

LECONTENUSPECTRALDUCOURANTABSORBEPARLA MACHINEASYNCHRONEENCASDEDEFAILLANCE, UNETATDEL'ART.

HubertRAZIK

GREEN-UHP

FacultédesSciences,BP239

54506Vandoeuvre-Lès-Nancy,CEDEX

mél: Hubert.Razik@green.uhp-nancy.fr

Résumé : Le moteur asynchrone triphasé est maintenant largement utilisé dans des applications nécessitant une vitesse variable. Il peut faire appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel. Ces machines ont la réputation d'être robustes, d'être adaptées à des applications de forte puissance. Cependant, malgré les qualités évoquées, il n'est pas rare que ces moteurs présentent quelques défaillances émanant d'un vieillissement prématuré. Aussi, nous analyserons dans ce papier quelques défauts les plus couramment rencontrés et les effets engendrés par ceux-ci.

I. INTRODUCTION.

La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles. On la rencontre dans les endroits les plus divers, de l'éolienne à des applications militaires, dans la propulsion électrique de véhicules, de tramways, de trains à grande vitesse voire même de bateaux de croisières. De plus, il est habituel de nos jours de faire de la variation de vitesse. Cela induit naturellement l'utilisation d'onduleur de tension. Hélas, le moteur doit supporter tant bien que mal ces ondes de tensions riches en harmoniques alors qu'il n'a été conçu que pour le 50 Hz. De ce fait, on assiste à un vieillissement prématuré du moteur asynchrone. Il devient donc plus vulnérable et donc, plus sujet à être défaillant. Par conséquent il nous faut nécessairement faire du diagnostic, de la surveillance, de la prévention afin d'améliorer la fiabilité d'un système dans son ensemble.

Parmi toutes les méthodes utilisées ou proposées, on se doit de prélever un ou plusieurs signaux pour :

- les traiter,
- les analyser,
- conclure à une défaillance ou non, avec certitude.

Cependant, il nous faut modérer notre enthousiasme à vouloir déduire rapidement, et donc conclure à une panne ou à une défaillance plus que probable, car nombreux sont les symptômes (*les fréquences*) identiques engendrés par plusieurs types de défaillances. Nonobstant ces remarques, les défauts au rotor et au stator, sont dus à un "stress" ou une combinaison de "stress"[1][2][3] (*figure 1*). Ceux-ci se regroupent en quatre catégories génériques pour le stator et six pour le rotor.

Pour le stator, les effets sont principalement dus à un problème :

- thermique (surcharge, ...),
- électrique (diélectrique, ...),
- mécanique (bobinage, ...),
- environnemental (agression, ...).

Pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :

- thermique (surcharge, ...),
- électromagnétique (force en $B^2(t)$, ...),
- résiduel (déformation, ...),
- dynamique (arbre de transmission, ...),
- mécanique (roulement, ...),
- environnemental (agression, ...).

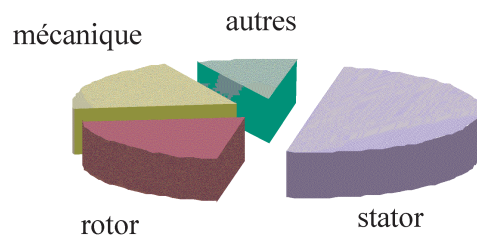


Figure 1: Répartition des différentes pannes

Parmi tous ces éléments énoncés, nous allons explorer les cas où les défauts rencontrés sont les plus courants. Pour cela, nous évoquerons l'acquisition de signaux en vue du traitement. Nous ferons état des spectres dus à différentes défaillances suite à un problème de barre(s) cassée(s) ou de portion d'anneau, un défaut au stator, une excentricité et ceux liés aux roulements à billes.

II. LA MESURE.

Pour ce faire, trois signaux élémentaires peuvent être prélevés (figure 2). Il s'agit :

- du courant statorique,
- du flux rayonnant de la machine,
- de la vitesse de rotation.

