



Réduction de modèles thermiques des machines électriques pour véhicules hybride et électrique

Bassel Assaad, Radouane Sgani, Edouard Negre

► To cite this version:

Bassel Assaad, Radouane Sgani, Edouard Negre. Réduction de modèles thermiques des machines électriques pour véhicules hybride et électrique. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. <hal-02983332>

HAL Id: hal-02983332

<https://hal.science/hal-02983332v1>

Submitted on 29 Oct 2020

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.



HAL Authorization

Réduction de modèles thermiques des machines électriques pour véhicules hybride et électrique

RESUME – La surveillance des températures est une fonction fondamentale pour éviter la surchauffe des zones critiques d’une machine électrique comme le bobinage du stator et/ou du rotor, les aimants permanents, les roulements, etc. La surveillance permet également d’éviter la limitation des performances d’une machine électrique intégrée dans des applications hybride et électrique. L’élaboration d’un modèle thermique complet constitue alors une étape importante. Mais un modèle thermique complet, contenant des centaines de nœuds, est lent à simuler et impossible à implémenter en temps-réel à des fins de protection des composants internes. En conséquence, la réduction de modèle est une étape essentielle pour diminuer le temps de calcul et rendre le modèle implémentable dans un calculateur embarqué à bord d’un véhicule. Dans cet article, nous proposons tout d’abord une méthode de transfert du logiciel commercial de modélisation thermique MotorCAD vers Matlab/Simulink. Ensuite, nous utilisons l’analogie thermique – électrique et nous appliquons la réduction du réseau électrique équivalent par théorie de Kirchhoff afin de réduire le modèle thermique d’une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) refroidie par eau. Enfin, nous comparons la précision des modèles aux différentes étapes de cette réduction (Modèle MotorCAD – modèle Simulink et modèle complet – modèle réduit)

Mots-clés — Modélisation thermique, MotorCAD, réduction de modèles thermiques, machine électrique, théorie de Kirchhoff.

1. INTRODUCTION

La température est toujours un facteur important de dimensionnement des machines électriques. Cette contrainte devient plus sévère pour des machines de plus en plus compactes, intégrées dans des environnements confinés et chauds (Compartiments moteurs automobiles par ex) et pour des machines de plus fortes puissances massiques.

La performance de la machine électrique est limitée par les températures maximales admissibles au niveau des composants internes tels que les isolants du bobinage et les aimants permanents. Un échauffement non maîtrisé peut conduire à une destruction des isolants et à une démagnétisation irréversible des aimants. Pour ces raisons parmi d’autres, la surveillance des températures des zones critiques de la machine est une fonction primordiale.

Etant donné la complexité de mesurer les températures internes de la machine, particulièrement des parties tournantes, il est nécessaire de développer un modèle thermique prédictif pouvant simuler le fonctionnement de la machine dans son environnement.

La modélisation des phénomènes thermiques est réalisée par la résolution de l’équation de flux de chaleur [1][2]. Le niveau de discrétisation spatiale de la machine permettant de donner des résultats thermiques précis aboutit à des équations et des paramètres qui augmentent rapidement avec la

complexité du système étudié. De plus, les différentes applications de la machine électrique imposent la nécessité d’étudier les performances de la machine sur ses différents types de service. Cela est pénalisant en termes de temps de calcul et de ressources informatiques allouées pour un modèle thermique fin.

Certaines approches de réduction de modèles thermiques se sont basées sur des méthodes mathématiques pour la réduction des modèles thermiques [3]-[7]; d’autres ont procédé à la réduction par simplification des phénomènes physiques prenant place à l’intérieur de la machine ou par des analyses de sensibilité locale et globale [9]-[14].

Dans cet article, nous proposons la réduction de modèles thermiques par la méthode du réseau électrique équivalent basée sur théorie de Kirchhoff [15]. Dans un premier temps, ayant établi un modèle thermique fin d’une machine synchrone à aimants permanents sous MotorCAD, nous réalisons un algorithme de passage de ce logiciel vers l’environnement Matlab/Simulink. Cette méthodologie de transfert est nouvelle et n’existe pas actuellement dans les fonctionnalités de MotorCAD. Dans un deuxième temps, une méthode de réduction est formulée et est appliquée sur le modèle thermique de la MSAP. Les résultats issus de cette réduction sont finalement comparés au modèle Simulink complexe. La principe de la méthodologie adoptée dans cette étude est illustrée dans la Fig. 1.

