



HAL
open science

Comparaison des performances de machines à réluctance variable 8/6 à flux radial et axial

Racha Aydoun, Jean-Philippe Lecointe, Abdelmounaïm Tounzi, Guillaume Parent

► **To cite this version:**

Racha Aydoun, Jean-Philippe Lecointe, Abdelmounaïm Tounzi, Guillaume Parent. Comparaison des performances de machines à réluctance variable 8/6 à flux radial et axial. Symposium de Génie Électrique (SGE) : EF-EPF-MGE, Jul 2018, Nancy, France. hal-02981829

HAL Id: hal-02981829

<https://hal.science/hal-02981829v1>

Submitted on 28 Oct 2020

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 des performances de machines à réluctance variable 8/6 à flux radial et axial

Racha AYDOUN⁽¹⁾, Guillaume PARENT⁽¹⁾, Abdelmounaïm TOUNZI⁽²⁾, Jean-Philippe LECOINTE⁽¹⁾

⁽¹⁾Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Béthune, 62400, France

⁽²⁾Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP), Cité Scientifique, Villeneuve d'Ascq, 59655, France

RESUME – Cet article propose une comparaison des performances de deux machines à réluctance variable à flux radial (MRVFR) et axial (MRVFA), présentant des surfaces actives équivalentes. Les valeurs d'inductances sont d'abord estimées par des réseaux de réluctances. Ensuite, des modèles numériques éléments finis sont mis en oeuvre pour corroborer ces résultats et déterminer le couple électromagnétique de chacune des deux structures. Les résultats de cette comparaison montrent une amélioration du couple électromagnétique de la MRVFA et une réduction de son volume. La MRVFA fait enfin l'objet d'une analyse de certains paramètres géométriques sur l'inductance et le couple statique.

Mots-clés – Machine à réluctance variable, flux axial, couple électromagnétique, inductance.

1. INTRODUCTION

Dimensionner des machines tournantes produisant un fort couple et fonctionnant à très hautes vitesses s'accompagne aujourd'hui d'une recherche de rendement élevé. Dans ce cadre, les machines à réluctance variable (MRV) sont de très bonnes candidates. On leur reconnaît une bonne robustesse [1] [2], caractéristique liée à l'absence d'aimants et de bobinages au rotor [3]. On leur confère également aussi une capacité à travailler à fort couple ou à des vitesses très élevées.

La MRVFA est d'autant plus intéressante qu'elle est plus compacte que la machine à flux radial. De ce fait, bien que les MRV dites à flux radial (MRVFR) soient plus répandues dans la bibliographie et dans les applications industrielles, l'intérêt pour la MRVFA est de plus en plus grandissant pour des raisons de réduction d'encombrement [4] [5] [6] [7] [8] [9]. La recherche bibliographique montre que la comparaison des deux machines est également favorable à la MRVFA avec une amélioration du couple électromagnétique.

Plusieurs topologies de MRVFA sont présentées dans la littérature. Une première, qui ne comporte qu'un stator et un rotor [10], est bien adaptée pour des applications avec des contraintes de volume et de compacité, mais l'existence d'efforts axiaux crée des problèmes d'équilibrage [11]. Pour palier ce problème, d'autres topologies [12] utilisant par exemple deux stators ou un stator et deux rotors [13] ont été exploitées. Dans [4], le développement d'une machine 12/16 à flux axial avec deux rotors segmentés et un stator montre un gain en densité de couple et un rapport couple/poids élevé, ce qui la rend intéressante pour des applications de traction. Dans [14], les auteurs ont modélisé une MRVFA en proposant différentes directions de feuilletage au stator pour réduire les flux de fuite. Cette configuration a permis une réduction importante des pertes fer en comparaison avec une MRVFA sans feuilletage. Les auteurs de [5] ont travaillé sur l'optimisation d'une MRVFA afin de maximiser la densité de couple. Puis, dans [12], une comparaison des performances entre une MRVFR et une MRVFA à 2 stators et 1 rotor avec un flux se refermant dans la culasse rotorique est effectuée à volume constant. Enfin, dans [13], les auteurs proposent une structure axiale à deux rotors avec un trajet de flux plus court.

Cet article propose une comparaison des performances de MRVFA et MRVFR, les deux machines présentant la même surface active de dents. D'abord, les caractéristiques ainsi que le

modèle de la MRVFR de référence sont présentés. Ensuite, le dimensionnement de la MRVFA équivalente est développé, suivi du modèle 3D. Suit enfin une étude détaillée de la MRVFA et des paramètres géométriques influant sur les performances de cette machine.

Des exposants "R" et "A" permettront de distinguer les MRVFR et MRVFA tandis que stator et rotor seront repérés par des lettres "s" et "r" placées en indice. L'absence d'exposant renvoie à des grandeurs communes aux 2 machines.

2. PRÉSENTATION DE LA MRVFR ET VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

2.1. Géométrie et modèle numérique

Le développement du modèle numérique a d'abord été réalisé pour une MRVFR 8/6 de référence (figure 1) présente au laboratoire.

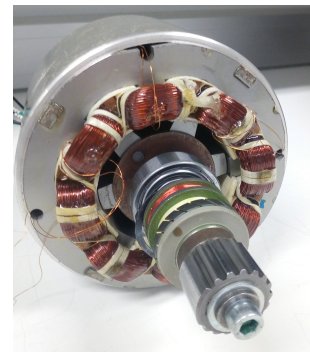


Fig. 1. Photographie de la MRVFR de référence

Les dimensions géométriques de la MRVFR sont présentées à la figure 2 et leurs valeurs sont renseignées dans le tableau 1.

