



Etude de l'effet de la position et du nombre de barres rotoriques défaillantes d'un moteur asynchrone sur le spectre de son courant statorique

S. BELHAMDI^(1,2), A. BENAKCHA⁽¹⁾, A. MENACER⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratoire LGEB, Université de Biskra, B. P 145 Biskra

⁽²⁾Département d'électrotechniques M'sila

Fax 035557717

ss.saad@ caramail.com

Reçu le : 15/05/2006

Reçu sous forme révisée le : 03/04/2007

Accepté le : 09/10/2007

RÉSUMÉ. Le moteur asynchrone présente un intérêt certain dans des applications de fortes puissances nécessitant la variation de vitesse. Cependant, il n'est, comme toute autre machine électrique, pas à l'abri d'un dysfonctionnement par suite d'une défaillance de nature électrique ou mécanique. Parmi ces défauts rotoriques, on peut citer une fissure ou une cassure totale de barre, une rupture d'anneau de court circuit, une excentricité de l'axe du rotor...

Dans cet article, on utilise une technique basée sur l'analyse spectrale du courant statorique en vue de la détection d'un défaut au rotor. Ainsi, l'effet du nombre, de la position des cassures des barres et du glissement est mis en évidence.

MOTS-CLÉS: Moteur asynchrone, FFT, rupture de barre, courant statorique, Analyse spectrale.

ABSTRACT. The asynchronous motor has an interest in applications of strong powers requiring the variation speed. However, it is not, like any other electric machine, safe from a dysfunction in consequence of failure of an electrical or mechanical nature.

Among these rotor defects, we can quote a fissure or a total break of bar, a rupture of end ring circuit, an eccentricity of the rotor axis...

In this paper, we use a technique based on the spectral analysis of stator current in order to detect a break down or a defect in the rotor. Thus, the number and the position effect of the breaks have been highlighted.

KEYWORDS: Asynchronous motor, broken bars, FFT, stator current, spectrum analysis.

1. Introduction

Bien que la machine asynchrone soit réputée pour ses qualités de robustesse de faible coût de construction, elle est néanmoins sujette à des défaillances de types électriques ou mécaniques. La mise au point de techniques d'analyse des signatures des défauts au rotor tels que la rupture partielle ou totale d'une barre de la cage d'écureuil ou d'une portion d'anneau et, au stator, un déséquilibre en amplitude ou en phase entre tensions des phases statoriques est nécessaire.

A partir de l'analyse du défaut, on peut programmer l'arrêt d'un processus d'une chaîne de fabrication pour le remplacement et la révision des éléments défaillants. La détection et le diagnostic précoces de défauts revêtent de l'importance et mobilisent les chercheurs dans les domaines allant de l'électrotechnique à l'automatique en passant par le traitement du signal. Les conséquences d'un défaut au rotor peuvent être:

- un vieillissement mécanique de la ligne d'arbre à cause des fluctuations de couple,
- des risques plus élevés de rupture des barres adjacentes qui supportent des courants élevés et, par conséquent, des efforts électrodynamiques importants,
- une influence sur les formes des tensions d'alimentation de la machine, donc sur le réseau.

On peut citer également d'autres types de défauts.

1.1 Défauts internes

La source de ces défauts est le comportement de la machine.

1.1.1 Défauts statoriques

Le stator est plutôt soumis à des contraintes électriques:

- court circuits entre spires d'une même phase,
- courts circuits entres phases,
- coupure d'une phase,
- défaut du circuit magnétique (rupture de tôles),
- défaut d'isolation entre différentes tôles,
- défaut d'isolation électrique au niveau du bobinage statorique, suite à un vieillissement des isolants.

1.1.2 Défauts rotoriques

Parmi ces défauts on peut citer :

- la rupture partielle ou totale d'une ou plusieurs barres,
- un défaut d'alignement de l'axe du rotor par suite d'une usure des roulements ou de leurs logements dans les flasques. Ce défaut est détectable par la surveillance des vibrations ou du courant [1],
- rupture d'anneaux de court circuit,
- défaut du circuit magnétique.

1.2 Défauts externes

Ces défauts sont principalement dûs à un problème de nature :

- électrique : régime transitoire ou déséquilibre dans l'alimentation,
- thermique : température de fonctionnement élevée, points chauds, surcharge,
- mécanique : frottements, chocs en service, jeux,
- chimique : corrosion, humidité.

