



HAL
open science

Dimensionnement optimal de machines synchro-réductantes performantes: rotor assisté ou "Dual Phase materials"?

Leila Nguimpi Langue, Guy Friedrich, Stephane Vivier, Khadija El Kadri
Benkara

► To cite this version:

Leila Nguimpi Langue, Guy Friedrich, Stephane Vivier, Khadija El Kadri Benkara. Dimensionnement optimal de machines synchro-réductantes performantes: rotor assisté ou "Dual Phase materials"?. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361622

HAL Id: hal-01361622

<https://hal.science/hal-01361622>

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.

Dimensionnement optimal de machines synchro-réductantes performantes: rotor assisté ou « Dual Phase materials »?

Leïla NGUIMPI LANGUE, Guy FRIEDRICH, Stéphane VIVIER, Khadija EL KADRI BENKARA

UTC Sorbonne Universités - Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, Rue du Docteur Schweitzer, 60203 Compiègne Cedex, France

RESUME -Cet article propose une méthode de dimensionnement optimal du rotor de machines synchro-réductantes (SR) à barrières de flux dans l'optique d'obtenir une puissance utile maximale par détermination d'une géométrie optimale du rotor ainsi que par le calcul d'une commande optimale associée.

Le dimensionnement des SR à barrières de flux est complexe car il implique un grand nombre de variables tant géométriques (rotor) qu'électriques. Plus particulièrement, le rotor requiert de considérer et d'ajuster de manière optimale plusieurs paramètres indépendants dans le but d'atteindre les meilleures performances possibles.

Les démarches de dimensionnement seront appliquées à 3 types d'architecture du rotor : SR classique (SRC), SR assistée (SRA) et SR à rotor « Dual Phase » (SRDP).

1 Introduction

Les machines synchro-réductantes à barrières de flux connaissent un regain d'intérêt car elles se révèlent être une alternative viable pour des applications de traction, notamment automobile, en remplacement des machines à aimants permanents de type NdFeB.

Le point faible de ce type de machine est constitué essentiellement par les ponts magnétiques (renforts mécaniques, figure 5). Ces zones peuvent représenter des courts-circuits magnétiques venant réduire de manière significative les performances de la machine. Pour y remédier, deux alternatives peuvent être envisagées:

- Utilisation d'aimants de type ferrite afin de saturer rapidement ces ponts magnétiques
- Utilisation pour les ponts magnétiques de matériaux de type "Dual Phase" permettant de réduire localement par un traitement thermique a posteriori la perméabilité relative du matériau.

Cet article propose une méthode de dimensionnement optimal de cette catégorie de machine en vue d'atteindre les meilleures performances possibles. Ce dimensionnement passe d'une part par l'optimisation de la géométrie du rotor, le stator étant imposé, et également par le calcul des lois de commande optimale.

Les performances offertes par ces deux solutions technologiques sont évaluées et comparées.

2 Etat de l'art

L'optimisation d'une machine peut s'articuler autour de 3 points principaux : des topologies de machines innovantes [16], des matériaux plus performants [5, 10] et des méthodologies d'optimisation efficaces [11, 12, 15]; ces aspects pouvant être considérés individuellement ou combinés entre eux.

2.1 Architectures

On dénombre différentes architectures de machines synchro-réductantes. Les principales sont données ci-après.

2.1.1 SR à rotor massif



Figure 1: SR à rotor massif à trous

Cette architecture se veut adaptée aux hautes vitesses de fonctionnement et un refroidissement optimal. En effet son rotor est constitué d'un seul bloc (et non assemblé), lui conférant une très bonne tenue mécanique. Cependant la faiblesse relative du rapport de saillance $\xi = L_d/L_q$ (maximum 4.5 [18]) du rotor et donc l'impossibilité de développer de forts couples la rend mal adaptée à des exigences de traction [7].

2.1.2 SR axialement laminée

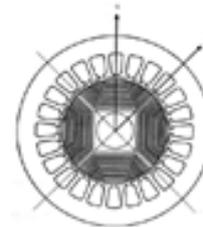


Figure 2: SR axialement laminée

Cette structure présente un meilleur rapport de saillance (pouvant atteindre 20 [18]). Mais du fait de son procédé d'assemblage couteux et complexe, et de la relative faible tenue mécanique qui en découle, elle est limitée aux faibles vitesses (< 5 000 tr/min) [5, 6].