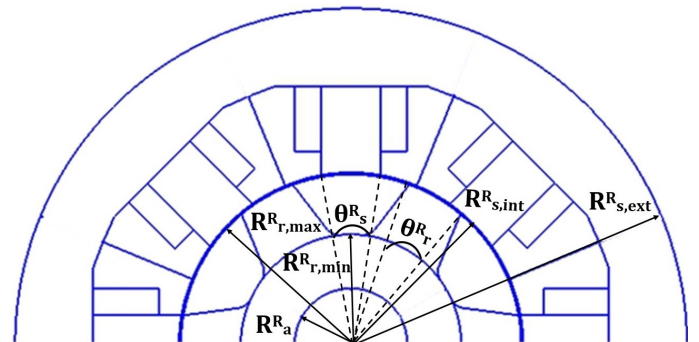


Fig. 2. Dimensions de la MRVFR représentées sur la moitié d'une machine

Le modèle a été développé à l'aide d'un logiciel d'analyse par éléments finis, **GMSH**, couplé au solveur **Getdp**. Les circuits magnétiques statorique et rotorique sont constitués de pa-

Tableau 1. Dimensions de la MRVFR

Paramètres	Nom	Valeur
Rayon statorique à l'alésage [mm]	$R_{s,int}^R$	32
Rayon statorique externe [mm]	$R_{s,ext}^R$	62.5
Rayon rotorique maximal [mm]	$R_{r,max}^R$	20.5
Rayon rotorique minimal [mm]	$R_{r,min}^R$	31.65
Nombre de dents statoriques	N_s	8
Nombre de dents rotoriques	N_r	6
Nombre de spires par phase	N_{phase}	520
Ouverture dent statorique [°]	θ_s^R	19.92
Ouverture dent rotorique [°]	θ_r^R	19.975
Rayon de l'arbre [mm]	R_a^R	10.5
Épaisseur d'entrefer [mm]	e^R	0.35

quets de tôles empilées à grains non-orientés **M400** de **0.5** mm d'épaisseur et dont la caractéristique $B(H)$ est donnée à la figure 3.

Le modèle numérique de la MRVFR utilise un maillage de **46755** éléments.

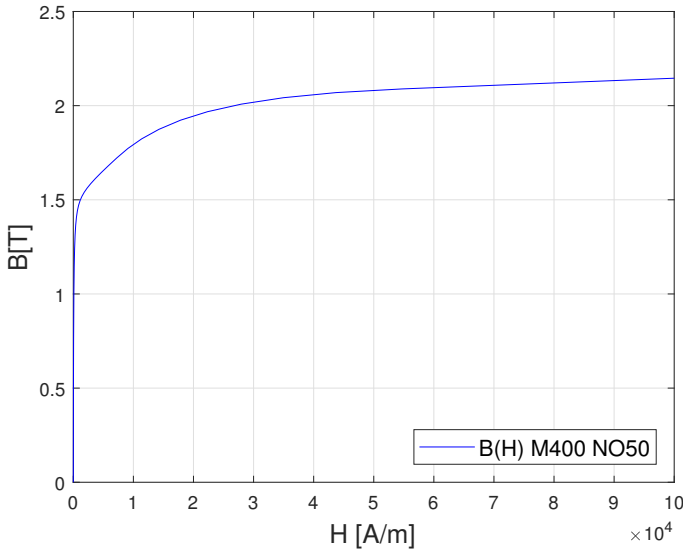


Fig. 3. Caractéristique $B(H)$ des tôles référencées M400 NO50

2.2. Validation expérimentale

Il s'agit d'abord de vérifier la fiabilité du modèle numérique utilisé pour modéliser les deux MRV étudiées. La validation expérimentale porte sur le modèle de la MRVFR.

Des mesures expérimentales ont été réalisées sur la MRVFR existante. La résistance des phases a été mesurée par la méthode voltampérométrique. Le rotor est bloqué à la position angulaire souhaitée, de la position de conjonction à la position d'opposition, avec un frein équipant la machine. Un GBF et un amplificateur de puissance permettent d'alimenter une phase avec une tension alternative. L'inductance est ensuite déduite de la valeur de l'impédance. Les mesures sont réalisées pour différentes positions.

Étant donné que le courant nominal de la MRVFR testée est de 3A, les résultats d'inductance montrés à la figure 4 sont obtenus expérimentalement et numériquement à cette valeur de courant. A des courants plus élevés, le couple devient important si bien qu'il est difficile de garder le rotor bloqué dans des positions intermédiaires entre la conjonction et l'opposition et la saturation engendre de fortes distorsions de courant.

