



HAL
open science

Comparaison structures de machines synchrones à aimants permanents vis-à-vis des critères compacité- rendement

Hiba Bouker, Lionel Vido, Hamid Ben Ahmed

► **To cite this version:**

Hiba Bouker, Lionel Vido, Hamid Ben Ahmed. Comparaison structures de machines synchrones à aimants permanents vis-à-vis des critères compacité- rendement. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065196

HAL Id: hal-01065196

<https://hal.science/hal-01065196>

Submitted on 18 Sep 2014

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 structures de machines synchrones à aimants permanents vis-à-vis des critères compacité- rendement

H. BOUKER*, L. VIDO**, H. BEN AHMED***

*ENS Cachan – Laboratoire SATIE, Université de Cergy-Pontoise, SATIE ** ENS Rennes – SATIE

RESUME – Dans cet article nous nous proposons de comparer diverses structures classiques de machines synchrones à aimants permanents à même spécifications. Le domaine applicatif est l'automobile pour des machines haute vitesse (vitesse périphérique supérieure à 150 m.s^{-1}). Les structures comparées sont optimisées pour un cahier des charges dans lequel la vitesse de base n'est pas fixée. Nous décrivons sommairement les modèles utilisés, puis la stratégie d'optimisation envisagée. Celle-ci repose sur la recherche d'une vitesse de base qui permet de minimiser les pertes sur la caractéristique maximale en zone de puissance constante. Nous présentons dans ce résumé les résultats d'optimisation pour une structure de machine synchrone à aimants permanents à concentration de flux, les comparaisons seront effectuées dans la version finale de l'article.

MOTS-CLES – machines électriques, haute vitesse, aimants permanents, optimisation bi-objectif, compacité.

1. Introduction

Pour les véhicules hybrides, les constructeurs demandent d'intégrer des machines électriques toujours plus performantes et avec des fonctionnalités nouvelles dans le même encombrement qu'un alternateur. Les puissances mises en jeu pourraient atteindre 15kW voire plus alors que les alterno-démarrateurs actuels ont une puissance maximale de 4kW [1]. Le passage à de nouvelles technologies a permis de doubler la puissance massique de la machine : par exemple, le passage d'un alterno-démarrateur « StARS » associé à une électronique de type pleine onde à un alterno-moteur associé à une électronique de type Modulation de Largeur d'Impulsion. Le quadruplement de la puissance est un but plus difficile à atteindre. Certains constructeurs envisagent même pour des véhicules 4x4 de remplacer une transmission mécanique par un moteur électrique. La place disponible est encore plus réduite et la puissance demandée peut aller jusqu'à 20 kW.

Pour les véhicules électriques, les constructeurs souhaitent récupérer le maximum de place pour l'espace habitacle sans augmenter le volume extérieur du véhicule. D'autre part l'autonomie du véhicule électrique dépend directement de la masse embarquée, le poids du moteur électrique devient non négligeable (Exemple de moteur seul : puissance continue : 30kW poids : 35kg), une réduction de masse pour cette application est bienvenue (problème d'allègement véhicule).

Par ailleurs, le coût des systèmes hybrides est un frein évident à leur introduction. Le prix des matières premières (cuivre, aimants terres rares,...) impacte notamment de manière significative le coût de ces systèmes [2].

L'une des voies empruntée pour accroître la compacité des machines électriques est l'augmentation de la fréquence de conversion [3][4]. Cependant, les machines hautes fréquences, cumulent des difficultés d'ordre électromagnétique, mécanique et thermique [5]. Les matériaux mis en œuvre doivent en effet offrir une bonne résistance aux forces centrifuges, ainsi qu'aux échauffements considérablement augmentés par rapport aux machines conventionnelles. En outre, les fonctionnements générateur sur charge non linéaire non commandée ou commandée ainsi qu'en moteur en vitesse variable ont introduit de nouvelles contraintes notamment celles liées aux pertes harmoniques, au bruit d'origine magnétique et à la capacité de défluxage électrique et/ou électronique de la machine. Ces contraintes ont une incidence directe sur le choix des matériaux magnétiques bien sûr et les modèles correspondants mais aussi sur l'architecture même de la machine et sur la stratégie de son contrôle [6].