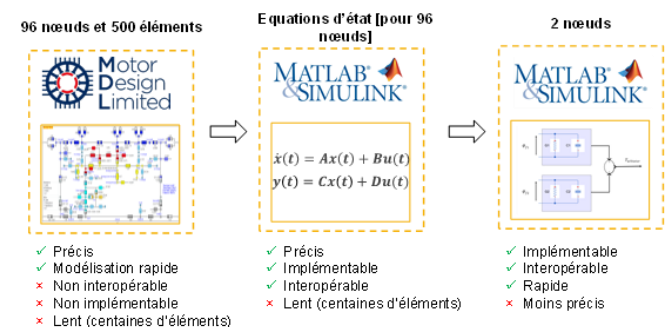


Fig 1 : Méthodologie de réduction en vue d’implémentation temps-réel

2. TRANSITION MOTORCAD MATLAB/SIMILINK

2.1. Interconnexion entre Matlab/Simulink et MotorCAD

Comme une première étape de réduction de modèle, nous traduisons le réseau nodal donné par MotorCAD sous forme une représentation d’état. Cette dernière est implémentée dans l’environnement Matlab/Simulink et constitue une première réduction de modèle. MotorCAD est un bon logiciel de modélisation thermique des machines électriques. En revanche, un modèle thermique sur MotorCAD n’est pas implémentable dans un calculateur embarqué et n’est pas interopérable avec d’autres systèmes du véhicule. Ce qui

justifie la première étape consistant à reproduire le modèle MotorCAD sous environnement Matlab/Simulink. Ce modèle thermique complet sur Matlab/Simulink servira de référence pour le test de la méthodologie de réduction adoptée dans ce travail.

L'interconnexion entre Matlab/Simulink et MotorCAD se fait via l'interface ActiveX. Il s'agit d'un ensemble de fonctions de passage entre les deux environnements. Elles permettent d'imposer des entrées au logiciel MotorCAD et de recevoir des résultats ou l'état d'une variable donnée.

2.1.1. Prise en compte des variabilité des paramètres

Les paramètres d'un modèle thermique changent en fonction des données du système. En effet, la vitesse de rotation de la machine impacte directement plusieurs paramètres du système. Entre autres, la nature d'écoulement dans l'entrefer, les coefficients d'échange convectif et les pertes au niveau des roulements. Par ailleurs, du fait que le modèle est non-linéaire, certains paramètres changent en fonction de la sortie du modèle thermique. Le modèle obtenu de MotorCAD n'est pas valable pour tous les points et toutes les conditions de fonctionnement. Pour cela, nous discrétisons la plage de fonctionnement de la machine selon les températures initiale et ambiante et la vitesse de rotation.

A partir de la visualisation de l'évolution des résistances thermiques, en fonction de plusieurs paramètres, il s'est avéré que la variation avec la vitesse est la plus sensible, suivie par la variabilité en fonction de la température. Dans l'exemple suivant, on voit la variation de la résistance thermique de convection entre l'arbre moteur et la cavité interne en fonction de la vitesse.

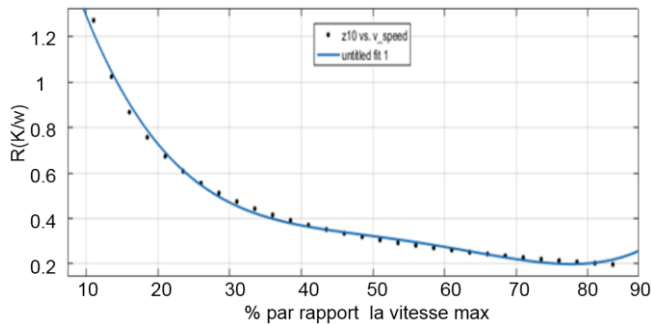


Fig 2 : Variation de la résistance thermique de convection entre l'arbre moteur et la cavité interne en fonction de la vitesse

Pratiquement, les capacités calorifiques thermiques des différents nœuds ne changent pas en fonction de la température et la vitesse, sauf pour le nœud fluide, mais cette variation de C du nœud fluide reste limitée et impacte pas peu l'évolution de la température des zones critiques de la machine. On peut donc négliger cette variation.

