

Modélisation magnétothermique d'une MRV opérant dans un environnement thermique contraint

Karim ALITOUCHE⁽¹⁾, Hocine MENANA⁽²⁾, Noureddine TAKORABET⁽²⁾, Rachid SAOU⁽¹⁾, Daniel ROGER⁽³⁾

⁽¹⁾Université Abderrahmane Mira, Laboratoire de Génie Electrique de Bejaïa (LGEB), Bejaïa, Algérie

⁽²⁾ Université de Lorraine, GREEN, F-54000 Nancy, France

⁽³⁾ UArtois, LSEE, F-62400 Béthune France

RESUME – Dans ce papier, nous présentons une stratégie de modélisation magnétothermique d'une machine électrique à réluctance variable (MRV) fonctionnant à haute température. Outre la non-linéarité magnétique, les variations des propriétés électromagnétiques et thermiques des matériaux en fonction de la température sont prises en compte. La rapidité de l'approche proposée la rend compatible avec une démarche de CAO.

Mots-clés—Modélisation magnétothermique, MRV, Hautes températures.

1. INTRODUCTION

Certaines applications industrielles imposent des contraintes thermiques sévères aux machines électriques, en raison la nécessité de réduction des masses et des volumes impliquant une augmentation des densités de puissance, ou la cohabitation de ces dernières avec des éléments portés à une très haute température. Les gammes de températures atteintes, dans ces machines, peuvent être très élevées, entraînant une interdépendance des phénomènes électromagnétiques et thermiques. De ce fait, leur dimensionnement nécessite une modélisation magnétothermique, où la connaissance du comportement électromagnétique et thermique des matériaux aux hautes températures est cruciale.

Les phénomènes électromagnétique et thermique évoluent de manières très différentes dans l'espace et le temps, ce qui rend ce type de modélisation très délicate, et parfois très coûteuse en temps calcul, ce qui n'est pas compatible avec les processus de dimensionnement et d'optimisation. Pour certains problèmes, il est également nécessaire de faire correspondre localement l'évolution des grandeurs électromagnétiques et thermiques. Cela engendre des contraintes supplémentaires en termes de discrétisation spatio-temporelle du problème, le pas spatial étant lié au pas temporel dans une modélisation numérique dans le temps. L'évolution des grandeurs thermiques étant beaucoup plus lente que celle des grandeurs magnétiques, une stratégie de couplage faible est alors souvent adoptée dans une telle modélisation [1-4].

La complexité structurelle et le mouvement sont des difficultés supplémentaires rencontrées lors d'une modélisation magnétothermique appliquée à une machine électrique. Il est, dans ce cas, nécessaire d'adopter des stratégies de modélisation particulières permettant d'avoir le meilleur compromis entre la précision et le temps de calcul. Dans ce contexte, nous proposons une approche de modélisation magnétothermique simplifiée d'une MRV fonctionnant à haute température. En effet, leur simplicité de construction et robustesse les rendent aptes à fonctionner dans des environnements contraints.

2. SYSTEME MODELISE ET PROPRIETES DES MATERIAUX

Nous nous proposons de modéliser une MRV à double saillance, à flux radial, dont la structure de base est présentée

dans la figure 1. Le circuit magnétique est constitué d'acier inoxydable magnétique de type SUS410. Pour les autres parties : l'arbre est constitué d'acier, le bobinage est constitué de conducteurs en cuivre (Cu) et l'entrefer est constitué d'air.

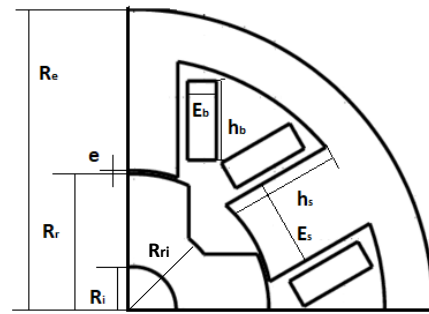


Fig. 1. Structure de la MRV modélisée.

La variation de la résistivité électrique des conducteurs en fonction de la température est modélisée par l'équation (1).

$$\rho(T) = \rho_{ref} [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (1)$$

Dans (1), α est le coefficient de température [K^{-1}], T_{ref} est une température de référence, et ρ_{ref} est la résistivité à la température T_{ref} [$\Omega.m$]. Pour le cuivre, $\alpha = 3.93 \times 10^{-3} K^{-1}$.

