

Etude de la convection autour des têtes des bobines d'un alterno-démarreur intégré par les méthodes CFD

Ayoub BEN NACHOUANE^{1,2*}, Abdenour ABDELLI¹, Guy FRIEDRICH², Stéphane VIVIER²

¹ IFP Energies nouvelles, 1-4 Av de Bois Préau, 92852 Reuil Malmaison, France.

² Sorbonne Universités, Laboratoire d'Electrotechnique de Compiègne, UTC, BP 20529, 60205, Compiègne, France.

RESUME – Cet article propose un modèle numérique basé sur les méthodes CFD pour la compréhension de l'échange thermique par convection autour des têtes des bobines d'une machine synchrone à aimants permanents totalement fermée. L'effet de la vitesse de rotation sur la variation des coefficients d'échange locaux et moyennés autour des têtes des bobines a été minutieusement étudiée. Des réponses sur le chemin de flux autour des têtes des bobines en présence et en absence d'embrayage ont été également fournies.

Mots-clés – CFD, têtes des bobines, coefficient d'échange convectif, machine synchrone à aimants permanents, réseau nodal.

1. INTRODUCTION

Les nouvelles contraintes conceptuelles et physiques imposées sur les machines électriques telles que la réduction de la masse, l'augmentation de la densité de puissance et l'amélioration du rendement global ont poussé les concepteurs à proposer des machines électriques beaucoup plus compactes. Par conséquent, des gradients de température beaucoup plus importants sont détectés dans des différents endroits de la machine surtout autour des têtes bobines. Malgré sa criticité en terme de variation de température, cette région est très peu étudiée dans la littérature. Les quelques études disponibles sont généralement réalisées sur des machines à induction en présence de ventilation à l'intérieur [2]. Des études de caractérisation thermique dans cette région ont été proposées par [2, 3] où ils s'intéressent à l'analyse de l'effet de la géométrie de la cavité et des brasseurs sur la variation de l'intensité de l'échange convectif. Dans cette étude, on propose un modèle numérique pour compréhension du mécanisme de transfert thermique par convection autour des têtes des bobines d'une machine synchrone à aimants permanents totalement fermée [1]. On analyse également l'impact du régime d'écoulement sur la variation du chemin de flux thermique dans cette région. Un modèle numérique axisymétrique de type CFD a été développé sur le logiciel commercial ANSYS Workbench 15.0 ©.

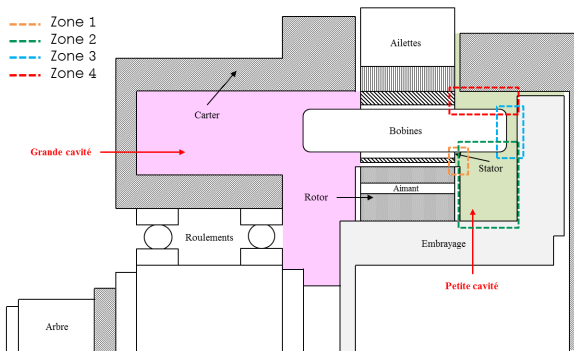


Fig. 1. Schéma simplifié de l'alterno-démarreur intégré

2. MODÉLISATION DES ÉCHANGES THERMIQUES AUTOUR DES TÊTES DES BOBINES

2.1. Machine d'étude

La machine électrique étudiée dans cet article est une machine synchrone à aimants permanents intérieurs refroidie de l'extérieur à l'aide des ailettes. Cette machine a la particularité d'avoir deux cavités non similaires autour des têtes des bobines. En effet, une petite cavité (à droite) dans laquelle l'air est brassé par la rotation de l'embrayage qui joue le rôle d'un ventilateur et une grande cavité (à gauche) localisée au-dessus des roulements dans laquelle aucun débit d'air n'est imposé. La figure 1 montre les deux cavités dans lesquelles la convection a été étudiée. Dans cet abstract, on présente seulement un modèle axisymétrique pour l'analyse de la thermique à l'intérieur de la petite cavité dont laquelle un maillage hexaédrique a été généré. Des températures uniformes ont été imposées sur toutes les surfaces intérieures de la cavité pour différentes vitesses de rotation entre 250 et 8000 tr/min. Les détails sur les hypothèses de calcul, la technique de modélisation et le post-traitement des résultats seront fournis dans la version finale de l'article.