2. Modèle de la machine asynchrone triphasée à rotor en cage

L'élaboration du modèle de la machine prend en considération les suppositions suivantes:

- la saturation et l'effet de peau sont négligeables,
- l'entrefer est uniforme,
- la répartition des f.m.m dans l'entrefer est sinusoïdale,
- les barres rotoriques sont isolées du circuit magnétique du rotor,

- la perméabilité relative des armatures de la machine est supposée infinie.

Bien que la f.m.m. de l'enroulement statorique soit supposée sinusoïdale, d'autres distributions d'enroulement pourraient également être envisagées en employant simplement le théorème de superposition. Ceci est justifié par le fait que les différentes composantes des harmoniques d'espace n'agissent pas les unes sur les autres [2].

Dans le but d'étudier ces phénomènes ayant lieu dans le rotor, celui-ci est modélisé sous la forme de N_R mailles, comme le montre la figure 1.

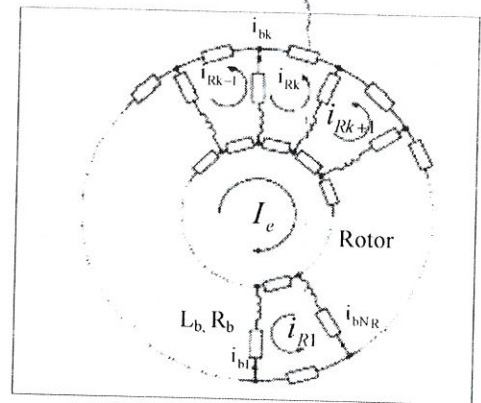


Figure 1. Circuit équivalent de la cage rotorique

Le modèle mathématique du moteur à induction à cage peut être écrit comme suit :

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt} [[L][I]] \text{ Où :}$$

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_S] \\ [V_R] \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} [I_S] \\ [I_R] \end{bmatrix} \quad [1]$$

avec :

$$[V_S] = [V_{S1} \quad V_{S2} \quad V_{S3}]$$

$$[V_R] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]_{1 \times (N_R+1)}$$

$$[I_S] = [I_{S1} \quad I_{S2} \quad I_{S3}]$$

$$[I_R] = [I_{R1} \quad \dots \quad I_{Rk} \quad \dots \quad I_{RN_R} \quad I_e]_{\times (N_R+1)}$$

La matrice globale des résistances peut s'écrire



$$[R] = \begin{bmatrix} [R_S]_{3 \times 3} & \vdots & [0]_{3 \times N_R} & \vdots & [0]_{3 \times 1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [0]_{N_R \times 3} & \vdots & [R_R]_{N_R \times N_R} & \vdots & -\frac{R_c}{N_R} [1]_{N_R \times 1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [0]_{1 \times 3} & \vdots & -\frac{R_c}{N_R} [1]_{1 \times N_R} & \vdots & R_c \end{bmatrix}$$

$$[R_S]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \quad [2]$$

La matrice globale des inductances peut être représentée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_S]_{3 \times 3} & \vdots & [M_{SR}]_{3 \times N_R} & \vdots & [0]_{3 \times 1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [M_{RS}]_{N_R \times 3} & \vdots & [L_R]_{N_R \times N_R} & \vdots & -\frac{L_c}{N_R} [1]_{N_R \times 1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [0]_{1 \times 3} & \vdots & -\frac{L_c}{N_R} [1]_{1 \times N_R} & \vdots & L_c \end{bmatrix} \quad [3]$$

Où

$$[M_{SR}]_{N_R \times 3} = \begin{bmatrix} \dots & -M_{SR} \cos(\theta + ka) & \dots \\ \dots & -M_{SR} \cos(\theta + ka - \frac{2\pi}{3}) & \dots \\ \dots & -M_{SR} \cos(\theta + ka - \frac{4\pi}{3}) & \dots \end{bmatrix}$$

$$[L_S]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} L_{Sp} & M_S & M_S \\ M_S & L_{Sp} & M_S \\ M_S & M_S & L_{Sp} \end{bmatrix}$$

avec: $L_p = L_{Rp} + 2L_b + 2\frac{L_c}{N_R}$

3. Modèle présentant un défaut de la machine

Afin de simuler le défaut de cassure de barre, on ajoute à l'élément défaillant correspondant de la matrice des résistances du rotor R_R la résistance de défaut R_{bf} [3], tel que:

$$[R_F]_{N_R \times N_R} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R_{bf_k} & -R_{bf_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{bf_k} & R_{bf_k} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad [4]$$