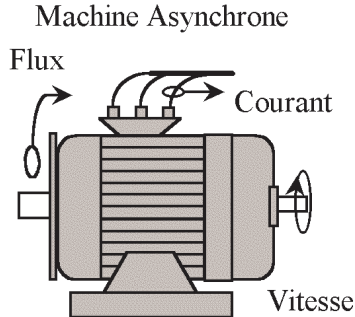


Figure 2: Les différents capteurs.

Parmi ces trois signaux, il semblerait que l'analyse du spectre du courant statorique soit la plus révélatrice et la plus fiable pour le diagnostic. La surveillance par l'analyse du flux dans l'entrefer n'est pas attractive car elle nécessite une intervention sur le moteur lui-même pour être fiable. Cela ne peut se faire aisément dans le milieu industriel. En effet, il faudrait doter ces actionneurs de capteur(s) *in situ*. Une autre possibilité serait de prévoir, dès l'origine, un actionneur instrumenté. Un autre moyen consiste à traiter des signaux issus de flux de fuites. Ils contiennent les informations relatives au fonctionnement. Hélas, il a été montré que ceux-ci sont fortement dépendants de la charge. Donc, un diagnostic fiable sera très difficile à faire, surtout dans un milieu industriel, voire hostile.

III. PROBLEME DE BARRES CASSEES.

Sous les conditions normales de fonctionnement, le moteur crée un champ tournant qui peut être direct ou inverse dans l'entrefer. Ce champ tournant, direct, dans l'entrefer induit un courant à la fréquence de glissement dans le rotor, plus précisément, dans les barres rotoriques. Ceux-ci génèrent alors un champ tournant résultant direct. Pour un moteur symétrique, il n'y aura pas de champ tournant résultant inverse tant que le champ direct est normal et non - nul. Cependant, sous conditions d'anomalies, il n'y a plus de symétrie, mais plutôt des dissymétries du rotor. Dans ce cas, le champ résultant sera composé de champs résultants direct et inverse. Ceci sera d'autant plus accentué que les barres au rotor sont isolées.

Le résultat de la dissymétrie due à un défaut de barre(s) cassée(s) réside dans la création d'un champ tournant de sens opposé à celui généré par le stator, et cela à la fréquence de glissement. Par conséquent, il y aura création d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique à la fréquence $(1-2g).f$ (figure 3).

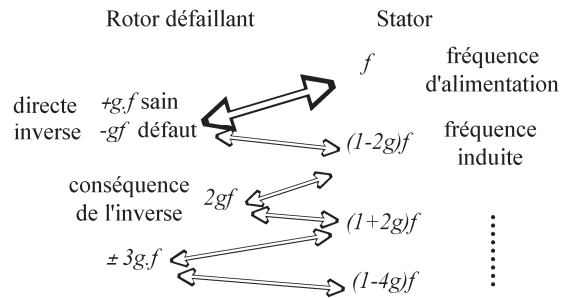


Figure 3 : Les différentes fréquences.

En effet, la relation permettant au moteur de fonctionner en tant que tel repose sur la relation :

$$f = f_r + f_g \text{ (Hz)}$$

où :

- f = fréquence d'alimentation,
- f_r = fréquence de rotation,
- f_g = fréquence de glissement.

Or, dans le cas d'une dissymétrie, f_g est négative, donc

$$f_{bc} = f_r - f_g = f - 2.f_g = f.(1-2g).$$

Hélas, ce courant va générer un couple oscillatoire car il y aura interaction entre ce courant et le flux fondamental créé par l'alimentation statorique. Dès lors, ce couple additionnel issu du produit du flux par le courant est proportionnel à l'amplitude du courant et de la fréquence $(1-2g).f$. La fréquence d'oscillation sera donc de $2g.f$ et engendrera une oscillation de vitesse à cette fréquence dont l'amplitude dépendra de l'inertie du -moteur + charge-. Cette oscillation de vitesse va générer une variation de flux, donc une force électromotrice de fréquence fondamentale plus deux supplémentaires liées aux oscillations de vitesse. Celles-ci sont proportionnelles à l'amplitude de la variation de vitesse et généreront deux courants additionnels de fréquence $(1-2g).f$ et $(1+2g).f$ de même valeur. Cependant, le courant de réaction à la fréquence $(1-2g).f$ vient se soustraire à celui créé par le défaut rotorique [4][5].

