

DIAGNOSTIC DES DEFAUTS ROTORIQUES PAR L' APPROCHE DE VECTEUR DE PARK ETENDU

M. Sahraoui, S. E. Zouzou et A. Aboubou,.

Laboratoire M. S. E. Université M^{ed} KHIDER BP145, 07000 Biskra, Algérie.

s_moh78@yahoo.fr

Résumé— Dans cet article nous présentons une méthode dédiée à la détection des cassures de barres et/ou de portions d'anneaux de court-circuit dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Cette méthode est basée sur l'exploitation du contenu spectral du module de vecteur de Park du courant statorique. Le principe théorique de cette méthode est décrit. Des tests de simulations ainsi qu'une application sur des signaux expérimentaux ont montrés l'efficacité de cette méthode pour la détection de telles anomalies.

Mots clés— Vecteur de Park, Diagnostic, Défauts Rotoriques, Moteur Asynchrone.

I- INTRODUCTION

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affectés la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor [1], [2]. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, il est donc impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats afin d'éviter les arrêts imprévus.

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes Industriels. Le diagnostic fait partie de la surveillance. Il a pour objectif de détecter, d'une façon précoce, un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale de l'installation industrielle. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation à pour objet de trouver le type de défaut.

Une étude [3] faite sur les pannes de machines asynchrones, a montrée que près de 40% sont liées aux roulements, 38% sont concentrées au niveau du stator et 10% au niveau du rotor, le reste (12%) touche d'autres parties de la machine. Les ruptures des barres ou d'anneaux de court-circuit ont fait l'objet de nombreux travaux, à cause de l'inaccessibilité en fonctionnement de celui-ci.

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

La diversité des défauts et les causes possibles entraînant une panne dans la machine, facilite les erreurs sur la nature et la localisation de cette panne. Un diagnostic fiable, nécessite une bonne connaissance des mécanismes des défauts à surveiller, ainsi que leurs conséquences sur les grandeurs électromagnétiques de la machine

Le grand développement qu'ont connu les équipements et les logiciels du traitement de signal a rendu le diagnostic des défauts dans les machines électriques possible. Le principe des nouvelles techniques du diagnostic est basé sur la détermination de la composition fréquentielle des signaux issus de la machine, puis la localisation de certaines harmoniques qui caractérisent les défauts.

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet l'évolution temporelle et fréquentielle de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine.

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

- Courant statorique [5], [7], [11].
- Couple électromagnétique [8], [9].
- Vibration mécanique [10].
- Puissance instantanée statorique [4], [6], [13].

Cet article, présente l'utilisation de l'approche de vecteur de Park étendu pour la détection des cassures de barres ou de portions d'anneaux de court-circuit dans un moteur asynchrone triphasé à cage, alimenté directement du réseau. Le développement mathématique des équations représentant le principe de cette technique a été fait dans un repère lié au rotor. Ceci représente la contribution des auteurs de cet article.

II- TECHNIQUE DE MODULE DU VECTEUR DE PARK ETENDU

Les composantes (i_{ds} et i_{qs}), du vecteur de Park dans un repère lié au rotor ($\theta = \omega_s t$), peuvent être exprimées en fonction des courants des phases statoriques par :

$$\begin{cases} i_{ds} = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})] \\ i_{qs} = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \sin(\theta - \frac{4\pi}{3})] \end{cases} \quad (1)$$

Sous les conditions idéales (sans défaut), les courants statoriques i_a , i_b et i_c sont des signaux purement sinusoïdaux :

$$\begin{cases} i_a(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha) \\ i_b(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

Avec :

i_m : La valeur maximale du courant d'alimentation;
 ω_s : Pulsation d'alimentation;