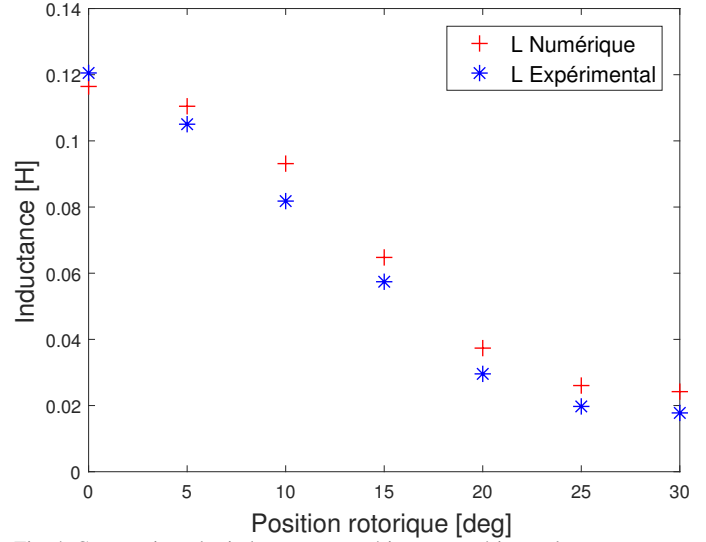


Fig. 4. Comparaison des inductances numérique et expérimentale

Les valeurs d'inductances expérimentale et numérique présentent un écart faible de 3.3 % pour la position de conjonction. Les écarts qui apparaissent pour les autres positions peuvent être expliqués par la différence entre la caractéristique $B(H)$ utilisée dans nos simulations (figure 3) et issue de caractérisations standards du matériau magnétique et la caractéristique réelle du matériau de la machine qui a été soumise à différentes contraintes de la fabrication. Toutefois, les allures sont très similaires ce qui permet de considérer que le modèle numérique est suffisamment précis pour analyser la différence de performances entre la MRVFR et la MRVFA.

3. PRÉSENTATION DE LA MRVFA ET DU MODÈLE NUMÉRIQUE 3D

3.1. Dimensionnement de la MRVFA

Une structure de MRVFA à deux stators a été retenue pour ses avantages thermiques [15], les bobines se trouvant sur la partie externe de la machine conduisant à une meilleure dissipation de la chaleur. La structure à deux stators offre également un chemin du flux dans le rotor dit "transverse" (figure 5). Il conduit à une augmentation de la valeur moyenne du couple en comparaison avec la configuration "locale" dans laquelle le flux se reboucle à travers la culasse rotorique [12].

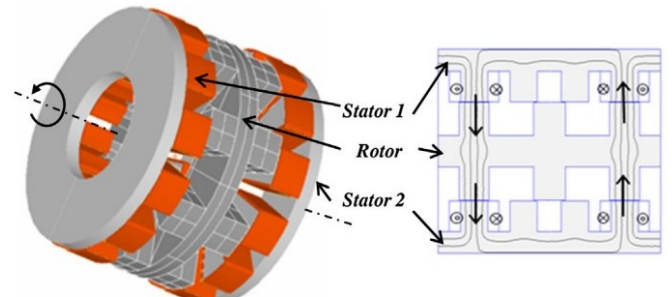


Fig. 5. Chemin du flux pour la topologie à 2 stators et 1 rotor

Le dimensionnement de la MRVFA retenue est basé sur l'équivalence des surfaces actives avec celles de la MRVFR. En d'autres termes, on égale les surfaces des dents statoriques et rotoriques. Des caractéristiques comme les nombres de dents au stator et au rotor, les angles d'ouverture des dents, le rayon de l'arbre, l'épaisseur d'entrefer et le nombre de spires sont identiques à celles de la MRVFR.

Les surfaces actives d'un stator et d'un demi-rotor de la MRVFA (S^A) sont égales à la moitié de celles de la machine radiale (S^R) : $S^A = S^R/2$. La partie la plus étroite des bobines présente un profil en arc de cercle, de centre situé au bord de la dent et de rayon de courbure externe r_b^A . Dans ce cas, le rayon interne $R_{s,int}^A$ du circuit magnétique de la MRVFA est tributaire du rayon de l'arbre (R_a^A) et de r_b^A :

$$R_{s,int}^A = r_b^A + R_a^A \quad (1)$$

Le rayon externe se déduit de la relation :

$$S_s^A = \pi \times \frac{\theta_s^A}{360} \times \{(R_{s,ext}^A)^2 - (R_{s,int}^A)^2\} \quad (2)$$

Dans notre dimensionnement, la MRVFA possède des bobines ayant la même section de cuivre et le même nombre de spires que la MRVFR, ce qui a conditionné la hauteur des dents statoriques dans notre modèle.

Les valeurs numériques des dimensions de la MRVFA sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2. Dimensions de la MRVFA

Paramètres	Nom	Valeur
Rayon statorique interne	$R_{s,int}^A$	22.23
Rayon statorique externe	$R_{s,ext}^A$	59
Rayon rotorique interne	$R_{r,int}^A$	22.23
Rayon rotorique externe	$R_{r,ext}^A$	59
Nombre de dents statorique	N_s	8
Nombre de dents rotorique	N_r	6
Nombre de spires par phase	N_{phase}	520
Ouverture dent statorique	θ_s^A	19.92
Ouverture dent rotorique	θ_r^A	19.975
Rayon de l'arbre	R_a^A	10.5
Épaisseur d'entrefer	e^A	0.175

Ces résultats basés sur des considérations géométriques confirment un gain en volume au profit de la MRVFA avec une diminution de 6 % du rayon externe de la machine et un gain de 47 % sur la longueur axiale de la machine pour les mêmes surfaces actives. En termes de volume externe, on obtient une réduction d'environ 50 % par rapport à la MRVFR.

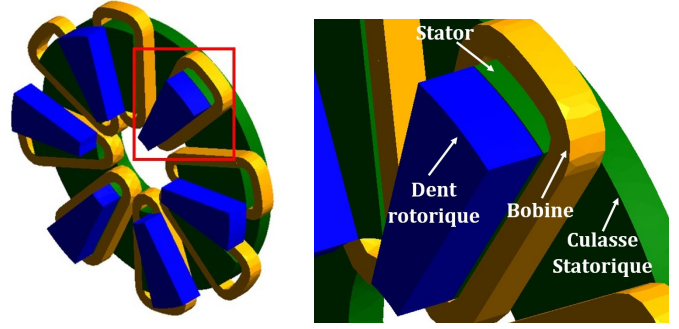
3.2. Modèle numérique 3D de la MRVFA

Avec la topologie choisie (2 stators et 1 rotor) pour notre modèle, la culasse rotorique n'est pas utile d'un point de vue magnétique. Par conséquent, elle a été retirée. Les dents sont donc découpées individuellement et encapsulées dans une structure amagnétique. La seule contrainte résidera dans le choix de la hauteur de dent rotorique et d'une structure amagnétique l'y accueillant qui soit suffisamment rigide d'un point de vue mécanique et magnétique pour garder l'effet de saillance. Cette topologie permet d'alléger le rotor et de diminuer son inertie.

