiaux, conception, modification de la structure.

1. INTRODUCTION

Parmi les différentes structures de machines électriques, la MRV est une candidate sérieuse pour la motorisation de véhicules électriques notamment à faible coût. En effet, la MRV offre plusieurs avantages : un faible coût de fabrication, une géométrie simple, une structure robuste, un bobinage concentrique, une tolérance aux défauts, un fonctionnement possible à haute température et haute vitesse ... Néanmoins, les deux inconvénients majeurs de la MRV restent, d'une part, l'émission d'un bruit acoustique indésirable qui découle essentiellement des efforts radiaux (forces radiales) sur le stator [1] et d'une autre part, des ondulations de couple importantes [2]. Des solutions à ces problèmes doivent donc être proposées dans le but d'une industrialisation et commercialisation à grande échelle des véhicules électriques. Généralement, ces deux problèmes sont étudiés séparément, ce qui n'est pas le cas dans ce travail. Trois approches peuvent être considérées, à savoir le contrôle [3]–[8], la compensation [9]–[11] et la conception [12]–[22]. Dans notre travail, nous nous intéressons à la dernière approche. Plusieurs modifications de structure sont proposées dans le but d'évaluer leurs impacts simultanément sur ces deux problèmes tout en considérant les régimes statique et en fonctionnement.

2. DÉMARCHE DE L'ÉTUDE

Plusieurs modifications géométriques d'une MRVDS sont proposées dans cette étude (Fig. 1). Il s'agit d'une MRV avec barrière de flux « MRV_bar », une MRV avec une importante ouverture rotorique « MRV_Br », une MRV avec un trou « MRV_trou », une MRV avec dents arrondies « MRV_arro » et une MRV avec cale « MRV_cale ». Une analyse est alors consacrée aux caractéristiques de chacune des géométries en les

comparant à une MRV de référence (MRV_orig) en régime statique comme en fonctionnement.

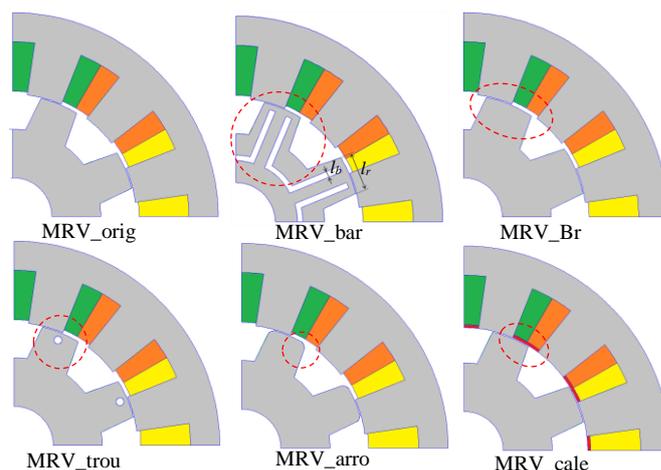


Fig. 1 Structures proposées

Dans un premier temps, les différentes caractéristiques statiques (couple, flux et force radiale sur une dent statorique) sont obtenues en alimentant une seule phase par un courant constant tout en prenant en compte la rotation.

Cependant, les cahiers des charges liés à la traction électrique imposent d'atteindre des courbes enveloppes définissant les couples maxima développés pour l'ensemble des vitesses. Dans le cas des MRV, ces courbes sont atteintes lorsque la machine est alimentée par son courant maximum et sa tension maximale tout en optimisant les paramètres de contrôle. Dans notre cas, la commande à couple moyen est considérée. Certes, cette commande fait intervenir trois paramètres (l'angle de conduction θ , l'angle d'amorçage ψ et le courant de référence I_{ref} , Fig. 2), mais dans le cas de ces courbes enveloppes (couple moyen maximum), deux paramètres doivent maxima à savoir, $\theta=180^\circ$ et $I_{ref}=I_{max}$. Nous nous intéressons donc à ces courbes permettant ainsi de travailler sur une large plage de vitesse et de proposer une optimisation des paramètres de commande.