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 [11], [15]. Une chaîne Des composantes fréquentielles de fréquence $(1 \pm 2k)g_s$, caractérisants ce type de défaut, apparaissent dans les courants statorique. Si on prend seulement les premières raies autour du fondamental, on obtient :

$$\begin{cases} i_a = i_f \cos(\omega_s t - \alpha) + i_1 \cos[(1 - 2g)\omega_s t - \beta_1] \\ \quad + i_r \cos[(1 + 2g)\omega_s t - \beta_r] \\ i_b = i_f \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) + i_1 \cos[(1 - 2g)\omega_s t - \beta_1 - \frac{2\pi}{3}] \\ \quad + i_r \cos[(1 + 2g)\omega_s t - \beta_r - \frac{2\pi}{3}] \\ i_c = i_f \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{4\pi}{3}) + i_1 \cos[(1 - 2g)\omega_s t - \beta_1 - \frac{4\pi}{3}] \\ \quad + i_r \cos[(1 + 2g)\omega_s t - \beta_r - \frac{4\pi}{3}] \end{cases} \quad (3)$$

La relation (3) représente toujours un système de courants équilibré, on peut donc appliquer la transformation de Park en remplaçant les courants i_a , i_b et i_c par leurs expressions dans la relation (1), on obtient :

$$\begin{cases} i_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} \left\{ \underbrace{i_f \cos[g\omega_s t - \alpha] + i_1 \cos(-g\omega_s t - \beta_1)}_{A1} \right. \\ \quad \left. + \underbrace{i_r \cos(3g\omega_s t - \beta_r)}_{A2} \right\} \\ i_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} \left\{ \underbrace{i_f \sin[g\omega_s t - \alpha] + i_1 \sin(-g\omega_s t - \beta_1)}_{A1} \right. \\ \quad \left. + \underbrace{i_r \sin(3g\omega_s t - \beta_r)}_{A2} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

Dans ces conditions, il est clair que les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} sont composées de deux parties :

- **1^{ère} partie A1** : Elle est constituée de deux composantes à la fréquence gfs , qui s'ajoutent vectoriellement.
- **2^{ème} partie A2** : Elle est constituée d'une composante à la fréquence $3gfs$.

D'une manière générale, la cassure d'une ou plusieurs barres engendre dans le spectre des courants i_{ds} et i_{qs} une série des harmoniques aux fréquences $k g f_s$, avec $k=1, 3, 5, \dots$ (Figure 1).

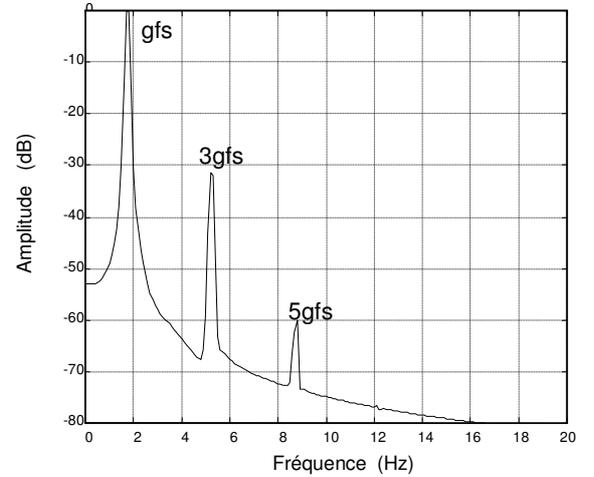


Figure 1 : Le spectre de la composante i_{ds} pour un moteur de 450w en pleine charge et avec deux barres cassées.

Le carré du module du vecteur de Park est donné par :

$$\begin{aligned} |i_{ds} + j i_{qs}|^2 &= \frac{3}{2} (i_f^2 + i_1^2 + i_r^2) + 3i_f i_1 \cos(2g\omega_s t - \alpha + \beta_1) \\ &\quad + 3i_f i_r \cos(2g\omega_s t - \alpha + \beta_r) + 3i_1 i_r \cos(4g\omega_s t + \beta_1 - \beta_r) \end{aligned} \quad (5)$$

On remarque que le module du vecteur de Park est la somme de deux parties, la première (dc), contient une composante continue générée surtout par le fondamental et la deuxième partie (ac), contient deux composantes aux fréquences $2g f_s$ et $4g f_s$.

La partie (ac) du module du vecteur de Park, offre une possibilité de détecter les anomalies dans la cage rotorique, puisque elle ne contient que des composantes liées directement au défaut.

III- TESTS DE LA SIMULATION

Le moteur utilisé pour la simulation est de 450w (voir annexe). D'après la figure 2, on constate que l'état sain est caractérisé par l'absence des raies, tandis que le défaut de barres est caractérisé par la présence des composantes à $2gf_s$ et $4gf_s$. L'amplitude de ces composantes indique le degré de sévérité de défaut.

