

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/259658069>

Modélisation et Surveillance Thermique d'une Machine Asynchrone on prend on compte les Effets non Linière

Conference Paper · October 2010

DOI: 10.6084/m9.figshare.7277390

CITATIONS

0

READS

3,484

4 authors, including:



Hacene Mellah

Université de Bouira

45 PUBLICATIONS 91 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Kamel Eddine Hemsas

Ferhat Abbas University of Setif

73 PUBLICATIONS 389 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Zorig Assam

Université de M'sila

7 PUBLICATIONS 4 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Free & Online International Conference on Modern Electrical Engineering and Technology (ICMEET) [View project](#)



Simulation of Winding Inter-Turn Short Circuit Fault of a DFIG by FEM [View project](#)

Modélisation et Surveillance Thermique d'une Machine Asynchrone on prend on compte les Effets no Linière

H. Mellah, K.E Hemsas, A. Zorig et H. Radjeai

Laboratoire d'Automatique de Sétif, Département d'Electrotechnique de Sétif

Email : mell_has@yahoo.fr hemsas_ke@univ-setif.dz

Résumé — *Le but de cet article est de visualisé l'effet des pertes variable qui augmentent avec la charge et les pertes constantes (pertes fer) sur le comportement thermique de moteur asynchrone. La modélisation est basée sur la théorie de dissipation de puissance, de transfert de chaleur et du taux de croissance de la température au stator et au rotor, en prenant en compte l'effet de la vitesse sur les échanges. En développement des machines électriques en général, et les moteurs asynchrones en particulier, la température limite est un facteur principal affectant l'efficacité de la conception globale. Puisque le chargement conventionnel des moteurs asynchrone est souvent très chère, l'estimation de l'augmentation de la température par des outils de modèle mathématique et d'expériences informatiques devient de plus en plus importante. Ensuite on a utilisé notre model pour faire une surveillance thermique de chaque enroulement du moteur. Les résultats trouvés sont en bonne concordance avec des résultats des articles et expérimentales.*

Mots clés : MAS, Modélisation Thermique, Pertes fer, Transfert de Chaleur, Température Limite, Surveillance Thermique.

I. INTRODUCTION

La transformation de l'énergie d'une forme en une autre au moyen d'une machine s'accompagne toujours d'une certaine perte de puissance. Cette perte se produit dans la machine elle-même et donne lieu :

- 1 un échauffement des différentes parties de la machine;
- 2 une diminution du rendement de la machine, la puissance débitée par la machine étant inférieure à la puissance qui lui est fournie.

Une étude rigoureuse du comportement thermique des machines électriques est de plus en plus nécessaire. En effet, l'augmentation des puissances massiques, l'utilisation de nouveaux modes de commande induisant des harmoniques de temps, l'adaptation des moteurs à des nouvelles applications engendre des échauffements internes plus importants. Il en est ainsi des pertes par effet Joule, mécaniques et électromagnétiques qui Constituent autant de sources thermiques [1], On cite généralement la loi d'Arrhenius qui spécifie qu'une

hausse de 10°C au delà de la température maximale de fonctionnement se traduit par une diminution de moitié de la durée de vie de la machine (fig. 2) [2] et [3].

II. PROTECTION THERMIQUE DES MACHINES DES LA PHASE DE CONCEPTION

Les concepteurs de machines, conscients de cette limitation thermique, ont profilé les carcasses de manière à favoriser les échanges avec le milieu ambiant de température plus faible. Des systèmes de ventilation avec moteur indépendant ou auto entraînés ont été ajoutés à l'extérieur de la machine et des ailettes de refroidissement ont été ajoutées au niveau de l'anneau de court-circuit des rotors à cage afin d'homogénéiser la température dans la machine, souvent totalement close (fig. 1). Généralement, la conception de ces machines, malgré l'effort fait pour les échanges thermiques, ne prend pas en compte l'échauffement supplémentaire relatif aux harmoniques présents dans les commandes liées à des convertisseurs statiques [4].

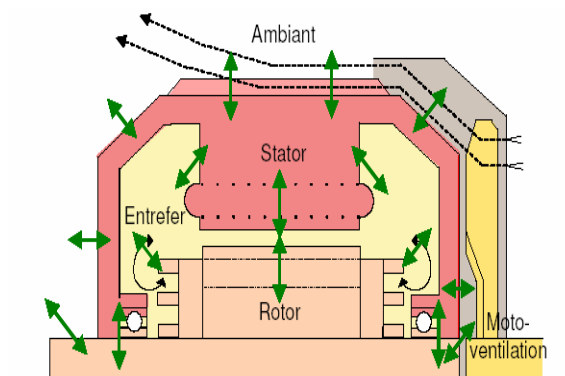


Fig. 1 Échanges thermiques dans une machine asynchrone fermée [5].