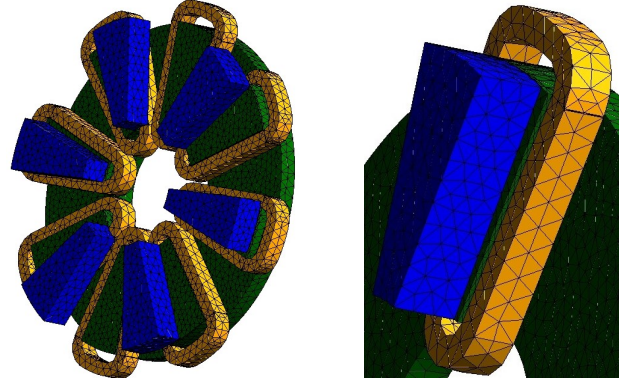
Grâce à la symétrie de la machine, seule la moitié de la machine (1 stator et la moitié du rotor) est modélisée en 3D comme montré à la figure 5. Toutes les simulations numériques du modèle de la MRVFA ont été réalisées avec le même maillage comportant **135423** éléments (figure 6).

4. COMPARAISON DES PERFORMANCES DES DEUX MACHINES

Le dimensionnement effectué avec équivalence géométrique des surfaces actives montre que la MRVFA est plus compacte



(a) Modèle 3D de la MRVFA (b) Zoom du modèle 3D
Fig. 6. Modèle 3D de la MRVFA modélisée

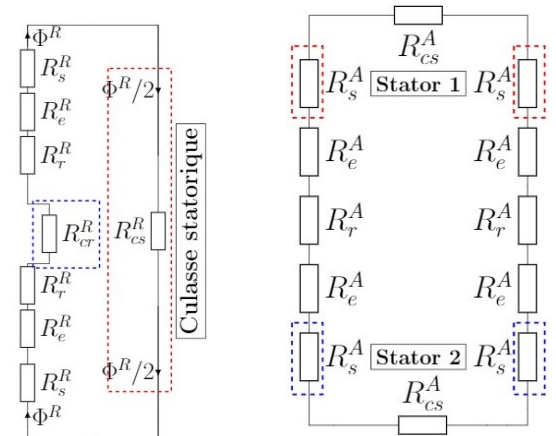


(a) Maillage de la MRVFA (b) Zoom sur le maillage
Fig. 7. Maillage 3D utilisé

que la MRVFR. Il convient de comparer les performances des deux machines. Deux modélisations sont mises en oeuvre : la première se base sur un réseau de réductance basique tandis que la seconde exploite les modèles éléments finis décrits précédemment.

4.1. Réseaux de réductances basiques

Les 2 machines sont décomposées de manière basique en réseaux de réductance [16] pour les positions d'alignement et d'opposition. Les deux modèles pour les deux machines sont présentées à la figure 7 où R_s^x , R_r^x , R_e^x , R_{cs}^x et R_{cr}^x sont respectivement les réductances d'une dent statorique, d'une dent rotorique, de l'entrefer, de la culasse statorique et de la culasse rotorique avec "x"="A" ou "R". Ces modèles ont été appliqués pour les positions d'opposition et de conjonction.



(a) MRVFR (b) MRVFA
Fig. 8. Réseaux de réductances des 2 MRV

L'expression reliant l'inductance aux différentes réluctances pour la MRVFR s'écrit :

$$L^R = \frac{N_{phase}^2}{2 \times [2 \times (R_s^R + R_r^R + R_e^R) + \frac{R_{cs}^R}{2} + \frac{R_{cr}^R}{2}]} \quad (3)$$

De la même manière, pour la MRVFA, il vient :

$$L^A = \frac{N_{phase}^2}{2 \times [4 \times (R_s^A + R_e^A) + 2 \times (R_r^A + R_{cs}^A)]} \quad (4)$$

Les valeurs d'inductances des deux machines sont calculées pour une perméabilité donnée dans la pente linéaire de la courbe B(H) (figure 3). Elles sont récapitulées dans le tableau 3 pour les positions de conjonction et d'opposition :

Tableau 3. Valeurs d'inductances par réseaux de réluctances

Position rotorique	MRVFR	MRVFA
Conjonction	160 mH	231 mH
Opposition	29.9 mH	13.4 mH

Le ratio entre la différence des inductances en conjonction L_{max} et en opposition L_{min} et la différence de positions rotoriques est plus important dans le cas de la MRVFA : 0.4 pour la MRVFA contre 0.24 pour la MRVFR.

4.2. Simulations par éléments finis

Les simulations des MRVFR et MRVFA sont faites à courants égaux et le circuit magnétique est caractérisé avec la courbe B(H) donnée à la figure 3.

Les variations d'inductance avec la position du rotor et issues de résultats de simulation à 2 et 10A sont présentées aux figures 9 et 10.

