



HAL
open science

Détermination expérimentale des coefficients d'échange thermique en mode de convection naturelle - Application à une machine électrique intégrée dans son environnement

Bassel Assaad, Guy Friedrich, Khadija El Kadri Benkara, Stephane Vivier, Radhouane Khlissa, Antoine Michon

► To cite this version:

Bassel Assaad, Guy Friedrich, Khadija El Kadri Benkara, Stephane Vivier, Radhouane Khlissa, et al.. Détermination expérimentale des coefficients d'échange thermique en mode de convection naturelle - Application à une machine électrique intégrée dans son environnement. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065398

HAL Id: hal-01065398

<https://hal.science/hal-01065398>

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.

Détermination expérimentale des coefficients d'échange thermique en mode de convection naturelle

Application à une machine électrique intégrée dans son environnement

Bassel Assaad^{1,2}, Stephane Vivier¹, Radhouane Khlissa¹, Guy Friedrich¹, Khadija El Kadri Benkara¹

¹ LEC: Laboratoire d'Électromécanique de Compiègne, UTC, BP 20529, 60205, Compiègne, France

² Centre Technique des Industries Mécaniques, CETIM, 52 av Félix Louat, BP 80067, 60304, Senlis Cedex, France

RESUME - Cet article propose un modèle de convection naturelle d'une machine électrique intégrée dans un ensemble mécanique contribuant à l'évacuation des pertes internes. Des corrélations empiriques sont calculées pour l'évaluation du coefficient du transfert thermique. La dépendance de ce coefficient de plusieurs facteurs tels que la structure et l'état de la surface, le rend imprécis et inapproprié parfois à des conditions particulières. L'article montre une étude expérimentale du modèle proposé et les limites du calcul analytique. La précision du modèle est discutée à partir d'une comparaison entre les flux thermiques sortants et les pertes internes générées dans les cas d'un régime établi.

MOTS-CLES - Convection naturelle, machine électrique intégrée, modélisation thermique.

1. Introduction

Dans plusieurs applications industrielles, telles que les véhicules hybrides par exemple, l'intégration d'une machine électrique totalement fermée et sans ventilation TENC (*Totally Enclosed Non Cooled*) constitue une solution intéressante, voire optimale. De là, un des points fondamentaux est l'évacuation des pertes internes afin de limiter l'échauffement des différents éléments constitutifs. La modélisation thermique est alors un élément essentiel pour la conception des machines performantes.

La seule façon d'évacuer les pertes internes produites dans une TENC est au travers de la convection naturelle (CN) se produisant aux surfaces externes de la machine. Dans ce contexte, plusieurs problèmes peuvent apparaître. L'évaluation du coefficient de transfert de chaleur par convection s'avère ainsi importante. Elle impose la prise en compte de plusieurs hypothèses lourdes pouvant introduire des erreurs de calcul. Une modélisation précise de ces phénomènes de CN devient donc fondamentale. Elle est reconnue pour être le mode de transfert le plus complexe et délicat à modéliser en comparaison des autres modes de transfert comme la conduction, voire même le rayonnement.

Cet article propose le calcul de ces coefficients d'une façon analytique, et présente leur adaptation et leurs domaines de validation dans le cas d'une machine électrique intégrée. Toutes les pertes internes de la machine (pertes par effet Joule, pertes mécaniques et pertes fer) devant être évacuées vers l'extérieur sont prises en compte.

Plusieurs études sur les aspects convectifs existent dans la littérature [1] - [6]. [1] présente les notions de transfert thermique par convection en général (naturelle, forcée et mixte), alors que les auteurs de [6] ont présenté ces notions dans le contexte d'une machine électrique.

L'évaluation du niveau d'échange convectif à l'extérieur de la machine peut introduire plusieurs sources d'erreurs telles qu'à travers du choix de la corrélation, de son adaptation à la forme des surfaces de la machine électrique, ou autres.

Une discussion sur la validité des coefficients d'échange convectif sera effectuée sur la base de comparaison entre les flux de chaleur sortants et la puissance thermique interne (pertes).

En résumé, la démarche proposée est établie en considérant les points suivants, (voir Figure 1) :

- ρ ; est mesurée et est considérée homogène sur toute la pièce
- P est considérée comme connue (pertes internes de la machine)
- Les coefficients d'échange convectif h_1 , h_2 et h_3 sont issus de la littérature

En régime permanent thermique, les flux thermiques sortants sont égaux à la puissance interne générée.

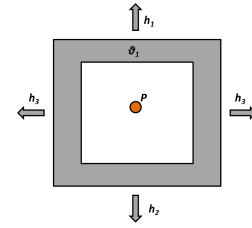


Figure 1 : Prise en compte du problème de CN.

