

Méthodes Dédiées à la Détection des Cassures de Barres dans les Moteurs Asynchrones Triphasés à Cage

S. E. ZOUZOU, M . SAHRAOUI, A. ABOUBOU, A. MENACER, et A. DERGHAL.
Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques
Département d'Electrotechnique.
Université Mohamed KHIDER B . P. 145, Biskra, Algérie.
E- mail : ZOUZOU_S@hotmail.com

Résumé— Dans cet article, nous allons présenter quelques méthodes dédiées à la détection des cassures de barres dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Ces méthodes sont basées sur l'analyse spectrale(FFT) des signaux du couple, de la vitesse , de la puissance absorbée et du courant statorique afin de déterminer leurs composition fréquentielle, et donc de retrouver les raies associées au défaut. Pour simuler le comportement du moteur en présence de cassure de barres, un modèle mathématique basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique est adopté. Une étude analytique du défaut est décrite. Les résultats de simulation obtenus nous ont permis de montrer l'intérêt de ces techniques ainsi que la comparaison entre elles.

Mots clés—Machines Asynchrones, Cage d'Ecureuil, Diagnostics, Modélisation.

I. INTRODUCTION

Vu sa grande solidité et son faible coût , le moteur asynchrone à cage reste l'élément réussite de la plupart des équipements industriels. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,... Malgré toutes ces aptitudes, un certains nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent restreindre la durée de vie de celui-ci, en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor [1][2]. Ces pannes provoquent des pertes économiques considérables, il est donc primordial de mettre en œuvre des systèmes de surveillance afin d'éviter les arrêts inattendus.

Un mauvais fonctionnement d'un moteur asynchrone peut être due aux :

❖**Défauts dues aux roulements et aux accouplements.**

❖**Défauts rotoriques :**

- Rupture de barres.
- Cassure d'anneaux.
- Excentricité statique et/ou dynamique.
- Défaut de circuit magnétique .

❖**Défauts statoriques :**

- Court - circuit entre spires d'une même phase.
- Court- circuit entre phases.
- Coupure d'une phase.
- Défaut de circuit magnétique .

D'après la littérature, les principaux signaux utilisés pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- Courant statorique [3][4][5].
- Couple électromagnétique [6][7].
- Puissance instantanée statorique [9][10].

II. MODÈLE MATHÉMATIQUE

La modélisation nous permet de représenter la rupture de barres pour un moteur à cage. Pour cela, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplés magnétiquement, où chaque maille est constituée de deux barres et des deux portions d'anneaux qui les relient (figure1). Le nombre d'équations différentielles obtenues est égal au nombre de barres plus une (afin de prendre en considération l'un des deux anneaux) [11] [12]. La rupture d'une barre, dans notre cas, est modélisée par l'augmentation de sa résistance de 30 fois.

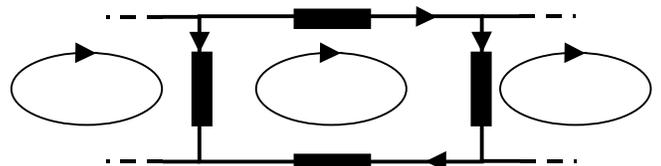


Figure 1 : Schéma équivalent d'une maille du rotor.

Sous les hypothèses classiques, le modèle mathématique de la machine est donné par l'équation de tension globale :

$$\begin{bmatrix} v_{os} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

Avec:

ibk : Courant dans la barre k.

irk : Courant dans la maille k.

ie : Courant dans l'anneau de court-circuit

iek : Courant dans une portion d'anneau

ids, iqs : Composantes biphasées du courant statorique

vds, vqs : Composantes biphasées des tensions d'alimentation

[Rtr], [Ltr] : Matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park [11] [12].