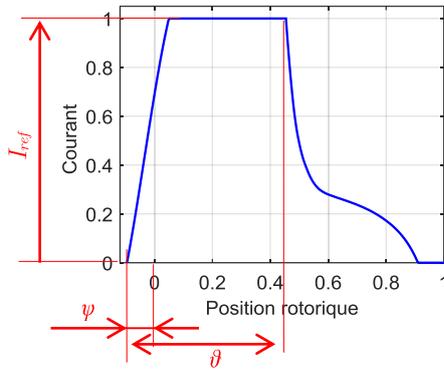


Fig. 2 parametres de controle

Pour des raisons de confidentialité, les grandeurs sont normalisées par rapport à celles de la MRV_{orig} tout le long de cet article, y compris la position du rotor. Pour les mêmes raisons, les caractéristiques et les dimensions des MRV ne sont pas communiquées.

3. LA MRV DE RÉFÉRENCE "MRV_ORIG"

Afin de mieux cerner les avantages, les inconvénients et les caractéristiques des différentes structures proposées, nous allons effectuer des études comparatives avec une machine de référence « MRV_{orig} » (Fig. 3). Cette dernière est un prototype d'une MRVDS conçue pour intégrer un groupe motopropulseur d'un véhicule tout électrique. Lors de sa phase de conception, cette machine a été optimisée pour maximiser le couple moyen.

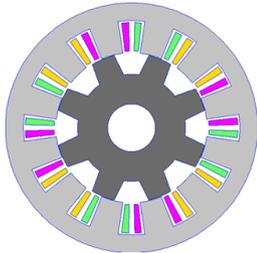


Fig. 3 MRV de référence "MRV_orig"

4. STRUCTURES PROPOSÉES

Dans cette première partie, les différentes structures étudiées sont présentées. Le choix des caractéristiques et des dimensions de chaque structure est effectué à l'aide d'études paramétriques. Une étude plus détaillée peut être consultée dans [23].

Durant cette section, nous définissons les ondulations de couple en statique ou autrement dit le creux de couple comme étant la différence entre le couple maximum statique et la valeur du couple à l'intersection de deux couples de deux phases différentes (Fig 4, équation 1).

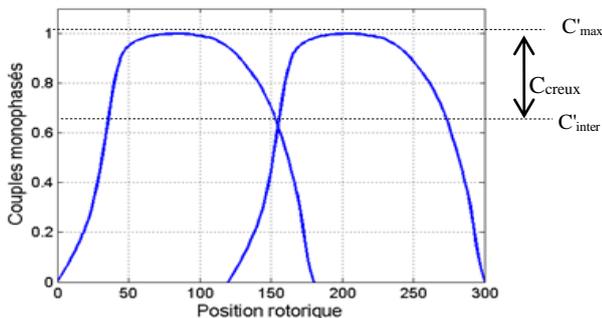


Fig. 4 Couples statiques de deux phases

$$C_{creux} = C'_{max} - C'_{inter} \quad (1)$$

4.1. MRV avec barrières de flux "MRV_bar"

La MRV_{bar} doit permettre la réduction des ondulations de couple [20]. Dans notre étude, nous reprenons donc une structure similaire afin de quantifier une éventuelle réduction des ondulations lors du fonctionnement et nous profitons pour analyser l'impact sur la force radiale.

En magnétostatique, malgré une dégradation au niveau de son couple moyen (5% à I_{max} et 2% à 0.5 * I_{max}), la MRV_{bar} permet de réduire les ondulations de couple. En outre, glissement de la courbe du couple est constaté, c'est-à-dire moins de couple au voisinage de la position de conjonction et plus de couple à proximité de la position d'opposition. Ce couple plus important à cette position peut être bénéfique lors d'un fonctionnement à haute vitesse car il est plus facile d'imposer le courant au voisinage de cette position qu'à celle de conjonction (force électromotrice FEM). Au niveau de la force radiale, la MRV_{bar} voit son gradient réduit.

4.2. MRV avec augmentation de Br "MRV_Br"

Comme le couple de la MRV_{orig} est plus important au voisinage de la position de conjonction que celle d'opposition, l'idée est alors d'augmenter l'ouverture polaire rotorique (angle Br) afin d'accroître le couple en position d'opposition. Il s'agit donc de considérer une MRV_{Br} dont l'ouverture Br est fortement supérieure à celle de la MRV_{orig}.