Dans ces conditions, le choix de l'architecture de la machine électrique est fondamental. L'objectif de cette étude est de présenter la méthodologie de comparaison de diverses architectures de machine vis-à-vis des critères de compacité et de rendement et d'analyser les résultats obtenus ainsi que les paramètres sensibles à leur dimensionnement optimal.

2. Architectures de machines étudiées

Pour leur qualité intrinsèque de couple massique et de rendement élevés, nous ne nous intéressons qu'aux machines à aimants permanents [7][8][9]. La Figure 1 présente les rotors des architectures étudiées.

Ainsi, 3 types de rotors (aimants en surface, aimants insérés, à concentration de flux) sont considérés. Le stator est à bobinage dentaire.

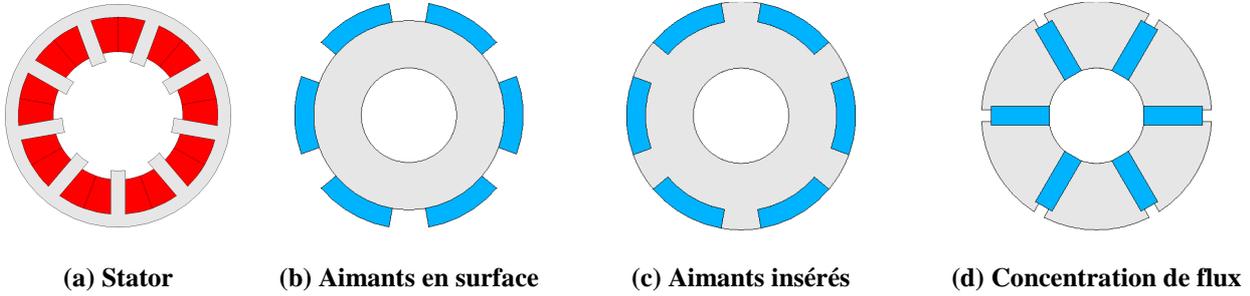


Figure 1 : Architectures de machines étudiées

3. Méthodologie de comparaison

Deux critères de comparaison sont adoptés. Le critère de compacité ainsi que le critère de rendement. Ces deux critères étant fondamentalement contradictoires, une optimisation du dimensionnement bi-objectif est nécessaire.

Par ailleurs, la comparaison s'effectue pour un cahier des charges spécifique néanmoins relativement « ouvert » (Figure 2). Il s'agit de rechercher les géométries optimales des diverses machines maximisant les deux critères précités sous un certain nombre de contraintes et permettant de satisfaire un fonctionnement à puissance constante de valeur imposée (notée P_{\max}) entre une vitesse de base (notée Ω_b) et k_Ω fois cette vitesse de base. La vitesse de base est un paramètre d'optimisation au même titre que le nombre de paires de pôles, la géométrie de la machine et son alimentation.

3.1 Problème d'optimisation bi-objectif

Nous définissons dans ce qui suit les fonctions coût du problème d'optimisation bi-objectif que nous voulons résoudre.

Le critère de compacité consiste ici à minimiser le volume extérieur V_{ext} de la machine considérée.

$$V_{\text{ext}} = 2\pi R_{\text{exts}} L_{\text{ext}}$$

R_{exts} est le rayon extérieur statorique de la machine et L_{ext} sa longueur extérieure (comprenant les têtes de bobine).