A ces équations, on ajoute les équations électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad 2$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (3)$$

$$C_e = \sqrt{\frac{3}{2}} p L_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \right\} \quad (4)$$

Avec:

Ce : Couple électromagnétique

Cr : Couple résistant

k0 : Coefficient de frottement

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

θ_r : Position du rotor par rapport au stator

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Vitesse électrique de rotation

ω_m : Vitesse mécanique de rotation

P : Nombre de paires de pôles.

$$a = p \frac{2\pi}{N_r} : \text{Angle électrique entre deux barres rotoriques.}$$

$$L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right) : \text{Inductance mutuelle maximale.}$$

Où : R : Rayon intérieur du stator
l : Longueur active du moteur
e : Entrefer

III. SIMULATION DE LA RUPTURE DE BARRES

La figure 2 représente l'évolution du couple électromagnétique et le courant statorique ainsi que la vitesse de rotation et le courant dans la barre 1, lors de la rupture d'une barre à l'instant $t=2s$, puis de deux barres à l'instant $t=3s$. On constate que la cassure d'une barre rotorique crée des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. Les amplitudes ces oscillations et ces modulations augmentent avec le nombre de barres cassées.

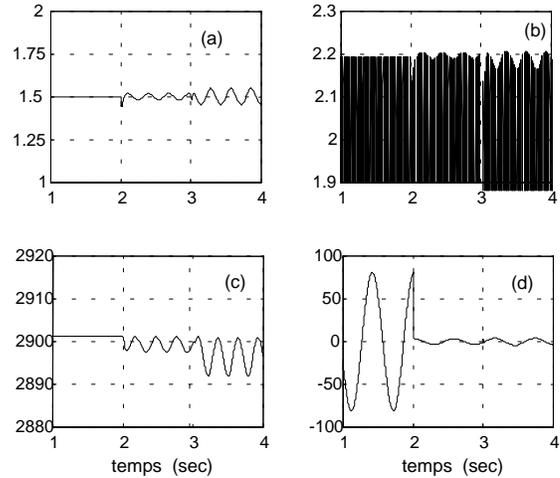


Figure 2 : Moteur avec une et deux barres cassées.

a) -Le couple électromagnétique (N.m)

b) -Le courant statorique (A)

c) - La vitesse de rotation (tr/mn)

d) -Le courant dans la barre rompue (A)

IV. ETUDE ANALYTIQUE DU DEFAUT

L'objectif de ce paragraphe, est d'étudier puis expliquer les oscillations observées sur le couple et la vitesse, la modulation de l'enveloppe du courant statorique et de la puissance instantanée, lors d'une rupture de barres. Cette étude permet de sélectionner parmi ces signaux ceux qui sont pertinents et exploitables pour le diagnostic [16].

A. EXPRESSION DES CHAMPS MAGNETIQUES TOURNANTS STATORIQUES ET ROTORIQUES

La présence d'une barre rompue dans la cage rotorique, produit une asymétrie géométrique et électromagnétique dans les circuits du rotor. Les courants ainsi induits vont créer en plus du champ tournant direct B_{rd} , un autre champ tournant inverse B_{ri} .

Dans un repère lié au stator, on aura :

❖ L'induction magnétique statorique dans un point M, situé dans l'entrefer est donnée par :

$$B_s(t) = k_s i_{as} \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_s}) \quad (5)$$

❖ Le champ tournant rotorique direct, tourne à la vitesse : $\omega_m + \omega_r = (1-g)\omega_s + g\omega_s = \omega_s$, donc

$$B_{rd}(t) = k_{rd} i_{rd} \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{rd}}) \quad (6)$$

❖ Le champ tournant rotorique inverse, tourne à la vitesse: $\omega_m - \omega_r = (1-g)\omega_s - g\omega_s = (1-2g)\omega_s$, donc

$$B_{ri}(t) = k_{ri} i_{ri} \cos((1-2g)\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{ri}}) \quad (7)$$

Avec:

φ_{B_s} : Phase du champ tournant statorique

$\varphi_{B_{rd}}$: Phase du champ tournant rotorique direct

$\varphi_{B_{ri}}$: Phase du champ tournant rotorique inverse

K_s, k_{rd}, k_{ri} : Coefficients de bobinage

B. LE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = \frac{dW_{mag}}{d\theta} \quad (8)$$

W_{mag} : est l'énergie magnétique emmagasinée, elle vaut :

$$W_{mag} = \int_V \frac{B_{total}^2}{2\mu_0} dV \quad (9)$$

avec :

$$\begin{cases} B_{total} = B_s + B_{rd} + B_{ri} \\ dV = R l e d\theta \end{cases} \quad (10)$$

d'où :

$$W_{mag} = \frac{R l e}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} (B_s + B_{rd} + B_{ri})^2 d\theta \quad (11)$$