Suivant une discrétisation de l'espace vitesse-température (V,T) les réseaux thermiques sont représentés par leurs matrices de résistances thermiques $R(V,T)$. Celles-ci sont obtenues à l'aide des commandes ActiveX. Puis, une étude de variation est faite pour estimer la loi de variation de chaque paramètre. Dans notre cas, nous avons choisi d'approximer les courbes obtenues par la loi polynômiale de degrés 4 à une ou deux variables.

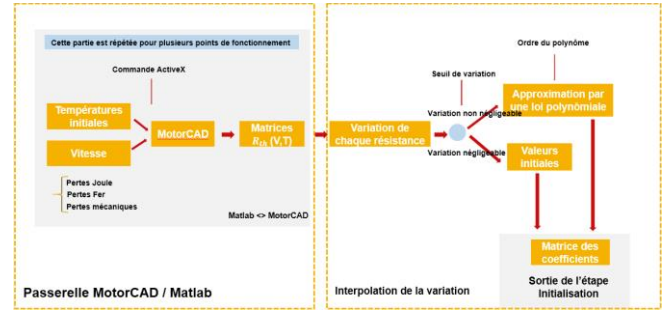


Fig 3 : Etapes de l'algorithme de l'approximation polynômiale des résistances thermiques et de l'interconnexion entre Matlab/ Simulink et MotorCAD.

La sortie de cette étape est une matrice de coefficients polynômiaux pour les résistances dont la variance est supérieure à un seuil préalablement défini. Un bloc Simulink comprend la valeur de chaque paramètre qui correspond à un point de fonctionnement donné. La matrice résistance initiale est conservée pour démarrer la simulation. Le vecteur des capacités ne change pratiquement pas en fonction du point de fonctionnement, il a un lien direct avec les caractéristiques intrinsèques des matériaux constitutifs des composants de la machine. Par conséquent, nous gardons le vecteur C donné par MotorCAD.

2.1.2. Construction du modèle complet sur Simulink

La température d'un nœud est déduite à partir d'un bilan de flux passant par ce nœud. Elle est obtenue à travers une intégration temporelle du flux résultant. Comme l'équation le montre, le flux résultant dans un nœud est la somme des flux entrants moins la somme des flux sortants, plus les pertes produites dans le volume et la masse représentés par le nœud en question.

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{1}{C_k} \left(P_k + \sum_{j=1, j \neq k}^N T_j \left(\frac{1}{R_{k-j}} \right) - T_k \sum_{j=1, j \neq k}^N \left(\frac{1}{R_{k-j}} \right) \right) \quad k=1,2,3...N$$

Avec T_k la température du nœud k , P_k C_k sont respectivement, la source de chaleur et la capacité thermique calorifique associée au nœud k et R_{k-j} les résistances thermiques entre le nœud k et les nœuds voisins. La représentation sous la forme d'équations d'état amène à définir les matrices suivantes :

Ci-dessous, nous donnons la définition de la matrice d'état, ou matrice dynamique A , et matrice d'entrée, ou de commande, B permettant l'écriture sous forme de représentation d'état de ces équations :

$$\begin{cases} \forall i \neq j : A(i,j) = \frac{1}{R_{i-j}} \\ A(i,i) = - \sum_{k \neq i}^N \frac{1}{C_i \times R_{i-k}} \end{cases} \quad \begin{cases} \forall i \neq j : B(i,j) = 0 \\ B(i,i) = 1/C_i \end{cases}$$

Puisque nous nous intéressons à l'évolution de l'ensemble des températures qui constituent la variable d'état $x(t)$, le

vecteur x est identique au vecteur y . Donc la matrice C , est une matrice identité d'ordre N . Et l'ensemble d'équations devient :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

La solution de cette équation d'état, la prise en compte de l'évolution des paramètres des matrices A et B de l'équation d'état en fonction du point de fonctionnement et l'affectation des pertes se font via le modèle Simulink schématisé comme suite.

