

# 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 trois méthodes dédiées à la détection des cassures de barres dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Ces méthodes sont basées sur l'analyse spectrale (par FFT) des signaux du couple, de la vitesse 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

Vue sa grande solidité et son faible coût, le moteur asynchrone à cage reste l'élément réusite 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 rotoriques :

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

### ❖ Défauts statoriques :

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

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].
- Vibration mécanique [8].
- 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 reliés entre elles électriquement et couplés magnétiquement, où chaque maille est constituée de deux barres et des deux portions d'anneaux qui les relie (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.

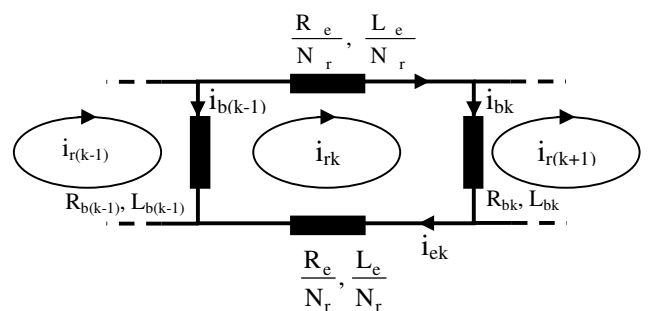


Figure 1 : Schéma équivalent d'une maille du rotor.

### III. MIS EN EQUATION

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

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

$[L_{tr}]$  et  $[R_{tr}]$  sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park, dont le repère est lié au rotor.

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

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_m &= \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \\ \frac{d}{dt} \theta_r &= \omega_r \end{aligned} \quad (2)$$

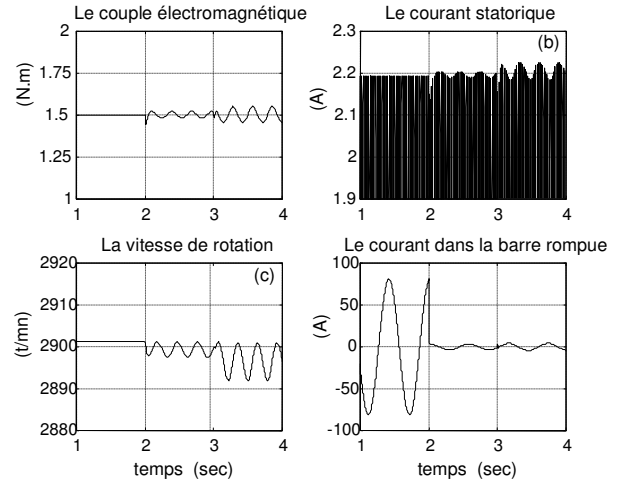
avec :

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

### IV. 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.

(b)



**Figure 2 :** Moteur avec une barre cassée puis deux barres cassées (Agrandissement)

- a) -Le couple électromagnétique
- b) -Le courant statorique
- c) - La vitesse de rotation
- d) -Le courant dans la barre rompue

### V. ETUDE ANALYTIQUE DU DEFAUT

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

#### V.1. EXPRESSION DES CHAMPS MAGNETIQUES 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 créés 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 :  $B_s(t) = k_s i_{as} \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_s})$  (5)

- ❖ Le champ tournant rotorique direct, tourne à la vitesse :  $\omega_m + \omega_r = (1-g)\omega_s + g\omega_s = \omega_s$ , donc :  $B_{rd}(t) = k_{rd} i_{rd} \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{rd}})$  (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  $B_{ri}(t) = k_{ri} i_{ri} \cos((1-2g)\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{ri}})$  (7)

## V.2 . LE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{e_{tot}} = \frac{dW_{mag}}{d\gamma} \quad (8)$$

$W_{mag}$  : est l'énergie magnétique emmagasinée dans l'entrefer,

elle vaut :

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

avec :

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

Or :

$$\begin{aligned} W_{mag} &= \frac{R l e}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} (B_s + B_{rd} + B_{ri})^2 d\theta \\ &= W_s + W_{rd} + W_{ri} + W_{srd} + W_{sri} + W_{rdri} \end{aligned} \quad (11)$$

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, le système inverse de courant au rotor produit la composante oscillatoire de pulsation  $2g\omega_s$ .

