

DETECTION DES CASSURES DE BARRES ET/OU D'ANNEAUX DE COURT-CIRUCIT PAR L'APPROCHE DE VECTEUR DE PARK ETENDU

SAHRAOUI Mohamed, ZOUZOU Salah Eddine, AOUBOU Abdennacer.

Département d'Electrotechnique.

Université Mohamed KHIDER BP 145, Biskra 07000, Algérie.

sahraouimohamed78@yahoo.fr

Résumé : Dans cet article nous présenterons une méthode dédiée à la détection des cassures de barres et d'anneaux de court-circuit dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Cette méthode est basée sur l'analyse spectrale du module de vecteur de Park du courant statorique. Le principe théorique de cette méthode est décrit. Des testes de simulation ont montrés l'efficacité de cette méthode pour la détection des anomalies.

Mots clés : Machines Asynchrones, Vecteur de Park, Diagnostic.

1. Introduction

Le moteur asynchrone à cage est une composante clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son faible coût. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,... Malgré toutes ces qualités, un certains nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affectés la durée de vie de celui-ci, en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor [18][19]. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, il est donc impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance afin d'éviter les arrêts imprévus.

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

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. Chaque défaut se manifeste soit par la création des harmoniques à des fréquences liées à la nature du défaut, soit par la modification des amplitudes des harmoniques déjà présentes dans le spectre des grandeurs électromagnétiques [6][8][13]. Donc, le principe des nouvelles techniques de 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.

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][6][13].
- Couple électromagnétique [9][14].

- Vibration mécanique [10].
- Puissance instantanée statorique [4][7].

Des recherches concernant l'utilisation de l'approche de vecteur de Park [1][2], ont montrées l'efficacité de cette technique pour le diagnostic des anomalies, tels que les courts-circuits entre spires statoriques, les cassures de barres rotoriques ou les excentricités

Le développement des équations mathématiques est fait dans un repère lié au rotor. Ceci représente la contribution des auteurs de cet article.

2. L'approche de vecteur de Park étendu

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

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

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 [3][2]. Des composantes fréquentielles $(1 \pm 2g)f_s$, caractérisants ce type de défaut, apparaissent dans le spectre du courant statorique. Donc, les expressions des courants statoriques deviennent :

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

avec :

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

i_1 : 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_1 : L'angle de phase de la composante $(1-2g)f_s$

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

En remplaçant les courants i_a , i_b et i_c par leurs expressions dans la relation (1), on obtient :

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

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 grandeurs i_{ds} et i_{qs} une série des harmoniques aux fréquences $k g f_s$, avec $k=1, 3, 5, \dots$ (Figure 1).

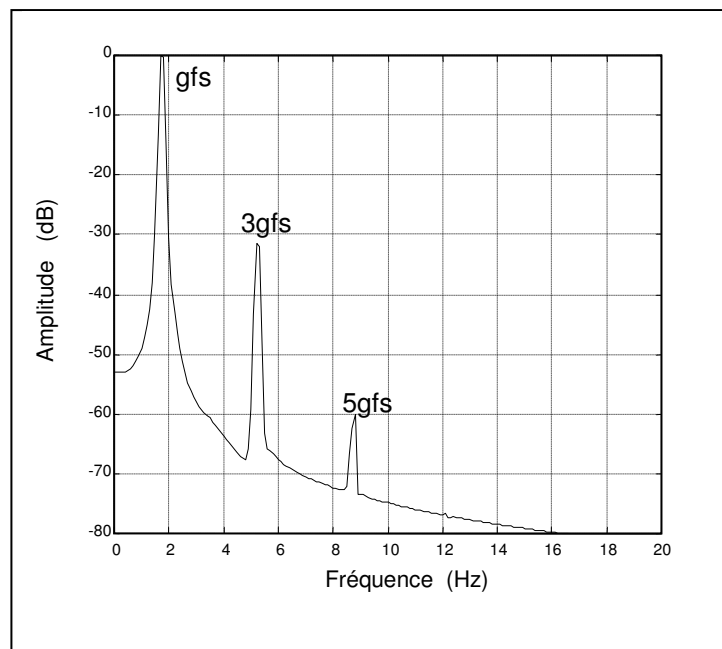


Figure 1 : Le spectre de la composante i_{ds} pour un moteur en charge avec deux barres cassées ($g=3.5\%$).

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

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

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 $2gf_s$ et $4gf_s$.

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. En plus, le niveau des informations apporté par cette méthode, qui tient compte des courants dans les trois phases, est plus grand que celui apporté par une seule phase. Ceci représente l'avantage de cette technique par rapport aux autres.

La figure 2, montre le spectre de la composante oscillatoire (ac) pour l'état sain, et pour une barre cassée, puis deux barres cassées et enfin pour trois barres cassées, avec une charge nominale (1.5 Nm). Ces figures mettent en évidence la présence des composantes $2gf_s$ et $4gf_s$ qui caractérisent un défaut de barres. L'amplitude de ces composantes indique le degré de sévérité de défaut.