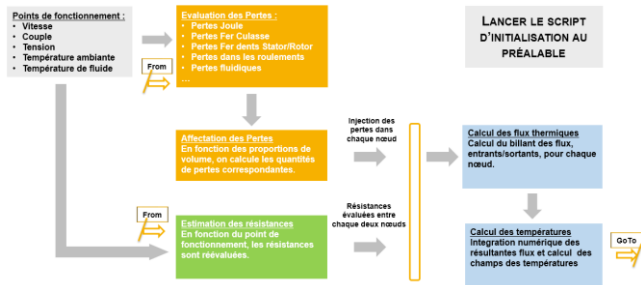


Fig 4 : Etapes de la simulation du modèle complet sur Simulink

Un rebouclage de la température des conducteurs est nécessaire pour mettre à jour les pertes Joule. La simulation du modèle réduit est très rapide par rapport à celle du modèle complet, et il remplit les spécifications imposées par l'interopérabilité avec d'autres modèles sous Simulink, comme par exemple un modèle de l'onduleur ou du système de refroidissement.

Mais l'intérêt de ce transfert vers Matlab/ Simulink est également d'obtenir un modèle réduit intégrable dans une plateforme temps réel.

2.2. Résultats du passage vers Matlab/ Simulink

L'algorithme de passage est appliqué sur une MSAP refroidie à convection forcée par un circuit d'eau. Elle est destinée à la propulsion hybride. Ainsi, elle doit répondre à des exigences multiples que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur. Son intégration dans un système embarqué automobile implique des contraintes en termes de puissance et de couple massique ; les contraintes thermiques sur ce type de dispositif sont donc fortes.

La machine est essentiellement refroidie via le flux échangé avec le nœud eau de la machine. L'eau de refroidissement est maintenue à une température constante à l'aide d'un radiateur. Par conséquent, d'un point de vue électrique, le nœud eau est caractérisé par une source de tension. Par ailleurs, une autre partie de flux s'échappe à travers la culasse par convection naturelle, mais elle reste négligeable par rapport à la convection forcée étant donné l'environnement de la machine électrique dans le véhicule.

La validation de l'algorithme de passage s'appuie sur la comparaison de la température du bobinage du stator, l'une des températures les plus critiques, donnée par les deux modèles MotorCAD et Simulink, pour la simulation d'un même cycle de fonctionnement défini dans la Fig. 5 (couple et vitesse en fonction du temps). Les résultats de simulation des deux modèles sont illustrés dans la Fig. 6 pour la

température de bobinage. Nous remarquons une bonne cohérence entre les résultats avec un écart négligeable de moins de 1%.

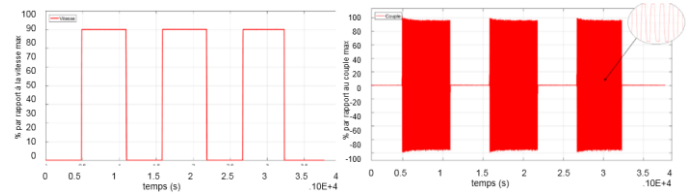


Fig 5 : Couple et vitesse du cycle de fonctionnement de test de la machine

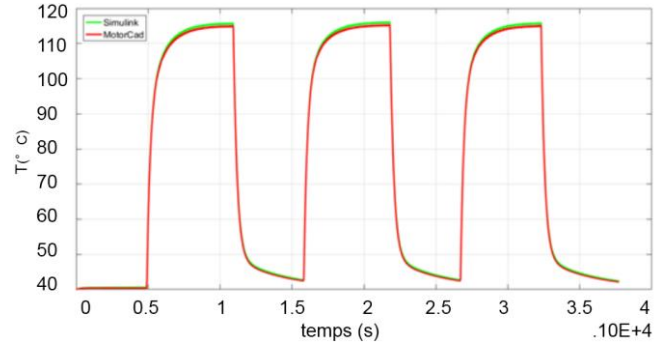


Fig 6 : Comparaison entre les modèles MotorCAD et Matlab pour la température de bobinage

2.3. Conclusion

Le passage vers l'environnement Matlab/Simulink apporte plusieurs avantages. Il permet de construire un modèle thermique fiable en référence à l'outil spécialisé à cet effet, MotorCAD, et de passer vers un environnement générique de simulation, Simulink. Le modèle thermique Simulink permet de faire des calculs d'analyse de sensibilité étant donné le temps de calcul bien inférieur à celui de MotorCAD, pour un même profil temporel. En outre, l'algorithme de passage développé dans ce travail est applicable à tous types de machines électriques, quelle que soit la technologie de refroidissement. Le modèle validé dans cette étape devient, pour la suite, la référence pour la validation du modèle réduit.