2.1.3 SR à barrières de flux



Figure 3: SR à trois barrières de flux

Les barrières de flux sont un autre moyen d'augmenter le rapport de saillance des SR et constituent un bon compromis entre les architectures précédentes. Son rapport de saillance (pouvant atteindre 12-13 [18]) est certes moins élevé que celui des SR axialement laminés mais cette structure jouit d'une meilleure robustesse mécanique. Et inversement, elle peut s'avérer moins robuste que la SR à rotor massif, mais son rapport de saillance est

2 à 3 fois meilleur. Les SR à trois barrières de flux ont fait l'objet de notre étude [1-4].

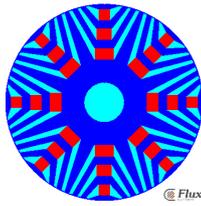


Figure 4: Modèle éléments finis de la SR étudiée

Pour assurer cette tenue mécanique, cette structure nécessite l'ajout de renforts mécaniques [17] qui se comportent comme des courts-circuits magnétiques et viennent donc réduire les performances de la machine.

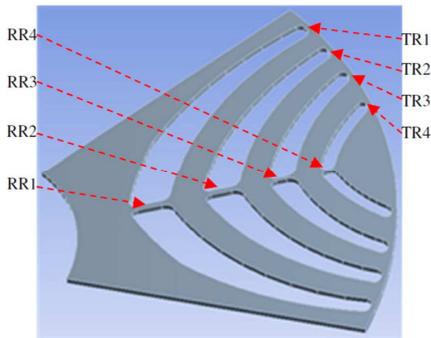


Figure 5: Ponts magnétiques inter barrières (RR1-4) et d'entrefer (TR1-4)

Pour y remédier, 2 solutions sont envisagées : l'ajout d'aimants ou l'utilisation de matériaux Dual Phase.

2.1.3.1 SR assistée (SRA)

Cette opération consiste à garnir les barrières de flux d'aimants permanents ferrites orientés suivant l'axe q d'une part afin d'accélérer la saturation des ponts magnétiques et d'autre part de diminuer la valeur de L_q tout en conservant celle de L_d [18].

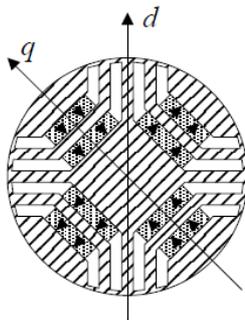


Figure 6: SR assistée, axes d et q représentés

2.1.3.2 SR « Dual Phase » (SRDP)

Le matériau « Dual Phase », encore en phase de développement au sein de General Electric™, permettrait localement de modifier ses propriétés magnétiques sans avoir à enlever physiquement de la matière. Ainsi il serait possible de maintenir les propriétés mécaniques du rotor avec des

caractéristiques magnétiques locales se rapprochant de celles de l'air [10].

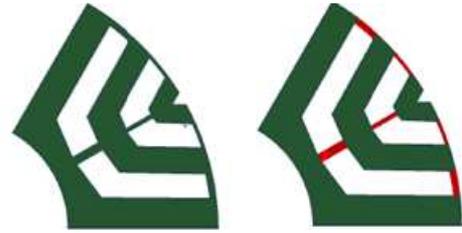


Figure 7: Zone en vert magnétique, zone en rouge amagnétique

2.2 Méthodes de dimensionnement

Un certain nombre de travaux ont proposé des méthodologies de paramétrisation et d'optimisation de la géométrie du rotor, basées sur des modèles analytiques et/ou éléments finis (réseaux de réductance, tenseur de Maxwell, travaux virtuels) [11-15]. Quant à la commande optimale nous nous sommes inspirés des travaux de L. Chédot [8].

3 Optimisation proposée

L'indicateur par excellence des performances d'une machine électrique est le couple développé. Celui-ci s'exprime de la manière suivante :

$$C_{em} = f(\xi, (I_{eff}, \beta), \psi_f)$$

Il est décomposable en trois parties :

- Un terme de saillance ξ qui dépend majoritairement de la géométrie de la machine
- Un terme de commande (I_{eff}, β) (figure 8)
- Eventuellement un terme d'interaction entre flux statorique et flux d'excitation rotorique ψ_f (nul si rotor passif) (figure 8)

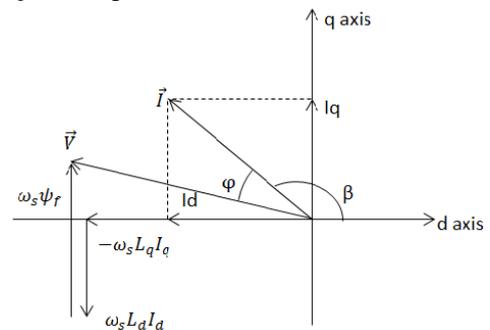


Figure 8: Diagramme vectoriel d'une SR

La méthode utilisée pour l'optimisation de la SR à barrière de flux s'articule donc autour de 3 axes :