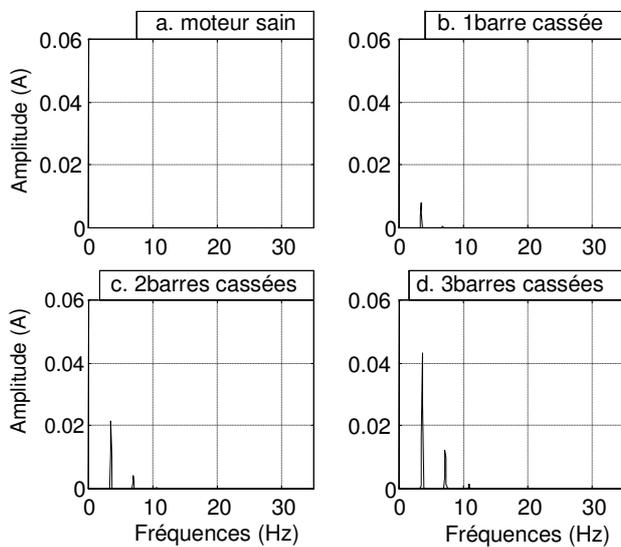


Figure 2 : Spectre de la composante oscillatoire (ac) pour un moteur en charge nominale.

La figure 3 représente le spectre de la composante (ac) du module de vecteur de Park, pendant la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit puis de deux portions. Selon les amplitudes des harmoniques $2kgf_s$, on constate que ce type de défaut est plus sévère que celui dû aux cassures de barres.

La figure 4 montre que l'amplitude de l'harmonique $2gf_s$ augmente avec le nombre de barres cassées. Ceci nous permet de la prendre comme un indicateur de degré de sévérité du défaut.

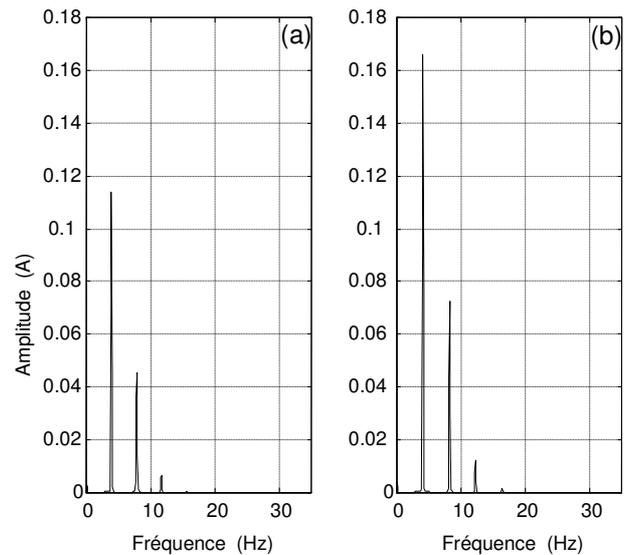


Figure 3 : Spectre de la composante oscillatoire (ac) pour un moteur :
a. avec une portion d'anneau cassée.
b. avec deux portions d'anneau cassées.

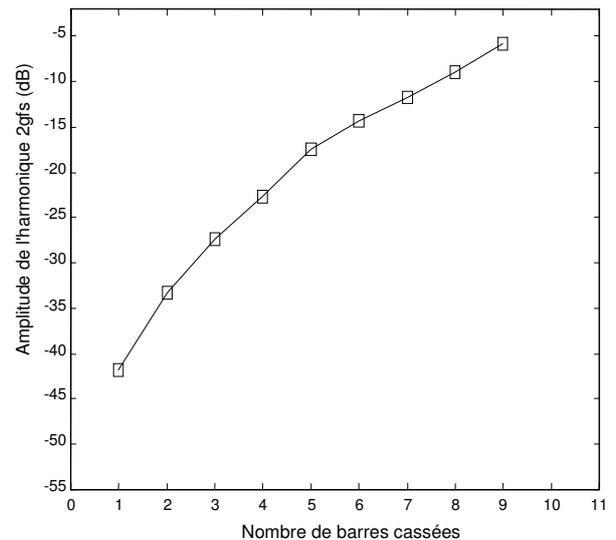


Figure 4 : Variation de l'amplitude de l'harmonique $2gf_s$ en fonction de nombre de barres rompues.