1) *Isolation dans les machines tournantes:* Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres [6]. La tâche la plus difficile et la plus importante est d'assurer la bonne tenue de l'isolation des enroulements ; pour cette raison la charge admissible d'une machine est déterminée tout d'abord par la température admissible des isolants utilisés [4], la table

suiuante montre quelque type d'isolant et leur température maximal correspondant.

TABLE 1. Classes thermiques des systèmes d'isolation [5].

Classe thermique	Y	A	E	B	F	H	200
Température maximale (°C)	90	105	130	120	155	180	200

2) Action de la température sur les matériaux isolants: on sait, que la machine est soumise aux échauffements dus aux pertes joule, aux pertes fer, aux frottements. Aussi, généralement, on s'inquiète simplement du positionnement par rapport à la température limite définie par la classe thermique d'isolation. Ceux-ci se traduisent, avant tout, par un vieillissement physique des matériaux isolants [5].

La durée de vie t_v de l'isolant, caractérisée par un seuil de dégradation normalisé, est donnée en fonction de la température absolue à laquelle ce seuil apparaît [7], [2].

$$\text{Log}(t_v) = \frac{\alpha}{T} + b \quad (1)$$

Où a et b sont des constantes du matériau

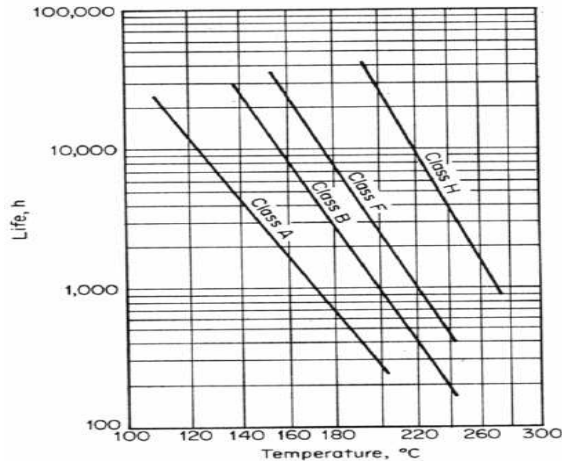


Fig. 2 Durée de vie de l'isolant en fonction de la température [2]

III. MODEL THERMIQUE DE LA MAS

La modélisation de la MAS prenant tous les comportements réels. C'est à dire sans Hypothèses simplificatrice étant très difficile ou impossible. Pour cela on supposera un modèle avec des hypothèses simplificatrices.

1) *Hypothèses de travail* : Pour mise en équation, nous supposons que : Le bobinage est réparti de manière à donner une fmm sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux, nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé, nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau et la variation de la résistance en fonction de la fréquence, le régime homopolaire est nul puisque

le neutre n'est pas relié. Enfin, la variation de la résistance en fonction de la température est linière. Nous expliquerons les grandes étapes et les résultats de la modélisation.

2) *Équations générales* : La transformation de 3Φ à 2Φ PARK par exemple est obligée pour modéliser le comportement électrique du moteur asynchrone. Le rapport linéaire supposé entre la résistance et la température doit être pris en considération pour la résistance de stator et de rotor.

$$\begin{aligned} R_1(\theta_1) &= R_{10}(1 + \alpha_1\theta_1) \\ R_2(\theta_2) &= R_{20}(1 + \alpha_2\theta_2) \end{aligned} \quad (2)$$

Ou : R_{10} et R_{20} la résistance statorique et rotorique a la température ambiante α_1 et α_2 leur coefficients thermique respectivement. Don le modèle classique de la MAS, on remplace R_1 et R_2 par $R_1(\theta_1)$, $R_2(\theta_2)$ respectivement on trouve les équations suivantes :

$$V_{ds} = R_1(\theta_1)i_{ds} + L_1 p i_{ds} + L_m p i_{dr} \quad (3)$$

$$V_{qs} = R_1(\theta_1)i_{qs} + L_1 p i_{qs} + L_m p i_{qr} \quad (4)$$

$$0 = R_2(\theta_2)i_{dr} + L_2 i_{dr} + L_2 \omega_r p i_{qr} + L_m \omega_r i_{qs} + L_m p i_{ds} \quad (5)$$

$$0 = R_2(\theta_2)i_{qr} + L_2 p i_{qr} - L_2 \omega_r p i_{dr} - L_m \omega_r i_{ds} + L_m p i_{qs} \quad (6)$$

Ce qui peut être réarrangé dans d'espace d'état sur le format suivantes [8].