En ce qui concerne le couple statique, l'augmentation de l'ouverture polaire rotorique augmente le couple au voisinage de la position d'opposition et fait l'inverse au voisinage de la position de conjonction. En effet, pour des valeurs importantes de Br, les dents rotoriques et statoriques sont plus proches dans la position d'opposition : ainsi, la force de traction est plus importante et il en est de même pour la force radiale. Cependant, la dent rotorique chevauche celle du stator plus en avance (par rapport à la MRV_{orig}) ce qui réduit la saillance et explique la perte au niveau du couple. Des écarts légers sont observés au niveau des couples moyens (entre 0 et 4 %). Contrairement au couple, le constat au niveau de la force radiale est plus simple : toute augmentation de l'ouverture polaire entraîne une augmentation directe de la force quels que soient le courant et la position (augmentation de la surface d'application de la pression magnétique).

4.3. MRV avec trou au rotor "MRV_trou"

Il s'agit de l'ajout d'un trou au niveau du rotor. Le but est de limiter la force radiale, notamment en position de conjonction où elle atteint sa valeur maximale. Le trou retenu permet de regagner une partie du couple moyen perdue au voisinage de la conjonction, position pour laquelle le couple de la MRV_{trou} dépasse celui de la MRV_{orig}.

L'introduction du trou influence peu le couple à la position d'opposition contrairement à la position de conjonction. Au voisinage de cette dernière, le couple chute à cause du trou qui commence à chevaucher la dent statorique et réduit ainsi la section de passage de flux. Le trou permet la réductions des ondulations de couple en statique. Le couple moyen, quant à lui, est légèrement réduit dans la MRV_{trou}. En ce qui concerne la force radiale appliquée sur une dent statorique qui est la cible principale de cette structure, elle est quasiment la même au voisinage de la position d'opposition quel que soit le courant d'alimentation. Cependant, cette force est fortement diminuée à partir au voisinage de la position de conjonction. Grâce alors au trou et donc à la réduction de la section de passage du flux, la force d'attraction décroît ainsi que son gradient.

4.4. MRV avec dents rotoriques arrondies "MRV_arro"

C'est une MRV dont les dents rotoriques sont arrondies. L'objectif principal est d'adoucir la variation de la force radiale et par conséquent de rendre moins brusque le relâchement de la dent rotorique par la dent statorique.

Grace à la réduction du gradient de la force radiale, à la réduction en valeur moyenne de cette force, à la réduction des ondulations de couple en statique à courant maximum et à son couple identique comparée à MRV_orig à faible courant, la MRV avec l'arrondi est considérée comme étant une structure avantageuse et sera donc étudiée davantage dans la section suivante.

4.5. MRV avec une cale magnétique "MRV_cale"

Le principe est d'ajouter des cales magnétiques entre les dents. Elles canalisent un peu de flux magnétique, ce qui modifie le comportement magnétique de la machine (Fig. 1-e). Le but est de réduire la force radiale et les ondulations du couple. La courbe de magnétisation B(H) de la cale est différente de celle des autres parties de la machine. Pour la suite de cette étude, la MRV avec cale dont la hauteur est de 4% de la hauteur de la dent est retenue.

À faible courant, l'influence de la cale sur le couple est assez négligeable. En effet, pour les premières valeurs du courant, les couples monophasés en fonction de la position rotorique des deux moteurs ont quasiment la même allure et leurs valeurs moyennes sont égales. Au-delà d'une valeur de 0,35 du courant maximum d'alimentation, un écart commence à apparaître entre les deux couples et atteint une valeur maximale de 6,4% pour les valeurs moyennes. À partir de ce point, la MRV_cale développe moins de couple comparée à la MRV_orig, notamment au voisinage de la position de conjonction. En contrepartie, la cale permet de réduire la force radiale exercée sur une dent statorique. Cette force radiale est en effet moins importante dans la MRV_cale en position de conjonction. Cependant, elle reste la même pour les deux MRV pour la position d'opposition. En ce qui concerne sa valeur moyenne, à très faible courant, les deux machines se valent, mais qu'à partir d'une valeur de $0,22I_{max}$, la MRV_cale présente une valeur moyenne moins importante. En outre, l'introduction de la cale magnétique adoucit la variation de la force radiale. Voir l'article [24] pour plus de détails.

5. ÉTUDES DYNAMIQUES EN FONCTIONNEMENT

L'étude dynamique en fonctionnement considère les différentes grandeurs instantanées pour certains points de fonctionnement (une fois le régime permanent établi). Il s'agit de confronter les courbes envoloppes avec celle de la MRV de référence. En plus de couple moyen, la force radiale et les ondulations du couple sont calculées sur toute la plage de vitesse envisagée pour l'application. La détermination de ces courbes est effectuée à l'aide du logiciel de laboratoire « MRVSIM » [25]. Les figure « Fig. 5, Fig. 6 et Fig. 7 » représentent respectivement la comparaison en fonctionnement de la MRV_orig avec MRV_bar, la MRV_Br, la MRV_trou, la MRV_arro et la MRV_cale.

