



Analyse spectrale du courant statorique pour détecter les cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphasés à cage en tenant compte des harmoniques d'espace

Abdelkader Mellakhi^a, Nouredine Benouzza^b, Azzedine Bendiabdellah^b
mellakhi@yahoo.fr, benouzza@yahoo.com, bendiaz@ yahoo.fr

^a Université Hassiba Benbouali de Chlef, Département d'Electrotechnique, BP151, Hay Salem Chlef 02000

^b Université des Sciences et Technologie d'Oran, Département d'Electrotechnique, BP:1505 El M'naouar, Oran

Résumé

Bien que la machine asynchrone soit réputée par ses qualités de robustesse et de faible coût de construction, il arrive néanmoins que celle-ci présente des pannes électriques ou mécaniques. Dans cet article, on a développé une technique maintenant répandue qu'est l'analyse spectrale de la signature du courant statorique du moteur asynchrone à cage d'écureuil en vue de la détection d'un défaut au rotor, cassure de barres, en tenant compte des harmoniques d'espace. Le modèle de la machine utilisée est l'approche des multi circuits électriques couplés magnétiquement.

Mots clés : diagnostic ; analyse spectrale; harmoniques d'espace; moteur asynchrone; cassure de barres, fonction d'enroulement; moteur à induction.

1. Introduction

Le diagnostic des machines électriques s'est largement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan international, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic [1 - 7]. Celles-ci ont pour objectif principal de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la retrouvons dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, le pétrole, la chimie ou encore les transports ferroviaires.

Les exigences industrielles en terme de maintenance orientent la recherche vers un diagnostic utilisant des

grandeurs électromagnétiques telles que (flux, courant, tension, etc....) et plus particulièrement le courant statorique qui n'exige qu'un capteur de courant qui donne une image sur le courant de phase statorique, d'autre part cette technique permet d'améliorer la fiabilité du moteur et d'augmenter sa durée de vie.

La technique de l'analyse spectrale du courant statorique est la plus utilisée [6 - 12] parce qu'elle permet non seulement la détection d'autres types de défauts mais aussi de s'affranchir des problèmes d'accessibilité.

Et afin de répondre à cette problématique, nous pouvons envisager l'utilisation de la méthode de résolution de l'ensemble des équations avec la cage sous forme d'enroulements particuliers [1 - 6]. Pour ce faire, nous utilisons les équations électriques de la machine dans lesquelles figurent des paramètres tels que résistances statoriques et rotoriques, inductances propres et mutuelles. En conséquence, la fiabilité dépend de la précision de l'identification de ces paramètres [7].

2. Modèle du moteur asynchrone à cage

Dans le cadre du diagnostic de la machine, les objectifs d'un modèle de simulation sont cependant différents de ceux de la commande et du dimensionnement de

l'entraînement électrique, ce qui a motivé la mise au point de nouveaux modèles, spécifiquement dédiés à la simulation des défauts.

Le modèle exposé prend en compte les harmoniques d'espace du bobinage statorique les plus importants [1].

Pour simplifier l'étude, on admet les suppositions suivantes :

- La linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer très grande).
- L'effet de peau a été négligé dans cette approche.
- De plus, les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques ont été négligés dans le modèle de la machine asynchrone à cage d'écuriel.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault peuvent être négligés.

L'approche des multi circuits couplés magnétiquement [1] est basée sur les lois de Kirchhoff. Si dans cette méthode la saturation est négligée, il est donc possible d'observer les défauts au stator et au rotor à cause de la modélisation détaillée de la machine représentée par m circuits statoriques et N_r barres rotoriques (fig.1).

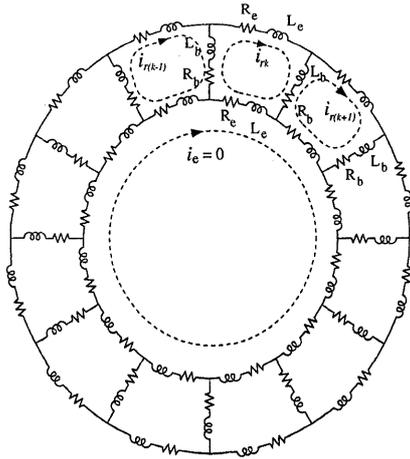


Fig.1 : Circuit équivalent du rotor à cage.

Ce modèle peut être représenté sous forme matricielle comme suit :

$$[U_s] = [R_s] [I_s] + [\Psi_s] / dt \quad (1)$$

$$[U_r] = [R_r] [I_r] + [\Psi_r] / dt \quad (2)$$

$$[\Psi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [L_{sr}] [J_r] \quad (3)$$

$$[\Psi_r] = [L_{rs}] [I_s] + [L_{rr}] [J_r] \quad (4)$$

Où $[U_s]$, $[I_s]$ et $[\Psi_s]$ représentent respectivement les vecteurs tension, courant et flux statorique de dimensions $(m \times 1)$.