$$\begin{aligned} p \delta i_{ds} &= -R_1(\theta_1)L_2 i_{ds} + L_m^2 \omega_r i_{qs} + R_2(\theta_2)L_m i_{dr} \\ &\quad + L_2 L_m \omega_r i_{qr} + L_2 V_{ds} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} p \delta i_{dr} &= R_1(\theta_1)L_m i_{ds} - L_1 L_m \omega_r i_{qs} - R_2(\theta_2)L_1 i_{dr} \\ &\quad - L_1 L_2 \omega_r i_{qr} + L_2 V_{qs} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} p \delta i_{qs} &= -L_m^2 \omega_r i_{ds} - R_1(\theta_1)L_2 i_{qs} - L_2 L_m \omega_r i_{dr} \\ &\quad + R_2(\theta_2)L_m \omega_r i_{qr} + L_2 V_{qs} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} p \delta i_{qr} &= -L_1 L_m \omega_r i_{ds} - R_1(\theta_1)L_2 i_{qs} - L_1 L_2 \omega_r i_{dr} \\ &\quad + R_2(\theta_2)L_1 i_{qr} + L_m V_{qs} \end{aligned} \quad (10)$$

Où : $\delta = L_1 L_2 - L_m^2$ pour quantifie la vitesse et les températures ce modèle électrique d'ordre quatre doit être augmenté par les modèles appropriés à des processus mécaniques et thermiques du moteur.

3) *Équation du couple et du vitesse* : Le comportement mécanique peut être modelé par :

$$T = b \omega_r + j p \omega_r + T_L \quad (11)$$

Mais le couple électromagnétique du moteur T peut être représenté dans la limite des composants courants de stator et du rotor :

$$T = p_n L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (12)$$

Par égalité de ces deux équations précédentes, l'équation de vitesse de rotor dans l'espace d'état est :

$$p \omega_r = p_n L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) - \frac{b}{j} \omega_r + \frac{T_L}{j} \quad (13)$$

4) *Equations du comportement thermiques* : le modèle thermique est dérivé en considérant de la dissipation de puissance, le transfert thermique et le taux d'élévation de la température dans le stator et le rotor. Les pertes de puissance du stator incluent des contributions des pertes cuivre et des pertes fer dépendantes de la fréquence [8].

$$pL_1 = (i_{qs}^2 i_{dr} - i_{ds}^2 i_{qr}) R_1(\theta_1) + k_{ir} \omega_r \quad (14)$$

Où : k_{ir} est la constante de perte de fer.

Les pertes de puissance de rotor sont dominées par la contribution de perte de cuivre si le moteur est actionné à une valeur basse de glissement, ainsi [8] :

$$pL_2 = (i_{dr}^2 - i_{qr}^2) R_2(\theta_2) \quad (15)$$

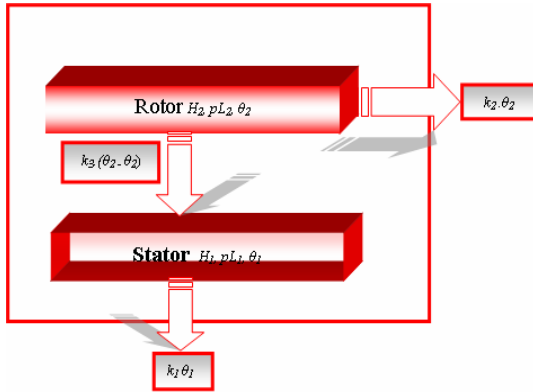


Fig. 3 la structure du modèle thermique du moteur

Où : H_1 et H_2 sont les capacités thermiques du stator et du rotor respectivement. Une représentation simple de l'écoulement de chaleur supposée est donnée dans la figure 3.

Le transfert de chaleur se fait essentiellement par conduction thermique des parties actives internes vers le milieu ambiant où la chaleur est cédée par convection et rayonnement [9], L'écoulement de chaleur de rotor est directement à l'air de refroidissement avec le coefficient de transfert thermique k_2 , ou à travers entrefer au stator avec le coefficient de transfert thermique k_3 [8].

$$pL_2 = k_2 \theta_2 + H_2 p \theta_2 + k_3 (\theta_2 - \theta_1) \quad (16)$$

L'écoulement de chaleur de stator est directement à l'air de refroidissement avec le coefficient de transfert thermique k_1 .