2. Approche théorique

2.1 Transfert de chaleur par convection naturelle

La convection naturelle reste de la conduction dans un fluide déformable, mais la variation de la masse volumique en fonction de la température induit des forces d'Archimède qui provoquent le mouvement du fluide. Toute autre cause de mouvement de molécule d'air telle que les ventilateurs est éliminée. Dans le mode de convection, l'analyse adimensionnelle intervient afin de pouvoir calculer les caractéristiques du régime d'écoulement et le coefficient d'échange convectif h . Les quatre nombres adimensionnels critiques dans le cas de la convection naturelle sont : Nusselt Nu , Grashof Gr , Prandtl Pr et Rayleigh Ra [7]. La résistance thermique de convection R_{th} est évaluée après le choix de la corrélation adéquate (fonction de Nusselt). Pour une surface d'échange S , les formules de la résistance R_{th} , du coefficient h et du diamètre hydraulique D_c [7] sont :

$$R_{th} = \frac{1}{h.S} \quad h = \frac{\lambda.Nu}{D_c} \quad D_c = \frac{4S_c}{P} \quad (1)$$

Avec λ \cong la conductivité de l'air, S_c et P pour le diamètre hydraulique, sont respectivement la section et le périmètre d'un canal d'écoulement. Dans le cas d'un canal de section circulaire par exemple, D_c est égal au diamètre géométrique de la conduite.

2.2 Corrélations empiriques

Les différentes corrélations empiriques utilisées dans cette étude, et issues de la littérature sont présentées dans l'article final dans un tableau récapitulatif. La corrélation générale du nombre de Nusselt moyen \overline{Nu} en fonction du coefficient d'échange convectif moyen \overline{h} qui correspond à la convection naturelle pour différentes configurations (cylindre chauffé, plaque verticale, etc.) est donnée par l'Eq. 2.

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}.D_c}{\lambda} = C.Ra_D^n \quad (2)$$

Avec C et n des valeurs empiriques données dans [4], et variant selon la configuration géométrique et l'intervalle de variation du nombre Ra .

Les différents types de configurations sont les formes élémentaires les plus courantes pour une machine électrique intégrée dans son environnement (cylindre, plaque, ailettes). Notons que les propriétés physiques du fluide sont évaluées à sa température $T_f = (T_p + T_\infty) / 2$ avec T_p la température de la paroi et T_∞ la température extérieure à l'infini ($\cong 24^\circ\text{C}$).

Une source d'erreur non négligeable peut résulter de l'application de ces corrélations; Par exemple, la corrélation pour les cylindres horizontaux est établie pour un cylindre très long dont le diamètre D est négligeable devant sa longueur L ($D \ll L$). Cependant, dans le contexte de certaines machines électriques, D est très proche de L , et parfois plus grand (voir partie expérimentale), par conséquent, cette corrélation est inadaptée.

3. Description de la structure modélisée

La machine électrique étudiée est une machine synchrone à aimants permanents enterrés destinée à une application du type alerno-démarreur intégré ou ADI. Elle appartient au domaine des applications mild-hybrid. Cette machine assure les fonctions stop-start et freinage régénératif mais pas l'assistance au moteur thermique. Elle possède huit aimants disposés transversalement sans concentration de flux et 48 encoches statoriques. Dans son contexte réel d'application, cette machine est totalement fermée avec l'absence de toutes sources de ventilation externe. Le stator est muni d'ailettes qui assurent un refroidissement par convection naturelle par air. La MAPI est fixée à une plate-forme d'essais (Figure 2) et accouplée à une machine d'entraînement. Elle est instrumentée par 20 thermocouples installés dans différentes parties.

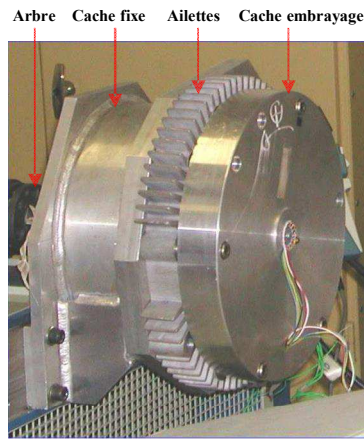


Figure 2 : Prototype du LEC- Machine synchrone à aimants permanents internes MAPI.

4. Modélisation proposée

4.1 Choix du modèle : Assemblage des composants élémentaires

Pour la modélisation des phénomènes de CN, la structure de la MAPI est ramenée à des géométries simples (composants élémentaires). La Figure 3 montre le choix du modèle considéré pour évaluer les coefficients d'échanges convectifs des différentes surfaces vers l'extérieur.

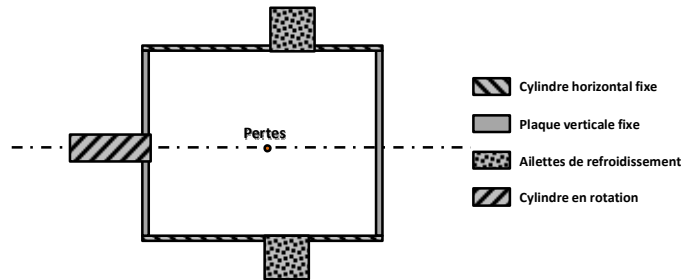


Figure 3 : Modèle considéré pour représenter les phénomènes de CN

4.2 Calcul des flux de chaleur en considérant les températures de parois connues

4.2.1 Prise en compte de la contribution du rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement peut aussi contribuer à l'évacuation des calories produites, quoique leur effet, peut-être considéré négligeable parfois, à cause des températures relativement basses aux surfaces ou à l'intérieur de la machine. Par contre, dans notre cas, le pourcentage de chaleur évacué par rayonnement peut atteindre 20-30% du flux total vers l'extérieur. Sa valeur dépend principalement du choix du facteur de l'émissivité des surfaces. Ainsi, pour étudier les phénomènes de convection naturelle, la valeur du flux évacué par rayonnement sera déduite du flux total.