- Paramétrisation et optimisation par éléments finis de l'architecture du rotor, sur un point de fonctionnement et à commande fixe : optimisation de ξ
- Optimisation de la commande, pour une géométrie fixée de machine : optimisation du couple (I_{eff}, β)
- Tracé des cartographies de performances sur toute la plage de vitesse dans le cadre d'une commande optimale non linéaire

3.1 Optimisation de la géométrie

3.1.1 Choix issus du pré dimensionnement

Certains paramètres géométriques ont été fixés au préalable suite à des études préliminaires ou du fait de contraintes technologiques de réalisation et/ou liées à l'application.

Ainsi, au stator, le nombre de pôles et le nombre d'encoches choisis sont issus d'une pré-étude, en faisant le choix de maintenir au maximum 2 encoches par pôle et par phase.

Les dimensions extérieures de la machine ont été imposées par l'application.

Au rotor, le diamètre intérieur a été fixé afin de garantir la résistance mécanique de l'arbre. Les dimensions de ponts magnétiques ont été fixées à leur valeur minimale compte tenu des technologies de fabrication disponibles (une étude est en cours afin de les dimensionner sur des critères de tenue mécanique, comme la résistance à la force centrifuge).

Enfin la hauteur d'entrefer a été fixée à la valeur minimale possiblement réalisable pour une valeur maximale de L_d .

Tableau I : Caractéristiques géométriques principales

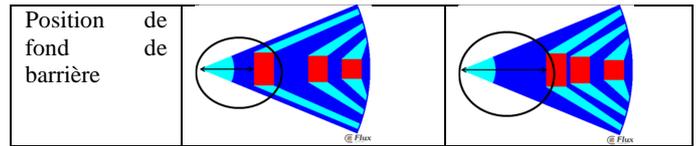
Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de pôles	8	
Nombre d'encoches du stator	48	
Diamètre ext. du stator	144	mm
Diamètre int. du rotor	20	mm
Longueur du paquet de tôles	70	mm
Hauteur d'entrefer	0.3	mm
Pont magnétique d'entrefer	0.3	mm
Pont magnétique inter barrière	0.5	mm
Tension du bus continu Vdc	52	V

3.1.2 Définition du modèle à optimiser

Pour un rotor à 3 barrières de flux, nous avons isolé 5 paramètres pour le design de chaque barrière, soit 15 paramètres indépendants.

Tableau II : Paramètres variables du rotor

Paramètre	Position min	Position max
Angle d'ouverture de fin de barrière		
Largeur de fin de barrière		
Largeur de fond de barrière		
Hauteur de fond de barrière		



La modélisation et l'optimisation de la géométrie sont réalisées avec des outils éléments finis : Flux2D™ et Got-It™ respectivement. Le point de fonctionnement choisi est celui en mode générateur et à vitesse 1650 tr/min. La machine est commandée en courant dont la valeur efficace maximale est fixée à partir de la densité de courant limite dans les conducteurs en continu: 10 A/mm². Cette valeur permet de considérer implicitement les problématiques thermiques.

Compte tenu du fait que seule la géométrie du rotor est modifiée au cours de cette étape, une commande en courant a été au préalable fixée.

Dans le plan d-q on a :

$$i_d = \sqrt{2} * I_{eff} * \cos \beta$$

$$i_q = \sqrt{2} * I_{eff} * \sin \beta$$

Pour ce faire, toujours avec un modèle éléments finis et en magnétostatique, la courbe du couple en fonction de l'angle de charge β a été calculée sur la base de la géométrie initiale de la machine et la valeur retenue est celle pour laquelle le couple maximal est atteint dans le respect de la limite en tension.

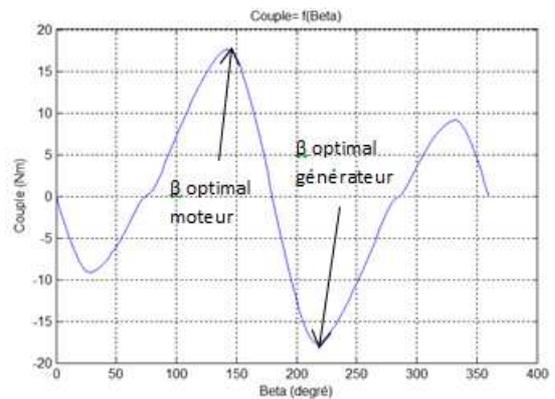


Figure 9 : Couple en fonction de l'angle de charge β

Cette méthodologie repose sur 2 hypothèses clés :

- Pour le point de fonctionnement choisi, 1650 tr/min, les signaux électriques ont une période approximative de 10 ms. Le système peut alors être considéré comme quasi statique, légitimant ainsi l'utilisation de la courbe de la figure 9.
- D'autre part, à cette même vitesse, la tension générée aux bornes de la machine reste inférieure à la tension limite V_{max} (V_{max} étant une tension liée à celle du bus continu provenant de la batterie). Ainsi, étant donné que ce point de fonctionnement se situe hors de la zone de défluxage, la commande n'est donc que faiblement liée à la géométrie de la machine, raison pour laquelle ces deux entités peuvent être traitées séparément.

