

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

M'Hamed BELHADI<sup>1,2</sup>, Guillaume KREBS<sup>1</sup>, Claude MARCHAND<sup>1</sup>, Hala HANNOUN<sup>2</sup> and Xavier MININGER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: 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 F-91192 Gif-sur-Yvette CEDEX

<sup>2</sup>: Renault, 1 avenue du Golf, 78288 Guyancourt, France

mhbelhadi@yahoo.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. Les premiers sont à l'origine d'une nuisance sonore et les secondes dégradent le confort des usagers. Une démarche a été mise en place afin d'étudier ces modifications dans les régimes statique et dynamique (en fonctionnement) ce qui a permis de dresser un bilan comparatif.

**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, un fonctionnement possible à haute température et haute vitesse, une tolérance aux défauts... 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]. Ces dernières peuvent introduire des vibrations qui se propagent tout le long de la chaîne cinématique du VE dégradant ainsi le confort des usagers. Des solutions à ces problèmes doivent donc être proposées dans le but d'une industrialisation et commercialisation à grande échelle. 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, la compensation et la conception. Dans notre travail, nous nous intéressons à la dernière approche. Plusieurs modifications de structure sont alors proposées dans le but d'évaluer leurs impacts simultanément sur ces deux problèmes tout en considérant les régimes statique et dynamique (en fonctionnement) sur toute la plage de variation de la vitesse.

## 2. DÉMARCHE DE L'ÉTUDE

Plusieurs modifications géométriques d'une MRV sont proposées dans cette étude (Fig 1). Une analyse est alors

consacrée aux caractéristiques de chacune des géométries en la comparant à une MRV de référence (MRV\_orig) en régime statique comme en fonctionnement. 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. Ensuite, nous considérerons les courbes enveloppes (couple moyen maximum pour chaque vitesse) ce qui permettra de travailler sur une large plage de vitesse et de proposer l'optimisation des paramètres de commande. Par ailleurs, le cahier de charges contient une contrainte sur l'environnement externe de la MRV qu'il ne faut pas modifier par rapport à la MRV\_orig. Afin de le respecter, plusieurs caractéristiques sont identiques à celles de la MRV\_orig, à savoir : le volume global, la typologie, le nombre de spires, le facteur de remplissage, le courant maximum et la tension maximale.

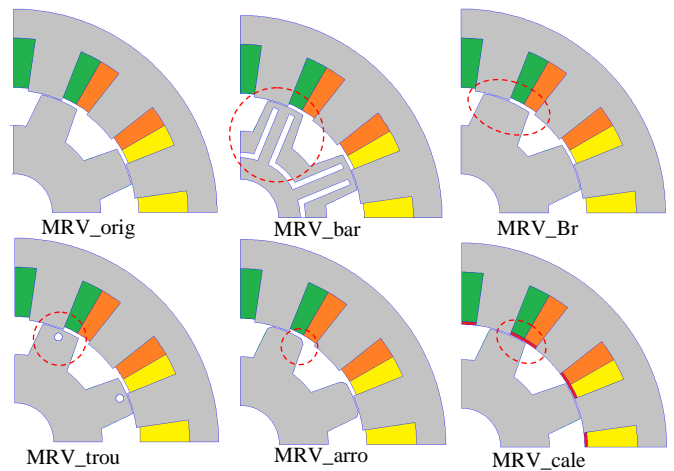


Fig 1 Structures proposées

## 3. LA MRV DE RÉFÉRENCE "MRV\_ORIG"

La MRV de référence 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.

## 4. STRUCTURES PROPOSÉES

Dans cette première partie, les différentes structures étudiées sont présentées (Fig 1). Le choix des caractéristiques et des dimensions de chaque structure est effectué à l'aide

d'études paramétriques qui seront détaillées dans le papier étendu.

#### 4.1. MRV avec barrières de flux "MRV\_bar"

La MRV\_bar doit permettre la réduction des ondulations de couple [3]. 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.

#### 4.2. MRV avec augmentation de $B_r$ "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  $B_r$ ) afin d'accroître le couple en position d'opposition. Il s'agit donc de considérer une MRV\_Br dont l'ouverture  $B_r$  est fortement supérieure à celle de la MRV\_orig.

#### 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 est de forme circulaire, proche de l'entrefer et la valeur choisie pour le rayon vaut 4 fois la longueur de cet entrefer.

#### 4.4. MRV avec dents rotoriques arrondies "MRV\_arro"

C'est une MRV dont les dents rotoriques sont arrondies. L'objectif principal d'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.

#### 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. Le but est de réduire la force radiale et les ondulations du couple.

### 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). À titre illustratif, la figure 2 montre l'exemple de la MRV\_bar confrontée à la MRV de référence. Sur toute la courbe enveloppe, le couple moyen, la force radiale moyenne et les ondulations du couple sont calculées. La figure 2 montre alors ces dernières grandeurs sur toute la plage de vitesse envisagée pour l'application de traction électrique.

### 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  $\Delta C$ .

- ☹ : 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.

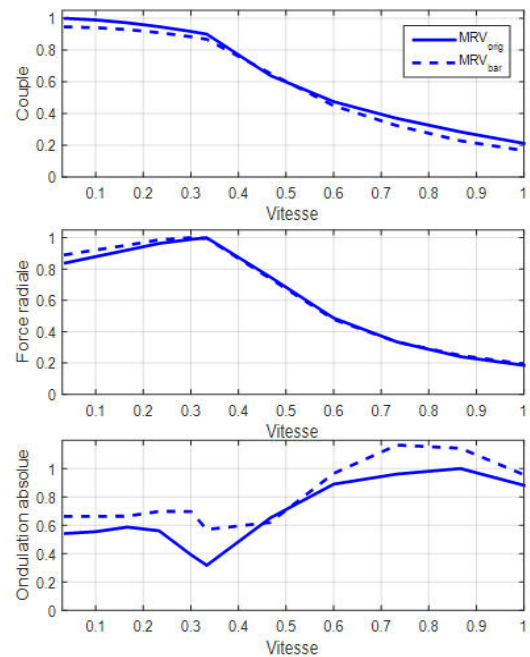


Fig.2 Etude en fonctionnement de la MRV\_bar, (a) couple moyen vs. vitesse, (b) force radiale vs. vitesse (c) ondulation de couple vs. vitesse

		MRV_bar	MRV_Br	MRV_arro	MRV_trou	MRV_cale	
Statique	$C_{moy}'$	☹	☹	☹	☹	☹	
	$F_{rad}'$	😊	☹	😊	😊	😊	
	$\Delta C'$	😊	😊	😊	😊	😊	
Fonctionnement	V. faible	$C_{moy}$	☹	☹	☹	☹	
		$F_{rad}$	😊	☹	☺	😊	😊
		$\Delta C$	☹	☹	☺	☹	😊
	V. haute	$C_{moy}$	☹	☹	☺	☺	☹
		$F_{rad}$	☺	☺	☺	☺	😊
		$\Delta C$	☹	☹	☺	☹	😊

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. Davantage de résultats seront détaillés et discutés dans la version finale.

### 8. REFERENCES

- [1] D. E. Cameron, J. H. Lang, et S. D. Umans, « The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, n° 6, p. 1250-1255, nov. 1992.
- [2] I. Husain, « Minimization of torque ripple in SRM drives », *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 49, n° 1, p. 28-39, 2002.
- [3] J. Hur, G. H. Kang, J. Y. Lee, J. P. Hong, et 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.