IV- TESTS EXPERIMENTAUX

Les tests expérimentaux ont été effectués sur un banc expérimental au sein du laboratoire du GREEN-UHP à Nancy. Le moteur utilisé est de : 3Kw, 230/400v, 2800tr/mn et 50Hz, fabriqué par Sew-Uscome. Les caractéristiques détaillées sont présentées dans [14]. Le moteur est couplé avec une génératrice de courant continu chargée par des résistances variables.

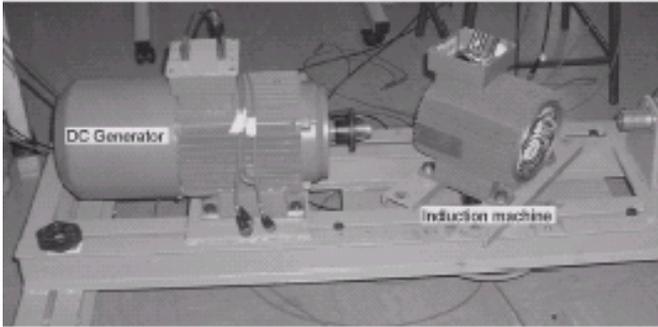


Photo 1 : Une partie du banc d'essai utilisé

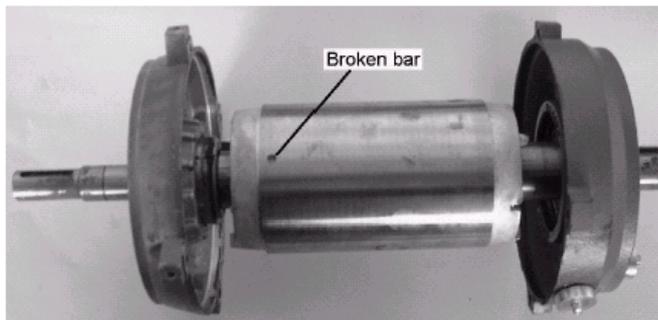


Photo 2 : Rotor avec une barre cassée

Les signaux des courants statoriques enregistrés sont utilisés pour calculer le module du vecteur de Park. La transformée de Fourier rapide (FFT) de ce dernier a été calculée et tracée en utilisant un programme implanté sous l'environnement MATLAB 5.3.

Le spectre de la figure 5 montre que même pour un moteur à l'état sain, il existe toujours des composantes fréquentielles mais de faibles amplitudes (l'amplitude la plus grande est de 0.01A), ceci est dû, d'une part, à l'asymétrie naturelle du moteur et d'autre part aux déséquilibres de tensions qui peuvent survenir au niveau de l'alimentation.

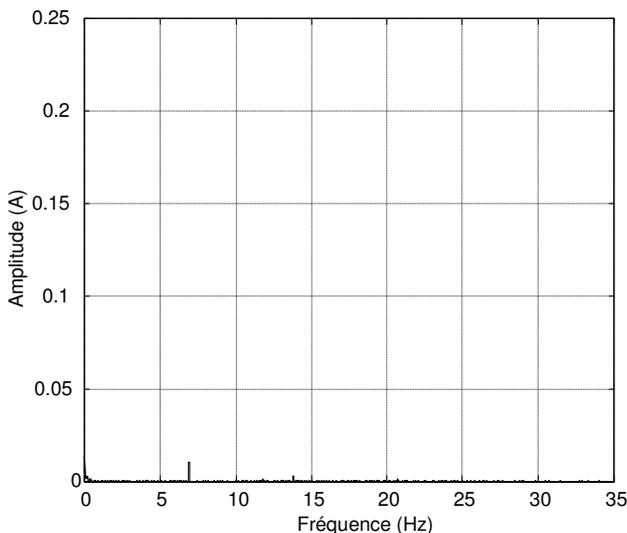


Figure 5 : spectre de la composante oscillatoire du module de vecteur de Park pour un moteur de 3kw en plein charge dans l'état sain.