Le couple électromagnétique dans une machine asynchrone provient de l'interaction du champ magnétique statorique avec celui rotorique. Finalement on obtient :

$$\begin{aligned} C_{e_{tot}} &= C_{e_{srd}} + C_{e_{sri}} \\ &= \frac{R l e \pi}{\mu_0} k_s i_{as} k_{rd} i_{rd} \cos(\varphi_{B_s} - \varphi_{B_{rd}}) \\ &\quad + \frac{R l e \pi}{\mu_0} k_s i_{as} k_{ri} i_{ri} \cos(2g\omega_s t + \varphi_{B_s} - \varphi_{B_{ri}}) \end{aligned} \quad (12)$$

Il est clair, que le couple électromagnétique est la somme d'une composante constante et une composante oscillatoire. Le système de courant direct au rotor est à l'origine de la composante constante. En présence du défaut en régime permanent, le système inverse de courant au rotor produit la composante oscillatoire de pulsation $2g\omega_s$.

C. LA VITESSE DE ROTATION

D'après l'équation mécanique, on négligeant le coefficient de frottement k_0 , et en supposant qu'en régime permanent $Cr = C_{e_{srd}}$, on obtient :

$$\omega_m(t) = (1-g)\omega_s - \quad (13)$$

$$\frac{1}{2gJ\omega_s} \frac{\pi R l e}{\mu_0} k_s k_{ri} i_{as} i_{ri} \sin(2g\omega_s t + \varphi_{B_s} - \varphi_{B_{ri}})$$

On peut constater que la composante oscillatoire du couple, produit une oscillation de pulsation $2g\omega_s$ dans la vitesse [13].

D. LE COURANT STATORIQUE

Sous les conditions anormales (présence d'un défaut rotorique), des harmoniques dans le couple sont générées, accompagnées par des oscillations dans la vitesse et une modulation de l'enveloppe du courant statorique [14], [15]. Une chaîne Des composantes fréquentielles de fréquence $(1 \pm 2k) f_s$, caractérisants ce type de défaut, apparaissent dans les courants statorique. Si on prend seulement les premières raies autour du fondamental, on obtient :

$$\begin{aligned} i_a(t) &= i_f \cos(\omega_s t - \alpha) + i_l \cos[(1-2g)\omega_s t - \beta_l] \\ &\quad + i_r \cos[(1+2g)\omega_s t - \beta_r] \end{aligned} \quad (14)$$

Avec:

i_f : Valeur maximale de la composante fondamentale du courant d'alimentation.

i_l : Valeur maximale de la composant inférieure $(1-2g)f_s$ du courant d'alimentation.

i_r : Valeur maximale de la composant supérieure $(1+2g)f_s$ du courant d'alimentation.

α : L'angle de phase de la composante fondamentale du courant d'alimentation.

β_l : L'angle de phase de la composante $(1-2g)f_s$

β_r : L'angle de phase de la composante $(1+2g)f_s$

E. LA PUISSANCE INSTANTANEE

Si (v_a, v_b, v_c) et (i_a, i_b, i_c) sont, respectivement, les tensions et les courants d'alimentation du moteur, la puissance instantanée totales absorbée est donc donnée par :

$$P_{sa}(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (15)$$

l'équation de la puissance sera :

$$P_{sa}(t) = \underbrace{\frac{3}{2} v_m i_f \cos(\alpha)}_{dc} + \underbrace{\frac{3}{2} v_m i_l \cos(2g\omega_s t - \beta_l) + \frac{3}{2} v_m i_r \cos(2g\omega_s t - \beta_r)}_{ac} \quad (16)$$

On remarque bien que la puissance instantanée $P_{sa}(t)$, est constituée d'une composante continue (dc), qui correspond à la valeur moyenne de la puissance active, plus une composante oscillatoire (ac) à la fréquence de modulation $2gf_s$, cette composante est très importante, elle nous permis d'obtenir des informations sur l'état de santé du moteur.

On peut résumer tous ces résultats à partir de ce qui suit :

Dans un repère fixe par rapport au stator et pour une machine avec un rotor sain et à une paire de pôles , on a le comportement suivant en régime permanent:

- Les circuits statoriques produisent un champ tournant direct à la pulsation ω_s
- Les courants induits dans les circuits rotoriques produisant un champ tournant de pulsation $g\omega_s$.