## V.3 . LA VITESSE DE ROTATION

D'après l'équation mécanique, on a :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_e - C_r - k_0 \omega_m \quad (13)$$

En négligeant le coefficient de frottement  $k_0$ , et en supposant qu'en régime permanent  $C_r = C_{e_{srd}}$ . On obtient :

$$\begin{aligned} \omega_m(t) &= (1-g)\omega_s - \\ &\quad \frac{l}{2gJ\omega_s} \frac{\pi R l e}{\mu_0} k_s k_{ri} i_{as} i_{ri} \sin(2g\omega_s t + \varphi_{B_s} - \varphi_{B_{ri}}) \end{aligned} \quad (14)$$

De l'expression (14), on peut constater que la composante oscillatoire du couple, produit une oscillation de pulsation  $2g\omega_s$  dans la vitesse [13].

## V.4 . LA FORCE ELECTROMOTRICE

La F.e.m est donnée par l'expression suivante :

$$e(t) = -\frac{d\phi_s}{dt} - \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \frac{d\phi_{ri}}{dt} \quad (15)$$

Après avoir développé l'expression (15) et en remplaçant la vitesse  $\omega_m(t)$  par son expression, on obtient :

$$\begin{aligned} e(t) &= -k_s i_{sa} R l \omega_s \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_s}) \\ &\quad - k_{rd} i_{rd} R l \omega_s \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{rd}}) \\ &\quad + k_{rd} i_{rd} R l K \cos((1-2g)\omega_s t - \theta_M - \varphi_{B_s} + \varphi_{B_{rd}} + \varphi_{B_{ri}}) \\ &\quad + k_{rd} i_{rd} R l K \cos((1+2g)\omega_s t - \theta_M - \varphi_{B_s} + \varphi_{B_{rd}} - \varphi_{B_{ri}}) \\ &\quad - k_{ri} i_{ri} R l (1-2g)\omega_s \cos((1-2g)\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_{ri}}) \\ &\quad + k_{ri} i_{ri} R l K \cos((1-4g)\omega_s t - \theta_M - \varphi_{B_s} + 2\varphi_{B_{ri}}) \\ &\quad + k_{ri} i_{ri} R l K \cos(\omega_s t - \theta_M + \varphi_{B_s} + \varphi_{B_{ri}}) \end{aligned} \quad (16)$$

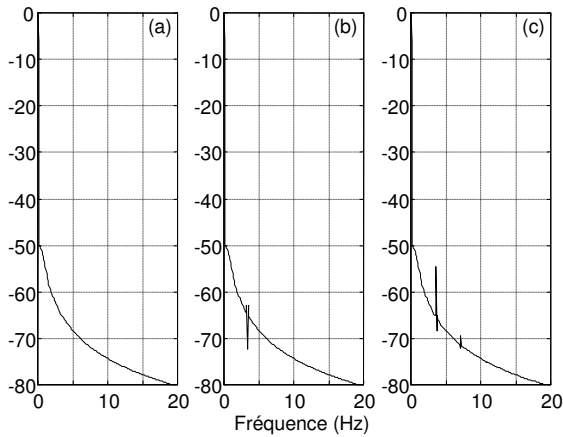
$$\text{Avec : } K = \frac{1}{4gJ\omega_s} \frac{\pi R l e}{\mu_0} k_s k_{ri} i_{sa} i_{ri} \quad (17)$$

On peut résumer tous ces résultats à partir de ce qui suit : En présence d'une barre rompue dans la cage, les courants rotoriques engendrent un champ magnétique inverse de fréquence  $-gf_s$ ; 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.

