

DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE

Partie II : Méthodes dédiées a la détection des cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphasés a cage

M. SAHRAOUI, S. E. ZOZOU, A. MENACER, A. ABOUBOU ET A. DERGHAL.

Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques - Département d'Electrotechnique.

Université Mohamed KHIDER BP 145, Biskra. Algérie.

E-Mail : s_moh78@yahoo.fr

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. Ce travail est la continuité naturelle de celui de la partie I, dans laquelle on a présenté un modèle multi-enroulement décrivant le comportement du moteur en présence de cassure de barres. Une étude analytique du défaut est décrite. Les résultats de la 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.

1 INTRODUCTION

Vu 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 certain 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 [18][19]. 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.

La diversité des défauts et les causes possibles entraînant un 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 des 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], [6], [20].
- Couple électromagnétique [15], [21].
- Vibration mécanique [17].
- Puissance instantanée statorique [4][10].

2 MODÈLE MATHÉMATIQUE

La modélisation du moteur à cage nous permet de représenter la rupture des barres rotorique ; 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 de deux portions d'anneaux qui les reliait (figure1). (Voir partie I)

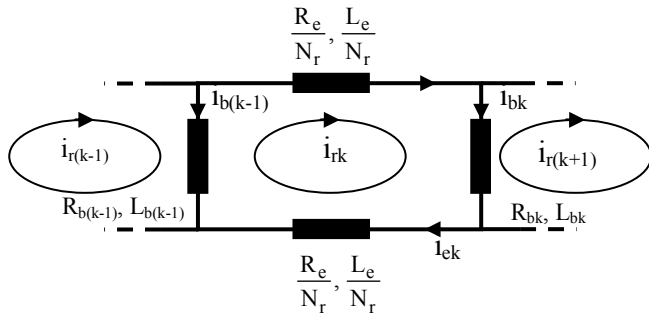


Figure 1 : Schéma équivalent d'une maille du rotor.

3 SIMULATION DE LA RUPTURE DE BARRES

D'après la figure 2, on constate que la présence d'une barre rompue crée des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. Les amplitudes des oscillations et modulations augmentent avec le nombre de barres cassées.

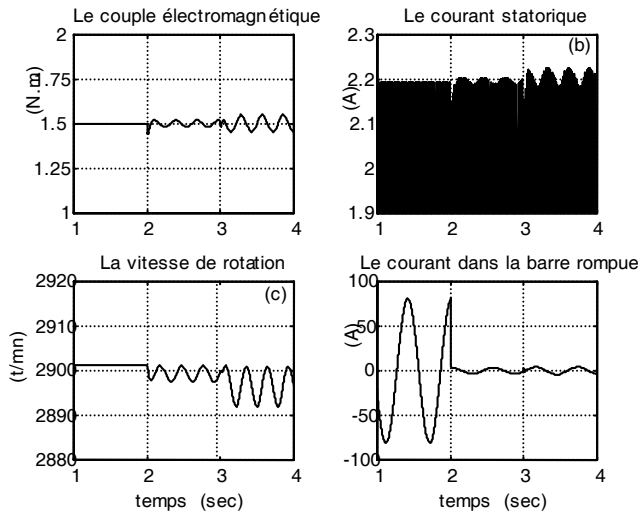


Figure 2 : Moteur avec une barre cassée puis deux barres cassées (Agrandissement)

4 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.

4.1 Expression des Champs Magnétiques 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)

4.2 Le couple électromagnétique

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 directe 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 $2g\omega_s$.

4.3 La Vitesse de Rotation

D'après l'équation mécanique, on a :

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

En négligeant le coefficient de frottement k_0 , et en supposant qu'en régime permanent $Cr = Ce_{\text{std}}$. On obtient :

$$\omega_m(t) = (1-g)\omega_s - \frac{1}{2gJ\omega_s} \frac{\pi R l e}{\mu_0} k_s k_{ri} i_{sa} i_{ri} \sin(2g\omega_s t + \varphi_{B_s} - \varphi_{B_r}) \quad (14)$$

De l'expression (14), on peut constater que la composante oscillatoire du couple, produit une oscillation de pulsation $2g\omega_s$ dans la vitesse [3].

4.4 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 :

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

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 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 $(1\pm 2g)f_s$. [3][9].

5 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 composantes de fréquence $2gf_s$ dans le spectre de la vitesse ou du couple (figure.3 et figure.4).