Nous pouvons donc conclure que l'amplitude du courant à la fréquence $(1-2g).f$ plus celle à la fréquence $(1+2g).f$ est constante.

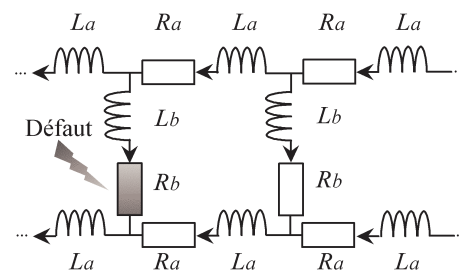


Figure 4 : La cage d'écureuil.

L'amplitude du courant à $(1+2g).f$ sera d'autant plus faible que l'inertie du moteur plus celle de la charge ramenée sera grande, importante.

La création des autres raies est fondée par une démarche identique et c'est ainsi que la relation des plus courante est :

$$f_{bc} = (1 \pm 2g).f \text{ (Hz)}$$

où :

- f_{bc} = fréquence « de barre cassée »,
- g = le glissement,
- f = fréquence d'alimentation.

Si l'on désire simuler un défaut au rotor, il nous faudra disposer d'un modèle représentatif. Pour cela, nous devons, comme à l'accoutumé, poser des hypothèses restrictives. Il faut nous placer dans des conditions telles que :

- la distribution du champ est idéale,
- l'entrefer est constant,
- les barres de la cage d'écureuil sont isolées,
- il n'y a pas de saturation,
- il n'y a pas de phénomène lié à la fréquence,
- il n'y a pas de pertes fer.

De ces hypothèses, il est alors possible d'établir un modèle du moteur asynchrone dans son ensemble. La représentation du rotor en *figure 4* nous sensibilise au fait qu'un rotor est constitué d'un grand nombre de résistances et d'inductances. On peut y distinguer les résistances de portions d'anneau, Ra , inductances de portions d'anneau, La , résistances de barre, Rb et inductances de barre, Lb . Un défaut se traduira alors par une élévation de la résistance soit d'une portion d'anneau, soit d'une barre.

Ce modèle de simulation est d'ordre très élevé car il est constitué :

- des équations liées au stator (ordre 3),
- des équations liées au rotor (ordre égal au nombre de barres de la cage d'écureuil),
- de l'équation liée à la mécanique et à la vitesse de rotation.

Ainsi, pour un moteur de faible puissance ($\sim 3 \text{ kW}$), l'ordre du système sera égale à $3+28+1 = 32$. Malgré cette lourdeur, les résultats de simulations sont en concordance avec l'expérimentation [6][7][8].

IV. PROBLEME DE DEFAUTS STATORIQUES.

A partir des études théoriques, il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator. Les fréquences additionnelles sont données par la relation :

$$f_{cc} = [(n/p).(1 - g) \pm k].f \text{ (Hz)}$$

où :

- f_{cc} = fréquence « de court-circuit »,
- f = fréquence d'alimentation,
- $n = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$,
- p = nombre de paires de pôles,
- g = le glissement,
- $k = 1, 3, 5, \dots, k \in \mathbb{N}$.

Cette démarche n'a de sens que pour des moteurs de faible puissance, donc des moteurs de faible tension. Une spire n'aura alors qu'une faible ddp (différence de potentiels) à ces bornes (quelques volts) alors que sous tension élevée, la ddp sera élevée et sera de quelques centaines de volts. Le nombre de spires est donc fortement lié à la tension d'alimentation, donc un court-circuit entre deux spires n'aura pas la même importance pour un moteur de faible ou de forte puissance. C'est ainsi qu'un moteur de faible puissance pourra continuer de fonctionner quelques minutes, alors que pour le cas de la forte puissance, la durée de survie sera de l'ordre de la seconde.

Parmi toutes les fréquences observables et observées, il faut redoubler de rigueur et de prudence car certaines d'entre elles ont la même signification que celles engendrées par d'autres causes. Pour exemple, la raie à la fréquence de 150 Hz n'est pas significative car elle provient de l'effet de la saturation [9]. D'une part, elle est générée par un défaut statorique, même si le moteur est déconnecté de la charge. D'autre part, des fréquences identiques à des défauts tels que l'excentricité peuvent perturber l'analyse de la défaillance.