A. Étude en fonctionnement de la MRV_bar

La MRV_bar développe globalement moins de couple que la MRV_orig sur toute la plage de variation de la vitesse (Fig 5 - a). L'écart varie de -5% à faible vitesse jusqu'à -21% à haute vitesse. L'augmentation de flux dans la position d'opposition et sa réduction dans celle de conjonction diminue le cycle de conversion de cette machine. Ceci explique la perte au niveau du couple moyen.

À cause de l'augmentation de la largeur de la dent qui accroît la surface de cette dernière, la MRV_bar possède une force

radiale plus importante notamment à faible vitesse (Fig 5-a). À haute vitesse, les deux machines ont des valeurs identiques de force à cause de l'effet de la FEM. L'écart entre les deux forces, quant à lui, varie de plus de 6% à très faible vitesse jusqu'à moins de 1,7% à la vitesse de 0,6. Enfin, on espérait avoir moins d'ondulations grâce à la réduction des ondulations en statique, ce n'est pas le cas lors de la comparaison dans le régime dynamique. En effet, la MRV_bar présente globalement plus d'ondulations comparée à la MRV_orig avec un écart de 26% en moyenne.

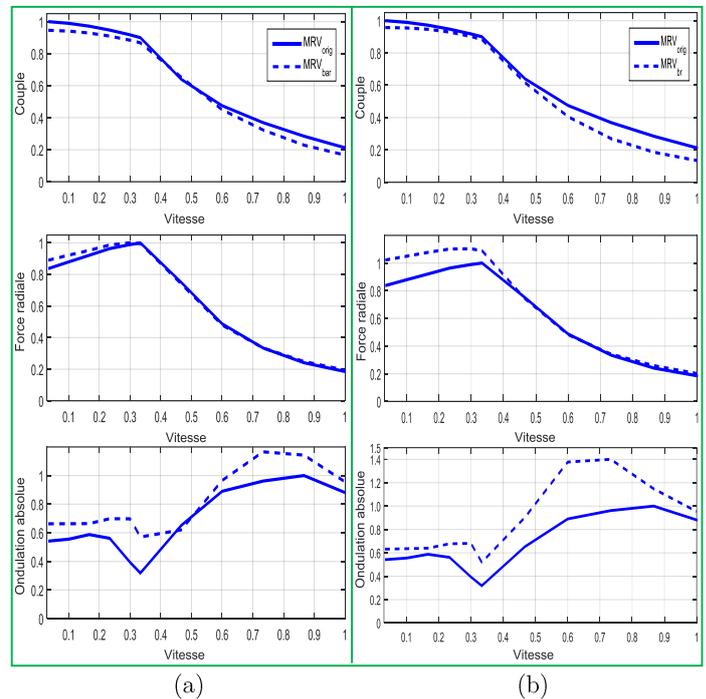


Fig. 5 Comparaison en fonctionnement, (a) MRV_orig vs. MRV_bar, (b) MRV_orig vs. MRV_br