Le modèle de Frölich-Kennely modifié est utilisé pour l'estimation de la variation de la perméabilité du circuit magnétique, en fonction du champ magnétique (H), et de la température [1] :

$$\mu(H, T) = \mu_0 + [a + bH^c]^{-1} \quad (2)$$

Dans ce travail, nous avons utilisé les valeurs expérimentales des paramètres a , b et c , fournies dans [1].

Les capacités thermiques sont supposées être indépendantes de la température, de même que les conductivités thermiques (λ) de l'air et celle des isolants. Les conductivités thermiques du cuivre et de l'acier varient en fonction de T comme suit :

$$\begin{cases} \lambda_{Cu}(T) = 401 - 0.0617[T - 273] \\ \lambda_{SUS410}(T) = 14 + 0.012[T - 273] \end{cases} \quad (3)$$

L'obtention des coefficients d'échange convectif de chaleur est une difficulté majeure dans les calculs thermiques des machines électriques. Ils dépendent de la nature de l'écoulement de fluide (laminaire ou turbulent) mais aussi de la surface du milieu adjacent et de sa rugosité. Le coefficient relatif à la convection dans l'entrefer est d'autant plus compliqué à déterminer vu la structure doublement saillante de la machine étudiée. Dans le cas d'un régime turbulent, le

transfert de chaleur dans l'entrefer peut être modélisé par un échange conductif, caractérisé par une conductivité thermique effective (λ_{eff}), calée de manière à faire correspondre au mieux les températures calculées aux températures mesurées [2-3]. Dans [2], les auteurs ont choisi une conductivité thermique effective de $2W.m^{-1}.K^{-1}$ pour une vitesse de rotation de 6000rpm. Etant donné que cette conductivité effective est proportionnelle à la racine carrée du nombre de Reynolds [3], et, donc, à la racine carrée de la vitesse de rotation, dans notre cas, pour une vitesse de 1500rpm, nous avons fixé sa valeur à $1W.m^{-1}.K^{-1}$. Les coefficients de convection thermique extérieurs sont évalués par les formules empiriques fournies dans [4]. La surface extérieure (S) se compose d'ailerettes de refroidissement axiales en aluminium. L'effet des ailettes de refroidissement est pris en compte par l'introduction d'un coefficient de convection équivalent, augmenté du rapport de la surface des ailettes à la surface au rayon extérieur de la machine.

3. MISE EN OEUVRE DU MODELE MAGNETOTHERMIQUE

Une alimentation en courant est considérée. Le problème magnétique est formulé par un modèle magnétostatique bidimensionnel en fonction du potentiel vecteur magnétique A décrit par la relation (4), où J représente la densité de courant source.

$$\partial_x \left(\frac{1}{\mu(H,T)} \partial_x A_z \right) + \partial_y \left(\frac{1}{\mu(H,T)} \partial_y A_z \right) = -J_z \quad (4)$$

La densité volumique des pertes joules dans les conducteurs est évaluée par la loi d'Ohm : $p(T) = \rho(T)J^2$ [W/m³], et, les pertes fer peuvent être évaluées en utilisant les pertes spécifiques, connaissant la répartition du champ magnétique pour chaque position du rotor [2-4]. Les pertes électromagnétiques sont introduites dans le modèle thermique comme source de chaleur.

La diffusion de la chaleur dans la machine, dans le plan (x, y), est régie par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \rho_m C_p \partial_t T = \partial_x (\lambda(T) \partial_x T) + \partial_y (\lambda(T) \partial_y T) + p(T) \\ -\lambda(T) \partial_n T = h(T - T_e) \end{cases} \quad (5)$$