3. REDUCTION DE MODELE

3.1. Etat de l'art

La réduction d'un modèle nodal consiste à diminuer le nombre de nœuds et d'éléments. L'objectif principal de cette opération est de réduire la charge de calcul des températures du modèle afin d'intégrer le modèle dans un ordinateur embarqué à bord d'un véhicule, par exemple l'onduleur du système de traction, et de surveiller les températures critiques de la machine.

Les techniques de réduction des modèles sont nombreuses : la troncature, la réduction par minimisation de l'erreur quadratique, la réduction par analyse de sensibilité et la réduction de la topologie du modèle complet à base de l'approche de Kirchhoff (voir [13], [3], [15] et [4]) ; leurs seuls buts est d'accélérer les temps de calcul tout en conservant une bonne précision dans les résultats et de permettre l'intégration du modèle dans des plateformes de calcul temps réel.

L'avantage de la première méthode est de pouvoir visualiser, à partir d'un modèle d'ordre réduit, la température de tous les nœuds du système. En revanche, elle se base sur la représentation modale qui est difficile à calculer et à interpréter dans le domaine physique.

La deuxième méthode est efficace, elle permet aussi de conserver tout le champ de température des nœuds de départ. En revanche, la précision du modèle réduit obtenu par cette méthode repose sur la nature d'excitation appliquée au modèle complet.

La troisième méthode, réduction par analyse de sensibilité, est très riche en termes d'informations apportées. Au-delà de la réduction, l'analyse de sensibilité permet d'avoir une bonne compréhension des échanges majeurs à l'intérieur d'une machine électrique. Pourtant, la réduction par analyse de sensibilité se base principalement sur l'expérience du thermicien. La réduction se fait manuellement en interprétant les résultats de l'analyse de sensibilité.

La méthode de réduction adoptée dans ce travail est une méthode qui s'appuie sur l'analogie thermique-électrique, application des lois de Kirchhoff [15] pour la réduction de la topologie du réseau nodal.

3.2. Réduction de la topologie du modèle complet à base de l'approche de Kirchhoff

En partant de la représentation d'un modèle thermique sous la matrice des admittances, équations suivante, on peut réduire le modèle en se basant sur les lois générales d'électricité.

$$\dot{T} = -C^{-1} \cdot G \cdot T + C^{-1} \cdot P$$

Après le passage vers le domaine de Laplace, on obtient l'équation :

$$[P] = [Y] \cdot [\theta]$$

θ : vecteur des différences de températures par rapport à une température de référence ; P : vecteur des pertes ; Y : la matrice admittance définie comme suit :

$$Y = \begin{pmatrix} -\sum_{i \neq 1} G_{1i} + s \cdot C_1 & \dots & G_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{1N} & \dots & -\sum_{i \neq 1} G_{Ni} + s \cdot C_N \end{pmatrix}$$

La réduction commence par une réorganisation de la matrice Y , des vecteurs θ et P de telle façon à mettre les nœuds que nous souhaitons garder dans les premières positions. Cela se fait par des permutations simples des indices. Les nœuds choisis sont suivis également par le ou les nœuds de refroidissement, nœud eau dans le cas de la machine refroidie à l'eau et nœud huile dans le cas de la machine refroidie à injection d'huile.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(s) & Y_{12}(s) \\ Y_{21}(s) & Y_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

Les θ_1 sont les nœuds choisis, plus le nœud de fluide de refroidissement et les θ_2 sont les nœuds négligés ou supprimés

pour la réduction. Après la définition de la matrice Z comme inverse de la matrice Y , en effectuant une multiplication matricielle nous obtenons :

$$\begin{cases} \theta_1 = Z_{11} \cdot (P_1 - Y_{12} \cdot Y_{22}^{-1} \cdot P_2) \\ Z_{11} = (Y_{11} - Y_{12} \cdot Y_{22}^{-1} \cdot Y_{21})^{-1} \end{cases}$$