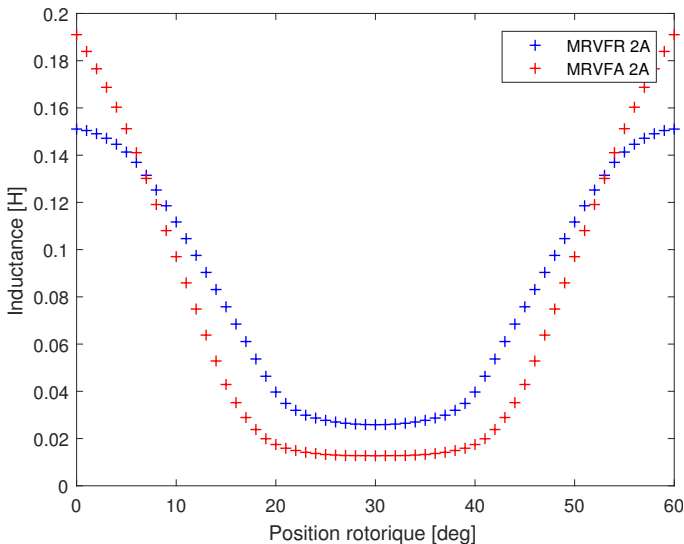


Fig. 9. Comparaison des inductances de la MRVFR et de la MRVFA à 2A

Ces résultats confirment ce qui est explicité dans la littérature, à savoir des pentes plus importantes, des valeurs minimales plus faibles et des valeurs maximales plus élevées au profit de la MRVFA, ce qui sera favorable à la production de couple. On constate également que cette évolution s'accroît lorsque le courant augmente et lorsque le circuit magnétique est saturé.

En comparant les valeurs d'inductances présentées dans le tableau 3 avec les résultats de simulations par éléments finis pour

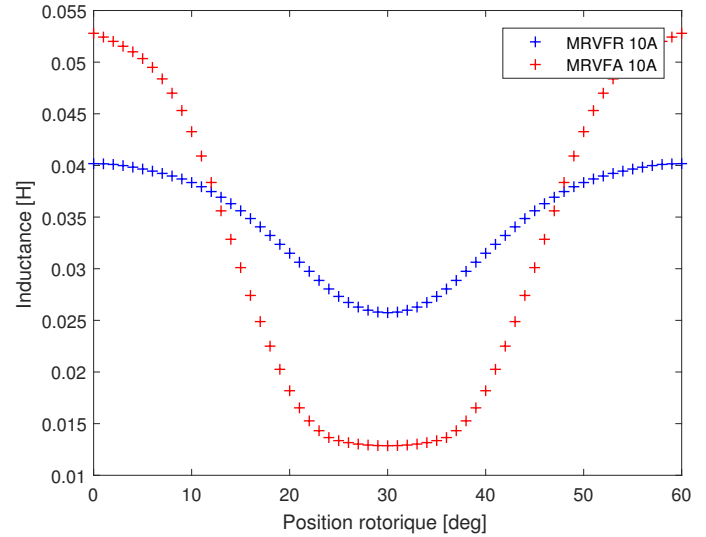


Fig. 10. Comparaison des inductances de la MRVFR et de la MRVFA à 10A

la MRVFR (figure 9), des écarts de 5.6 % en conjonction et de 13.5 % en opposition sont constatés à 2A sachant qu'à ce niveau de courant, l'effet de saturation est minime. Pour la MRVFA on obtient des différences de 17 % et de 4 % pour les positions de conjonction et d'opposition pour le même courant. L'écart entre les 2 méthodes en position de conjonction pour la MRVFA est dû à la présence de saturations locales et aux flux de fuites. Néanmoins, ces résultats montrent que le modèle simple par réseaux de réluctances donne un bon ordre de grandeur avec des temps de mises en oeuvre extrêmement faibles par rapport au modèle numérique.

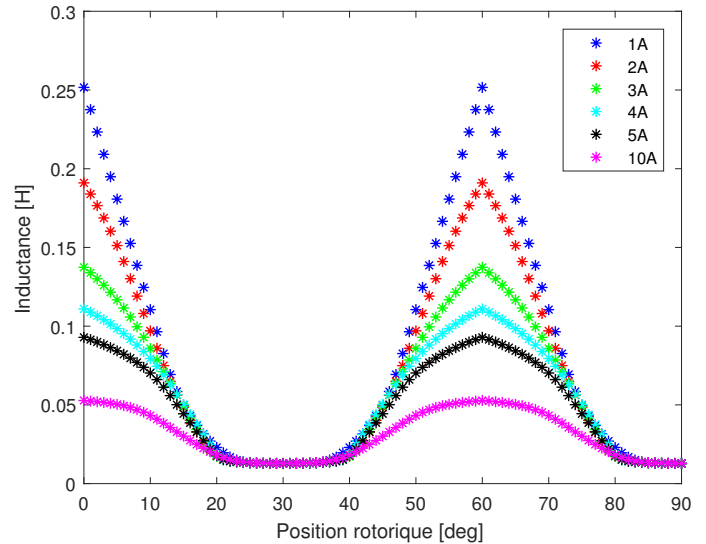


Fig. 11. Réseau d'inductances de la MRVFA à différents niveaux de courant

Le réseau de courbes présenté à la figure 11 montre les variations de l'inductance propre d'une phase de la MRVFA en fonction de la position pour des courants allant de 1A à 10A. Il met en évidence l'effet de la saturation sur le profil de l'inductance lorsque l'on augmente le courant avec un effet d'aplatissement en position de conjonction.

4.3. Détermination des couples statiques

Une évaluation du couple de la MRVFA est nécessaire pour conclure sur ses performances par rapport à la MRVFR à surfaces actives équivalentes. Comme pour l'inductance, des com-

paraisons des couples statiques sont présentées à deux courants (2A et 10A).

