

Pré-dimensionnement d'une machine synchrone à aimants permanents sous contrainte de masse.

Pierre ESTIVAL^{1,2}, Guillaume KREBS¹, Claude MARCHAND¹, Rabia SEHAB², Bertrand BARBEDETTE²

¹Laboratoire de Génie Electrique de Paris UMR CNRS 8507 - 11 rue Joliot-Curie Plateau de Moulon 91192 Gif sur Yvette

²Centre de Recherche et d'Ingénierie, Pôle Système, ESTACA, Campus Ouest Laval – Rue George Charpak 53061 Laval Cedex 9

RESUME – Une méthode de pré-dimensionnement de machine électrique offrant un grand nombre de degrés de liberté au concepteur est présentée dans cet article. Cette méthode s'appuie sur un algorithme analytique de construction de machine électrique à partir de l'induction d'entrefer. L'ensemble des grandeurs géométriques, magnétiques et électriques est ainsi déduite. Un algorithme d'optimisation couplé à ce modèle, donne au concepteur la possibilité d'ajuster un grand nombre de degrés de liberté pour une même application. Enfin une validation par un modèle 2D éléments finis permet d'avoir un rendu visuel de la répartition des flux et de la machine électrique.

MOTS-CLES – Machine électrique, optimisation, degrés de liberté, couple massique, masse par unité

1. Introduction

Les contraintes industrielles imposent des machines électriques toujours plus performantes. C'est le cas par exemple dans les systèmes embarqués, où la masse est un critère important. Pour un véhicule électrique, l'augmentation du couple massique permettra d'augmenter l'autonomie ou bien de gagner sur le coût batterie [1].

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et à concentration de flux sont des candidates intéressantes [1] et [2] de ce point de vue. Néanmoins le dimensionnement d'une telle structure n'est pas trivial car de nombreux paramètres sont à prendre en compte afin de parvenir à une structure optimale (géométriques, matériaux,...).

L'utilisation de différents matériaux avec un modèle faisant évoluer l'architecture de la machine peut offrir une réponse optimisée en fonction des contraintes de l'application [2]. Les réponses fournies montrent une variation forte de la typologie machine pour une même application.

Dans ce papier, le dimensionnement d'une MSAP (à bobinage concentrique et à double couche [3]) est proposé en tenant compte de plusieurs degrés de liberté. Les contraintes sont le couple moyen, la densité de courant des conducteurs, la vitesse de base au couple demandé et la tension d'alimentation. Le but du dimensionnement est de parvenir à une machine avec une masse minimale.

2. Méthode de dimensionnement

Ce travail de dimensionnement passe par trois grandes étapes, la première consiste à créer un modèle pour le dimensionnement d'une machine électrique. Afin d'avoir plusieurs degrés de liberté, et des temps de calculs courts (pour une utilisation couplée avec un algorithme d'optimisation), une modélisation analytique est adoptée.

La seconde étape de dimensionnement consiste à faire fonctionner conjointement le modèle et l'algorithme d'optimisation choisis. La fonction objective est de minimiser la masse de la machine électrique. Les bornes de variations des paramètres, ainsi que les contraintes du modèle doivent être choisies avec attention.

La dernière étape permet de valider la réponse du modèle analytique en transférant l'ensemble de la géométrie vers un logiciel de calcul par éléments finis et vérifier les valeurs d'inductions, de flux et le calcul du couple.

2.1 Modèle analytique

Le modèle se base en particulier sur un calcul analytique de l'induction dans l'entrefer de la machine [4]. Les hypothèses choisies (géométrie du rotor, matériaux des aimants, longueur d'entrefer) permettent d'aboutir à l'expression suivante :

$$B_g = \frac{C_\phi}{1 + \frac{K \cdot \mu_r \cdot C_\phi \cdot g}{L_m}} \cdot B_r \quad (1)$$

avec B_g l'induction d'entrefer (en Tesla), B_r l'induction rémanente de l'aimant (en Tesla), μ_r la perméabilité relative de l'aimant permanent (sans unité), C_ϕ le coefficient de concentration de flux (sans unité), g la longueur d'entrefer (en mètre), L_m la longueur de l'aimant dans le sens de magnétisation (en mètre) et enfin K un coefficient de prise en compte d'un effet de denture et de fuite magnétique (sans unité).

Cette induction sert de base pour le calcul de la géométrie du stator afin d'éviter de saturer magnétiquement les composants du stator, (les dents et la culasse statorique). Une fois les géométries du rotor et du stator fixées, les inductions en différents points de la machine sont calculées en prenant en compte la non linéarité du matériau. Les valeurs des inductions sont comparées à une induction de référence à ne pas dépasser dépendant du matériau choisi.