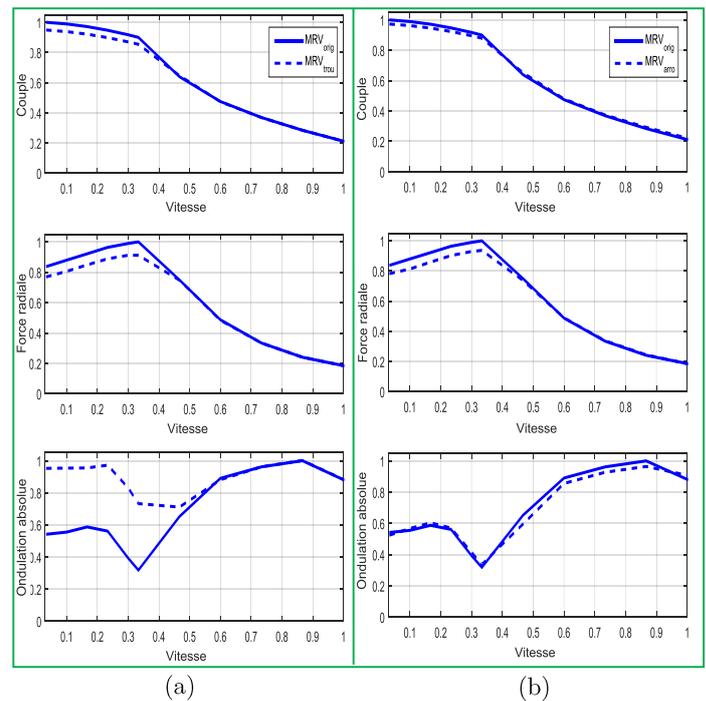


Fig. 6 Comparaison en fonctionnement, (a) MRV_orig vs. MRV_trou, (b) MRV_orig vs. MRV_arro

B. Étude en fonctionnement de la MRV_{Br}

Le fait d'augmenter l'ouverture Br réduit la saillance de la machine comparée à la MRV_{orig}. Cette augmentation de Br affecte légèrement le couple moyen, ce qui se répercute sur sa courbe enveloppe. En effet, la MRV_{Br} développe moins de couple comparée à la MRV de référence (Fig. 5-b). À faible vitesse cette dégradation est liée à la faible saillance de la MRV_{Br}, alors qu'elle est principalement due à une FEM importante dans la MRV_{Br} à haute vitesse.

En ce qui concerne la force radiale, elle est plus importante dans la MRV_{Br} sur quasiment l'ensemble de la plage de vitesse à cause de l'augmentation de surface de la dent rotorique. En analysant la courbe des ondulations, on voit que la MRV_{Br} ne présente pas d'intérêt au niveau de ce critère contrairement à ce qui était espéré. Cette machine a des ondulations plus importantes sur toute la plage de fonctionnement.

C. Étude en fonctionnement de la MRV_{trou}

Avec un écart de 5% en moyenne, la machine avec trou n'atteint pas le couple de la machine originelle entre la vitesse 0 et celle de 0,48 (Fig. 6-a). Ceci est lié aux raisons déjà évoqués. Au-delà de cette vitesse, les deux MRV développent des couples identiques à cause de la FEM qui limite le courant d'alimentation et réduit ainsi les couples des deux machines. En outre, pour la MRV_{trou}, la réduction constatée au niveau du flux fait que sa FEM est moins importante et son impact sur le courant aussi. À faible vitesse et comme attendu, la force radiale dans la MRV_{trou}. Au-delà de la vitesse de 0,45, les deux forces se valent. Dans ce cas de figure, la réduction de force due à l'introduction du trou est compensée par l'augmentation du courant d'alimentation dans la MRV_{trou} à cause de sa faible FEM. Si elle montre un avantage en termes de force radiale, la MRV_{trou} présente cependant un inconvénient au niveau des ondulations du couple. Malgré la réduction d'ondulations en statique, cette machine a globalement plus d'ondulations. Afin de bien comprendre ce paradoxe, il faut remonter vers les allures des inductances propres qui sont non-linéaire dans la MRV_{trou} ce qu'explique le couple fortement ondulé car ce dernier dépendant directement de la dérivée de ces inductances propres.

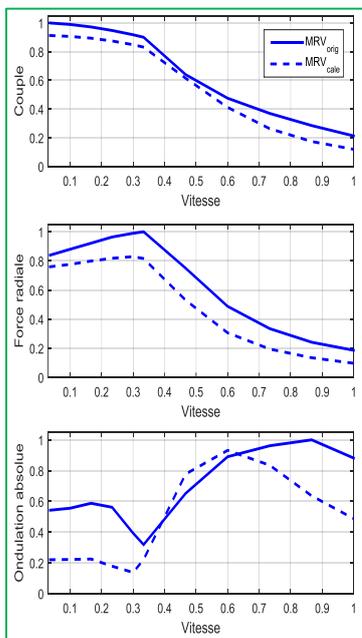


Fig. 7 Comparaison en fonctionnement, MRV_{orig} vs. MRV_{cale}

D. Étude en fonctionnement de la MRV_{arro}

Concernant le couple, la machine avec arrondi a des performances légèrement dégradées à faible vitesse (3% de moins en moyenne, Fig. 6-b). Ceci est dû à la réduction de la section de passage de flux dans les dents rotoriques. Au-delà de la vitesse 0.33, la MRV_{arro} développe un couple équivalent à celui de la MRV_{orig}. En effet, dans cette partie la FEM limite plus le courant d'alimentation dans la MRV_{orig} que dans la MRV_{arro}. Un comportement similaire est observé au niveau de la force radiale, c'est-à-dire une légère baisse à faible vitesse et des valeurs identiques à haute vitesse. En ce qui concerne les ondulations du couple, elles sont quasiment identiques dans les deux machines. En d'autres termes, quel que soit la vitesse considérée, les écarts entre la MRV_{arro} et MRV_{orig} sont négligeables.