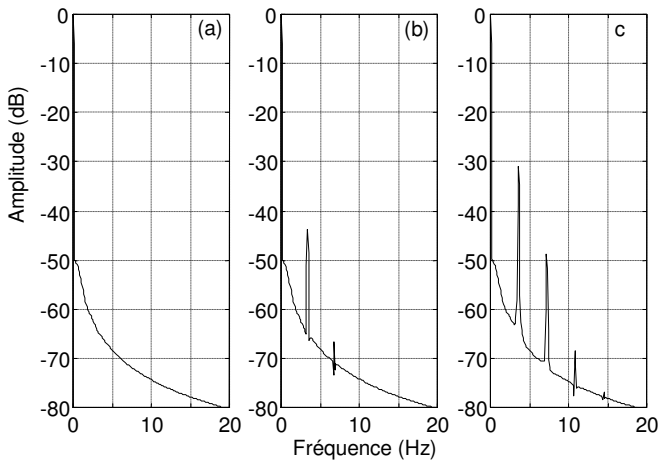
Les harmoniques de même fréquence  $[(1-2g)f_s]$  s'ajoutent, pour donner une seule composante résultante ; tandis que les harmoniques du courant de fréquence  $(1+2g)f_s$ , circule dans les enroulements statoriques induisant des courants de  $\pm 3gf_s$  au rotor(en présence de défaut). Par conséquent 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].

## VI. 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. Les expressions du couple (12) et de la vitesse (14) montrent que l'ondulation de la vitesse et du couple sont des grandeurs périodiques, 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 informatons de fréquence  $2gf_s$  dans le spectre de la vitesse ou du couple (figure 3 et figure 4).



**Figure 3 :** Amplitude du spectre de la vitesse(dB)  
 a) - état sain  
 b) - Une barre cassée  
 c)- Trois barres cassées



**Figure 4 :** Spectre du couple  
 a) - état sain  
 b) - Une barre cassée  
 c) - Trois barres cassées

On constate que l'apparition des harmoniques de fréquences  $2kg_s$  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 faibles à comparer à la vitesse de rotation elle même.

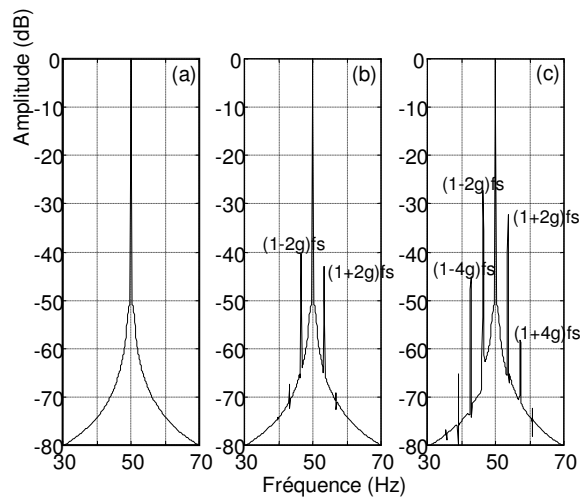
Cependant, le couple et la vitesse dépendent également du comportement global du dispositif mécanique constitué du moteur, du dispositif entraîné, de l'accouplement, ainsi que les défauts pouvant affecter chacun de ces éléments.

Il faut remarquer qu'il est possible d'observer une composante oscillatoire dans la vitesse ou dans le couple de pulsation  $2g\omega$ , d'origine purement mécanique, ceci peut conduire à un

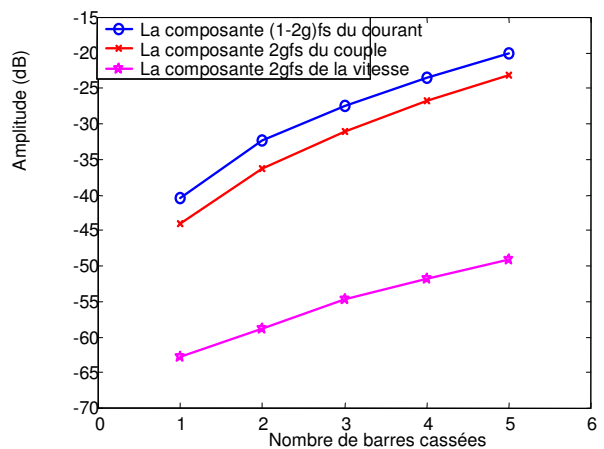
diagnostic erroné ; d'autre part, le coût des capteurs mécaniques limite l'utilisation de ces techniques. Toutes ces raisons, rendent difficile la détection des défauts par l'analyse de la vitesse ou du couple. On préférera donc utiliser le courant statorique qui est toujours mesurable quelque soit les conditions d'installation de la machine.