Nous choisissons le critère de rendement qui consiste à minimiser les pertes sur la caractéristique maximale en zone de puissance constante P_{\max} . Les pertes p_{\min} obtenues sont définies ci-après.

$$p_{\min}(\Omega_b) = \frac{1}{(k_\Omega - 1)\Omega_b} \int_{\Omega_b}^{k_\Omega \Omega_b} P_t(\Omega) d\Omega$$

Il est essentiel de noter que ces pertes dépendent de la vitesse de base choisie. Ce critère permet donc de déterminer également la vitesse de base qui est celle qui minimise p_{\min} . Ces pertes sont calculées à partir des pertes totales P_t pour chaque vitesse de fonctionnement. Les pertes totales sont la somme des pertes Joule P_j , des pertes fer P_f et des pertes aérodynamiques P_a . Les consignes appliquées à la commande en courant sont calculées afin de minimiser ces pertes en chaque point de fonctionnement (C, Ω) pour une machine donnée.

Nous présentons dans la suite le synoptique d'optimisation (Figure 3) qui comprend donc une boucle d'optimisation bi-objectif externe utilisant un algorithme métaheuristique de type Essaims Particulaire (MOPSO) [10] pour déterminer les dimensions optimales et une boucle d'optimisation interne résolue par une énumération exhaustive pour optimiser la commande, déterminer ainsi les pertes minimales sur la caractéristique de fonctionnement maximale et la vitesse de base correspondante.

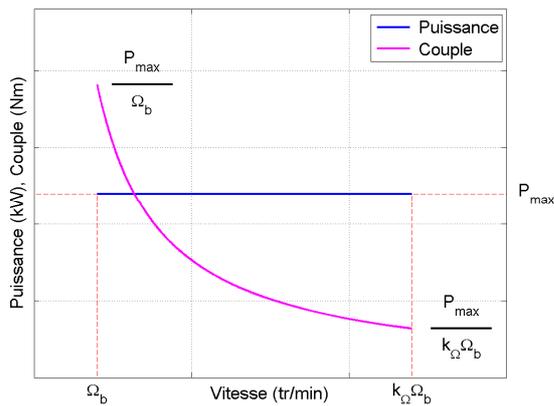


Figure 2. Spécifications mécaniques

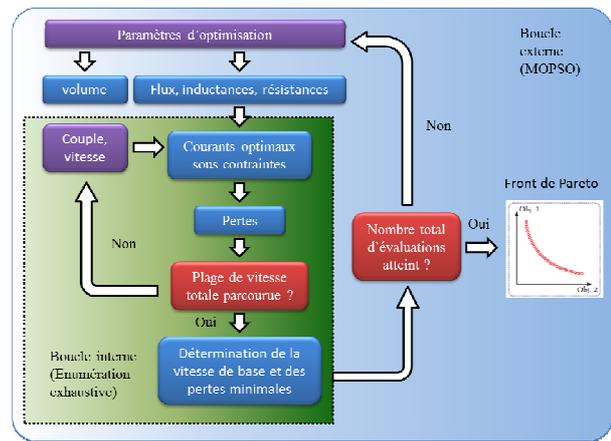


Figure 3. Synoptique d'optimisation

3.2 Modélisation multi-physique

Nous nous bornerons ici à indiquer les hypothèses des modèles que nous avons utilisés. Les modèles sont eux même décrits dans [11] excepté le modèle de pertes aérodynamiques qui est issu de [4]. Dans la version complète, le modèle multi-physique utilisé pour ces analyses comparatives sera détaillé et validé par des approches numériques.

- Modèle magnétique : il s'appuie sur les hypothèses du modèle de Park. Linéaire (perméabilité du fer infinie) mais (avec une butée en induction magnétique) et 1^{er} harmonique
- Modèle thermique : limitation de la densité de courant ;
- Modèle mécanique : limitation de la vitesse périphérique ;
- Modèle de calcul des consignes : modèle de Park avec prise en compte des pertes Joule ;
- Modèle de pertes : les pertes Joule ont une formulation classique ; les pertes fer sont calculées avec le modèle de Steinmetz sous hypothèse d'induction sinusoïdale ; Les pertes aérodynamiques sont déterminés grâce à une formulation empirique pour prendre en compte les écoulements laminaires et turbulents dans le cas de rotor à entrefer lisse (d'un point de vue mécanique).
- Modèle de l'onduleur : modélisation MLI au premier harmonique sans pertes.