Pour résumer, le problème d'optimisation utilise les points suivants :

- Fonction objectif : $f_{goptim} = \max(P_{utile})$

En mode générateur, P_{utile} représente la puissance électrique générée.

- Contraintes en tension: $g_v = V_{\text{eff}} - V_{\text{max}} < 0$

V_{max} étant une tension liée à celle du bus continu

- Contraintes en courant gérées par l'alimentation imposée.

Les calculs sont menés par un algorithme d'évolution différentielle, de la famille des optimiseurs stochastiques.

3.2 Commande optimale

Une fois l'architecture du rotor optimisée et la géométrie figée, les lois de commande optimale en courant sont calculées. Cette étape nous permet ensuite de tracer les cartographies de performances de la machine dans l'espace couple (ou puissance)-vitesse.

L'optimisation de la commande est basée sur une approche hybride. Les flux sont calculés par éléments finis et les autres grandeurs déduites grâce aux équations des machines synchrones dans le repère de Park. Pour établir ces équations, on considère une répartition spatiale sinusoïdale de la force magnétomotrice [19, 20]. L'algorithme d'optimisation, du type SQP, vise à minimiser les pertes pour chaque point de fonctionnement.

3.2.1 Equations de la machine synchrone

Les équations analytiques régissant le fonctionnement des machines synchrones et établies dans le repère de Park (plan d-q) sont les suivantes :

Courant efficace :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{i_d^2 + i_q^2}{2}}$$

Equations de flux :

$$\psi_d = f(i_d, i_q)$$

$$\psi_q = f(i_d, i_q)$$

Tension efficace :

$$v_d = R_s * i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e * \psi_q$$

$$v_q = R_s * i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e * \psi_d$$

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{v_d^2 + v_q^2}{2}}$$

R_s est la résistance électrique de phase de la machine. Cette résistance est estimée de manière classique à partir de la longueur et de la section des conducteurs.

Couple :

$$C_{em} = \frac{3}{2} * p * (\psi_{dm} * i_q - \psi_{qm} * i_d)$$

Puissances :

$$P_{\text{mec}} = C_{em} * \Omega$$

$$P_{\text{elec}} = \frac{3}{2} * (v_d * i_d + v_q * i_q)$$

Pertes Joules :

$$P_J = 3 * R_s * I_{\text{eff}}^2$$

Pertes fer :

$$P_{\text{fer}} = k_{\text{foi}} * (k_h * (f * B_M^2) + k_f * (f * B_M)^2 + k_e * (f * B_M)^{3/2})$$

Il s'agit d'une formulation des pertes fer par la méthode de Bertotti. L'induction maximale B_M est calculée à l'aide du modèle éléments finis et k_{foi} correspond au coefficient de foisonnement de l'empilement de tôles.

Les inconnues restantes sont les équations de flux qui seront déterminées par éléments finis. Un calcul paramétrique sur les courants direct et en quadrature est mené, à la suite de quoi les surfaces de réponses des flux sont tracées en fonction de ces 2 composantes. Ainsi avec un outil d'interpolation adapté, il est maintenant possible de déterminer les valeurs des flux quel que soit le courant d'alimentation (figure 10).