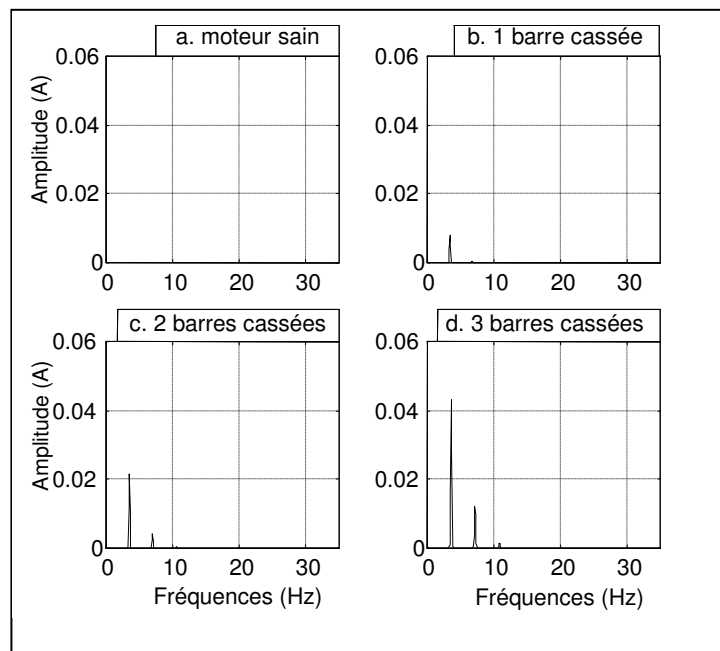


Figure 2 : Spectre de la composante oscillatoire (ac) pour un moteur en charge nominale.

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.

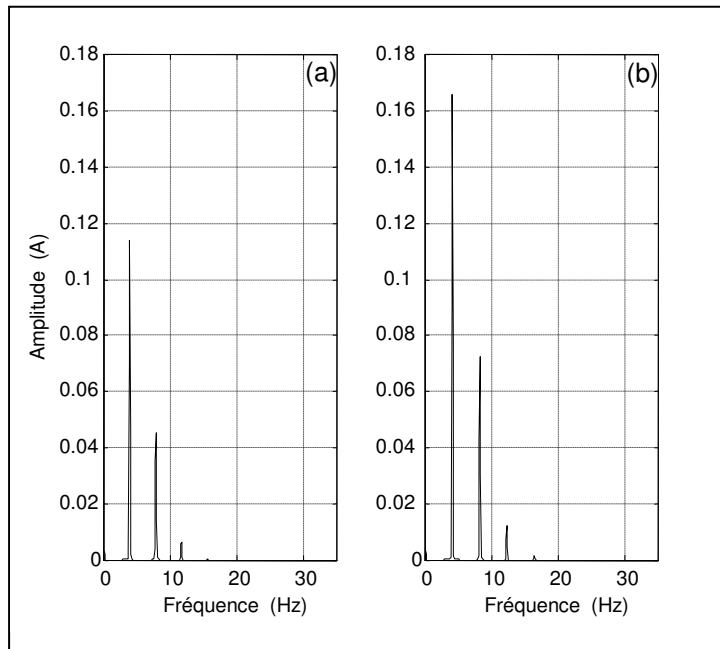


Figure 3 : Spectre de la composante oscillatoire (ac) pour un moteur :
a. avec une portion d'anneau cassée. **b.** avec deux portions d'anneau cassées.

M. A. Cruz [2], a défini un facteur de sévérité normalisé :

$$\text{facteur de sévérité normalisé} = \frac{\text{Amplitude de la composante } 2\text{gs}}{\text{Amplitude de la composante continue (dc)}}$$

La figure 4 montre que le facteur de sévérité normalisé augmente avec le nombre de barres cassées, ce qui le rend un bon indicateur des conditions de fonctionnement la machine.

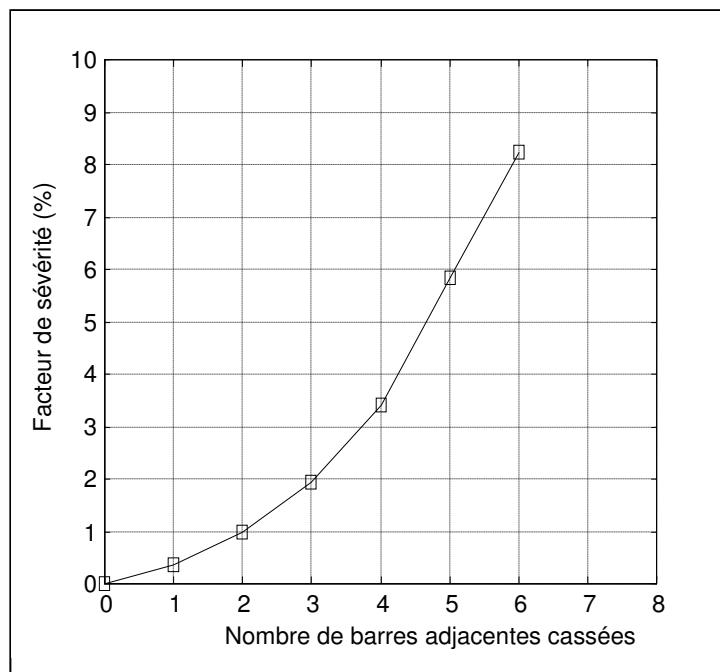


Figure 4 : Variation du facteur de sévérité normalisé en fonction du nombre de barres cassées.

3. Conclusion

Cet article présente une nouvelle approche qui utilise l'analyse spectrale du module de vecteur de Park pour détecter la présence des cassures de barres ou de portions d'anneaux de court circuit. Le développement mathématique dans un repère lié au rotor conduit aux mêmes résultats obtenus dans [2]. Il faut noter que la prise en compte des courants dans les trois phases statoriques apporte plus d'informations pour le procédé du diagnostic. Ceci représente l'avantage de cette technique par rapport aux autres.

4. Références

- [1] : A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz, J. F. S. Carvalho et E. S. Saraiva, "Rotor Cage Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors by Park's Vector Approach", Rec. 1995 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. Orlando, Florida, Vol. I, pp. 642-646.
- [2] : 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.
- [3] : 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.
- [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] : 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.
- [6] : 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.
- [7]: 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.
- [8] : W. T. Thomson, M. Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", IEEE Industry Application Magazine, July/August 2001, pp. 26-34.
- [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] : 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.

- [12]: 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.
- [13] : 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.
- [14] : 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