4. Résultats et analyses

Nous présentons ici un front de Pareto (volume, pertes) obtenu pour 100 machines après 400 itérations (Figure 4) pour la machine à concentration de flux. Par soucis de clarté, nous n'avons affiché que 21 machines sur ce front (symbolisées par 3 carrés rouges et 18 cercles bleus). Les carrés rouges représentent des machines particulières dont la géométrie a été représentée. La machine dite P est celle qui minimise les pertes (mais qui possède le volume le plus élevé). Les paramètres qui limitent cette machine sont les dimensions extérieures maximales allouées pour le problème posé. A l'autre extrémité, la machine V est la machine qui minimise le volume. La limitation sur la densité de courant (contrainte thermique) la vitesse limite et la plage de vitesse exigée (rapport 6 entre la vitesse de base et la vitesse limite) expliquent principalement les raisons qui empêchent cette machine d'avoir un volume plus faible. Enfin, la machine D est la machine dominante. Elle représente le meilleur compromis entre les deux objectifs. La Figure 5 montre l'évolution des pertes totales en fonction de la vitesse pour les machines P, D et V. La vitesse la plus faible correspond à la vitesse de base choisie pour minimiser les pertes sur la caractéristique maximale à puissance constante. Les pertes Joule sont prépondérantes à basse vitesse (en particulier pour la machine V qui présente de fait un rendement de 75 % à basse vitesse), les pertes fer et aérodynamique (dans une moindre mesure) sont les plus importantes à haute vitesse. Enfin, la Figure 6 représente la caractéristique iso-pertes totales (exprimées en kW) dans le plan couple vitesse pour la machine V. L'hyperbole noire représente l'hyperbole de puissance à P_{max} . La caractéristique est tracée sous contrainte de tension (imposée par le cahier des charges) et de courant maximum (propre à la machine considérée). Pour imposer la puissance maximale sur la plage de vitesse voulue, il est donc nécessaire de surdimensionner.

5. Conclusion

Dans cet article, notre objectif est de présenter une analyse comparative de machines synchrones vis-à-vis du critère de compacité sous contraintes. Les résultats présentés ici ne concernent que la machine synchrone à concentration de flux et nous allons intégrer les résultats associés aux autres machines dans l'article final. Dans l'état actuel, les points importants à retenir sont la méthodologie d'optimisation qui permet de déterminer une vitesse de base sur des critères énergétiques et la comparaison entre machines qui se fera à même cahier des charges.

