

# Détection de Cassures de Barres et/ou D'anneaux de Court-Circuit Dans un Moteur à Induction en Utilisant la Puissance Instantanée

M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Aboubou, A. Menacer, A. Derghal

Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques

Université Mohamed KHIDER BP145, 07000 Biskra, Algérie.

[s\\_moh78@yahoo.fr](mailto:s_moh78@yahoo.fr)

**Résumé**—Dans cet article nous présenterons une technique dédiée à la détection des cassures de barres et/ou de portions d'anneaux de court-circuit dans un moteur asynchrone triphasé à cage alimenté directement du réseau. Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu spectral de la puissance totale instantanée absorbée par le moteur. Un développement mathématique qui représente le principe théorique de cette méthode sera représenté. L'efficacité de cette approche est testée par simulation et par expérimentation pour différents degrés de sévérité du défaut.

**Mots clés**—Puissance Instantanée, Diagnostic, Défauts rotoriques, moteur asynchrone.

## I. INTRODUCTION

Le moteur asynchrone à cage est une composante clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son prix de revient. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...

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

Cet article, présente l'utilisation de l'approche de la puissance instantanée totale 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 de cette approche dans un repère lié au rotor représente la contribution des auteurs de cet article.

## II. TECHNIQUE DE LA PUISSANCE INSTANTANEE

Si  $(v_a, v_b, v_c)$  et  $(i_a, i_b, i_c)$  sont, respectivement, les tensions et les courants d'alimentation du moteur, la puissance instantanée totale absorbée est donc donnée par :

$$P_a(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = [v_{abc}]^T [i_{abc}] \quad (1)$$

En utilisant la transformation de Park, dont le repère est lié au rotor  $(\theta = \omega_r t)$  :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[i_{abc}] = [P(\theta)][i_{odqs}] \quad (3)$$

$$[v_{abc}] = [P(\theta)][v_{odqs}], \quad (4)$$

On obtient :

$$P_s(t) = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (5)$$

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

$$\begin{cases} i_{ds}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_a(t) \cos \theta + i_b(t) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c(t) \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})] \\ i_{qs}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_a(t) \sin \theta + i_b(t) \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c(t) \sin(\theta - \frac{4\pi}{3})] \end{cases} \quad (6)$$

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

$$\begin{cases} i_a(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha) \\ i_b(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (7)$$

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

$$\begin{cases} i_a(t) = i_f \cos(\omega_s t - \alpha) + i_1 \cos[(1 - 2g)\omega_s t - \beta_1] \\ \quad + i_r \cos[(1 + 2g)\omega_s t - \beta_r] \\ i_b(t) = i_f \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) + i_1 \cos[(1 - 2g)\omega_s t - \beta_1 - \frac{2\pi}{3}] \\ \quad + i_r \cos[(1 + 2g)\omega_s t - \beta_r - \frac{2\pi}{3}] \\ i_c(t) = i_f \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{4\pi}{3}) + i_1 \cos[(1 - 2g)\omega_s t - \beta_1 - \frac{4\pi}{3}] \\ \quad + i_r \cos[(1 + 2g)\omega_s t - \beta_r - \frac{4\pi}{3}] \end{cases} \quad (8)$$

On note que la relation (8) 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 (6), on obtient :

$$\begin{cases} i_{ds}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \left\{ \underbrace{i_f \cos[(g\omega_s t - \alpha) + i_1 \cos(-g\omega_s t - \beta_1)]}_{A1} \right. \\ \quad \left. + \underbrace{i_r \cos(3g\omega_s t - \beta_r)}_{A2} \right\} \\ i_{qs}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \left\{ \underbrace{i_f \sin[g\omega_s t - \alpha] + i_1 \sin(-g\omega_s t - \beta_1)}_{A1} \right. \\ \quad \left. + \underbrace{i_r \sin(3g\omega_s t - \beta_r)}_{A2} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

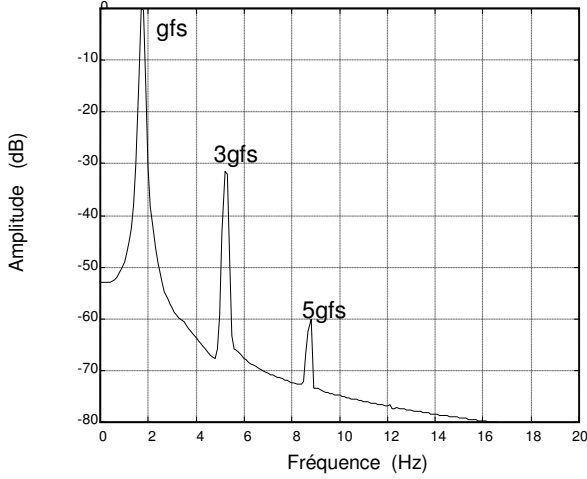
Dans ces conditions, il est clair que les grandeurs biphasées  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  sont composées de deux parties :

▪ **1<sup>ère</sup> partie A1** : Elle est constituée de deux composantes à la fréquence  $gfs$ , qui s'ajoutent vectoriellement.