4.2.2 Flux externes à travers la machine

En utilisant les températures des parois de la machine connues pour un essai à haute vitesse, les résistances thermiques de convection R_{eq} sont calculées en s'appuyant sur les corrélations de la littérature. Ainsi, les flux de chaleur – sortants sont déduits pour chaque surface grâce à la formule :

$$\varphi = R_{eq} \cdot \Delta T \quad (3)$$

Avec ΔT la différence de température entre la surface et l'air extérieur supposé à l'infini T_∞ .

Tableau 1. Résultats de simulation

Configuration	h (W/K/m ²)		ΔT	R_{eq} (K/W)	φ (W)
Cache Fixe	4.7*	5 ^Δ	58	1.32	43.7
Cache embrayage	5.4*	5.7 ^Δ	56	1.57	35.4
Carter/Ailette	9.5		69	0.7	99.0
Arbre	193		61	0.2	299.7
φ_{totale}					477.8

*: Surface radiale (cylindre horizontal)

^Δ: Surface axiale (plaque verticale)

4.3 Résultat de simulation

La Figure 4 présente la cartographie thermique et les distributions des flux de chaleur à l'extérieur de la machine en s'appuyant sur les résultats de simulation du Tableau 1.

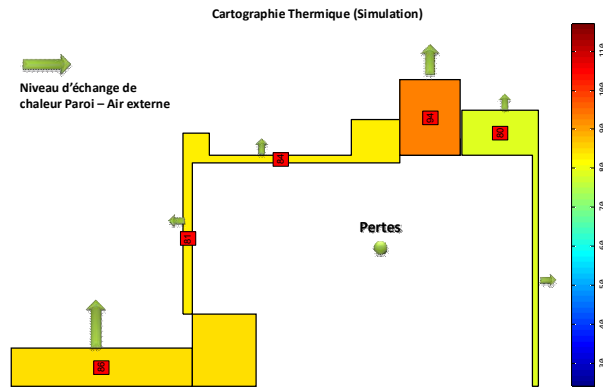


Figure 4 : Cartographie de températures de la MAPI et distribution des flux thermiques

5. Validation expérimentale

5.1 Description des essais

Plusieurs essais thermiques ont été effectués sur la MAPI pour quatre vitesses de rotation (0, 108, 2500 et 4000 trs/min) et deux densités de courant (0 et 5 A/mm²). La synthèse de ces essais ainsi que les différentes pertes internes de la machine sont présentés dans un tableau récapitulatif dans l'article final.

5.2 Synthèse des résultats

Les résultats des essais expérimentaux sont présentés dans un tableau qui réalise une comparaison entre les pertes générées à l'intérieur de la machine et les flux évacués au travers de ses surfaces externes.

5.3 Interprétations

En se basant sur la différence entre la valeur des flux évacués vers l'extérieur et les pertes produites en interne, nous pouvons présenter une interprétation des résultats qui permettent d'évaluer le niveau d'erreur commise en utilisant les corrélations empiriques, voire de juger la validité des hypothèses et des choix pris au début de l'étude.

6. Conclusion

Dans cet article, les coefficients de transferts convectifs sont évalués tout d'abord en choisissant une représentation de la machine en se basant sur des géométries simples et connues. Ensuite, une validation expérimentale de ces coefficients est présentée en s'appuyant sur des résultats d'essais d'un banc de test d'une machine synchrone à aimants permanents internes. Nous présentons la synthèse des résultats en calculant les flux sortants de la machine et en les comparant à la chaleur produite à l'intérieur de la machine (pertes). Cette étude permet d'adapter les coefficients d'échanges par convection naturelle dans une modélisation thermique complète d'une machine électrique, ainsi que d'explorer la complexité de ce mode de transfert thermique.

7. Références

- [1] J. HUETZ, J.P. PETIT, "Notions de transfert thermique par convection", TI, traité Génie énergétique.
- [2] S. W. CHURCHILL, H. H. S. CHU, Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1049, 1975.
- [3] V. T. MORGAN, "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders," in T. F. Irvine and J. P. Hartnett, Eds, Advances in Heat Transfer, Vol. 11, Academic Press, New York, 1975, pp. 199-264.
- [4] F. INCROPERA, D. DEWITT - Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [5] S. W. CHURCHILL, H. H. S. CHU, Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1323, 1975.
- [6] D.A. STATON, A. CAVAGNINO, "Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, Oct. 2008
- [7] Y. BERTIN. Refroidissement des machines électriques tournantes (D 3 460). TI, Traité Génie électrique
- [8] A. BOGLIETTI, A. CAVAGNINO, D.A. STATON, "Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models," IEEE Transactions on Industry Applications; vol.44, no.4, July-Aug. 2008