$[U_r]$, $[J_r]$ et $[\Psi_r]$ sont respectivement les vecteurs tension, courant et flux rotorique $((1+N_r) \times 1)$. $[R_s]$ est la matrice résistance statorique $(m \times m)$, $[R_r]$ est la matrice résistance

rotorique $((N_r+1) \times (N_r+1))$, $[L_{ss}]$ est la matrice inductance du stator, $(m \times m)$, $[L_{rr}]$ est la matrice inductance du rotor $((N_r+1) \times (N_r+1))$, $[L_{sr}]$ est la matrice mutuelle entre le stator et le rotor $(m \times (N_r+1))$.

Les équations mécaniques de la machine sont :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \quad (5)$$

$$C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (6)$$

Où C_{em} est le couple électromagnétique, C_r est le couple résistant (charge), Ω est la vitesse mécanique angulaire, J est le moment d'inertie, f_m est le coefficient de frottement.

3. Calcul des inductances de la machine asynchrone à cage [1], [15] et [17]

L'inductance mutuelle entre deux enroulements arbitraires "i" et "j" dans une machine s'obtient par la relation suivante:

$$L_{ij}(\theta) = \mu_0 l r \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi, \theta) N_i(\varphi, \theta) N_j(\varphi, \theta) d\varphi \quad (7)$$

avec

θ : La position du rotor par rapport au stator.

φ : La position angulaire le long de la surface intérieure du stator.

$g^{-1}(\varphi, \theta)$: La fonction inverse de l'entrefer, dans le cas où l'entrefer est constant et petit par rapport au rayon du stator, la fonction est constante et égale à $(1/g)$.

$N(\varphi, \theta)$: La fonction de l'enroulement i, elle représente la distribution spatiale de la force magnétomotrice le long de l'entrefer pour un courant unitaire circulant dans l'enroulement i [15] et [16].

Les inductances mutuelles sont calculées en posant $(j = i)$.

Les fonctions d'enroulements statoriques sont :

$$N_a = \frac{N_s}{2} \cos(\theta), \quad N_b = \frac{N_s}{2} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \quad N_c = \frac{N_s}{2} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

La fonction définie de la $i^{ième}$ maille rotorique est:

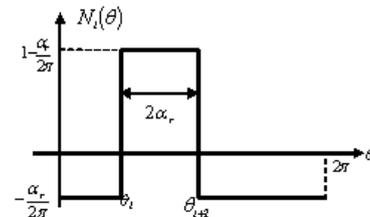


Fig.2. La fonction définie de la $i^{ième}$ maille rotorique de la barre cassée.

La fonction d'enroulement est définie comme suit:

$$N_i = \begin{cases} -\alpha_r / 2\pi & 0 < \theta \leq \theta_i \\ 1 - \alpha_r / 2\pi & \theta_i < \theta \leq \theta_{i+2} \\ -\alpha_r / 2\pi & \theta_{i+2} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

Avec :

α_r : L'angle entre deux barres rotoriques adjacentes.

θ_i : L'angle correspondant à la $i^{ème}$ maille rotorique.

Toutes les inductances du système sont calculées à partir de l'expression de l'induction d'entrefer créée par chaque phase statorique.

Le calcul du flux magnétisant d'une phase statorique s'effectue grâce à la relation :

$$\Phi_{S_i S_j} = \oint_S N_S B_{SI}(\theta_s) dS \quad (9)$$

et $dS = lr d\theta_s$

Où les indices i et j peuvent se substituer indépendamment à la lettre a, b ou c. Les termes l et r représentent la longueur active du circuit magnétique et g le rayon moyen de l'entrefer.

L'expression du flux d'une phase statorique est :

$$\Phi_{S_i S_j} = \frac{\mu_0 lr}{g} N_s^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} K_{sw2k+1} \quad (10)$$

Ce qui nous permettons d'obtenir l'expression de l'inductance magnétisante correspondante:

$$L_{ms} = \frac{\mu_0 lr}{g} N_s^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{K_{sw}}{(2k+1)^2} \quad (11)$$

Où le terme $(2k+1)$ représentent toujours le rang de l'harmonique d'espace considéré.

Pour le calcul des inductances mutuelles entre phases statoriques, il suffit d'introduire l'angle mécanique φ_{isj} dans le calcul du flux. Cet angle représente l'écart angulaire entre la phase i et la phase j statorique.

L'expression de l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques est :

$$L_{ms_i s_j} = \frac{\mu_0 l r N_s^2 \pi}{g 4} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{K_{sw2k+1}}{(2k+1)^2} \cos((2k+1)p\varphi_{s_i s_j}) \quad (12)$$

Où l'angle $\varphi_{s_i s_j}$ est égal à $\pm \frac{2\pi}{3p}$ pour un stator triphasé.

