

Méthodologie de dimensionnement sur cycle d'une machine synchrone à aimants permanents - Application au stockage inertiel longue durée

BERNARD Nicolas, OLIVIER Jean-Christophe

Laboratoire IREENA, Université de Nantes, 44600 Saint-Nazaire

RESUME – Dans cet article nous allons présenter une méthodologie d'optimisation sur cycle d'une machine synchrone à aimants permanents associée à un éventuel réducteur de vitesse par une approche purement analytique. On s'intéressera en particulier au cas des machines rapides dont on cherchera à minimiser le volume et les pertes sur le cycle. On montrera, qu'à partir d'un profil de couple et de vitesse, il est possible d'exprimer le résultat sous forme analytique. Cette approche, outre un temps de calcul réduit, permet d'établir des lois générales de dimensionnement permettant de choisir objectivement les matériaux, la fréquence de conversion, le rapport de réduction, etc.

MOTS-CLES – MSAP, machines rapides, optimisation sur cycle, stockage électromécanique.

1. Introduction

Avec l'amélioration des performances dans le domaine des matériaux, de l'électronique de puissance et de la commande, le développement des applications utilisant des machines rapides est en constante progression depuis ces dix dernières années. Qu'il s'agisse, de petites (machines outils) ou de moyennes et fortes puissances (véhicules automobiles, stockage inertiel), les applications sont, pour la plupart, définies par des profils de couple et de vitesse variables où l'optimisation ne peut être menée sur un seul point de fonctionnement. De façon classique, ce problème est résolu par l'utilisation d'un outil d'optimisation de type stochastique (algorithme génétique par exemple). Les temps de calculs sont alors très longs et le résultat fourni difficile à interpréter. Certains choix, comme le type de matériaux par exemple (tôles fer-Silicium ou poudre de fer), doivent être alors faits a priori. Nous allons montrer que ce problème peut être traité analytiquement et appliquerons notre méthode au stockage électromécanique d'énergie longue durée pour la propulsion d'un petit navire électrique.

2. Modélisation de la machine

Nous traiterons le cas des machines synchrones à aimants permanents (PMSM) montés en surface (Fig. 1a). Nous utiliserons une modélisation 1-D, suffisamment performante, pour ces machines. Nous considérerons le comportement des matériaux magnétiques linéaires et nous limiterons notre étude au premier harmonique. D'autre part, compte tenu de l'épaisseur relativement importante de l'entrefer, nous négligerons la réaction magnétique de l'induit et les pertes dans les aimants. Ces hypothèses seront justifiées et discutées dans l'article final.

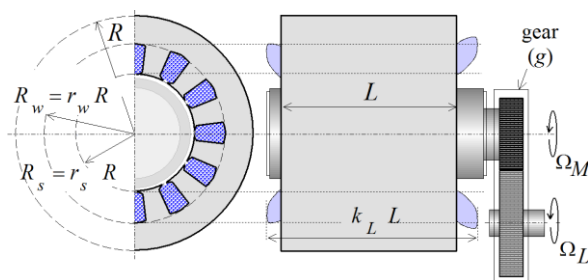


Fig. 1a: géométrie de la machine et variables associées

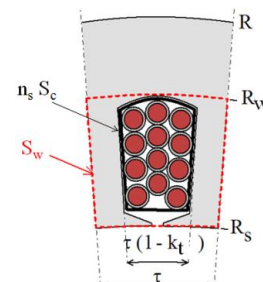


Fig. 1b: géométrie et paramètres d'une encoche

Le modèle utilisé, a été présenté dans [1]. Nous le détaillerons dans l'article final. On montre que la puissance électromagnétique, en fonction de la force magnétomotrice F_{MMs} et de l'induction maximale d'entrefer B_{fm} s'écrit :

$$C_{em}(t) = \frac{12}{\sqrt{2}} R_s L B_{fm} F_{MMs}(t) p \quad (1)$$

Pour les pertes cuivre on obtient :

$$P_c(t) = \frac{144}{\pi} \rho_c \left(\frac{k_L L}{k_f} \right) \frac{p^2}{R_w^2 - R_s^2} F_{MM}^2(t) \quad (2)$$