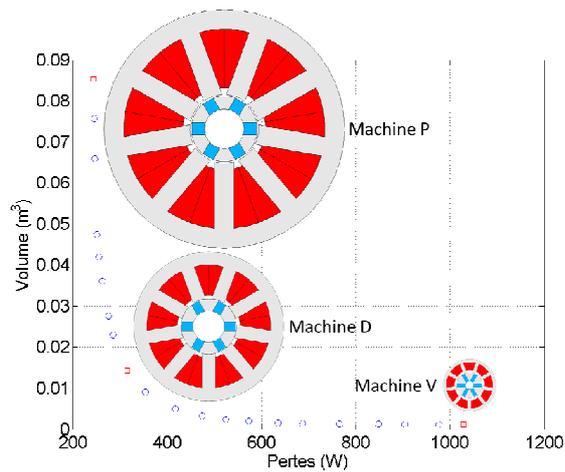


Figure 4. Front de Pareto volume - pertes

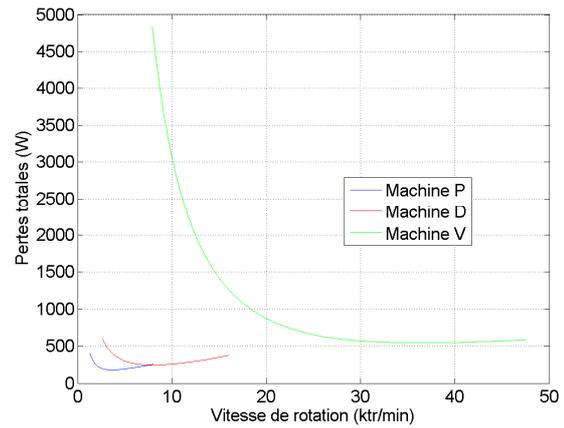


Figure 5. Pertes en fonction de la vitesse de rotation pour trois machines du front

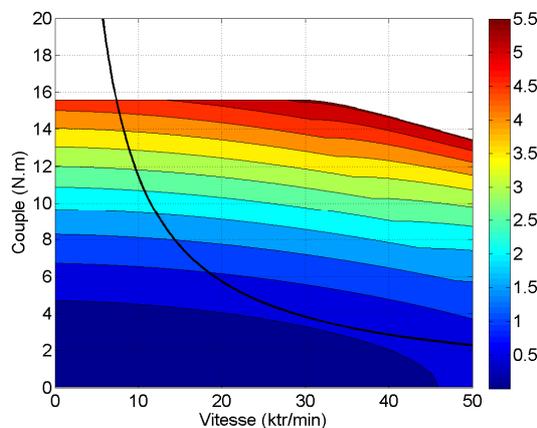


Figure 6. Caractéristique iso-pertes dans le plan couple-vitesse pour la machine V

6. Références

- [1] Projet ANR Transports Terrestres Durables, electro-Mécanique Embarquée à Compacité Améliorée (e-MECA).
- [2] On pourra trouver sur <http://www.metal-pages.com> l'évolution du prix des aimants permanents terres rares.
- [3] X. JANNOT, J.-C. VANNIER, C. MARCHAND, M. GABSI, J. SAINT-MICHEL, D.SADARNAC, Multiphysic Modeling of a High-Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Machine for a Multiobjective Optimal Design, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011.
- [4] M. E. H. ZAIM, H. BEN AHMED, and N. BERNARD, "Machines électriques rapides," in Machines électriques non-conventionnelles, EGEM., Lavoisier, Ed. 2011, pp. 123-193.
- [5] LAMGHARI-JAMAL, "Modélisation magnéto-thermique et optimisation de machines rapides : application à la machine synchrone à réluctance variable," Thèse de doctorat de Université de Nantes, 2006.
- [6] X. JANNOT, "Modélisation et optimisation d'un ensemble convertisseur-machine. Application aux systèmes d'entraînement à haute vitesse," thèse de doctorat de SUPELEC, 2010.
- [7] N. BIANCHI, S. BOLOGNANI, and F. LUISE, "Analysis and design of a PM brushless motor for high-speed operations," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 3, pp. 629-637, 2005.
- [8] ARKKIO, T. JOKINEN, and E. LANTTO, "Induction and permanent-magnet synchronous machines for high-speed applications," Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, vol. 2, pp. 871-876, 2005.
- [9] LOVELACE, T. JAHNS, T. KEIM, and J. LANG, "Mechanical design considerations for conventionally laminated, high-speed, interior PM synchronous machine rotors," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40, no. 3, pp. 806-812, 2004.
- [10] J. AUBRY, "Optimisation du dimensionnement d'une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs. Application au houlogénérateur SEAREV.," thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2011.
- [11] K. TIOUA, "Optimisation/Conception des actionneurs à très forte compacité et haute vitesse pour applications embarquées," Rapport de master recherche Physique et Ingénierie de l'Energie, Cachan, 2012.