On définit deux grandeurs ϕ_{red} et Y_{red} :

$$\begin{aligned} \phi_{red} &= P_1 + Z_{11}^{-1} \cdot Y_{12} \cdot P_2 \\ Y_{red} &= Z_{11}^{-1} \end{aligned}$$

L'équation du système devient :

$$\phi_{red} = Y_{red}(s) \cdot \theta_1$$

Dans le processus de réduction, nous serons amenés à inverser deux matrices : la première pour calculer la matrice Z en inversant Y ($N \times N$) et la deuxième pour calculer la matrice Y_{red} en inversant la matrice Z_{11} ($N_{red} \times N_{red}$).

Les termes de la matrice Y_{red} [6] représentent des résistances en parallèle avec des capacités. Le tout est alimenté par une source de courant en parallèle. Toute l'information du modèle est contenue dans le flux imposé, la source de courant. Chaque cellule est alors un premier ordre (ou plus, en fonction de la précision souhaitée) alimenté par l'entrée flux. Les paramètres amplitude $A0$ et constante de temps τ de ces premiers ordres changent en fonction de la vitesse de rotation machine. Un calcul préalable est mis en place dans la phase d'initialisation pour calculer les différents paramètres $A0(v)$ et $\tau(v)$.

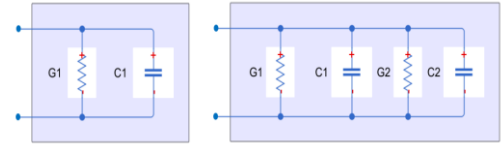


Fig 7 : Estimation en 1^{er} et 2^{ème} ordre des coefficients de Y_{red} [4]

Tous les calculs des paramètres Y_{red} et $Z_{11}^{-1} \cdot Y_{12}$ sont réalisés hors ligne, constituant une étape préparatoire du modèle réduit qui sera implémenté dans le calculateur embarqué.

3.3. Implémentation de l'algorithme de réduction

L'algorithme de réduction du modèle complet contient deux parties différentes : une partie initialisation qui est sous forme de script Matlab et une partie simulation qui est un modèle Simulink. Le modèle Simulink réduit est intégrable dans le calculateur embarqué et il satisfait les contraintes de mémoire et de puissance de calcul.

La première partie de la réduction consiste à créer le circuit réduit équivalent et prendre en compte la variation de ses paramètres en fonction des entrées de la simulation. Il convient au préalable de choisir les nœuds critiques à visualiser. Dans le contexte des moteurs électriques et pour des applications d'hybridation ou d'électrification automobile, nous sommes davantage intéressés par les températures des bobinages stator et des aimants permanents au rotor, dans le cas des MSAP. De même, dans le cas des machines à rotor bobiné, nous serons intéressés par les températures des bobinages rotor et stator.

Dans la suite de ce travail, le nombre de nœuds dans le modèle réduit est $N_r=2$.

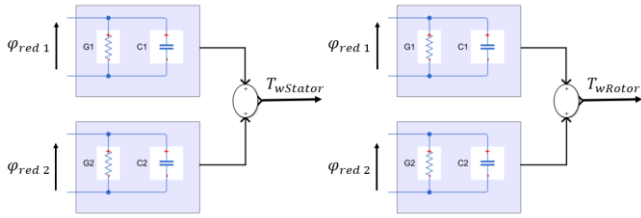


Fig 8 : Représentation électrique du modèle réduit

La méthode de réduction par utilisation des lois de Kirchhoff permet d'atteindre un rapport N_r/N très intéressant par rapport aux autres méthodes, tout en gardant un bon niveau de précision. Effectivement, cette méthode n'élimine en réalité aucun nœud. La contribution de tous les nœuds est prise en compte. Le nombre N_r de nœuds gardés désigne le nombre de nœuds que nous souhaitons visualiser. Les autres nœuds ($N-N_r$) ne sont pas écartés mais simplement réduits. Autrement dit, les flux imposés par ces $N-N_r$ nœuds sur les N_r nœuds du modèle réduit sont calculés et contenus dans le vecteur ϕ_{red} .