Les bobines des moteurs de faible puissance sont réalisées par le biais de machines automatiques. Par conséquent, les brins sont placés de façon « aléatoire » par rapport au moteur de forte puissance. En effet, pour ces derniers, de part le faible nombre de brins par encoche, ils sont insérés manuellement avec une rigueur exemplaire.

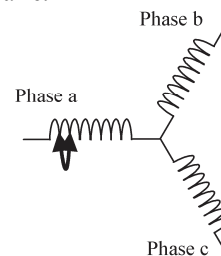


Figure 5 : Court-circuit en phase a.

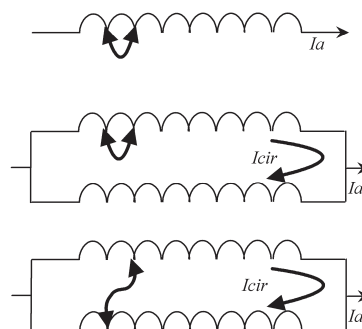


Figure 6 : Différents court-circuits.

Les problèmes engendrés par le stator dans le cas de faible puissance, peuvent se représenter selon les cas ci-dessus (*figures 5 et 6*). On peut noter au minimum trois configurations possibles. La première est un court-circuit de spires sur la phase a. Sur les deux

autres représentations (*figure 6*), la première correspond à un court-circuit entre deux brins d'un même faisceau, l'autre correspond à un court-circuit entre deux faisceaux en parallèles [10]. Dans ces deux cas, il peut y avoir existence d'un courant de circulation (I_{cir}) dans ces deux faisceaux car la ddp est différente entre les extrémités de ceux-ci.

V. PROBLEME D'EXCENTRICITE.

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles. Celles-ci relèvent de trois catégories qui sont pour l'essentiel :

1. l'excentricité statique,
2. l'excentricité dynamique,
3. l'excentricité mixte.

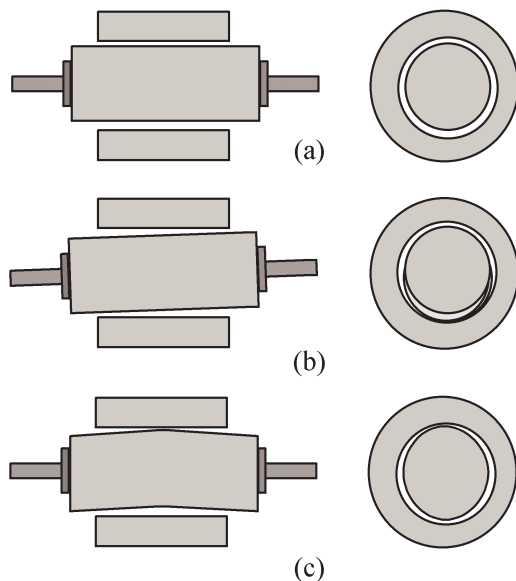


Figure 7 : L'excentricité statique,
(a) excentricité statique, (b) défaut de centrage,
(c) déformation du rotor

Bien entendu, des sous-catégories existent [11]. Ainsi, sont représentées en *figure 7*, trois déformations rassemblées sous l'unique intitulé « excentricité statique ».

L'excentricité statique correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator.

L'excentricité dynamique correspond, elle, à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.

L'excentricité mixte est la somme des deux cas présentés ci-avant.

Les fréquences induites, proches du fondamental, sont données par la relation :

$$f_{exc} = \left(1 \pm n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right) \cdot f \quad (Hz)$$

où :

- f_{exc} = fréquence « d'excentricité »,
- $n = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$,
- g = le glissement,
- p = nombre de paires de pôles,
- f = fréquence d'alimentation.

Cette relation a l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance précise de la machine asynchrone car elle ne fait pas apparaître de terme lié à sa conception.