D'après la figure 5 nous pouvons affirmer que la manifestation des raies  $(1\pm 2k)g_s$  est un signe de l'existence de cassures de barres, de plus leur amplitude est une indication du degré de sévérité du défaut.

La figure 6, montre que l'amplitude de l'harmonique  $(1-2g)_s$  du courant est toujours supérieurs à celle de l'harmonique  $2gfs$  du couple ou de la vitesse, ceci quelque soit le nombre de barres cassées. On peut donc affirmer, que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus fiable pour la détection des cassures de barres rotoriques.



**Figure 5 :** Spectre du courant statorique  
 a) - état sain  
 b) - Une barre cassée  
 c) - Trois barres cassées



**Figure 6 :** variation de l'amplitude des raies en fonction du nombre de barres cassées

## 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 et du courant statorique, afin de déterminer la composition fréquentielle de ces signaux et par conséquent de trouver les harmoniques caractérisant les cassures de barres. Des tests de simulations 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. 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  $2gf_s$ , du couple ou de la vitesse.

## 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 rotoriques	Nr: 27
Résistance d'une phase statorique	R <sub>s</sub> : 4.1Ω
Inductance de fuites statoriques	L <sub>sf</sub> : 17.5 mH
Coefficient de frottement	k0: 5 10 <sup>-6</sup> Nms <sup>2</sup>
Résistance d'une barre rotorique	R <sub>b</sub> : 74 μΩ
Inductance de fuites d'anneau de court-circuit	L <sub>c</sub> : 0.33 μH
Nombre spires par phase statorique	Ns: 193
Résistance d'une anneau de court-circuit	R <sub>c</sub> : 74 μΩ
Inductance de fuites d'une barre rotorique	L <sub>b</sub> : 0.33 μH
Momebnt d'inertie	J: 4.5 10 <sup>-3</sup> Nms <sup>2</sup>

### • Liste des symboles

$B_s$  : Induction magnétique de l'entrefer créée par le courant statorique.

$B_{rd}$  : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système direct équivalent au rotor.

$B_{ri}$  : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système inverse équivalent au rotor.

$B_k$  : induction magnétique dans l'entrefer produit par une maille rotorique k.

$i_{bk}$  : Courant dans la barre k.

$i_{rk}$  : Courant dans la maille k.

$i_e$  : Courant dans l'anneau de court circuit

$i_{ek}$  : Courant dans une portion d'anneau

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants statoriques.

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions statoriques

$i_{ds}, i_{qs}$  : Composantes biphasées du courant statorique

$\Phi_{Bs}$  : Phase du champ tournant statorique

$\Phi_{Brd}$  : Phase du champ tournant rotorique direct

$\Phi_{Bri}$  : Phase du champ tournant rotorique inverse.

[R], [L] : Matrices globales des résistances et des inductances avant la transformation du Park.

[R<sub>tr</sub>], [L<sub>tr</sub>] : Matrices globales des résistances et des inductances après la transformation du Park.

$\theta_s$  : Position des grandeurs statoriques.

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide (de l'air).

$\theta_r$  : Position du rotor.

$\omega_s$  : Pulsation statorique

$\omega_r$  : Vitesse électrique de rotation.

## 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 Air-Gap Torque 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.
- [9] Andrzej M. Trzynadlowski, Ewen 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, Andrzej 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. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.
- [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'Ecoreuil 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] Alberto Bellini, F. Filippetti, and all, "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.