où, λ , ρ_m , C_p , h et T_e , sont respectivement la conductivité thermique en (W.m⁻¹.K⁻¹), la masse volumique en (kg.m⁻³), la chaleur massique en (J.Kg⁻¹.K⁻¹), le coefficient d'échange par convection exprimé en (W.m⁻².K⁻¹), et la température du milieu externe.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Nous avons modélisé une MRV 6/4 dont les paramètres sont donnés dans le tableau 1. Pour l'implémentation numérique du problème magnétothermique, nous avons exploité les modules magnétique et thermique du logiciel libre « Finite Element Method Magnetics », pilotés via MATLAB, grâce à l'interface OctaveFEMM. La figure 2 représente l'évolution temporelle de la température dans les différentes parties de la machine, pour $T_e = 50^\circ C$. La présence de l'isolant électrique creuse l'écart de température entre les bobines et le reste de la machine. La figure 3 présente l'influence de la température sur le couple développé par la machine, à courant constant. Pour un courant imposé, le couple n'est que légèrement affecté par l'évolution de la température. Cependant, la tension et la vitesse seraient lourdement affectées par la diminution de la perméabilité du circuit magnétique et l'augmentation des résistances du bobinage, car, cela engendre une augmentation de la chute de tension dans la machine. Pour l'étude de la variation de la puissance de la machine, une

alimentation en tension, et, un couplage avec les équations de circuit sont nécessaires.

Tableau 1. Spécification des paramètres

R _e =140mm R _i =79mm R _r =40mm R _{ri} =59.25mm e=1mm E _b =16mm H _b =33mm E _s =42mm H _s =36mm Longueur axiale, L=100mm			
Vitesse de rotation, ω (rpm)			1500
Densité de courant dans les conducteurs, J (A/m ²)			6×10^6
Coefficient de conduction thermique équivalent dans l'entrefer (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)			1
Coefficient d'échange convectif culasse-air (W. m ⁻² .K ⁻¹)			50
Coefficient d'échange convectif axial (W. m ⁻² .K ⁻¹)			30
Propriétés thermiques des matériaux utilisés, à 20°C			
Matériau	λ (W/m K)	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ_m (kg/m ³)
SUS410	15	500	7650
Air	0.0181	1004	1.184
Cu	401	385	8954
Al	236	897	2707
Acier	62	444	7850

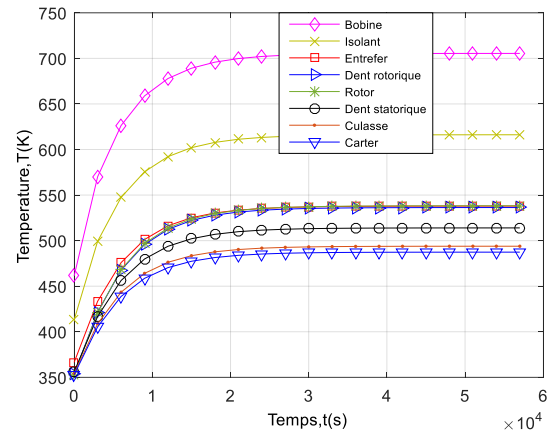


Fig. 2. Evolution temporelle de la température dans la machine.

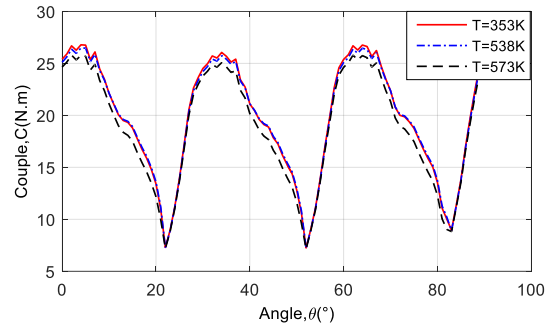


Fig.2. Couple développé par la machine pour différentes valeurs de la température au rotor.

5. REFERENCES

- [1] M. D. Noh, M. J. Gi, D. Kim, Y.-W. Park, J. Lee, and J.-W. Kim, "Modeling and Validation of High-Temperature Electromagnetic Actuator", IEEE Trans. Mag., Vol. 51, No. 11, 8003504, Nov. 2015.
- [2] My-Ismaïl Lamghari-Jamal, Javad Fouladgar, El-Hadi Zaim, Didier Trichet, "A Magneto-Thermal Study of a High-Speed Synchronous Reluctance Machine.", IEEE Trans. Mag., Vol. 42, No. 4, pp. 1271-1274, Ap. 2006.
- [3] Yonghong Huang, Fengxiao Huang, Ying Zhang, Chi Chen, Ye Yuan, and Jianhua Luo, "Thermal Characteristics Analysis of Single-Winding Bearingless Switched Reluctance Motor", Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 86, 59-69, 2019.
- [4] Yukun Sun, Binbin Zhang, Ye Yuan, and Fan Yang, "Characteristics of Switched Reluctance Motor under Different Working Conditions", Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 74, 11-23, 2018.