Une seconde approche consiste à utiliser une expression liant le défaut de barre cassée à celle de l'excentricité et des encoches au rotor. C'est ainsi qu'une équation, sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques de fréquences relatives à ces défauts, et qui dépendent pour beaucoup du nombre de paires de pôles.

$$f_{exc} = \left((kR \pm n_d) \left(\frac{1-g}{p} \right) \pm n_{os} \right) \cdot f \quad (Hz)$$

où :

- f_{exc} = fréquence « d'excentricité »,
- $k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$,
- R = nombre d'encoches au rotor,
- $n_d \in \mathbb{N}$,
- g = le glissement,
- p = nombre de paires de pôles,
- $n_{os} = 1, 3, 5, \dots, n_{os} \in \mathbb{N}$,
- f = fréquence d'alimentation.

Dans le cas d'excentricité statique, $n_d = 0$, alors que pour l'excentricité dynamique, n_d peut prendre les valeurs : $1, 2, 3, \dots$ (n_d est connu sous le nom « ordre d'excentricité »). Le coefficient n_{os} représente l'harmonique de temps lié à l'alimentation du moteur asynchrone.

VI. PROBLEME D'OSCILLATION DE VITESSE.

Dans le cas d'excentricité dynamique, laquelle varie avec la position, il y a variation de l'entrefer ce qui engendre une variation de perméance. Alors, cela affecte les inductances de la machine asynchrone, donc produit des harmoniques de courants qui ont pour relation [12][13]:

$$f_{ov} = \left(1 \pm k \left(\frac{1-g}{p} \right) \right) \cdot f \quad (Hz)$$

où :

- f_{ov} = fréquence « d'oscillation »,
- $k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$,
- g = le glissement,
- p = nombre de paires de pôles,
- f = fréquence d'alimentation.

Hélas, ces fréquences correspondent en tout ou partie à celles issues d'un défaut de barre cassée et d'excentricité. Il faudra donc faire le lien avec d'autres fréquences afin de conclure avec certitude à tel ou tel défaut.

VII. PROBLEME DE ROULEMENT A BILLES.

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone. Pour cela [14], les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être décrits par ces expressions :

$$f_{exc} = \left(1 \pm k \cdot \left(\frac{1-g}{p/2} \right) \right) f \quad (\text{Hz})$$

$$f_{exc} = |f \pm k \cdot f_{rm}| \quad (\text{Hz}) \quad f_{bng} = |f \pm m \cdot f_{vib}| \quad (\text{Hz})$$

où f_{vib} est l'une des fréquences des vibrations mécaniques.

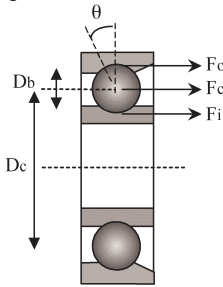


Figure 8 :
Les roulements à billes.

Les fréquences caractéristiques des roulements à billes reposent sur la figure 8 ci-dessus. Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieure comme intérieure. Pour cela, la fréquence caractéristique est le double de la fréquence de rotation et on la notera f_b :

$$f_b = \frac{D_c}{D_b} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right)^2 \right]$$

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure (CI) comme extérieure (CE) décrite par :

$$f_{int} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right] \quad f_{ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right]$$

où :

- g = le glissement,
- f = fréquence d'alimentation,
- f_{rm} = fréquence de rotation mécanique,
- $m = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$,
- $k = 1, 3, 5, \dots, k \in \mathbb{N}$,
- p = nombre de paires de pôles,
- n_b = nombre de billes,
- D_b = diamètre des billes,
- D_c = distance du centre des billes,
- θ = l'angle de contact de la bille avec la cage.

Cependant, il ne faudra pas omettre que nous sommes dans l'obligation de connaître quelques dimensions spécifiques du roulement à billes. Pour ce faire, des approximations applicables à de très nombreux cas sont, pour la plupart d'entre eux, la possession d'un nombre de billes comprise entre 6 et 12. Pour cela, il est usuel d'appliquer les deux relations suivantes :

$$f_{CE} = f \pm f_{ext}(0.4 \cdot n_b \cdot f_r) \quad f_{CI} = f \pm f_{int}(0.6 \cdot n_b \cdot f_r)$$

Ainsi, nous sommes dans la capacité de déterminer si oui ou non nous sommes confrontés à un défaut de roulement à billes. Cela est rendu possible grâce aux fréquences caractéristiques rappelées.