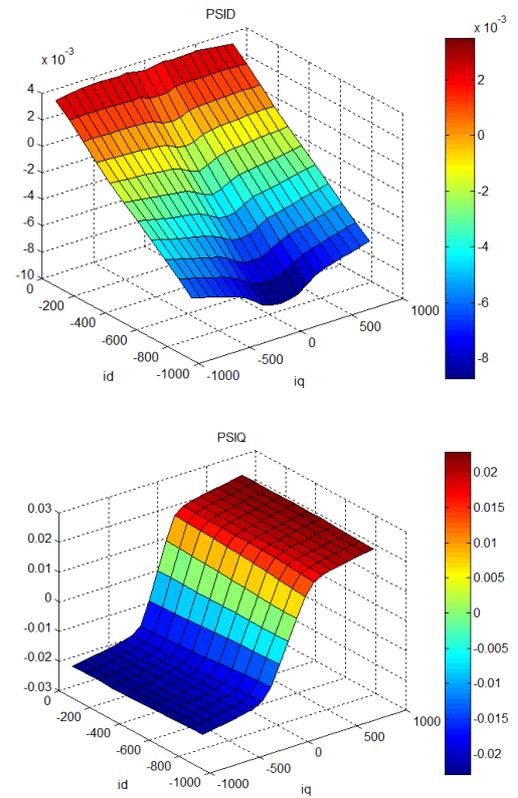


Figure 10: Cartographie des flux dans les axes d et q en fonction des courants

Notons que grâce à cette approche, la saturation magnétique est prise en compte dans les calculs. Cependant, l'inductance de fuite des têtes de bobines reste indéterminée et ne sera donc pas prise en compte lors de l'optimisation.

3.2.2 Algorithme d'optimisation de la commande

La commande optimale vise à fournir à la machine les meilleures consignes de courant afin d'atteindre les performances souhaitées, dans le respect des limites physiques du système. Il existe plusieurs possibilités permettant de répondre à ces objectifs

et contraintes, mais dans une logique optimale, nous choisissons de minimiser les pertes (pertes Joule et pertes fer).

Les calculs sont effectués grâce à la toolbox d'optimisation de Matlab™, plus particulièrement avec la fonction « fmincon » qui offre la possibilité de réaliser une optimisation sous contraintes de fonctions non linéaires à plusieurs variables.

Pour résumer, le problème de recherche de commande optimale utilise les points suivants :

- Fonction objectif : $f_{optim} = \min(P_J + P_{fer})$
- Contrainte de couple : Le couple calculé doit être égal à la consigne

$$g_c = |C_{em} - C^*| - \varepsilon |C^*| < 0$$

L'égalité parfaite étant numériquement impossible, la quantité ε est introduite afin de définir une précision relative ($\varepsilon = 10^{-2}$).

- Contrainte en courant : $g_i = I_{eff} - I_{lim} < 0$
- Contrainte en tension : $g_v = V_{eff} - V_{max} < 0$
- Contrainte en puissance : la puissance électrique doit être inférieure à la puissance maximale que peut délivrer la batterie

$$g_p = P_{elec} - P_{batteriemax} < 0$$

La figure 11 présente le schéma de l'algorithme de détermination de la commande optimale.

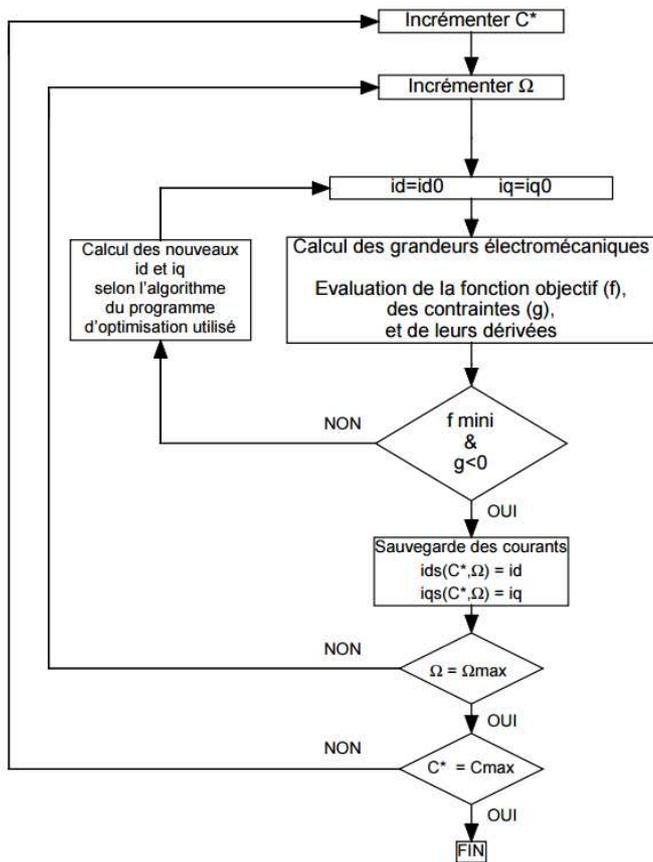


Figure 11: Algorithme de détermination de la commande optimale

4 Résultats

Les figures 12-14 représentent les géométries optimisées pour les 3 types de rotor.