▪ **2<sup>ème</sup> partie A2** : Elle est constituée d'une composante à la fréquence  $3gfs$ .

### III- TESTS DE SIMULATION

D'une manière générale, la cassure d'une ou plusieurs barres engendre dans le spectre des courants  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  une série d'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 plein charge et avec deux barres cassées.

Les composantes  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$ , dans un repère lié au rotor, sont données par :

$$\begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(g\omega_s t) \\ v_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(g\omega_s t) \end{cases} \quad (10)$$

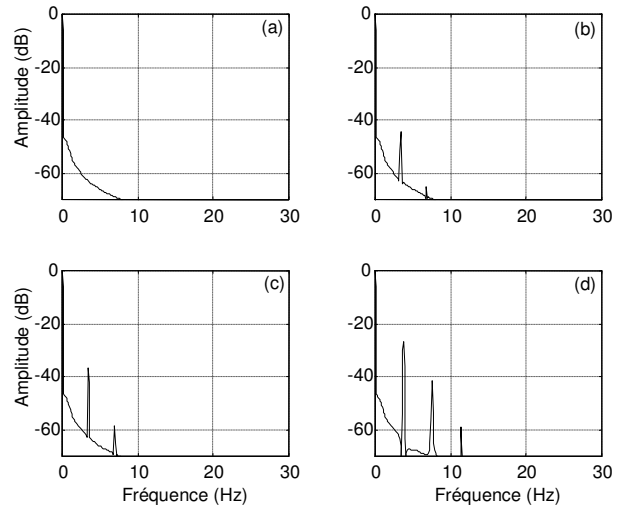
En remplaçant  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ,  $v_{ds}$ , et  $v_{qs}$  par ses expressions dans l'équation (7) de la puissance, on aura :

$$P_{sa}(t) = \underbrace{\frac{3}{2} v_m i_r \cos(\alpha)}_{dc} + \underbrace{\frac{3}{2} v_m i_1 \cos(2g\omega_s t - \beta_1) + \frac{3}{2} v_m i_r \cos(2g\omega_s t - \beta_r)}_{ac} \quad (11)$$

On remarque bien que la puissance instantanée  $P_{sa}(t)$ , est constituée d'une composante continue (dc), qui correspond à la valeur moyenne de la puissance active, plus une composante oscillatoire (ac) à la fréquence de modulation  $2g f_s$ , cette composante est très importante, elle nous permet d'obtenir des informations sur l'état de santé du moteur.

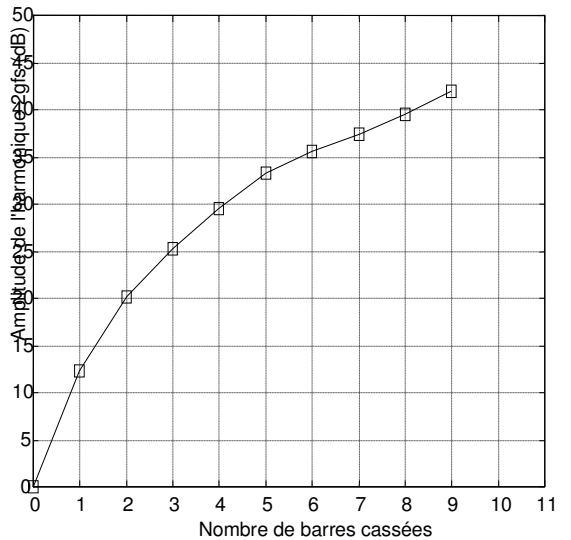
D'une manière générale, la cassure des barres rotoriques engendre dans le spectre de la puissance instantanée une chaîne d'harmoniques aux fréquences  $2k g f_s$  (avec  $k=1, 2, \dots$ ).

Les caractéristiques du moteur utilisé en simulation sont données dans l'annexe. Le moteur est testé pour différents états de fonctionnement. D'après la figure 2, on remarque que dans l'état sain, le spectre de la composante oscillatoire (ac) de la puissance instantanée ne contient aucune harmonique. Tandis que la présence des cassures de barres est caractérisée par l'apparition des raies à la fréquence  $2k g f_s$ . On remarque que l'amplitude la plus grande est celle de l'harmonique  $2g f_s$  et d'après la figure 3, on constate que l'amplitude de cette harmonique augmente avec le nombre de barres rompues, ce qui la rend un bon indicateur de degré de sévérité du défaut.