VIII. CONCLUSIONS.

Dans ce papier, nous avons fait état des différents défauts interférant sur le contenu spectral du courant absorbé par le moteur asynchrone. Ces défauts peuvent être d'origine mécanique ou électrique. Nous avons mis l'accent sur les fréquences induites car la technique la plus répandue de nos jours est basée sur l'analyse spectrale du courant statorique (MCSA : Motor Current Signature Analysis). Néanmoins, il faut être vigilant pour ne pas commettre d'erreur dans la conclusion. Elle est d'autant plus délicate qu'elle repose sur l'analyse et l'interprétation de la présence de fréquences et de l'évolution de l'amplitude de celles-ci.

IX. RÉFÉRENCES.

- [1] AUSTIN H. BONNET AND GEORGE C. SOUKUP, « *Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction Motors* », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, N° 6, pp. 1124-1130, November/December 1988.
- [2] AUSTIN H. BONNET AND GEORGE C. SOUKUP, « *Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors* », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, N° 4, pp. 921-937, July/August 1992.
- [3] M.G. MELERO, M.F. CABANAS, F.R. FAYA, C.H. ROJAS AND J. SOLARES, « *Electromagnetic Torque Harmonics for On-Line Interturn Shortcircuits Detection in Squirrel Cage Induction Motors* », In Proceedings EPE'99, p. 1-9, Lausanne, Suisse.
- [4] F. FILIPPETTI, G. FRANCESCHINI, C. TASSONI AND P. VAS, « *Impact of Speed Ripple on Rotor Fault Diagnosis of Induction Machines* », ICEM'96, pp. 452-457, Vigo, Spain.
- [5] S. WILLIAMSON AND A.C. SMITH, « *Steady-State Analysis of 3-Phase Cage Motors with Rotor-Bar and End-Ring Faults* », In IEE Proceedings, Vol 129, Pt. B., N° 3, pp. 93-100, May 1992.
- [6] E. RITCHIE, X. DENG AND T. JOLIKEN, « *Dynamic model of three-phase squirrel cage induction motor with rotor faults* », In Proceedings ICEM'94, pp. 694-698, Paris, France.
- [7] S. MANOLAS, J. TEGOPOULOS AND M. PAPADOPOULOS, « *Analysis of squirrel cage induction motors with broken bars* », In Proceedings ICEM'96, vol. 3, pp. 19-23, Vigo, Spain.
- [8] A. ABED, L. BAGHLI, H. RAZIK AND A. REZZOUG, « *Modelling Induction Motors for Diagnostic Purposes* », In Proceedings EPE'99, pp. 1-8, septembre 7-9 1999, Lausanne, Suisse.
- [9] W. T. THOMSON, « *On-line MCSA To Diagnose Shorted Turns in Low Voltage Stator Windings of 3-Phase Induction Motors Prior to Failure* », In Proceedings IEMDC'01, 2001, June 17-20, pp. 1-8, Cambridge, USA.
- [10] A. STAVROU, H. SEDDING AND J. PENMANN, « *Current Monitoring for Detecting Inter-Turn Short Circuits in Induction Motors* », In Proceedings IEMDC'99, pp. 345-347, Seattle, Washington USA.
- [11] D.G. DORREL, « *Modelling of Non-Uniform Rotor Eccentricity and Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in 3-Phase Cage Induction Motors* », In proceedings ICEM'2000, pp. 1820-1824, Espoo, Finland.
- [12] R.R. SCHOEN AND T.G. HABETLER, « *Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines* », In IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 31, N° 4, pp. 900-906, July/August, 1995.
- [13] G.B. KLIMAN AND J. STEIN, « *Methods of motor current signature analysis* », In Electric Machines & Power Systems, Vol 20, N° 5, pp. 463-474, September 1992.
- [14] R.R. SCHOEN, T.G. HABETLER, F. KAMRAN, R.G. BARTHELD, « *Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring* », In IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 31, N° 6, pp. 1274-1279, November/December, 1995.