2.2. Transfert thermique par convection

La caractérisation de l'échange convectif est réalisée à l'aide du coefficient d'échange dont l'expression est donnée par :

$$\bar{h} = \frac{\bar{q}}{T_{EdWg} - T_{\infty}} \quad (1)$$

où \bar{q} le flux thermique surfacique, T_{EdWg} la température des têtes des bobines et T_{∞} la température de l'air.

L'estimation de ces coefficients avec les méthodes CFD revient à résoudre les équations de Navier-Stokes. La méthode de résolution de ces équations dépend fortement du régime d'écoulement (laminaire, transitionnel ou turbulent). Dans la littérature, la caractérisation de l'écoulement est faite à travers le nombre de Reynolds donné par :

$$Re_r = \frac{\rho \Omega r^2}{\mu} \quad (2)$$

où r est la position radiale, Ω la vitesse de rotation et ρ et μ sont respectivement la densité et la viscosité dynamique de l'air.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La figure 2 montre la distribution de la température dans la petite cavité pour quatre vitesses de rotation et sous les mêmes conditions aux limites thermiques. A l'arrêt, le transfert thermique est gouverné par la convection naturelle et on remarque que les isothermes sont déformées dans la partie supérieure de la cavité. Quand la machine est en rotation, la convection est forcée et la distribution est fortement impactée par le champ de vitesse d'écoulement.

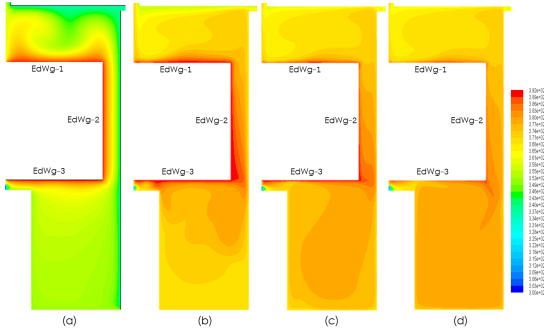


Fig. 2. Distribution de la température dans la petite cavité : (a) $\Omega = 0$ tr/min (b) $\Omega = 500$ tr/min (c) $\Omega = 3000$ tr/min (d) $\Omega = 6000$ tr/min

Pour simplifier l'analyse de l'échange thermique par convection, une subdivision de la cavité a été proposée. On distingue quatre zones dont la distribution de la température et les coefficients d'échange dépendent de la structure d'écoulement (Figure 3).

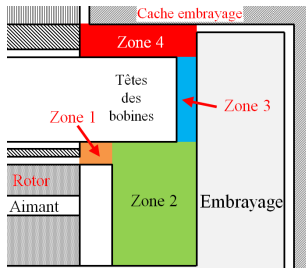


Fig. 3. Quatre régions de transfert thermique

- Zone 1** : On remarque que l'augmentation de la vitesse de rotation permet d'enlever les spots de température qui se créent à faible vitesse ($\Omega = 500$ tr/min). Ce qui s'explique par l'amélioration de l'échange thermique par convection dans cette zone grâce à l'augmentation du nombre de Reynolds.
- Zone 2** : Initialement, les températures les plus élevées sont localisées au voisinage des têtes des bobines et la distance entre les isothermes est importante. Quand la vitesse de rotation augmente, on remarque que la température au centre de la région devient uniforme et les isothermes sont presque confondues au voisinage des surfaces ($\Omega \geq 5000$ tr/min). Cette distribution de température est expliquée par l'augmentation du transfert thermique depuis les têtes des bobines vers le centre de la zone 2.
- Zone 3** : L'écoulement dans cette zone ressemble à celui obtenu entre deux disques dont l'un est en rotation et l'autre est fixe. Il est visible qu'à faible vitesse ($\Omega = 500$ tr/min), Le profil de température est linéaire vu l'écoulement est laminaire ($Re_{R_{clu}} \leq 3 \times 10^5$). Egalement, il est important de mentionner que l'échange thermique est plus élevé dans la direction centrifuge. Cela s'explique par l'augmentation du nombre de Reynolds local dans cette direction, ce qui améliore l'aérodynamique pour les positions radiales croissantes.
- Zone 4** : Cette zone correspond aux nombres de Reynolds locaux les plus élevés. Par conséquent, l'échange thermique dans cette zone est le plus élevé vu l'aérodynamique qui contribue à augmenter les coefficients d'échange locaux et globaux. L'embrayage joue le rôle d'un ventilateur à l'intérieur de la machine qui contribue au refroidissement de cette zone.