$$pL_1 = k_1 \theta_1 + H_1 p \theta_1 - k_3 (\theta_2 - \theta_1) \quad (17)$$

Pour un moteur asynchrone avec ventilateur monté axialement, les coefficients de transfert thermique dépendent de vitesse de rotor. Cette dépendance a été modélisée approximativement par un ensemble de rapports linéaires [8] :

$$k_1 = k_{10} (1 + k_{1\omega} \omega_r) \quad (18)$$

$$k_2 = k_{20} (1 + k_{2\omega} \omega_r) \quad (19)$$

$$k_3 = k_{30} (1 + k_{3\omega} \omega_r) \quad (20)$$

Où : k_{10} , k_{20} et k_{30} sont les coefficients de transfert de puissance thermiques à vitesse nulle. $k_{1\omega}$, $k_{2\omega}$ et $k_{3\omega}$

présentes la variation de transfert de puissance thermique avec la vitesse [8]. La Substitution des équations 15 et 16 dans les équations 14, 15, 18, 19 et 20, et le réarrangement rapportent les équations d'état thermiques pour le stator et pour le rotor respectivement :

$$p \theta_1 = \frac{R_1(\theta_1)}{H_1} (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{k_{ir}}{H_1} \omega_r^2 - \frac{k_{10} (1 + k_{1\omega} \omega_r)}{H_1} \theta_1 + \frac{k_{30} (1 + k_{3\omega} \omega_r)}{H_1} (\theta_1 - \theta_2) \quad (21)$$

$$p \theta_2 = \frac{R_2(\theta_2)}{H_2} (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) - \frac{k_{20} (1 + k_{2\omega} \omega_r)}{H_2} \theta_2 - \frac{k_{30} (1 + k_{3\omega} \omega_r)}{H_2} (\theta_1 - \theta_2) \quad (22)$$

IV. MODÈLE D'ÉTAT DE LA MACHINE ASYNCHRONE

L'ensemble des équations précédentes (7) à (10), (13), (21), et (22) nous donne le modèle suivant :

$$p \delta i_{ds} = -R_1(\theta_1) L_2 i_{ds} + L_m^2 \omega_r i_{qs} + R_2(\theta_2) L_m i_{dr} + L_2 L_m \omega_r i_{qr} + L_2 V_{ds} \quad (23)$$

$$p \delta i_{dr} = R_1(\theta_1) L_m i_{ds} - L_1 L_m \omega_r i_{qs} - R_2(\theta_2) L_1 i_{dr} - L_1 L_2 \omega_r i_{qr} + L_2 V_{ds} \quad (24)$$

$$p \delta i_{qs} = -L_m^2 \omega_r i_{ds} - R_1(\theta_1) L_2 i_{qs} - L_2 L_m \omega_r i_{dr} + R_2(\theta_2) L_m \omega_r i_{qr} + L_2 V_{qs} \quad (25)$$

$$p \delta i_{qr} = -L_1 L_m \omega_r i_{ds} - R_1(\theta_1) L_2 i_{qs} - L_1 L_2 \omega_r i_{dr} + R_2(\theta_2) L_1 i_{qr} + L_m V_{qs} \quad (26)$$

$$p \omega_r = p_n L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) - \frac{b}{j} \omega_r + \frac{T_e}{j} \quad (27)$$

$$p \theta_1 = \frac{R_1(\theta_1)}{H_1} (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{k_{ir}}{H_1} \omega_r^2 - \frac{k_{10} (1 + k_{1\omega} \omega_r)}{H_1} \theta_1 + \frac{k_{30} (1 + k_{3\omega} \omega_r)}{H_1} (\theta_1 - \theta_2) \quad (28)$$

$$p \theta_2 = \frac{R_2(\theta_2)}{H_2} (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) - \frac{k_{20} (1 + k_{2\omega} \omega_r)}{H_2} \theta_2 - \frac{k_{30} (1 + k_{3\omega} \omega_r)}{H_2} (\theta_1 - \theta_2) \quad (29)$$

Les équations '23-29' définissent le modèle électromagnétique, mécanique et thermique du moteur asynchrone.

V. RESULTAT DE SIMULATION

A. Essais en charge

1) Cas du régime temporaire ou un cycle thermique complet de la machine asynchrone (Service S2) : Ce régime est caractérisé par l'application d'une charge constante sur un intervalle du temps fini suivi d'un repos conduisant au retour à la température ambiante. Pour cela on applique un couple résistive de 5Nm, ensuite on fait un arrêt à l'instant $t=300\text{min}$ (Fig. 5).

De manière générale, en régimes transitoire et permanent, la température limite est atteinte au stator

avant le rotor (fig. 4), dans le cas des machines de faible puissance (<37 kW) [10], [11]. Au démarrage du moteur la température des enroulements statorique et rotorique est égale à la température ambiante (0C°) [12], le transitoire thermique est très lent, de plus la dynamique thermique du stator et plus rapide que celle du rotor [12] (fig. 4).