E. Étude en fonctionnement de la MRV_{cale}

L'introduction de la cale magnétique dégrade la courbe enveloppe, en moyenne de 16%, mais en contrepartie elle permet de réduire de 26% en moyenne la force radiale sur la dent statorique (Fig. 7). Cette dégradation est une conséquence directe du flux de fuite. La dégradation de la courbe enveloppe est moins importante aux faibles vitesses qu'aux très hautes vitesses. Pour ces dernières, la surface de conversion est moins importante pour la MRV_{cale}. La dégradation de la courbe enveloppe de la MRV_{cale} par rapport à la MRV_{orig} s'accompagne aussi par une réduction des ondulations de couple (en moyenne de -38%), notamment à faible vitesse (-50%).

6. SYNTHÈSE DES MODIFICATIONS GÉOMÉTRIQUES

Le tableau 1 synthétise les résultats pour les différentes modifications géométriques avec une comparaison à la MRV_{orig}. Nous considérons les régimes statique et dynamique. Dans ce dernier, la plage de vitesse est subdivisée en deux intervalles. Le premier est entre la vitesse nulle jusqu'à la vitesse de base (0.33) et le second entre cette vitesse de base jusqu'à la vitesse maximale. Les critères d'évaluation sont : le couple moyen en statique C_{moy}' et en fonctionnement C_{moy} , la force radiale en statique F_{rad}' et en fonctionnement F_{rad} et enfin les ondulations en statique $\Delta C'$ et en fonctionnement ΔC .

- ☹️ : MRV modifiée moins performante que la MRV_{orig}
- 😊 : MRV modifiée plus performante que la MRV_{orig}
- 😐 : MRV modifiée équivalente à la MRV_{orig}

La majorité des modifications géométriques dégradent légèrement le couple moyen de la MRV_{orig} car cette dernière a été optimisée sur ce critère. Néanmoins, ces nouvelles structures permettent de réduire la force radiale et les ondulations de couple notamment la MRV_{cale}.

		MRV _{bar}	MRV _{Br}	MRV _{arro}	MRV _{trou}	MRV _{cale}	
Statique	C_{moy}'	☹️	☹️	☹️	☹️	☹️	
	F_{rad}'	😊	☹️	😊	😊	😊	
	$\Delta C'$	😊	😊	😊	😊	😊	
Fonctionnement	V. faible	C_{moy}	☹️	☹️	☹️	☹️	
		F_{rad}	😊	☹️	😐	😊	😊
		ΔC	☹️	☹️	😐	☹️	😊
	V. haute	C_{moy}	☹️	☹️	😐	😐	☹️
		F_{rad}	😐	😐	😐	😐	😊
		ΔC	☹️	☹️	😐	☹️	😊

Tableau 1 Synthèse des géométries modifiées

7. CONCLUSIONS

En respectant des contraintes de cahier des charges, cinq structures de la MRVDS ont été proposées. Pour chacune des modifications, une étude statique et une autre en fonctionnement ont été réalisées. Ceci a permis d'établir un bilan comparatif des différentes solutions où la MRV avec cale magnétique s'avère être la plus avantageuse.