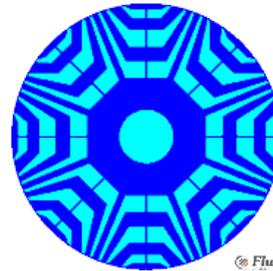


Figure 12: SR classique optimisée

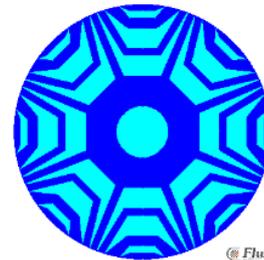


Figure 13: SR "Dual Phase" optimisée

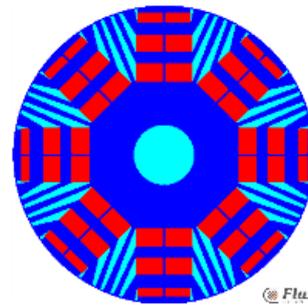


Figure 14: SR assistée optimisée

Après optimisation de la géométrie, on obtient des valeurs de rapport de saillance ($\xi = \frac{L_d}{L_q}$, L_d et L_q sont déterminées comme décrit dans [21]) synthétisées dans le tableau III

Tableau III : Rapport de saillance

	SRC	SRDP	SRA
Etat non saturé	4.4	6.7	15.0
Etat saturé	3.1	3.9	4.0

Les courants i_d et i_q de la commande optimale conduisent à des valeurs de β comprises entre 90° - 180° en mode moteur et 180° - 270° en générateur ; i_d toujours négatif et i_q change de signe en fonction du quadrant considéré. Ces valeurs d'angle sont en accord avec la courbe de la figure 9 de couple en fonction de β calculée en amont de l'optimisation de la géométrie.

5 Interprétation des résultats

Les cartographies représentent le rendement et le facteur de puissance, tracées dans le plan puissance – vitesse. Ces performances correspondent à un régime de fonctionnement en continu.

- Couples utiles**

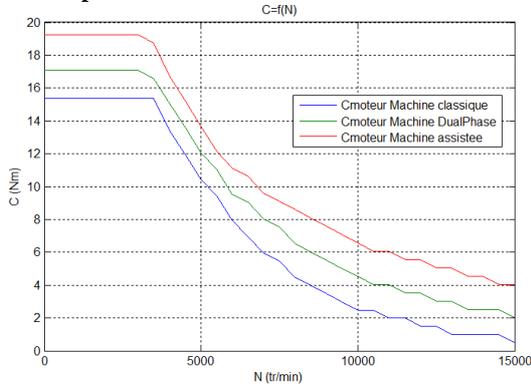


Figure 15: Comparaison des courbes couple-vitesse des 3 machines étudiées

- Puissances utiles**

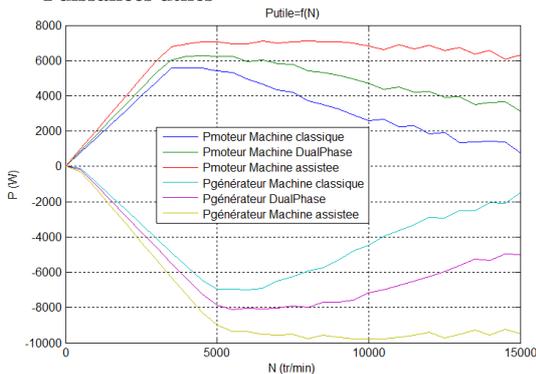


Figure 16: Comparaison des puissances des 3 machines étudiées

- Cartographies de rendement**

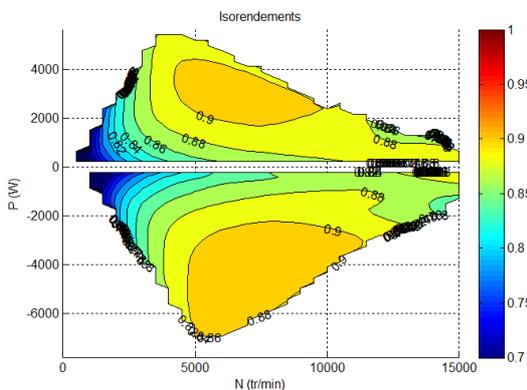


Figure 17: Rendement SR classique

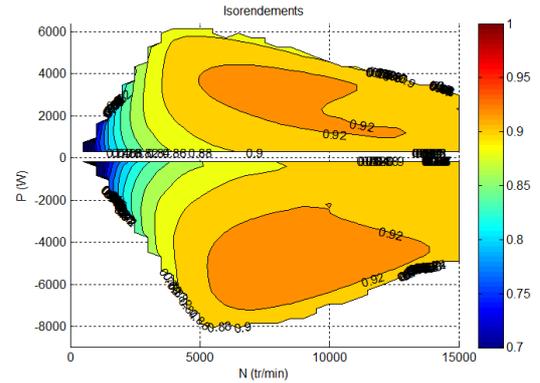


Figure 18: Rendement SR "Dual Phase"