L'intervalle du temps (t=0min à t=300min) c'est un cycle d'échauffement de la MAS, par contre l'intervalle du temps (t=300min à t=1000min) c'est un cycle de refroidissement de la machine asynchrone.

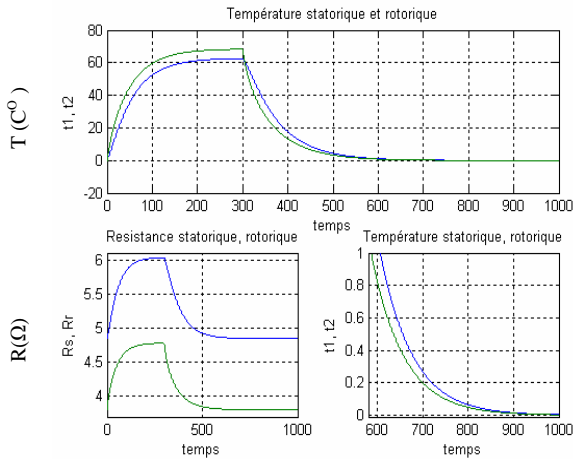


Fig. 5 température et résistance statorique et rotorique respectivement (Service S2)

2) Charge constant égal à 10Nm: L'application du couple intense donne une augmentation de valeur des résistances, des températures du stator et du rotor et garde la même allure, de plus le couple appliqué diminue la vitesse de rotation et augmente le couple électromagnétique. On remarque que la température des enroulements statorique et rotorique a la charge (10Nm) plus grand de celle de 5Nm à cause de l'appelle du courant à cause de l'augmentation du couple de charge (fig. 5, fig. 6).

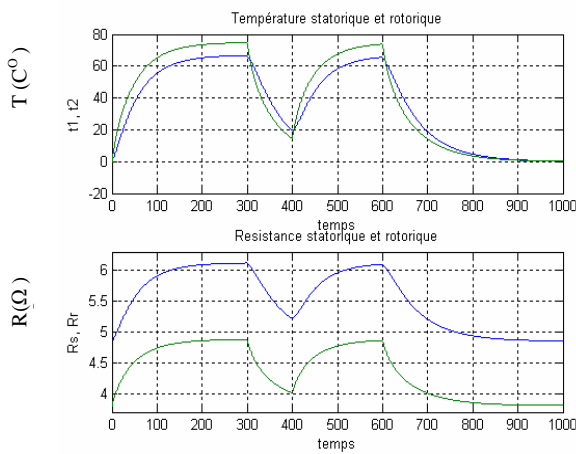


Fig. 6 température et résistance statorique et rotorique respectivement

3) Cas du régime intermittent (Service S3) : ce régime cyclique est caractérisé par l'application d'une charge constante sur des durées T_{on} séparé de repos de durée T_{of} sans retour à la température ambiante, dans notre cas on prend les valeurs $T=150min$, $T_{on}=100min$ et $T_{of}=50min$

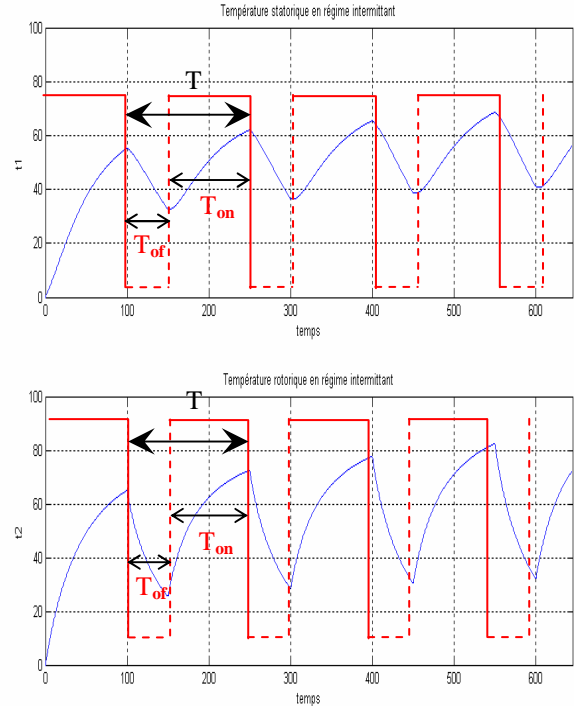


Fig. 7 Echauffement en régime intermittent.

1) Charge variable (cycle de faible durée) : On fait un démarrage de la machine asynchrone (MAS) appliquant un couple de charge variable, la figure suivante montre que la température des enroulements statorique et rotorique sensible à la variation de la charge.