En conséquence, la matrice des résistances de la cage tenant en compte le défaut, est définie par:

$$[R_{R'}]_{N_R \times N_R} = [R_R]_{N_R \times N_R} + [R_F]_{N_R \times N_R} \quad [5]$$

Par ailleurs, l'équation de mouvement est donnée par:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J_m} (C_e - C_r), \text{ avec } \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad [6]$$

L'application de la transformée de Park au stator permet d'écrire l'équation (1) et (6) sous la forme suivante [4]:

$$C_e = \sqrt{\frac{3}{2}} p M_{SR} \left\{ I_{qs} \sum_{k=0}^{N_R-1} I_{Rk+1} \cos(ka) - I_{ds} \sum_{k=0}^{N_R-1} I_{Rk+1} \sin(ka) \right\} \quad [7]$$

4. Résultats de simulation et discussions

La simulation des modèles électrique et mécanique est obtenue par les équations (3) et (5) après transformation.

L'analyse spectrale du courant statorique met en évidence l'effet du défaut qui se traduit par l'apparition des raies autour du fondamental [4, 5,6].

Leurs amplitudes croient en fonction du nombre de barres défectueuses à des fréquences caractéristiques (équation 8).

$$f_{defaut} = (1 \pm 2kg)fs \quad [8]$$

4.1 Effet de sévérité de la fissure sur le spectre du courant statorique

Pour mettre en évidence l'effet de la sévérité d'une fissure, on simule des cassures de barres en augmentant la résistance de la barre cassée de 10 fois et 100 fois.

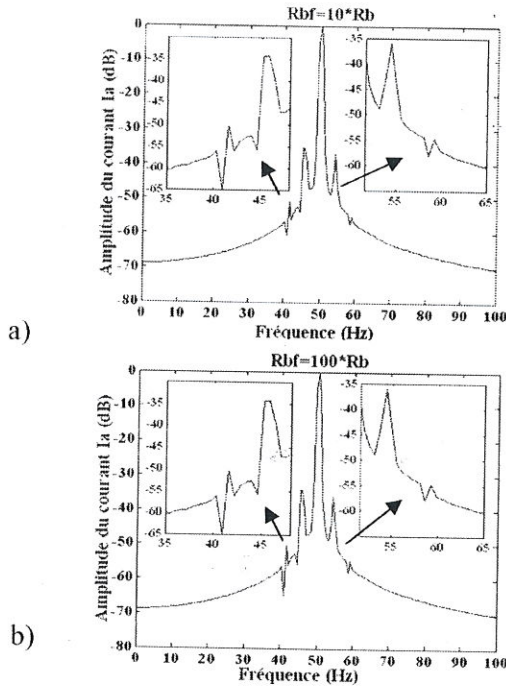


Figure 2. Effet de la sévérité de la fissure sur le spectre du courant statorique (augmentation de la résistance de la barre cassée a)10 fois, b) 100 fois)

On remarque que la variation de la valeur de la résistance de la barre cassée introduit une modification du spectre du courant statorique (raies situées de part et d'autre du fondamental). (Figures 2a et 2b).

4.2 Effet du nombre et de la position des barres cassées

On considère des défauts de cassure de barres de telle sorte qu'on tienne en compte le nombre et la position (figure 3) de ces barres.