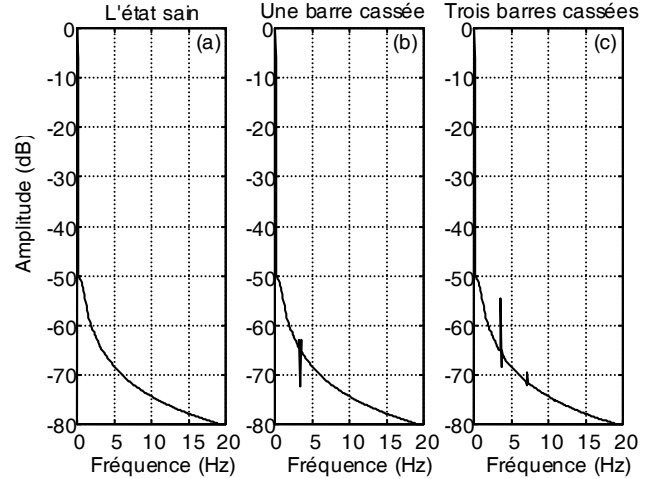


Figure 3 : Spectre de la vitesse

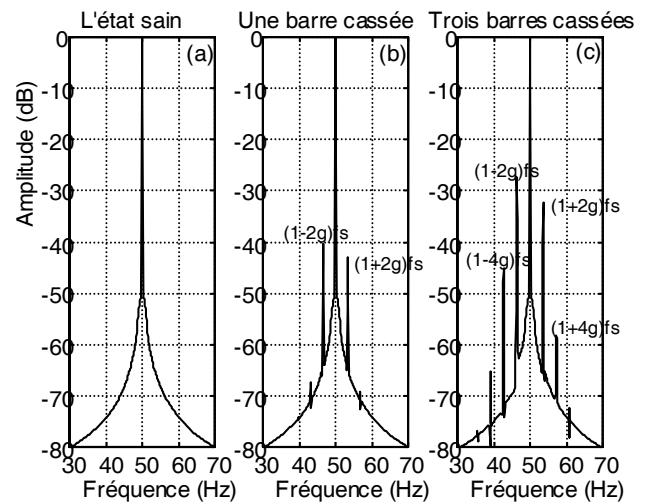


Figure 4 : Spectre du couple

On constate que l'apparition des harmoniques de fréquences $2kf_s$ 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 $2g\omega_s$, 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 $(1\pm 2k) f_s$ 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 $(1-2g) f_s$ du courant est toujours supérieurs à celle de l'harmonique $2gf_s$ 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.

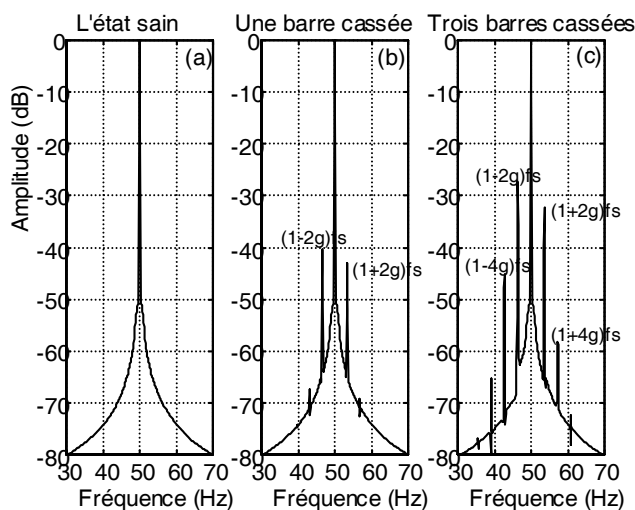


Figure 5 : Spectre du courant statorique

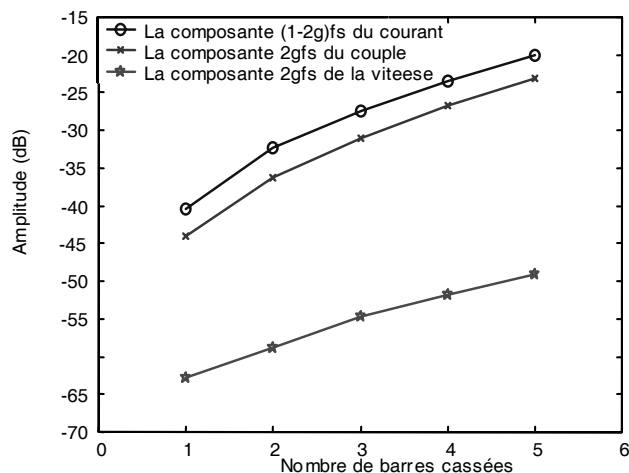


Figure 6 : Variation de l'amplitude des raies en fonction du nombre de barres cassées

6 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 testes de simulations nous ont permis de comparer entres 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

- P: 450 w
- V: 127 v
- f: 50 Hz
- P: 1
- Nr: 27
- Rs : 4.1Ω
- Lsf : 17.5 mH
- k0: $5 \cdot 10^{-6} \text{ Nms}^2$
- R_b: 74 μΩ
- L_c: 0.33 μH
- Ns: 193
- R_c: 74 μΩ
- L_b: 0.33 μH
- J: $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ Nms}^2$

RÉFÉRENCES

- [1] A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug, "Modelling Induction Motors for Diagnostic Purposes", EPE'99, 7-9 September 1999, 233.pdf, Lausanne, Suisse, pp. 1-9.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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, "Modelling of Three Phase Asynchronous Motor Application to Magnetic Faults Diagnostic", ICEM 98, Istanbul, Turkey, Vol 1. 1998, pp. 443-447.