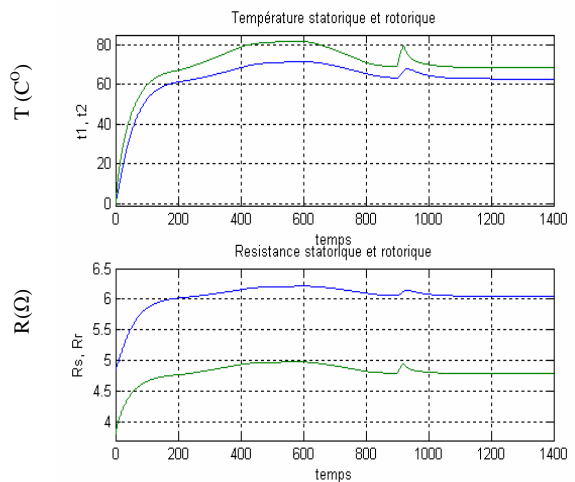


Fig. 8 température et résistance statorique et rotorique respectivement (cycle de faible durée)

B. Essai en fréquence variable

Le but capital de cette simulation est d'envisager l'influence des pertes constants (hystérésis et courant de Foucault) due à la fréquence, les résultats au-dessous montre bien cet effet.

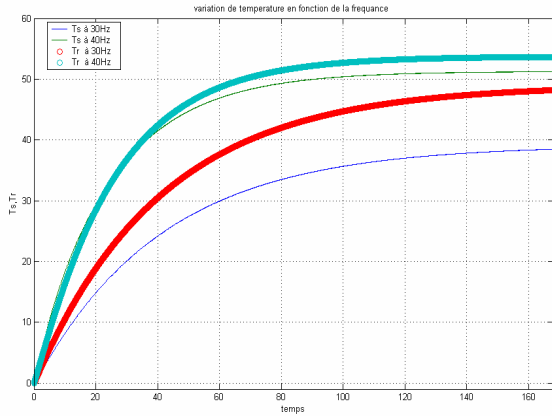


Fig. 9 température et résistance statorique et rotorique à 40&30 Hz

La température statorique et rotorique a 40Hz plus grand a celle de 30Hz.

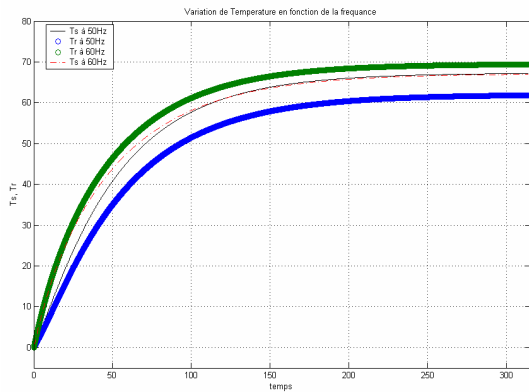


Fig. 10 température et résistance statorique et rotorique à 60&50Hz

La température statorique et rotorique à 60Hz plus grand a celle de 50Hz.

VI SURVEILLANCE THERMIQUE À BASE DE MODELE POUR EMPECHER DES DOMMAGES THERMIQUES DES MOTEURS ELECTRIQUES

L'aïdée de base de cette technique est de la référence [13] ou il fait une surveillance d'une température interne, mais D.Staton [14] montre que la répartition de la température n'est pas uniforme et aussi la température la plus critique et limitatif et celle des enroulements. Notre contribution est d'exploiter l'aïdée de Y. Huai [13] dans le modèle présenté en [8].

Nous devons déterminer pendant combien de temps le moteur peut fonctionner dans la condition donnée sans dépasser la limite spécifique de la température. Pour résoudre ces problèmes nous avons développé un

programme dans l'environnement *Matlab/Simulink* qui emploie notre modèle thermique. Dans la figure 9 nous montrons schématiquement un diagramme de Simulation employé pour surveiller le fonctionnement thermique du moteur.