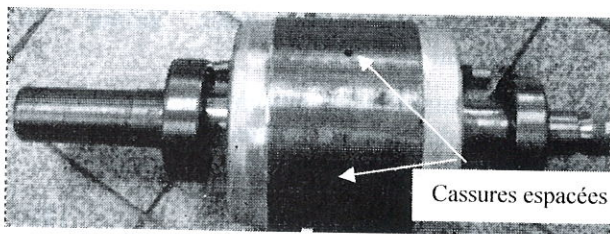


Figure 3. Exemple de cassures de barres espacées

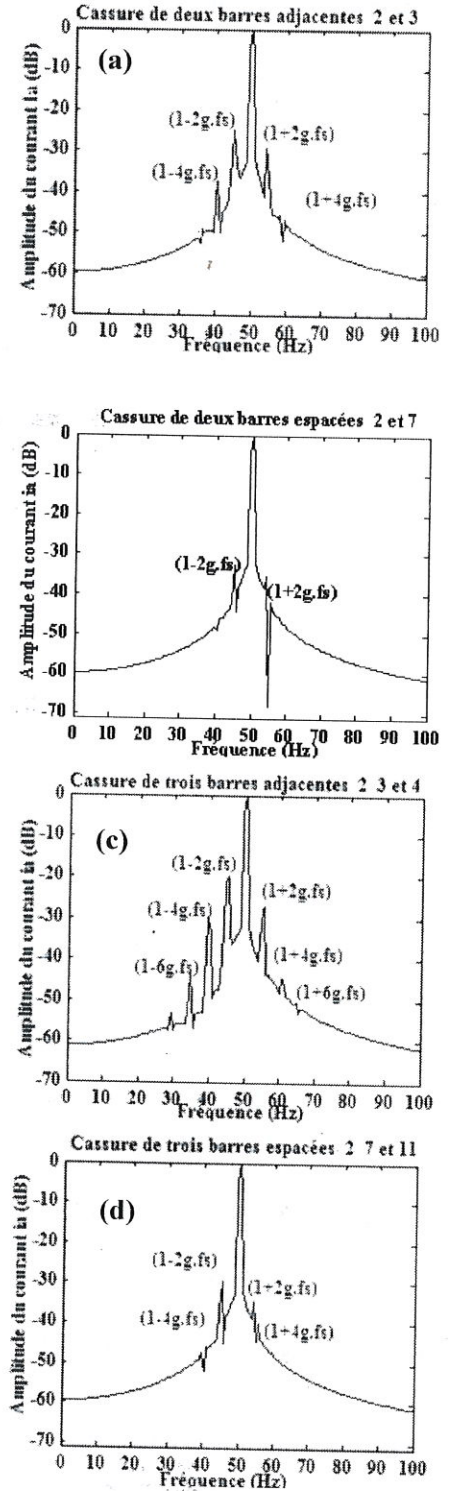


Figure 4. Spectre du courant statorique tenant compte du nombre et de la position des barres cassées

Sur la figure (4), on remarque l'apparition de raies sur le spectre. Ces raies ont une amplitude qui croit en fonction de l'augmentation du nombre de barres défectueuses et leurs positions.

Le tableau 1 dans l'annexe met en évidence l'influence du nombre de barres cassées et leurs positions sur le spectre.

Les valeurs des fréquences données par l'expression (8) et celles déduites des graphiques du spectre sont proches pour différents types de cassures. Cependant, les raies 1 5 et 6 n'apparaissent pas sur le spectre car il y a une compensation due à la position relative des barres cassées (symétrie cylindrique). L'augmentation de l'amplitude des raies est due à l'augmentation du nombre de barres cassées.

L'amplitude des raies augmente avec le nombre de barres adjacentes cassées. Par ailleurs, les six raies correspondant au défaut apparaissent.

4.3 Influence de la charge sur le spectre du courant statorique

L'effet de la charge (glissement) sur le spectre du courant statorique est mis en évidence en considérant une cassure de trois barres adjacentes avec différents glissements g (0.001 %, 1.15 %, 2.3 % et 3.6 %). (Figure 5)