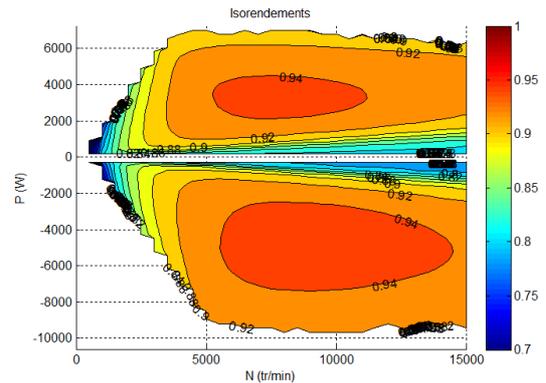


Figure 19: Rendement SR assistée

Les figures 15 et 16 des couples et puissances mettent en évidence le gain de performances possible avec les différentes solutions envisagées afin de pallier les défauts naturels de la SR classique. D'autre part les cartographies de rendement (figures 17-19) soulignent le fait que globalement ces machines synchro-réductantes présentent un bon rendement, et le facteur de puissance (figures 20-22) qui reste faible en ce qui concerne la SR classique est amélioré avec le matériau « Dual Phase » et davantage encore avec l'assistance de ferrites.

- Cartographies de facteur de puissance**

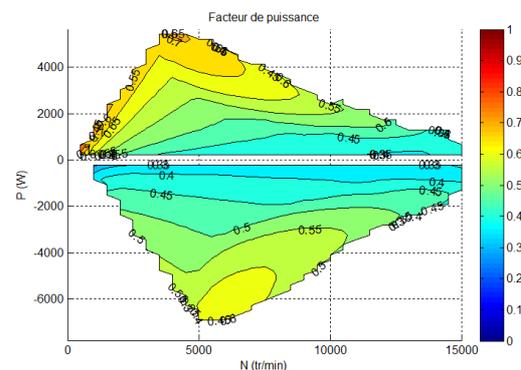


Figure 20: Facteur de puissance SR classique

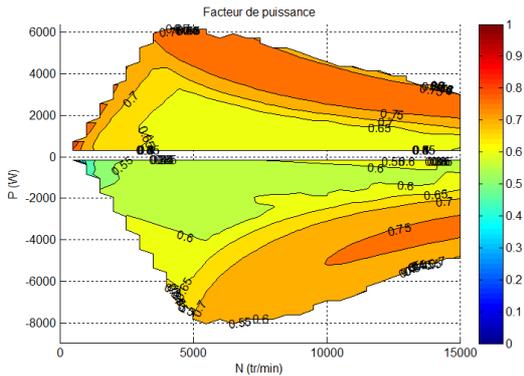


Figure 21: Facteur de puissance SR "Dual Phase"

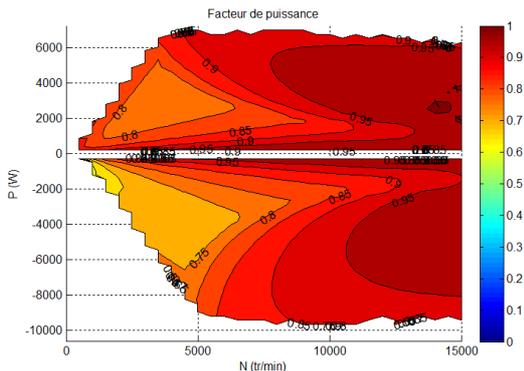


Figure 22: Facteur de puissance SR assistée

6 Conclusion

Cet article a présenté une approche numérique de dimensionnement de machines synchro-réductantes à barrières de flux. Cette étude a permis d'obtenir des modèles électromagnétiques de machines dont les performances se rapprochent des exigences de traction. Cette approche est majoritairement basée sur des calculs éléments finis garantissant une bonne précision des résultats et ce même pour des configurations fortement non linéaires (régimes saturés).

Trois types de machines ont fait l'objet de l'analyse et pour ces trois machines, la même méthodologie de dimensionnement a été appliquée :

- Optimisation de la géométrie à commande figée par un algorithme stochastique.
- Détermination d'une commande optimale non linéaire pour la géométrie optimisée, basée sur un modèle éléments finis pour le calcul des flux et un algorithme d'optimisation de type SQP.