Et pour les pertes fer, par séparation des pertes par courants de Foucault et par hystérésis :

$$P_{mg}(t) = k_{ad} \left(k_{ec} p^2 \Omega_M^2(t) + k_h p \Omega_M(t) \right) \left(V_d B_{dm}^2 + V_c B_{cm}^2 \right) \quad (3)$$

Ces pertes sont calculées dans les dents (de volume V_d) et dans la culasse statorique de volume V_c . Les coefficients de pertes volumiques k_{ec} et k_h seront présentés dans l'article final. On tiendra compte également des pertes mécaniques (aérodynamiques et paliers). Concernant les contraintes, les contraintes mécaniques (fréquence critique et tenue mécanique du rotor) et la contrainte thermique sont prises en compte. La contrainte de saturation, peu sollicitée dans les machines rapides peut être vérifiée après coup. Notons tout de même que la contrainte thermique prendra en compte la constante de temps thermique τ_{th} . Nous l'introduirons dans notre étude via l'élévation maximale de la température exprimée sous la forme :

$$\Delta T_{max} = f(\tau_{th}) \frac{\sum pertes}{h S_{th}} \quad (4)$$

Les modèles ainsi que l'expression des contraintes seront détaillés dans l'article final.

3. Méthodologie d'optimisation

Nous chercherons ici, à minimiser les pertes énergétiques, ce qui à échauffement maximal donnée revient à minimiser le volume de la machine. Le cahier des charges définit généralement les profils de couple et de vitesse. Pour parvenir à résoudre analytiquement ce problème, il suffit de commencer par rechercher les variables $F_{MM}(t)$ et B_{fm} optimales par dérivation de l'expression de l'énergie perdue sur un cycle. Dans le cas des machines à aimants, B_{fm} est une grandeur constante sur tout le cycle.

Considérons, dans un premier temps, seules les pertes électriques (les pertes mécaniques et leur effet sur l'optimisation seront présentés dans l'article final). Exprimées, en fonction des deux variables F_{MM} et B_{fm} , de la pulsation de rotation Ω_M et du couple C_{em} , les équations (1)-(3) peuvent s'écrire :

$$C_{em}(t) = \alpha B_{fm} F_{MM}(t) \quad (5)$$

$$P_c(t) = \beta F_{MM}^2(t) \quad (6)$$

$$P_{mg}(t) = \gamma k_{ad} \left[k_{ec} p^2 \Omega_M^2(t) + k_h p \Omega_M(t) \right] B_{fm}^2 \quad (7)$$

Les pertes cuivre et magnétiques moyennes sur un cycle s'expriment respectivement :

$$\langle P_c \rangle = \frac{\beta}{\alpha^2 B_{fm}^2} C_{em}^2_{eff} = \frac{\beta_0}{B_{fm}^2} \quad (8)$$

$$\langle P_{mg} \rangle = \gamma k_{ad} \left[k_{ec} p^2 \Omega_M^2_{eff} + k_h p \Omega_{M\ moy} \right] B_{fm}^2 = \gamma_0 B_{fm}^2 \quad (9)$$

La minimisation des pertes s'obtient, lorsque les pertes cuivre moyennes sont égales aux pertes magnétiques moyennes. On obtient alors les relations :

$$B_{fm}|_{opt} = \left(\frac{\beta_0}{\gamma_0} \right)^{1/4} \quad (10)$$

$$F_{MM} \Big|_{opt} = \alpha \left(\frac{\gamma_0}{\beta_0} \right)^{1/4} C_{em}(t) \quad (11)$$