Les simulations CFD ont permis de déterminer les flux thermiques dégagés par les surfaces des têtes des bobines. La figure 4 montre la variation des flux thermiques surfaciques sortant de chaque faces des têtes des bobines en fonction de la vitesse de rotation.

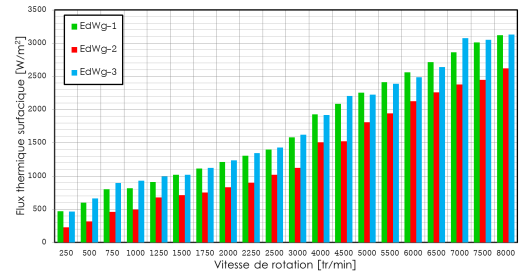


Fig. 4. Variation du flux thermique surfacique en fonction de la vitesse de rotation

On remarque que l'échange thermique par convection augmente en fonction de la vitesse de rotation. Egalement, il est important de noter que le flux thermique dégagé par la surface supérieure (EdWg-1) est presque égal à celui dégagé par la surface inférieure (EdWg-3) sur toute la plage de fonctionnement de la machine. Le flux thermique dégagé par la surface (EdWg-2) augmente en fonction de la vitesse mais il reste toujours moins important que ceux dégagés par (EdWg-1) et (EdWg-3).

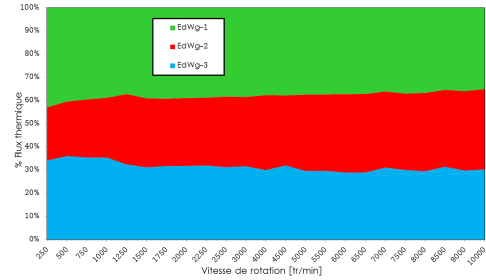


Fig. 5. Part de chaque surface dans l'échange thermique en fonction de la vitesse de rotation

En termes de proportions, la figure 5 montre la part de chaque surface dans les échanges convectifs. Il est visible que toutes les surfaces gardent une contribution thermique constante indépendamment de la vitesse de rotation.

4. CONCLUSIONS

Un modèle numérique de type CFD a été développé pour la petite cavité autour des têtes des bobines. La distribution de température a été étudiée en fonction de la vitesse de rotation et un premier aperçu sur le chemin de flux a été proposé. Dans la suite de l'article une étude plus approfondie sera fournie sur le mécanisme de transfert thermique autour des têtes des bobines et une méthode d'estimation des coefficients d'échanges sera explicitée.

5. RÉFÉRENCES

- [1] G. Friedrich, S. Vivier, R. Khliissa, K. El Kadri Benkara, and B. Assaad « Determination of rotor-stator heat exchange coefficients in the case of totally enclosed machines : Application to an integrated starter-generator ». ECCE 2013, pages 1526 –1533.
- [2] D.A. Staton, M. Popescu, D. Hawkins, A. Boglietti, A. Cavagnino, « Influence of Different End Region Cooling Arrangements on End-Winding Heat Transfer Coefficients in Electrical Machines », ECCE 2010, Atlanta, GA, pages 1298 - 1305
- [3] M.Hettegger, B. Streibl, O. Biro, H. Neudorfer, « Characterizing the heat transfer on the end-windings of an electrical machine for transient simulations ». MELECON 2010, pages 581-586, April. 2010.