En présence d'une barre rompue dans la cage, les courants rotoriques engendrent un champ magnétique inverse de pulsation $-g\omega_s$, par conséquent, des courants à la fréquences $(1-2g)f_s$ sont induits dans les circuits statoriques, accompagnés par un couple oscillatoire de fréquence $2gf_s$ dans le couple électromagnétique. Celui-ci, provoque une oscillation dans la vitesse et donne naissance à de nouvelles composantes d'harmoniques de courant d'une fréquences $(1\pm 2g)f_s$, dans les circuits statoriques.

Les harmoniques de même fréquence $[(1-2g)f_s]$ s'ajoutent, pour donner une seule composante résultante ; tandis que les harmoniques du courant de fréquence $(1+2g)f_s$, circule dans les enroulements statoriques induisent des courants de $\pm 3gf_s$ au rotor(en présence de défaut). Par conséquent des courants de fréquence $(1\pm 4g)f_s$ sont générés par un processus identique à celui qui avait produit les courants de fréquence $(1\pm 2g)f_s$. [13][14].

D'une manière générale, la cassure de barres rotoriques engendre dans le spectre du couple, de la vitesse, de la puissance instantanée, une série d'harmoniques aux fréquences $2kgf_s$ (avec $k=1, 2, \dots$).

Pour le courant statorique une série d'harmoniques aux fréquences $(1\pm 2kg)f_s$ (avec $k=1, 2, \dots$).

V. UTILISATION DANS LE CADRE DU DIAGNOSTIC

Après avoir décrit les effets qui peuvent survenir suite à une rupture de barres, quelques méthodes de diagnostic sont donc envisageables.

La figure 3 représente le spectre du couple électromagnétique, L'expression du couple, montre que l'ondulation du couple est une grandeur périodique, dont la pulsation $2g\omega_s$ est caractéristique d'un défaut de rupture de barres.

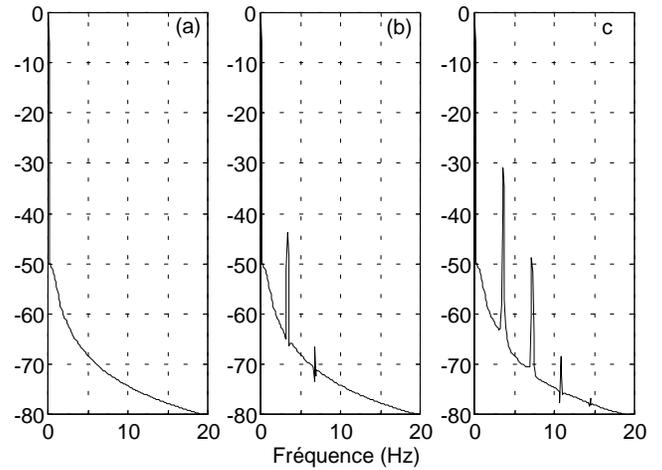


Figure 3 : Spectre de l'amplitude du couple (dB)

- a) - Etat sain
- b) - Une barre cassée
- c) - Trois barres cassées

L'expression de la vitesse montre que l'ondulation est une grandeur périodique, dont la pulsation $2g\omega_s$ est caractéristique d'un défaut de rupture de barres. Donc, on peut extraire des informations sur l'état de la machine, en surveillant les composantes de fréquence $2gf_s$ dans le spectre de la vitesse (figure 4).

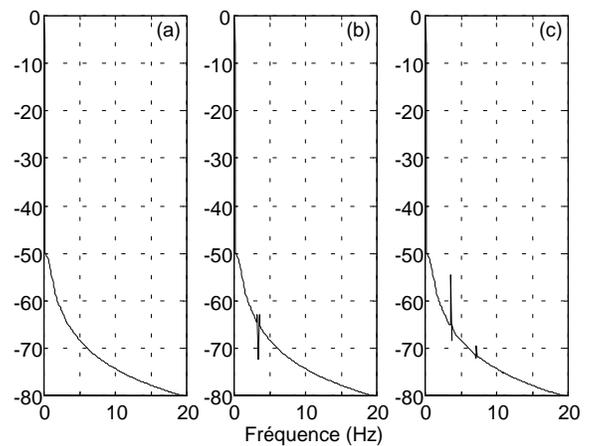


Figure 4 : Spectre de l'amplitude de la vitesse (dB)

- a) - Etat sain
- b) - Une barre cassée
- c) - Trois barres cassées

D'après la figure 5, la manifestation des raies $(1\pm 2kg)f_s$ est un signe de l'existence de cassures de barres, de plus leur amplitude est une meilleur indication du degré de sévérité du défaut.