8. REFERENCES

- [1] D. E. Cameron, J. H. Lang, and S. D. Umans, 'The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 6, pp. 1250–1255, Nov. 1992.
- [2] I. Husain, 'Minimization of torque ripple in SRM drives', *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 49, no. 1, pp. 28–39, 2002.
- [3] C. Pollock and C. Y. Wu, 'Acoustic noise cancellation techniques for switched reluctance drives', *Ind. Appl. IEEE Trans. On*, vol. 33, no. 2, pp. 477–484, 1997.
- [4] A. Yoshida, D. Tanaka, and I. Miki, 'A study on the reduction of vibration and acoustic noise for switched reluctance motor', presented at the Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on, 2005, vol. 1, pp. 520–523.
- [5] A. Kolli, G. Krebs, X. Mininger, and C. Marchand, 'Impact of command parameters on efficiency, torque ripple and vibrations for Switched Reluctance motor', presented at the 2012 XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2012, pp. 2975–2980.
- [6] A. Hofmann, A. Al-Dajani, M. Bosing, and R. W. De Doncker, 'Direct instantaneous force control: A method to eliminate mode-0-borne noise in switched reluctance machines', presented at the Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International, 2013, pp. 1009–1016.
- [7] B. Fahimi, G. Suresh, K. M. Rahman, and M. Ehsani, 'Mitigation of acoustic noise and vibration in switched reluctance motor drive using neural network based current profiling', presented at the Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, 1998, vol. 1, pp. 715–722.
- [8] R. Suryadevara and B. G. Fernandes, 'Control techniques for torque ripple minimization in switched reluctance motor: An overview', in *2013 8th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, 2013, pp. 24–29.
- [9] J.-P. Lecointe, 'Etude et réduction active du bruit d'origine magnétique des machines à réluctance variable à double saillance', Thèse, Artois, 2003.
- [10] X. Mininger, 'Réduction des vibrations des machines à réluctance variable à l'aide d'actionneurs piézoélectriques', Thèse, École Normale Supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2005.
- [11] Y. Tang, 'Switched reluctance motor with damping windings', US6008561 A, 28-Dec-1999.
- [12] M. Besbes, C. Picod, F. Camus, and M. Gabsi, 'Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors', *Electr. Power Appl. IEE Proc. -*, vol. 145, no. 5, pp. 462–468, Sep. 1998.
- [13] J. P. Hong, K. H. Ha, and J. Lee, 'Stator pole and yoke design for vibration reduction of switched reluctance motor', *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 38, no. 2, pp. 929–932, 2002.
- [14] S. P. Randall, 'Noise reduction in reluctance machines', US6072260 A, 06-Jun-2000.
- [15] S. Ayari, 'Etude des vibrations des machines à réluctance variable: influence des caractéristiques géométriques et de l'excentricité rotorique', Thèse, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2000.
- [16] M. N. Anwar and I. Husain, 'Design perspectives of a low acoustic noise switched reluctance machine', presented at the Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, 2000, vol. 1, pp. 99–106.
- [17] P. O. Rasmussen, J. H. Andreasen, and E. C. LaBrush, 'Interlaminated damping-a method for reduction of vibration and acoustic noise for switched reluctance machines?', in *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*, 2005, vol. 3, pp. 1531–1539.
- [18] M. Balaji and V. Kamaraj, 'Design optimization of Switched Reluctance Machine using Particle Swarm Optimization', presented at the Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference on, 2011, pp. 164–169.
- [19] R. T. Naayagi and V. Kamaraj, 'Modeling and design of shape optimized SRM with reduced ripple', in *Emerging Technologies, 2005. Proceedings of the IEEE Symposium on*, 2005, pp. 399–404.
- [20] J. Hur, G. H. Kang, J. Y. Lee, J. P. Hong, and B. K. Lee, 'Design and optimization of high torque, low ripple switched reluctance motor with flux barrier for direct drive', in *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, 2004, vol. 1.
- [21] Y. K. Choi, H. S. Yoon, and C. S. Koh, 'Pole-shape optimization of a switched-reluctance motor for torque ripple reduction', *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 43, no. 4, pp. 1797–1800, 2007.
- [22] P. C. Desai, M. Krishnamurthy, N. Schofield, and A. Emadi, 'Novel Switched Reluctance Machine Configuration With Higher Number of Rotor Poles Than Stator Poles: Concept to Implementation', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 649–659, Feb. 2010.
- [23] M. Belhadi, 'Étude de machines à réluctance variable pour une application de traction électrique : réduction des ondulations de couple et des efforts radiaux', Thèse, Paris Sud, 2015.
- [24] M. Belhadi, G. Krebs, C. Marchand, H. Hannoun, and X. Mininger, 'Switched reluctance motor with magnetic slot wedges for automotive traction application', *Eur Phys J Appl Phys*, vol. 72, no. 3, p. 30901, 2015.
- [25] M. Besbes and B. Multon, 'MRVSim code : Logiciel de simulation pour l'aide au dimensionnement des MRVDS et de convertisseur', IDDN.FR.001.430010.000.S.C.2004.000.30645, 2004.