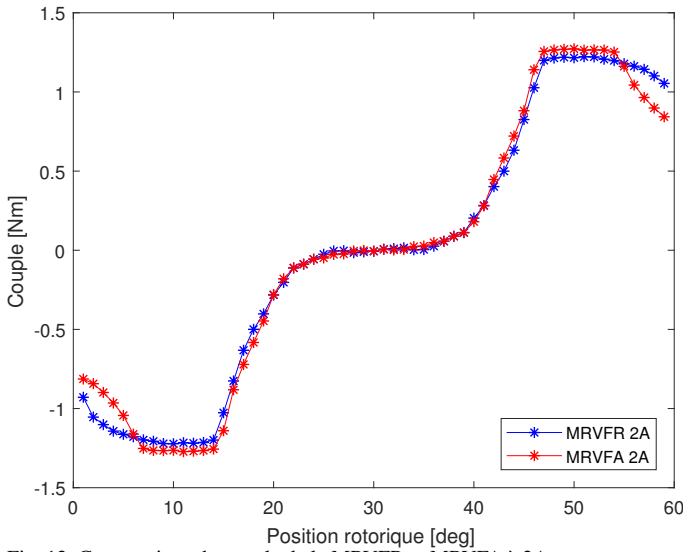


Fig. 12. Comparaison du couple de la MRVFR et MRVFA à 2A

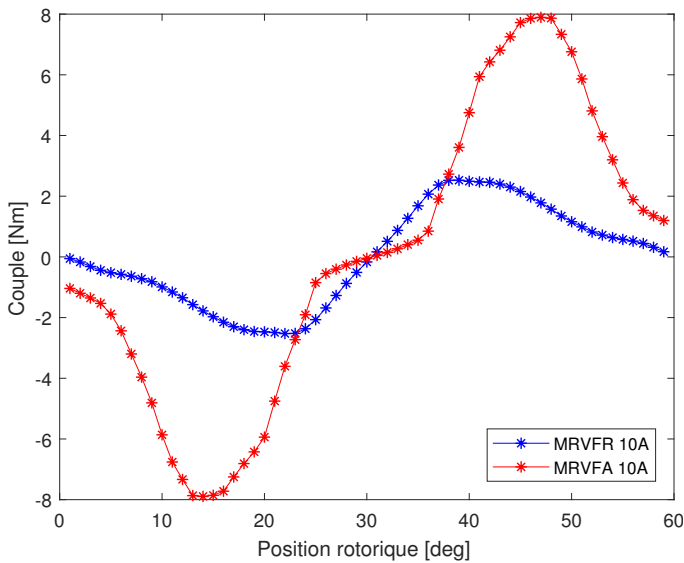


Fig. 13. Comparaison du couple de la MRVFR et MRVFA à 10A

Les allures du couple des figures 12 et 13 déduites des inductances montrent que nous obtenons ainsi un gain sur la valeur maximum du couple, 4% à 2A et 67% à 10A. Un plateau de couple moins large est observé lorsque l'on augmente le courant de 2A à 10A. Ce résultat est en accord avec la pente d'inductance qui est moins raide à cause de l'effet de la saturation.

Le réseau de courbes présenté à la figure 14 montre les allures du couple de 1A à 10A déduites de l'inductance pour tous les degrés rotoriques. Ces résultats montrent qu'autour de la position d'opposition, le plateau où le couple est nul est de moins en moins large lorsque le courant augmente. Ceci est en accord avec l'allure de l'inductance autour de la position d'opposition. L'effet de saturation à courants élevés affecte essentiellement la pente de l'inductance et, par conséquent, l'amplitude du couple. On remarque qu'une légère diminution de la pente d'inductance entraîne une diminution notable de la valeur du couple.

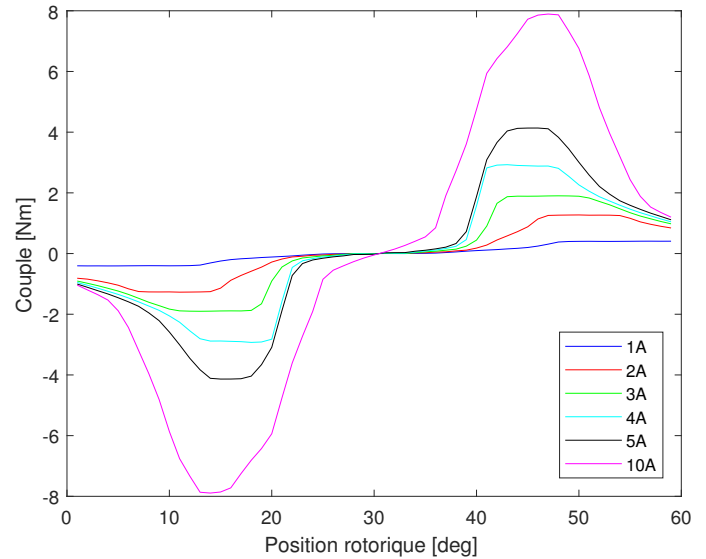


Fig. 14. Réseau du couple à différents niveaux de courant

5. ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA MRVFA

Les résultats de l'étude comparant la MRVFR et la MRVFA à surfaces actives équivalentes montrent un avantage significatif pour la MRVFA se traduisant par une amélioration de la valeur du couple électromagnétique tout en réduisant le volume total de la machine.

5.1. Définition d'un plan d'expériences

Pour mieux cerner le comportement de la MRVFA et pouvoir en déduire des tendances, nous avons choisi d'étudier l'effet de certains paramètres géométriques sur les performances de la MRVFA à l'aide d'un plan d'expériences. Ainsi, une matrice d'essais (simulations dans notre cas) est définie à partir d'un nombre de facteurs à étudier et les niveaux où les valeurs qui leur sont attribués. Les facteurs dont on étudie l'influence sont les suivants :

- Ouverture des dents statoriques θ_s^A
- Ouverture des dents rotoriques θ_r^A
- Rayon externe de la dent rotorique $R_{r,ext}^A$

Le tableau 4 résume les essais à réaliser pour étudier ces trois facteurs à raison de deux niveaux par facteur.