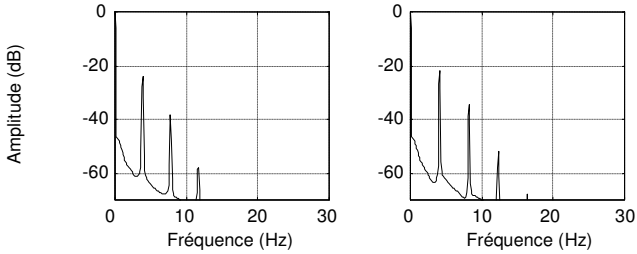
**Figure 2 :** Spectre de la puissance instantanée totale pour un moteur en charge nominale.

a. Moteur sain. b. Moteur avec une barre cassée. c. Moteur avec deux barres cassées. d. Moteur avec quatre barres cassées.



**Figure 3 :** Variation de l'amplitude de l'harmonique  $2g f_s$  en fonction du nombre de barres rompues

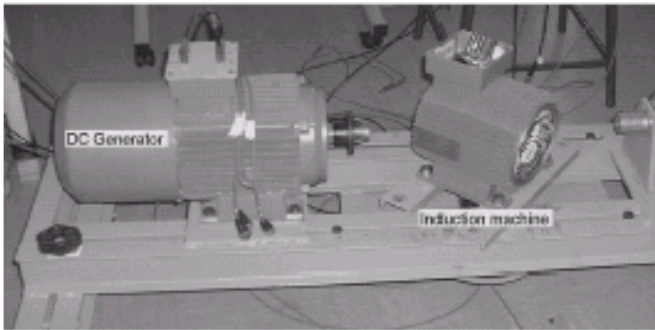
La figure 4 représente le spectre de la composante (ac) de la puissance instantanée, pendant la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit puis de deux portions. Selon les amplitudes des harmoniques  $2k_{gf_s}$ , on constate que ce type de défaut est plus sévère que celui dû aux cassures de barres.



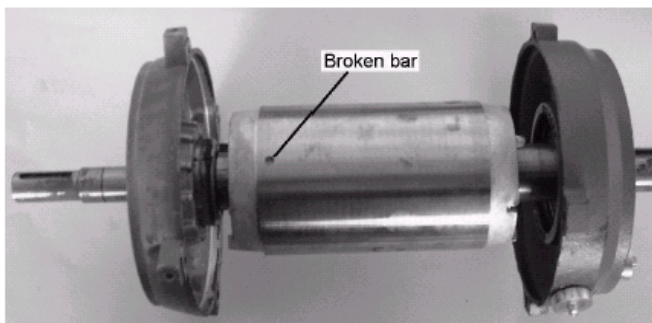
**Figure 4 :** Spectre de la puissance instantanée pour un moteur en charge  
**a.** Moteur avec une portion d'anneau rompue.  
**b.** Moteur avec deux portions d'anneau rompues.

#### IV. TESTS EXPERIMENTAUX

Les tests expérimentaux ont été effectués sur un banc expérimental réalisé au laboratoire du GREEN-UHP à Nancy (France). Le moteur utilisé (photos 1 et 2) est de 3Kw, fabriqué par Sew - Uscome. Les caractéristiques détaillées sont présentées dans [14]. Le moteur est couplé avec à génératrice de courant continu chargée par des résistances variables.



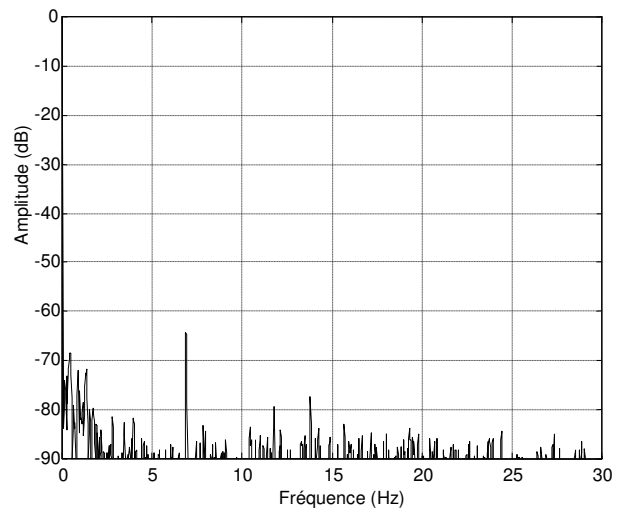
**Photo 1 :** Une partie banc d'essai utilisé