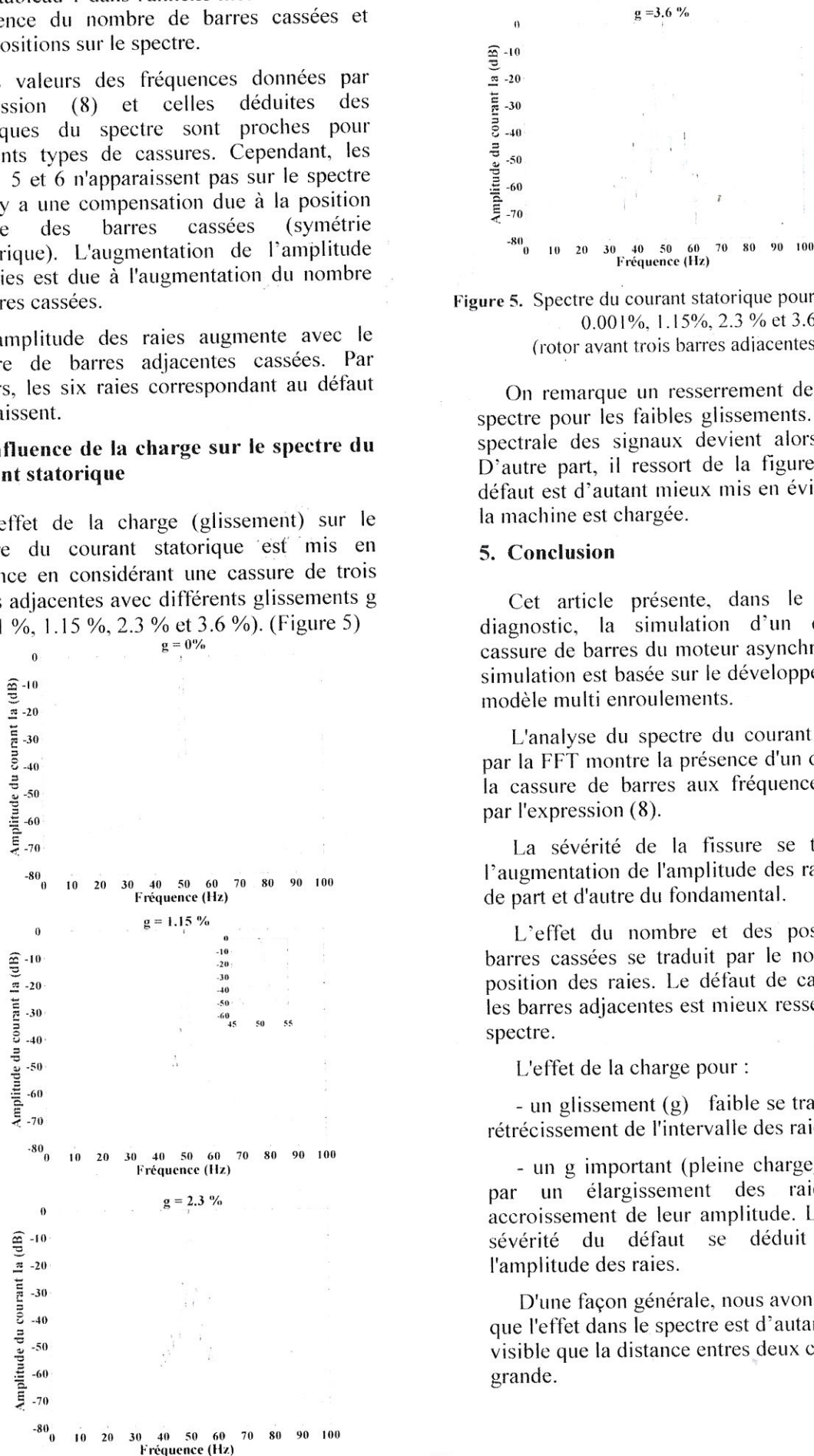


Figure 5. Spectre du courant statorique pour les glissements 0.001%, 1.15%, 2.3 % et 3.6 % (rotor avant trois barres adjacentes cassées)

On remarque un resserrement des raies du spectre pour les faibles glissements. L'analyse spectrale des signaux devient alors délicate. D'autre part, il ressort de la figure 5 que le défaut est d'autant mieux mis en évidence que la machine est chargée.

5. Conclusion

Cet article présente, dans le cadre du diagnostic, la simulation d'un défaut de cassure de barres du moteur asynchrone. Cette simulation est basée sur le développement d'un modèle multi enroulements.

L'analyse du spectre du courant statorique par la FFT montre la présence d'un défaut dû à la cassure de barres aux fréquences prédites par l'expression (8).

La sévérité de la fissure se traduit par l'augmentation de l'amplitude des raies situées de part et d'autre du fondamental.

L'effet du nombre et des positions des barres cassées se traduit par le nombre et la position des raies. Le défaut de cassure dans les barres adjacentes est mieux ressenti dans le spectre.

L'effet de la charge pour :

- un glissement (g) faible se traduit par un rétrécissement de l'intervalle des raies,
- un g important (pleine charge) se traduit par un élargissement des raies et un accroissement de leur amplitude. Le degré de sévérité du défaut se déduit donc de l'amplitude des raies.

D'une façon générale, nous avons remarqué que l'effet dans le spectre est d'autant moins visible que la distance entre deux cassures est grande.