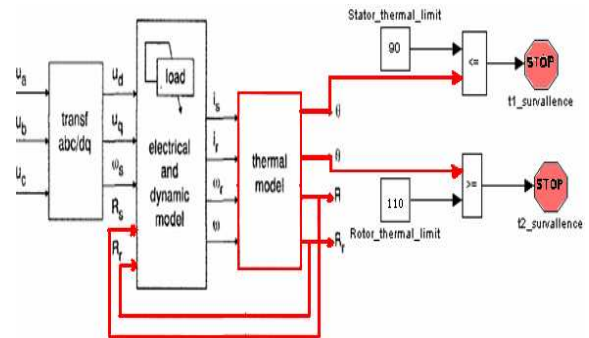
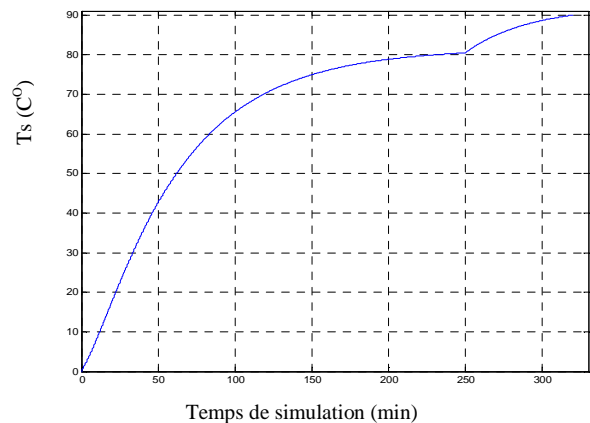
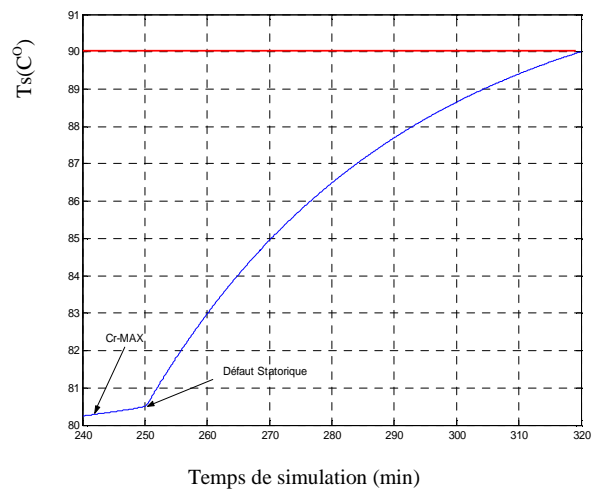


Fig. 11 diagramme de simulation employé pour surveiller le fonctionnement thermique du moteur.

On applique un couple intense et un défaut statorique pour augmenter la température statorique à la température limite T_{LS} avant que la température rotorique atteigne la limite T_{Lr} (fig. 12).



a- surveillance thermique de la température statorique

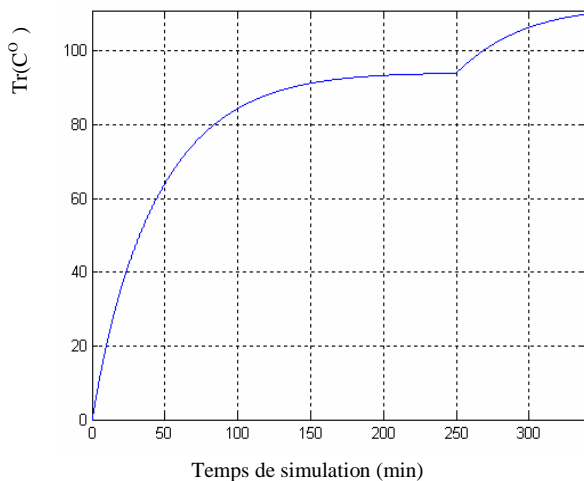


b- température statorique (ZOOM)

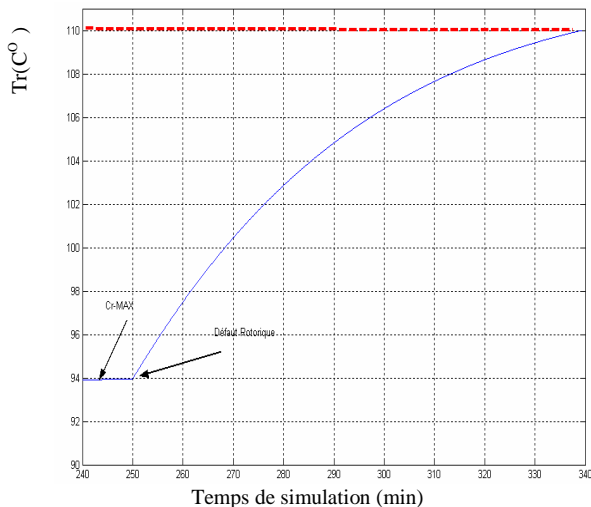
Fig. 12 surveillance thermique de la température statorique

Dans ces conditions indiquées précédemment, la température dans l'enroulement statorique frappera la température limite statorique ($T_{LS}=90^{\circ}\text{C}$) après 68min de l'opération de moteur (fig. 12).