Tableau 4. Matrice d'essais à réaliser

Essai	θ_s^A	θ_r^A	$R_{r,ext}^A$
1	19.92°-2°	19.975°-2°	59 mm
2	19.92°	19.975°-2°	59 mm
3	19.92°-2°	19.975°+2°	59 mm
4	19.92	19.975°+2°	59 mm
5	19.92°-2°	19.975°-2°	59 mm + 3 %
6	19.92	19.975°-2°	59 mm + 3 %
7	19.92°-2°	19.975°+2°	59 mm + 3 %
8	19.92	19.975°+2°	59 mm + 3 %

5.2. Résultats et analyse

Les simulations ont été réalisées pour 3 courants différents : 1A, 3A et 5A. Les allures d'inductances présentent les mêmes tendances aux 3 niveaux de courants considérés, nous avons donc choisi ici d'analyser les résultats des simulations réalisées à 5A et présentées à la figure 15 :

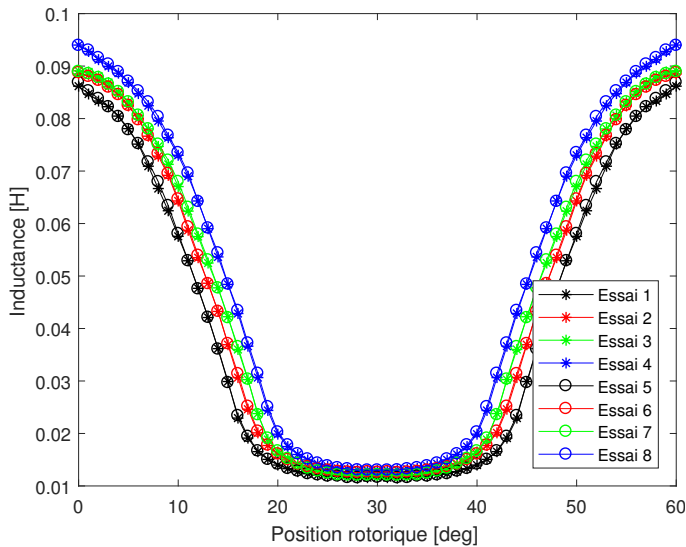


Fig. 15. Allures des inductances de tous les essais à 5 A

On remarque que les courbes de même couleur (même ouverture de dent statorique et rotorique et un rayon externe rotorique $R_{r,ext}^A$ qui change) se superposent. Ce résultat traduit le fait que le facteur $R_{r,ext}^A$ n'a pas réellement d'influence sur l'inductance de la machine en comparaison avec les deux autres facteurs.

Par conséquent, nous analyserons les inductances issues des 4 premiers essais (tableau 4) qui seront comparés aux résultats de la configuration de référence (tableau 2), à un courant identique (5A). En exploitant la symétrie, les inductances entre 30 et 60 degrés sont présentées à la figure 16.

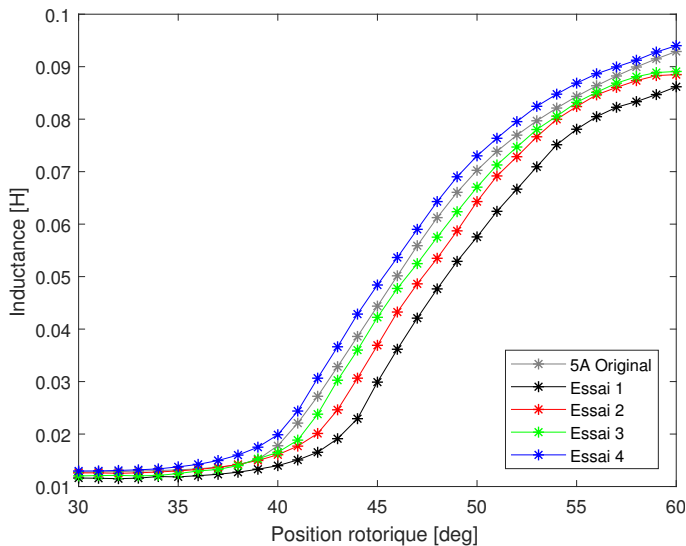


Fig. 16. Comparaison des inductances avec la configuration de référence à 5 A

Cette dernière montre que les essais 3 et 4 caractérisés par les angles d'ouvertures rotoriques les plus larges (21.975°) conduisent à des pentes plus raides comparées aux essais 1 et 2 pour lesquelles $\theta_r^A = 17.975^\circ$. La pente est la plus raide et la valeur en position de jonction est la plus élevée dans le cas de l'essai 4 qui correspond à la configuration aux ouvertures de dents rotorique et statorique les plus larges.

Les courbes de couples déduites des inductances sont présentées à la figure 17.