Annexe

a)	f calculé (Hz)	35.94	40.62	45.31	54.68	59.37	64.05
	f déduit (Hz)	36.58	40.87	45.11	54.33	58.57	63.54
	Amplitude(dB)	-49.16	-37.60	-24.91	-29.31	-45.6	-50.9
b)	f calculé (Hz)	36.26	40.84	45.42	54.57	59.15	63.73
	f déduit (Hz)	/	39.64	45.12	54.27	/	/
	Amplitude(dB)	/	-48.36	-32.71	-35.40	/	/
c)	f calculé (Hz)	34.576	39.71	44.85	55.14	60.28	65.42
	f déduit (Hz)	34.774	39.67	45.09	55.47	60.40	64.72
	Amplitude(dB)	-43.479	-30.46	-20.08	-27.00	-44.65	-50.81
d)	f calculé (Hz)	35.636	40.42	45.21	54.78	59.57	64.36
	f déduit (Hz)	/	40.83	45.137	54.15	59.79	/
	Amplitude (dB)	/	-46.02	-29.77	-34.85	-47.25	/

Tableau 1. Fréquences et amplitudes des raies du spectre du courant statorique

- a) deux barres adjacentes b) deux barres espacées
 c) trois barres adjacentes d) trois barres espacées

La matrice des résistances et inductances rotoriques

$$[R_R]_{NR \times NR} = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(NR-1)} + 2\frac{R_e}{NR} & -R_{b0} & 0 & \dots & \dots & \dots & -R_{b(NR-1)} \\ 0 & \dots & -R_{b(k-1)} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ -R_{b(NR-1)} & 0 & \dots & \dots & -R_{b(NR-2)} & R_{b(NR-1)} + R_{b(NR-2)} + 2\frac{R_e}{NR} & \dots \end{bmatrix}$$

$$[L_R] = \begin{bmatrix} L_p & M_{RR} - L_b & M_{RR} & M_{RR} & \dots & M_{RR} - L_b \\ M_{RR} - L_b & L_p & M_{RR} - L_b & M_{RR} & \dots & M_{RR} \\ M_{RR} & M_{RR} - L_b & L_p & M_{RR} - L_b & M_{RR} & \dots \\ M_{RR} & \dots & \dots & \dots & M_{RR} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{RR} - L_b & M_{RR} & M_{RR} & \dots & M_{RR} - L_b & L_p \end{bmatrix}$$



6. Bibliographie

- [1] A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug, "Modeling induction motors for diagnosis purposes", EPE'99 Lausanne
- [2] A. Abed, L., E. Weinachter, A. Razik, A. Rezzoug, "Real time implementation of the Sliding DFT Applied to on line's broken bars diagnostic", IEEE International Electric machines and drives Conference, IEMDC'2001, Cambridge, MA USA, June 17, 20, 2001, p. 345-34
- [3] A. Menacer, M. S. Nait Said, A. Benakcha, S. Drid, "Stator current analysis of incipient fault into asynchronous motor rotor bars using Fourier fast transform", Journal of Electrical Engineering, Slovakia, vol. 5-6, 2004, p. 122-130
- [4] S. Belhamdi, "Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone", thèse magister Biskra 2005.
- [5] M. Benbouzid, "A Review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection", IECON'98, Aachen, Germany, 1998, p. 1950-1955
- [6] R. William, M. Finley, M. Hodowanec, "An analytical approach to resolving motor vibration problem", IEEE 1999, p. 217-232

7. Liste des symboles

P_n : puissance nominale 1Kw
 V : tension d'une phase statorique 220V
 p : nombre de paires de pôles 1
 f_s : fréquence d'alimentation statorique 50Hz
 R_s : résistance d'une phase statorique 7.58 Ω
 R_r : résistance de la cage rotorique 6.3 Ω
 L_r : inductance rotoriques 0.1612H
 R_b : résistance de la barre rotorique 71.5 $\mu\Omega$
 L_e : inductance de fuites d'anneau 0.1 μH
 l_{sf} : inductance de fuites statoriques 0,0265H
 L_b : inductance de la barre rotorique 0.1 μH
 L_e : inductance d'anneau rotorique 0.1 μH
 L_{sc} : inductance cyclique statorique 0.5976H
 J_m : moment d'inertie 0.0054 Nms²
 R_c : résistance d'anneau de court circuit 1.5 $\mu\Omega$
 N_R : nombre de barres au rotor 16
 N_S : nombre de spires par phase statorique 160
 B_k : densité magnétique du flux rotorique
 M_{Sr} : inductance mutuelle stator maille 26.5mH
 g : glissement
 R_{bFK} : résistance additionnelle de défaut d'une barre rotorique
 I_{Sn} : courant des phases statoriques; n=1,2,3
(nombre de phases)
 a : angle électrique entre deux mailles rotoriques adjacentes 0.3927
 f_{cal} : fréquence calculée