La figure 13 montre que on a appliqué un couple intense et un défaut rotorique à l'instant $t=250\text{min}$ pour augmenter la température rotorique, et on voit que la température dans l'enroulement rotorique atteint à la température limite rotorique ($T_{RS}=110^{\circ}\text{C}$) après 90min de démarrage (fig. 13).



a- surveillance thermique de la température rotorique



b- température rotorique (ZOOM)

Fig. 13 Surveillance thermique de la température rotorique

Dans les deux cas complémentaires ($T_S=T_{LS}$ ou $T_R=T_{LR}$) le moteur déclanchera et la protection thermique des enroulements est vérifiée, donc on aura une augmentation de la durée de vie des enroulements du moteur. Ainsi il signifie que le moteur devrait être opérationnel pour que plus de 68 min évitent la surchauffe pour le stator et moins de 90 min pour le rotor.

V. CONCLUSION

Au cours de cet article, nous avons présenté une modélisation thermique d'une machine asynchrone à cage. Cette modélisation est basée sur la théorie de dissipation de puissance, de transfert de chaleur et du taux de croissance de la température au stator et au rotor, en prenant en compte l'effet de la vitesse sur les échanges, nous permet de faire des essais de simulation (service2, service3, cycle de court durée, surveillance). Les résultats trouvés, concordent bien avec les résultats expérimentaux.

Les résultats de simulation aussi montrent que la surveillance thermique de la MAS est très intéressante, de point de vue du risque de dégradation thermique diélectrique ou électrique des isolants. L'avantage de la surveillance thermique de la MAS et d'augmenter la durée de vie des isolants est donc de moteur asynchrone.

La quantification des résistances statorique et rotorique à partir des températures correspondantes donne une compensation sur leurs valeurs identifiées causées par les erreurs d'identifications. La valeur de la résistance rotorique est très intéressante à la commande vectorielle.

V. REFERENCES

- [1] R. Glises, G. Hostache, J.M.Kauffmann, "Simulation du comportement thermique en régime permanent d'un moteur asynchrone à refroidissement extérieur. Etude par éléments finis", J. Phys. III France 4 1994), No. 9, septembre 1994, pp 1723-1735.
- [2] O. Olivier, " diagnostic par reconnaissance de forme : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone", thèse de doctorat à l'école centrale de Lyon Soutenue le 17 Octobre 2006
- [3] L. BOUKEZZI, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension", thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Soutenue le Mardi 19 Juin 2007.
- [4] J.T. Boys, M.J. Miles, Empirical thermal model for inverter-driven cage induction machines, Electric Power Applications, IEE Proceedings, Volume 141, Issue 6, Nov 1994, pages : 360 – 372.
- [5] E. Foulon, surveillance thermique de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat de l'université de Nantes soutenue Le 25 juillet 2005 au Centre de Recherche et de Transfert de Technologie (CRTT), Saint Nazaire.
- [6] J.Y. Haggège, Technologie Générale, Support de cours 3eme et 4eme niveaux Génie Electrique, Option Maintenance, 2003.
- [7] S.A. Nasar, Handbook of Electric Machines, Graw-Hill Inc., Chapter 12 (by A.J.Spisak).
- [8] J. K. Al-Tayie, P. P. Acarnley, "Estimation of speed, stator temperature and rotor temperature in cage induction motor drive using the extended Kalman filter algorithm". IEE Proc. Electr- Power Appl, Vol. 144, No 5, September 1997.
- [9] S. Mezani. "Modélisation électromagnétique et thermique de la machine asynchrone", Thèse de doctorat à l'Institut National Polytechnique de Lorraine soutenue le 08 Juillet 2004
- [10] L. Sang-Bin, T.G. Habetler, R.G. Harley, D.J. Gritter, An evaluation of model-based stator resistance estimation for induction motor stator winding temperature monitoring,

Energy Conversion, IEEE Transactions on, volume 17, issue 1, Mar 2002.

- [11] L. Sang-Bin, T.G. Habetler, R.G. Harley, D.J. Gritter, A stator and rotor resistance estimation technique for conductor temperature monitoring, Industry Applications Conference, 2000, Conference Record of the 2000 IEEE, volume 1, 2000.
- [12] Z.Gao," Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines," Doctor of Philosophy in the School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology December 2006
- [13] Y a. Huai, V.N.Roderick. B, Melnik B. Paul, "Computational analysis of temperature rise phenomena in electric induction motors", sciencedirect, Technologie thermique appliquée 2003.
- [14] D. Staton, D.Hawkins and M. Popescu, Thermal Behaviour of Electrical Motors – An Analytical Approach, CWIEME 2009 Paper MDL www.motor-design.com.