Enfin les flux des dents, les flux embrassés des phases et donc les tensions induites sont déduit. Le couple moyen peut être ainsi calculé suivant l'équation :

$$C_{em}(\theta) = \frac{\sum_1^{N_{ph}} E_y(\theta) \cdot I_{ph_y}(\theta)}{\omega_m} \quad (2)$$

C_{em} est le couple électromagnétique (en Newton mètre), E_y est la force électromotrice d'une phase (en volt), I_{ph_y} est le courant de phase associé à la force électromotrice (en Ampère) et ω_m est la vitesse de rotation (en radians par seconde). Ce modèle a été comparé, puis validé par un modèle 2D éléments finis.

2.2 Optimisation

L'utilisation d'un algorithme d'optimisation déterministe [5] se prête bien à cet exercice car un modèle analytique est réputé rapide et peut donc être appelé un grand nombre de fois. L'objectif principal de notre application est de minimiser la masse tout en respectant les contraintes du cahier des charges. Seule la masse magnétiquement active des machines est prise en compte ici. L'algorithme mis en place dans cette application s'illustre de manière simplifié par la Figure 1 ci-dessous :

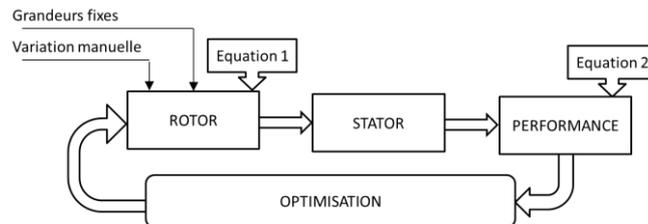


Figure 1 : cycle d'optimisation

L'algorithme utilise des grandeurs fixes citées plus tôt dans cet article, des paramètres que le concepteur peut modifier en dehors d'un processus d'optimisation et enfin des paramètres utilisés par l'algorithme d'optimisation dont les bornes ont été initialisées. Le modèle analytique en déduit un rotor, un stator, les performances et la masse de la machine. L'algorithme d'optimisation fait varier ses paramètres pour trouver une machine minimisant l'objectif.

En ajoutant l'ensemble des contraintes au modèle de dimensionnement, permettant de privilégier ou de refuser certaines machines, la surface de réponse (Figure 2) qui donne la masse par unité en fonction de deux paramètres, le nombre de dents et le nombre de paire de pôles, est obtenue.

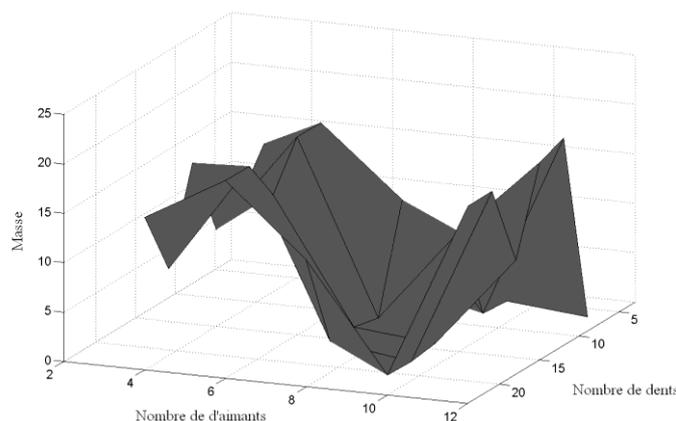


Figure 2 : surface des réponses de l'algorithmme d'optimisation

Une recherche systématique d'une machine optimale pour chaque valeur d'un nombre de dents et du nombre de paire de pôles est proposé ci-dessus. Chaque nœud de la surface est le résultat d'une optimisation de la masse d'une machine pour un nombre de dents et de paire de pôles fixé. Cette surface permet de visualiser rapidement quelle architecture de machine donne une réponse optimisée pour une application donnée. L'ensemble des points de la surface est une machine respectant le cahier des charges. Certaine combinaisons n'aboutissent pas à un résultat satisfaisant toute les contraintes.

2.3 validation par éléments finis

Afin de valider la réponse de l'optimisation, les grandeurs géométriques déduites du modèle sont envoyées vers un logiciel de calcul 2D par éléments finis (femm). Cette étape permet de visualiser la géométrie, la répartition des phases (Figure 3) et la répartition des flux (Figure 4).

Le couple est calculé par ce modèle en fonction de la position du rotor permettant une réponse fine des performances et de valider ou de refuser la machine.

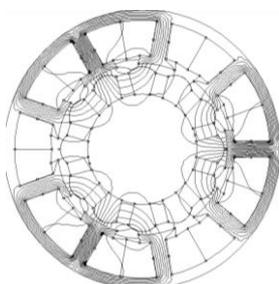


Figure 3 : machine à vide avec la phase 1 alimentée

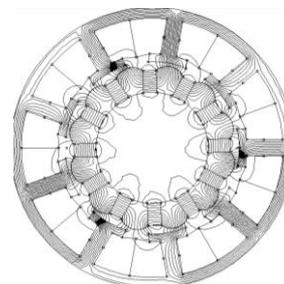


Figure 4 : machine en charge

Elle permet également de réaliser une dernière optimisation de manière subjective en fonction de l'expérience du concepteur.