On peut affirmer, que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus fiable pour la détection des cassures de barres.

VI. INTERPRETATION DES RESULTATS

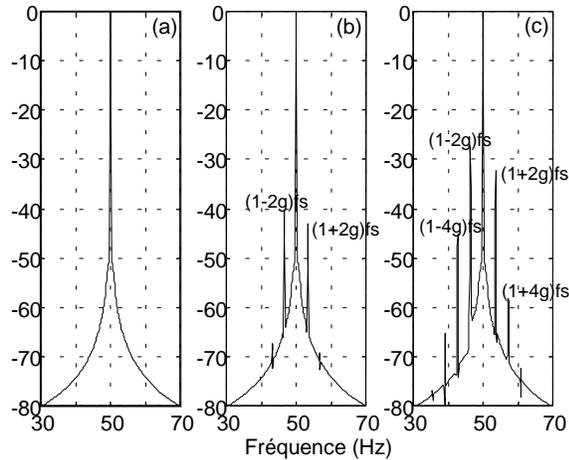


Figure 5 : Spectre de l'amplitude du courant statorique(dB)

- a) - Etat sain
- b) - Une barre cassée
- c) - Trois barres cassées

D'après la figure 6, on remarque que dans l'état sain, le spectre de la composante oscillatoire (ac) de la puissance instantanée ne contient aucune harmonique. La présence des cassures de barres est caractérisée par l'apparition des raies à la fréquence $2kgf_s$.

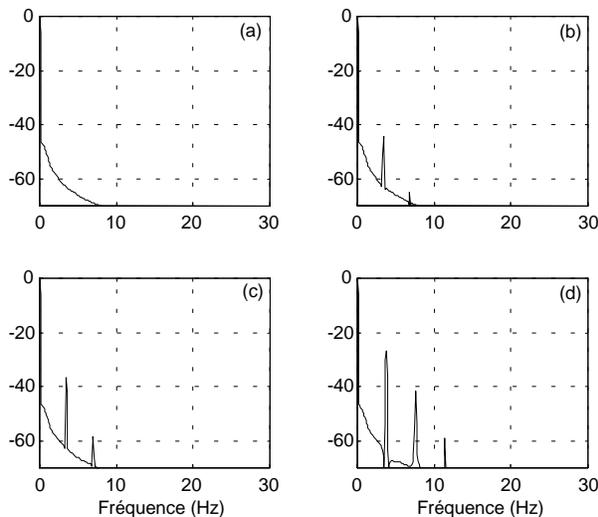


Figure 6 : Spectre de l'amplitude de la composante oscillatoire (ac) de la puissance instantanée.

- a)-Etat sain.
- b)- Une barre cassée.
- c)- Deux barres cassées.
- d)- Quatre barres cassées.

On constate que l'apparition des harmoniques de fréquences $2kgf_s$ dans le spectre du couple ou de la vitesse est un signe de présence d'une cassure de barres, en plus, l'amplitude de ces harmoniques indique le degré de sévérité de ce défaut.

On remarque aussi que le spectre du couple donne des informations plus claires et plus visibles que celles données par le spectre de la vitesse, car l'amplitude des oscillations de la vitesse est très faible à comparer à la vitesse de rotation elle-même.

Il faut remarquer qu'il est possible d'observer une composante oscillatoire dans la vitesse ou dans le couple de pulsation $2g\omega_s$ d'origine purement mécanique. Le couple et la vitesse dépendent du comportement global du dispositif mécanique constitué du moteur, du dispositif entraîné, de l'accouplement, ainsi des défauts peuvent affecter chacun de ces éléments, ceci peut conduire à un diagnostic erroné. D'autre part, le coût des capteurs limite l'utilisation de ces techniques. Les paramètres de la machine peuvent aussi influencer sur les composantes harmoniques.