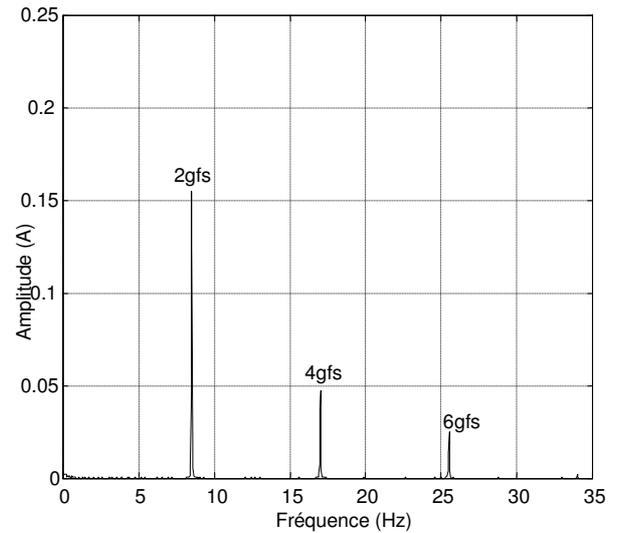


Figure 6: spectre de la composante oscillatoire du module de vecteur de Park pour un moteur de 3kw en plein charge et avec une barre cassée ($g=0.085$).

Le spectre de la figure 6 met en évidence l'apparition des harmoniques de fréquences $2kg_s$ dans le spectre du module du vecteur de Park. On remarque que l'amplitude la plus significative est celle de l'harmonique $2g_s$ (8.5Hz, 0.15A). On note qu'on peut facilement distinguer cet harmonique qui caractérise un défaut de barres. Au contraire, et lorsqu'on utilise le spectre du courant statorique dans la détection des défauts, il est parfois difficile de distinguer les raies latérales $(1\pm 2g)_s$, puisque ces raies se trouvent à une distance de $2g_s$ autour du fondamental et cette distance devient très petite à faible glissement et c'est le cas dans les moteurs de grande puissance.

V- CONCLUSION

Cet article représente une technique basée sur l'utilisation l'analyse spectrale de la composante oscillatoire du module du vecteur de Park du courant statorique pour détecter la présence des cassures de barres et/ou de portions d'anneaux de court circuit.

Il s'est avéré à travers les résultats de la simulation et ceux expérimentaux que la détection des défauts est plus facile en utilisant cette technique, puisque la composante oscillatoire du module du vecteur de Park ne contient que des harmoniques aux fréquences $2kg_s$ liées directement au défaut.

Il faut noter aussi que le niveau d'informations apportées par cette technique qui prend en considération les trois courants dans les trois phases statoriques, est plus grand que celui d'une seule phase. Ceci représente l'avantage de cette technique par rapport aux autres.

VI- ANNEXE

- Listes des symboles

i_m : La valeur maximale du courant d'alimentation;
 ω_s : Pulsation d'alimentation.
 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 $(1+2g)f_s$

P: 450 w	P: 3K w
V: 127 v	V: 380 v
f : 50 Hz	f : 50 Hz
P: 1	P: 1
Nr: 27	Nr: 28
R_s : 4.1 Ω	R_s : 2.86 Ω
k_0 : 5 10^{-6} Nms ²	k_0 : 0.001443 Nms ²
Ns: 193	Ns: 80
J: 4.5 10^{-3} Nms ²	J: 0.02397 Kg.m ²

VII- REFERENCES

- [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] : W. T. Thomson, M. Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", IEEE Industry Application Magazine, July/August 2001, pp. 26-34.
- [4] : 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.
- [5] : 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.
- [6]: 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.
- [7] : 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.
- [8] : A. Jaco, A. Makki, H. Yahoui, G. Grellet, "Modeling of Three Phase Asynchronous Motor Application to Magnetic Faults Diagnostic", ICEM 98, Istanbul, Turkey, Vol 1, 1998, pp. 443-447.
- [9] : J. S. Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.
- [10] : J. R. Cameron and al. "Vibration and Current Monitoring for Detecting Air gap Eccentricity in Large Induction Motors", IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.
- [11] : 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.
- [12] : 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.
- [13] : R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.
- [14] : A. Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, mars 2002.
- [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, pp. 289-299, 2000.