Une amélioration significative des performances peut ainsi être atteinte par rapport à une SR classique par utilisation la technologie « Dual Phase » ou en assistant le rotor d'aimants de type ferrite.

Pour des applications de traction, la SR assistée apparaît être le meilleur choix compte tenu du fait qu'elle présente les meilleures performances parmi les 3 structures et en particulier en ce qui concerne le facteur de puissance.

7 Références

- [1] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Diego Bon, and Michele Dai Pre. Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(3):921_928, 2009.
- [2] Massimo Barcaro and Nicola Bianchi. Interior PM machines using Ferrite to substitute rare-earth surface PM machines. *Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, IECM 2012*, 50(2):1339_1345, 2012.
- [3] Marco Ferrari, Nicola Bianchi, Alberto Doria, and Emanuele Fornasiero. Design of synchronous reluctance motor for hybrid electric vehicles. In *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, volume 9994, pages 1058_1065. IEEE, may 2013.
- [4] Nicola Bianchi, Emanuele Fornasiero, Marco Ferrari, and Mose Castiello. Experimental comparison of PM assisted synchronous reluctance motors. In *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, volume 9994, pages 4499_4506. IEEE, sep 2014.
- [5] S.E.Wood D.A.Staton, T.J.E.Miller. Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor .pdf. *Electric power Applications*, 140(4):249_259, 1993.
- [6] S. A. Nasar I. Boldea, Z. X. Fu. Performance Evaluation of Axially-Laminated Anisotropic (ALA) Rotor Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(4):7785_7796, July/August 1994.
- [7] M. El Hadi Zaim. High-Speed Solid Rotor Synchronous Reluctance Machine Design and Optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3):1796_1799, 2009.
- [8] L. Chedot and G. Friedrich. Comparisons of direct and adaptive optimal controls for interior permanent magnet synchronous integrated starter generator. In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.*, volume 1, pages 183_187. inc, IEEE, June 2003.
- [9] Akira Chiba, Kyohei Kiyota, Nobukazu Hoshi, Masatsugu Takemoto, and Satoshi Ogasawara. Development of a Rare-Earth-Free SR Motor With High Torque Density for Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(99):175_182, 2015.
- [10] Steven Galioto James P. Alexander Patel Bhageerath Reddy, Ayman El-Refaea. Design of Synchronous Reluctance Motor Utilizing Dual-Phase Material for Traction Applications. *IEEE:4812_4819*, 2015.
- [11] Vagati, a., Boazzo, B., Guglielmi, P., & Pellegrino, G. (2012). Ferrite assisted synchronous reluctance machines: A general approach. *Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, IECM 2012*, 1315-1321. <http://doi.org/10.1109/ICEIMach.2012.6350047>
- [12] F. Cupertino, G. M. Pellegrino, E. Armando, and C. Gerada. A SyR and IPM machine design methodology assisted by optimization algorithms. *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012*, inc(inc):3686_3691, 2012.
- [13] Imamura, K., Sanada, M., Morimoto, S., & Inoue, Y. (2013). Improvement of characteristics by flux barrier shape and magnet thickness of IPMSM with Dy-free rare-earth magnet. *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2013*.
- [14] Moghaddam, R. R., Magnussen, F., & Sadarangani, C. (2012). Novel rotor design optimization of Synchronous Reluctance Machine for low torque ripple. *Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, IECM 2012*, 720-724.

- [15] Prieto, D., Fernandez, A., Dessante, P., Vannier, J., Jannot, X., & Saint-Michel, J. (2014). Optimization methodology for synchronous reluctance motor by Finite Element Method. In *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications* (pp. 1–9). IEEE. <http://doi.org/10.1109/EPE.2014.6910891>
- [16] Yamazaki, K., Kato, Y., Ikemi, T., & Ohki, S. (2013). Reduction of rotor losses in multi layer interior permanent magnet synchronous motors by introducing novel topology of rotor flux barriers. *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013*, 50(5), 1220–1226. <http://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6646844>
- [17] Taghavi, S. M., & Pillay, P. (2015). A Mechanically Robust Rotor With Transverse Laminations for a Wide-Speed-Range Synchronous Reluctance Traction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 4404–4414. <http://doi.org/10.1109/TIA.2015.2445819>
- [18] Raminosoa, T. (2006). Optimisation des performances des machines synchro-réductantes par réseaux de perméances (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).
- [19] JM Biedinger, *Machines synchrones, Tome 1_Alimentation à fréquence constante*. UTC, UV_MC02, 1991
- [20] G.Séguier & F. Notelet. *Electrotechnique industrielle*. 2005
- [21] Nicola Bianchi. *Electrical machine analysis using finite elements*. CRC Press, 2005.