On préférera donc, utiliser le courant statorique et la puissance instantanée, qui sont toujours mesurables quelque soit les conditions d'installation de la machine.

VII. CONCLUSION

Une étude analytique de défaut nous a permis d'analyser et d'expliquer l'influence des cassures de barres sur les performances du moteur. Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide est appliquée sur les signaux du couple, de la vitesse, du courant statorique et de la puissance instantanée, afin de déterminer la composition fréquentielle de ces signaux et par conséquent de trouver les harmoniques caractérisant les cassures de barres. Des tests de simulation nous ont permis de comparer entre ces techniques. Il s'est avéré que la détection des défauts est plus aisée sur le courant statorique que sur la vitesse ou sur le couple ou sur la puissance instantanée. Cette constatation s'explique en partie par le fait que le courant statorique est plus accessible et mesurable extérieurement au moteur et en plus, l'harmonique $(1-2g)f_s$ de ce courant est plus sensible à la sévérité du défaut que celle de $2gf_s$.

ANNEXE

• Paramètres du moteur

Puissance nominale	P : 450 w
Tension nominale	V : 127 v
Fréquence	f : 50 Hz
Nombre de paires de pôles	P : 1
Nombre de barres rotatives	Nr : 27
Résistance d'une phase statorique	Rs : 4.1Ω
Inductance de fuites statoriques	Lsf : 17.5 mH
Coefficient de frottement	k0 : $5 \cdot 10^{-6} \text{ Nms}^2$
Résistance d'une barre rotative	Rb : 74 μΩ
Inductance de fuites d'anneau de court-circuit	Lc : 0.33 μH
Nombre spires par phase statorique	Ns : 193
Résistance d'une anneau de court-circuit	Rc : 74 μΩ
Inductance de fuites d'une barre rotative	Lb : 0.33 μH
Moment d'inertie	J : $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ Nms}^2$

RÉFÉRENCES

- [1] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No 4, July/August 1992, pp. 921-937
- [2] Y. Han, Y. H. Song, "Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment – A Literature Survey", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003, pp. 4-13.
- [3] M. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys "Induction Motors Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques", IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol 14, N°1, Jan. 1999, pp. 14-22.
- [4] R. R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran and R. G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring". IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 6, Nov./Dec. 1995, pp. 1274-1279.
- [5] G.B. Kliman and J. Stein. "Methods of Motor Current Signature Analysis", Electric Machines and Power Systems, Vol. 20, No. 6, 1992, pp. 463-474.
- [6] J. S. Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through AirGapTorque Observation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, pp. 1016-1021, Sept./Oct. 1995.
- [7] A. Jaco, A. Makki, H. Yahoui, G. Grellet, "Modelling of Three Phase Asynchronous Motor Application to Magnetic Faults Diagnostic", ICEM 98, Istanbul, Turkey, Vol 1. 1998, pp. 443-447.
- [8] J. R. Cameron and al. "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors", IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.
- [9] A. M. Trzynadlowski, E. Ritchie, "Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors : A Case of Rotor Cage Faults," IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 47, No. 5, October 2000, pp. 1092-1099.
- [10] S. E. Legowski, A. H. M. Sadrul Ula, A. M. Trzynadlowski "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.
- [11] A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug, "Modelling Induction Motors for Diagnostic Purposes", EPE'99, 7-9 September 1999, Lausanne, Suisse, pp. 1-9.
- [12] E. Ritchie, X. Deng, T. Jokinen, "Modèle Dynamique d'un Moteur à Cage d'Ecureuil Triphasé avec Défauts du Rotor", ICEM'94, Paris France, 1994, pp. 694-698.
- [13] D. G. Dorrell, N. C. Paterson, J. F. Watson, "The Causes and Quantification of Sideband Currents for Use in Rotor Faults Detection Systems for Cage Induction Motors", ICEM'96, Vol 3, pp 414-419, Vigo Spain, 1996.
- [14] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G. B. Kliman "Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 37, No 5, Sept/Oct. 2001, pp. 1248-1255.
- [15] S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso, , " Rotor Cage Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach", Electric Machines and Power Systems, Vol. 28, 2000, pp. 289-299.
- [16] F. Filippetti , G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas " AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect", IEEE Transaction On Industry Applications, Vol. 34, No 1, Jan/Feb. 1998, pp. 98-108.