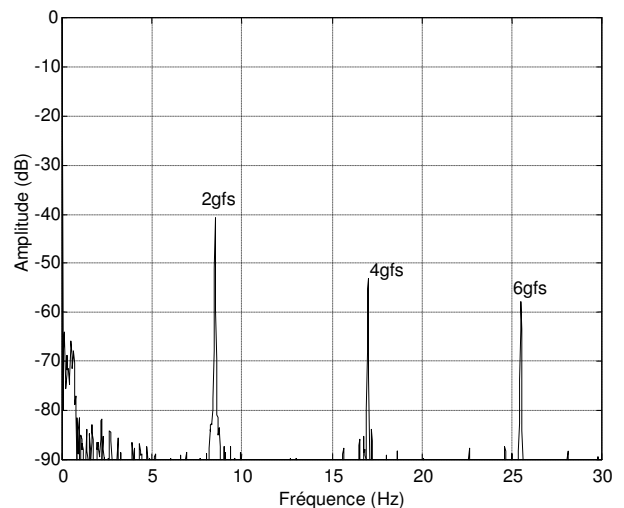
**Photo 2 :** Rotor avec une barre cassée

Les courants et les tensions enregistrés sont utilisés pour calculer la puissance totale absorbée. La transformée de Fourier rapide (FFT) des signaux enregistrés a été calculée et tracée dans un échelle logarithmique normalisé 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 y a toujours des composantes fréquentielles, de basses fréquences, dans le spectre de la puissance totale mais d'amplitudes très faibles (l'harmonique significative 6.8Hz a une amplitude de -64.3dB). Puisque en réalité, la puissance totale absorbée par un moteur sain n'est pas constante, ceci est dû d'une part à l'asymétrie naturelle du moteur et d'autre part aux déséquilibres qui peuvent survenir au niveau de l'alimentation.



**Figure 5 :** spectre logarithmique de la composante oscillatoire de la puissance totale absorbée par un moteur de 3kw en plein charge à l'état sain.



**Figure 6 :** spectre logarithmique de la puissance totale absorbée par un moteur de 3kw en pleine charge ( $g=0.085$ ) et avec une barre cassée.

Le spectre de la figure 6 mis en évidence l'apparition des harmoniques de fréquences  $2k_{gf_s}$ , caractérisants un défaut

de barres, dans le spectre de la puissance totale. L'harmonique la plus signifiante est celle  $2gfs=8.85\text{Hz}$  son amplitude est de  $-41.5\text{ dB}$ . On note qu'on peut facilement distinguer entre les raies  $2kgf_s$  et la composante fondamentale, ceci ne facilite les conditions de filtrage. Au contraire, et lorsqu'on utilise le spectre du courant statorique dans la détection des défauts, il est parfois difficile de distinguer entre les raies latérales  $(1\pm 2g)f_s$ , caractérisant les cassures de barres et la composante fondamentale, puisque ces raies se trouvent à une distance de  $\pm 2gf_s$  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 nouvelle technique basée sur l'utilisation l'analyse spectrale de la puissance totale instantanée absorbée par le moteur pour détecter la présence des cassures de barres et/ou de portions d'anneaux de court circuit.

Nous avons trouvé que la détection des défauts est plus facile en utilisant cette technique, puisque d'une part le spectre de la puissance totale contient une composante oscillatoire (ac) qui comporte des harmoniques aux basses fréquences  $2kgf_s$  liées directement au défaut, et d'autre part les tensions et les courants sont facilement accessibles et mesurables extérieurement du moteur.

Il faut noter aussi que la prise en compte des courants et des tensions dans les trois phases statoriques, apporte plus d'informations pour le procédé du diagnostic, surtout dans le cas d'un déséquilibre dans les tensions d'alimentation. Ceci représente l'avantage de cette technique par rapport aux autres.

## ANNEXE

### • Paramètres des moteur

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
$R_s : 4.1\Omega$	$R_s : 2.86\Omega$
$k_0: 5 \cdot 10^{-6} \text{ Nms}^2$	$k_0: 0.001443 \text{ Nms}^2$
Ns: 193	Ns: 80
$J: 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ Nms}^2$	$J: 0.02397 \text{ Kg.m}^2$

### • Listes de symboles

$i_m$  : La valeur maximale du courant d'alimentation;  
 $\omega_s$  : 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.

$\alpha$  : L'angle de phase de la composante fondamentale du courant d'alimentation.

$\beta_1$  : L'angle de phase de la composante  $(1-2g)f_s$

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

## REMERCIEMENT

Les auteurs remercient très vivement Mr. A. REZZOUG et Mr. H. RAZIK du GREEN - UHP à Nancy (France) pour leurs aides et conseils.

## 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 AirGap 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.