3.4. Résultats de la réduction

La finesse de la discrétisation par rapport à la vitesse est à réaliser en fonction de la taille mémoire qui est accordée au modèle. En effet, chaque indice de vitesse est associé à une matrice $Y_{red} \times Z_{12}$. Par conséquent, plus le modèle monte dans le degré de prise en compte de la variabilité en fonction de la vitesse, plus il demande des ressources mémoires constantes.

Les Fig. 9 et 10 montrent une comparaison de l'évolution de la température des aimants permanents et de la température au niveau de bobinage pour le même cycle utilisé pour la comparaison entre le modèle réduit et complet sous Simulink, Fig 5.

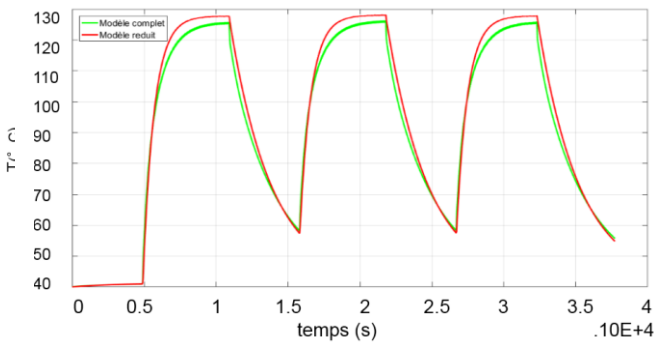


Fig. 9 : Comparaison de la température de l'aimant permanent entre le modèle réduit et complet de la machine DZ pour le cycle de fonctionnement de la fig 5

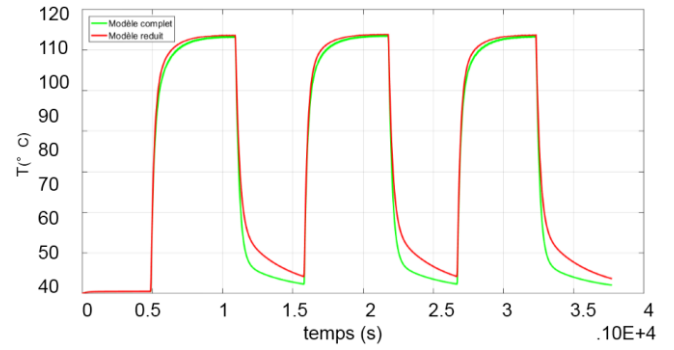


Fig 10 : Comparaison de la température du bobinage stator entre le modèle réduit et complet de la machine pour le cycle de fonctionnement de la fig 5

Les deux modèles comparés, réduit et complet, montre une bonne cohérence avec un écart maximal de 3%. Dans le contexte de surveillance des températures des machines électriques, cet écart est acceptable. Le temps de simulation est considérablement réduit, de 50s à une minute pour le modèle complet, à moins d'une seconde pour le modèle réduit, pour 5000 points de fonctionnement. Et celui-ci est intégrable dans un calculateur embarqué.

4. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une démarche méthodologique pour rendre implémentable les modèles thermiques obtenus par le logiciel MotorCAD. Cette démarche se décline en deux étapes : une méthodologie de transfert vers Matlab/ Simulink et un algorithme de réduction. Les deux algorithmes sont testés sur une machine synchrone à aimants permanents refroidie à l'eau destinée à application hybride. Les résultats ont montré que le modèle de référence MotorCAD et le modèle Simulink complexe présentent une bonne cohérence (<1% écart). Concernant la réduction, la comparaison entre le modèle complexe et le modèle réduit montre un faible écart de précision qui est acceptable. Le modèle réduit est considérablement plus léger en calcul et est implémentable dans une plateforme temps-réel embarquée.