On constate une diminution de la valeur maximum du couple de respectivement 12.5%, 5% et 2.5% pour les essais 1, 2 et

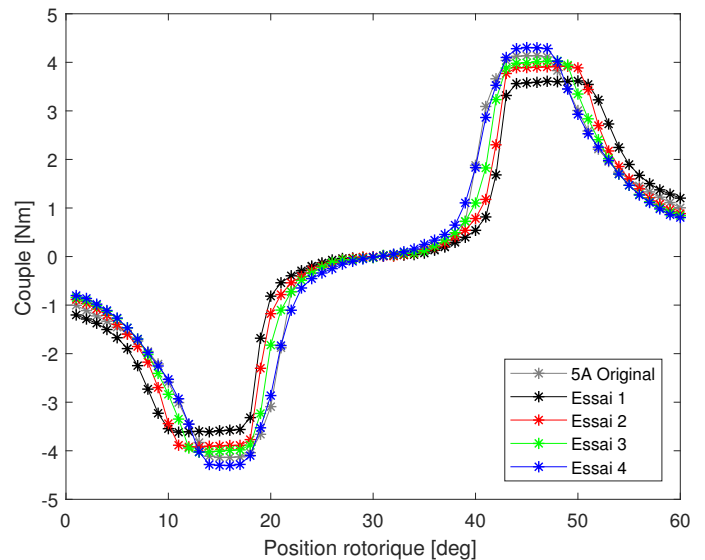


Fig. 17. Comparaison des couples avec la configuration de référence à 5 A

3 par rapport à la configuration de référence présentée dans le tableau 2. Néanmoins, on obtient une amélioration de 4% pour la configuration 4 présentant les angles d'ouvertures de dents statoriques et rotoriques les plus larges.

6. CONCLUSION

La comparaison d'une MRVFR et d'une MRVFA à iso-surfaces de dents conduit à mettre en évidence un double avantage se traduisant par un gain en compacité et en couple électromagnétique pour la MRVFA. D'abord un dimensionnement à surfaces actives équivalentes à partir d'une MRVFR 8/6 existante a permis de comparer les allures des inductances et par conséquent, des couples. Une analyse plus détaillée de la MRVFA a été réalisée grâce à un plan d'expériences; il a permis de conclure sur l'influence de certains paramètres comme les ouvertures de dents sur les performances de la MRVFA. On a également pu mettre en évidence que l'avantage de la MRVFA croît lorsque le courant augmente. On pourra donc, dans un travail futur, analyser l'intérêt d'équiper la machine de bobines hautes températures pour augmenter les densités de courants et, donc, les performances.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre du Contrat Plan Etat Région CE2I (Convertisseur d'Energie Intégré Intelligent). CE2I est cofinancé par des fonds FEDER, par le Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et par la Région Hauts-de-France.

8. RÉFÉRENCES

- [1] Y. Ohdachi, Y. Kawase, Y. Miura et Y. Hayashi « Optimum design of switched reluctance motors using dynamic finite element analysis », in IEEE Trans. Magn., vol. 33, no. 2, p. 2033–2036, 1997.
- [2] C. M. Stephens, « Fault detection and management system for fault-tolerant switched reluctance motor drives », in IEEE Transactions on Industry Applications, 27(6), p. 1098-1102, 1991.
- [3] T.J.E. Miller, « Optimal design of switched reluctance motors », in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, p. 15-27, 2002.
- [4] R. Madhavan et B.G. Fernandes, H. Goto et O. Ichinokura, « Axial flux segmented SRM with a higher number of rotor segments for electric vehicles », in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 28, p. 203-213, Mars 2013.
- [5] J.F. Tsai et T.P. Chen, « Design and Performance Analysis of an Axial-Flux Disk-Type Switched Reluctance Motor for Hybrid Scooters », in JSME Int.

J. Ser. C, vol. 49, p. 882-889, 2006.

- [6] S. Murakami, H. Goto et O. Ichinokura, « A study about optimum stator pole design of axial-gap switched reluctance motor», in International Conference on Electrical Machines (ICEM), p. 975-980, 2014.
- [7] R. Madhavan et B. G. Fernandes, « Comparative analysis of axial flux SRM topologies for electric vehicle application», in International Conference on Power Electron. Drives Energy Syst., p. 1-6, 2012.
- [8] R. Krishnan, M. Abouzeid et X. Mang, « A design procedure for axial field switched reluctance motors», Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of 1990, 241-246, 1990.
- [9] A. Labak, S. Member, N. C. Kar, et S. Member, « Design and Prototyping a Novel 5-Phase Pancake Shaped Axial Flux SRM for Electric Vehicle Application through Dynamic FEA Incorporating Flux-Tube Modeling», vol. 49, p. 1276-1288, 2013.
- [10] S. Dadpour et K. Ansari, « The effect of non-uniform air gap on the noise in switched reluctance motors», in Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering, vol. 37, p. 183-191, 2013.
- [11] T. Shibamoto, K. Nakamura, H. Goto et O. Ichinokura, « A design of axial-gap switched reluctance motor for in-wheel direct-drive EV », in XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM 2012), Marseille, France, Septembre 2012, p. 1160-1165.
- [12] M.H. Belhadi, G. Krebs, C. Marchand, H. Hannoun et X. Mininger « Evaluation of axial SRM for electric vehicle application », in Electric Power Systems Research, 2017, vol. 148, p. 155-161.
- [13] P Andrada, E. Martínez, M. Torrent et B. Blanqué, « Electromagnetic evaluation of an in-wheel double rotor axial-flux switched reluctance motor for electric traction.», in Renewable Energy and Power Quality Journal (RE and PQJ), vol.1, p. 8-12, 2017.
- [14] H. Arihara et K. Akatsu, « Characteristics of axial type switched reluctance motor», in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), p. 3582-3589, 2011.
- [15] S. Djebbari, J. Charpentier, F. Scuiller, M. Benbouzid et S. Guemard, « Rough design of a double-stator axial flux permanent magnet generator for a rim-driven marine current turbine», in ISIE Journal of Industrial Electronics, p. 1450-1455, 2012.
- [16] S. Smaka « Fast Analytical Model for Switched Reluctance Machines», in IEEJ Journal of Industry Applications, vol.4, p. 352-359, 2015.