On montre alors, à partir de (4), que le volume de la machine peut s'écrire :

$$Volume = \sqrt{2} \frac{C_{L\,eff}}{h \Delta T_{max}} \frac{L}{R} \frac{1}{1 + \frac{L}{R}} \sqrt{\frac{\rho_c k_L}{k_f}} \sqrt{\frac{k_{ad} (k_{ec} g p \Omega_{L\,eff}^2 + k_h \Omega_{L\,moy})}{g p}} \sqrt{\frac{1 + r_w}{(1 - r_w)(r_w^2 - r_s^2)} + \frac{p^2}{k_t r_s^2}} \quad (12)$$

Cette relation, hormis son côté pratique, permet de montrer les grandeurs du cycle de fonctionnement qui sont dimensionnantes : le couple efficace et les valeurs moyenne et efficace de la pulsation de rotation. D'autre part, la forme du résultat obtenu montre qu'il est possible d'optimiser séparément, la géométrie et le choix du matériau magnétique par l'étude des deux derniers termes de (12).

En guise d'illustration, considérons un fonctionnement continu (ou quasi continu) sur le cycle. La figure 2 montre dans ce cas l'évolution des puissances volumiques optimales en fonction de la vitesse de rotation de la machine, obtenues pour trois matériaux magnétiques différents (tôles fer-Silicium et Poudres de fer).

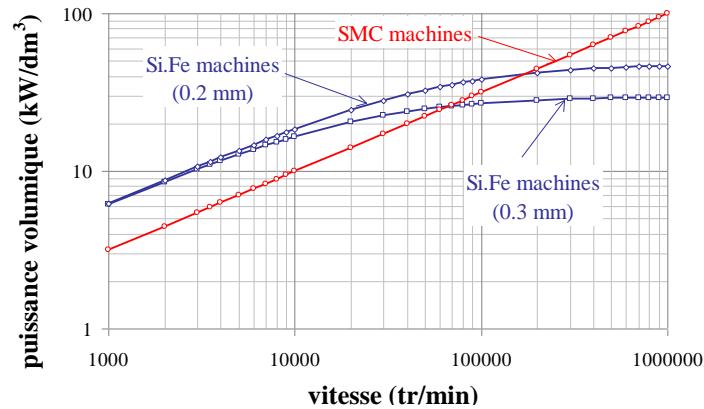


Fig.2 : influence du choix des matériaux magnétiques sur les performances optimales d'une machine

4. Application au stockage électromécanique d'énergie

Dans l'article final, nous présenterons de façon détaillée comment dimensionner un accumulateur électromécanique d'énergie pour la propulsion d'un petit navire électrique [2]. Les cycles (durée d'une traversée) sont de 30 min avec un temps de charge t_c de 5 min et un temps de décharge $t_d = 25$ min. La puissance de charge P_c et la puissance de décharge P_d sont respectivement de 200 kW et - 40 kW.

Nous détaillerons l'analyse et les résultats obtenus. On s'intéressera en particulier au choix des matériaux, au choix du nombre de paires de pôles et au choix du rapport de réduction. On discutera donc des avantages et inconvénients entre un entraînement direct ($g = 1$) et une entraînement avec réducteur mécanique ($g > 1$).

Nous présenterons les résultats pour une profondeur de décharge $r = \Omega_{L\,max}/\Omega_{L\,min}$ fixée puis nous étudierons l'influence de ce paramètre.

Enfin, nous discuterons des limites de notre modélisation, en particulier de l'influence de la réaction magnétique de l'induit que nous avons négligée en première approche. Nous tenterons de montrer comment cette réaction d'induit peut être intégrée à notre modélisation pour améliorer encore la justesse de nos résultats.

5. Références

- [1] BERNARD N., MARTIN F., ZAÏM E. H., "Design Methodology of a Permanent Magnet Synchronous Machine for a Screwdriver Application", IEEE trans. on Energy Conversion, Vol. 27, Issue : 3, pp 624-633, sept. 2012.
- [2] S. Trieste, J.-C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron, and D. Harpin, "Optimisation économique du dimensionnement d'un ensemble convertisseur -supercondensateurs utilisé pour l'énergie principale d'un véhicule électrique de type plug -in," in 14ème édition de la Conférence Electronique de Puissance du Futur, Bordeaux, july 2012.