5. REFERENCES

- [1] F. INCROPERA AND D. DEWITT, "FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER", JOHN WILEY & SONS, INC., 2011.
- [2] F. KREITH AND M. MANGLIK AND M.S. BOHN, "Principles of heat transfer, Seventh Edition", Cengage Learning Inc, 2011
- [3] P. Lagonotte, Y. Bertin et J. Saulnier, Analyse de la qualité de modèles nodaux réduits à l'aide de la méthode des quadripôles, France: Laboratoire d'études thermiques (LET), UMR CNRS 6608, ENSMA, 15 mai 1998.
- [4] A.Oulefki, Réduction de modèles thermiques par amalgame modal, Paris: HAL Id: tel-00523620, 10/1/2010.
- [5] S. Goyal et P.Barooah, A Method for Model-Reduction of Nonlinear Building Thermal Dynamics, France.
- [6] N.Jaljal, Optimisation énergétique en temps réel par modèles réduits d'une chaîne de traction hybride avec prise en compte des transitoires thermiques, Poitiers: Université de Poitiers, décembre 2007.
- [7] N. Jaljal, J. Trigeol et P. Lagonotte, Reduced Thermal Model of an Induction Machine for Real-Time Thermal Monitoring, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 10, 10/1/2008.
- [8] F. Silva, Méthodologies de réduction de modèles multiphysiques pour la conception et la commande d'une chaîne de traction électrique, Paris-Saclay: HAL Id: tel-01275878, 2015.
- [9] B. Assaad, K. El Kadri Benkara, S. Vivier, G. Friedrich and A. Michon, Thermal design optimization of electric machines using a global sensitivity analysis,. in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 6, pp. 5365-5372, Nov.-Dec. 2017.
- [10] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari and M. Pastorelli, «A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor,» Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 39, n° 14, pp. 945-952, July 2003
- [11] B. Assaad, K. El kadri Benkara, G. Friedrich, S. Vivier and A. Michon, "Reducing the complexity of thermal models for electric machines via sensitivity analyses," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 4658-4665.
- [12] B. Assaad, «Contribution à la prise en compte des aspects thermiques des machines électriques dans un environnement mécatronique,» Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, 11 décembre 2015.
- [13] O.Battaglia, J. Neveu Et A.Quemener, «Résolution d'un problème inverse par utilisation d'un modèle réduit modal,» Centre d'Energétique et de Mécanique d'Ile de France (CEMIF), Evry.
- [14] J. Puranen. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study. PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, 2006.
- [15] M. Broussely, Y. Bertin et P. Lagonotte, Reduction and optimisation of thermal models using Kirchhoff network theory, France: Laboratoire d'études thermiques, UMR CNRS, 10/1/2002.
- [16] D.A. Staton. Thermal computer aided design-advancing the revolution in compact motors. In Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International, pages 858-863, 2001.
- [17] B. Assaad;G. Friedrich; K. El kadri Benkara; S. Vivier; R. Khliissa; A. Michon, Détermination expérimentale des coefficients d'échange thermique en mode de convection naturelle: Application à une machine électrique intégrée dans son environnement, Laboratoire d'Électromécanique de Compiègne, Compiègne, France.
- [18] S. Harmand, J. Pellé, S. Poncet et I.V.Shevchuk, Review of fluid flow and convective heat transfer within rotating disk cavities with impinging jet, France: International Journal of Thermal Sciences, 23-Nov.
- [19] D.Petit et R.Pasquetti, Réduction de modèle par identification de modes dominants : application à un modèle bidimensionnel de diffusion thermique, France: Revue de Physique Appliquée, 25 (8), pp.831-842, AOÛT 1990.
- [20] P. Mellor, D. Roberts and D. Turner, «Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design,» Electric Power Applications, IEE Proceedings B, vol. 138, n° 15, pp. 205-218, Sep 1991.
- [21] D. Hamby, «A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models,» Environmental Monitoring and Assessment, vol. 32, n°12, pp. 135-154, 1994.
- [22] D. Staton and E. So, «Determination of optimal thermal parameters for brushless permanent magnet motor design,» Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, 1998.
- [23] D. Roye, R. Perret, «Définition des règles de modélisation thermique d'une machine électrique,» Revue de Physique Appliquée, 1985.
- [24] J. Lutun, «Modélisation thermique des alternateurs automobiles,» Université de Grenoble, Grenoble, 2012.
- [25] Y. BERTIN, «Refroidissement des machines électriques tournantes,» Techniques de l'Ingénieur d3460, Paris – France, 19/12/2012.