3. Exemple de degré de liberté : Comparaison entre différents matériaux

L'utilisation de ce modèle de dimensionnement permet de tester des matériaux différents en termes de propriétés magnétiques ou mécaniques. Seront considérés une comparaison entre cuivre et aluminium pour les bobines (Tableau 1), des nuances distinctes d'aciers statorique et rotorique (Tableau 2) et différents grades d'aimants permanents (Tableau 3).

Une machine de référence est utilisée avec comme acier statorique et rotorique un acier M27, des aimants permanents en Samarium Cobalt (SmCo26) et des bobines en cuivre.

Tableau 1 : Variation du matériau des bobines

| Matériaux des bobines | Masse machine (p.u.) | Typologie machine |
|--|----------------------|----------------------------|
| Cuivre conductivité électrique : $1.67 \cdot 10^{-8}$ [Ω/m] masse volumique : 8920 [kg/m^3] | 1 | 9 dents / 5 paires de pôle |

| | | |
|---|-------|----------------------------|
| Aluminium conductivité électrique : $2.65.10^{-8}$ [Ω/m] masse volumique : 2698 [kg/m^3] | 0.845 | 9 dents / 5 paires de pôle |
|---|-------|----------------------------|

Tableau 2 : Variation des tôles statorique et rotorique

| Acier des tôle statorique et rotorique | Masse machine (p.u.) | Typologie machine |
|--|----------------------|-----------------------------|
| Acier M14 coude de saturation : 1.5 [T] masse volumique : 7860 [kg/m^3] | 1.03 | 27 dents / 6 paires de pôle |
| Poudre de fer coude de saturation : 1.65 [T] masse volumique : 7860 [kg/m^3] | 0.985 | 9 dents / 6 paires de pôle |
| AFK502 coude de saturation : 2.1 [T] masse volumique : 8120 [kg/m^3] | 0.883 | 9 dents / 6 paires de pôle |

Tableau 3 : Variation du matériau et grade des aimants permanents

| Grade des aimants permanents | Masse machine (p.u.) | Typologie machine |
|---|----------------------|-----------------------------|
| AlNiCo 2 Induction rémanente : 0.66 [T] masse volumique : 6840 [kg/m^3] | 1.548 | 27 dents / 6 paires de pôle |
| SmCo 32 Induction rémanente : 1.07 [T] masse volumique : 8300 [kg/m^3] | 1.136 | 9 dents / 6 paires de pôle |
| NdFeB 42 Induction rémanente : 1.30 [T] masse volumique : 7500 [kg/m^3] | 1.092 | 9 dents / 6 paires de pôle |

4. Conclusion

Cet article présente une méthode de pré-dimensionnement de machines électriques utilisant un algorithme d'optimisation offrant au concepteur de jouer sur un grand nombre de degrés de liberté. Cette méthode s'appuie sur un modèle analytique qui à partir de l'induction d'entrefer permet d'en déduire l'ensemble des grandeurs géométriques. L'optimisation permet d'aboutir à une machine optimale respectant le cahier des charges et en ayant une masse minimale.

L'étude mise en œuvre montre qu'une application à fort couple et faible vitesse peut être optimisée en termes de couple massique en prêtant une attention particulière aux matériaux. De plus, en laissant plusieurs degrés de liberté supplémentaires, l'algorithme d'optimisation peut aider à trouver des réponses à fort potentiel.

Dans la version étendue, le modèle analytique sera présenté en détail et l'ensemble des grandeurs géométrique du rotor seront décrites comme un degré de liberté. L'étude présentera les grandeurs les plus influentes sur une application de machine à fort couple et faible vitesse pour la minimisation de la masse active.

5. Références

- [1] B. Multon, L. Hirsinger, « Problème de la motorisation d'un véhicule électrique » Journée de la section électrotechnique du club EEA 1994, Cachan (France)
- [2] B. Multon, H. Ben Ahmed, M. Ruellan, G. Robin, « Comparaison du couple massique de diverses architectures de machines tournantes synchrones à aimants » Électrotechnique du Futur 2005, Grenoble (France)
- [3] J. Cros, P. Viarouge, « Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings », IEEE Transaction on Energy conversion, vol. 17, No. 2, June 2002
- [4] Dr. D. Hanselman, « Brushless motors : Magnetic Design, Performance and Control », University of Maine, E-Man press, 2012
- [5] D. E. Finkel, C. T. Kelley « Convergence Analysis of the DIRECT algorithm » North Carolina State University, Center for Research in Scientific Computation and Department of Mathematics