Le calcul des inductances mutuelles entre les phases statoriques et les boucles rotoriques s'effectue en introduisant le coefficient global rotorique K_{rw2k+1} et l'angle mécanique $\varphi_{s_i s_j}$ entre les phases statoriques i et les boucles rotoriques m .

Le calcul du flux donne:

$$\Phi_{r_m s_i} = N_{r2k+1} l r \int_{-\frac{\pi}{Nr}}^{\frac{\pi}{Nr}} B_{si}(\theta_s - \varphi_{r_m s_i}) d\theta_r \quad (13)$$

$$\varphi_{r_m s_i} = (i-1) \frac{2\pi}{3p} - (m-1) \frac{2\pi}{Nr} \quad (14)$$

En divisant cette expression par le courant concerné, nous obtenons pour l'expression de l'inductance mutuelle entre les phases statoriques et les boucles rotoriques :

$$L_{r_m s_i} = \sum_{k=0}^{\infty} L_{sr2k+1} \cos\left((2k+1)p\left(\theta(m-1)\frac{2\pi}{Nr} - (i-1)\frac{2\pi}{3p}\right)\right) \quad (15)$$

Où

$$L_{sr2k+1} = \frac{\pi}{4} \mu_0 \frac{N_{sw} N_{rw}}{p^2 g} l r \frac{(-1)^k}{(2k+1)^2} K_{sw2k+1} K_{rw2k+1} \sin\left((2k+1)p \frac{\pi}{Nr}\right) \quad (16)$$

De plus, comme les circuits électriques statoriques sont en quadrature avec l'anneau de court circuit intérieur, les inductances mutuelles correspondantes sont nulles.

Comme pour le calcul des inductances de magnétisation statoriques, l'inductance magnétisante d'une boucle rotorique est déduite de l'expression du flux correspondant donné par l'expression :

$$\Phi_{r_m k} = \iint Br_k \cdot dS = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{I_{rk}}{g} 2\pi l r \quad (17)$$

L'inductance magnétisante est alors égale à:

$$L_{r_m k} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{g} 2\pi l r \quad (18)$$

Les inductances mutuelles entre les boucles rotoriques se calculent en introduisant l'angle mécanique $\varphi_{r_m r_n}$ dans le calcul du flux. Cet angle représente l'écart angulaire entre la boucle rotorique m et la boucle rotorique n de la cage d'écurieuil. L'expression de l'inductance mutuelle entre deux boucles rotoriques donne :

$$L_{r_m r_n} = L_{r_n r_m} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{g} 2\pi l r \quad (19)$$

Où les indices m et n peuvent être remplacés indépendamment par les nombres $1 \dots N_r$.

Comme le montre ces expressions, les inductances dépendent de la valeur de certaines grandeurs (l , r , g ou encore N_r), il faut connaître ces mesures géométriques de la machine asynchrone concernée. La connaissance de ces paramètres nous permet de calculer les inductances

mutuelles entre les bobinages statoriques et rotoriques pour un nombre d'harmoniques d'espace fixé.

4. Résultats de simulation

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale pour la mise au point d'une procédure de diagnostic, elles permettent la compréhension du fonctionnement sain et défectueux.

Le type de défaut que nous étudions est la rupture de barres de la cage de la machine asynchrone. La simulation de ce type de défaillance consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent. Dans ce type de modélisation, une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut.

Les figures 3 et 4 représentent les caractéristiques de la machine saine en tenant compte de la 15^{ème} harmonique. Le couple de charge de 4 N.m est appliqué à $t = 1$ s. La vitesse de rotation en charge est de 278 rad/s qui donne un glissement de 11,46 %.

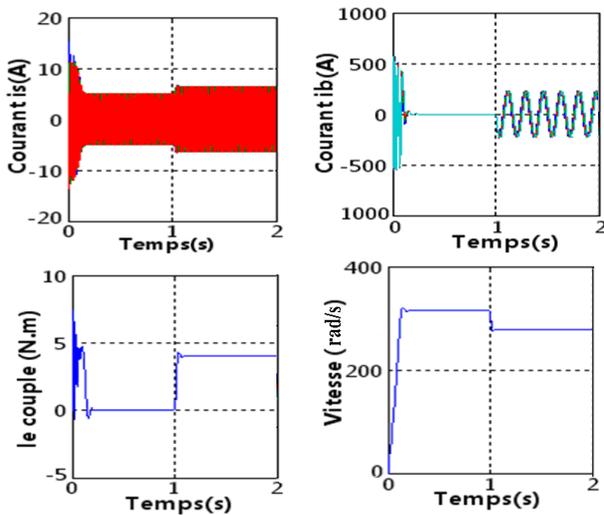


Fig.3. Caractéristiques de la machine asynchrone saine avec la 1ère harmonique d'espace

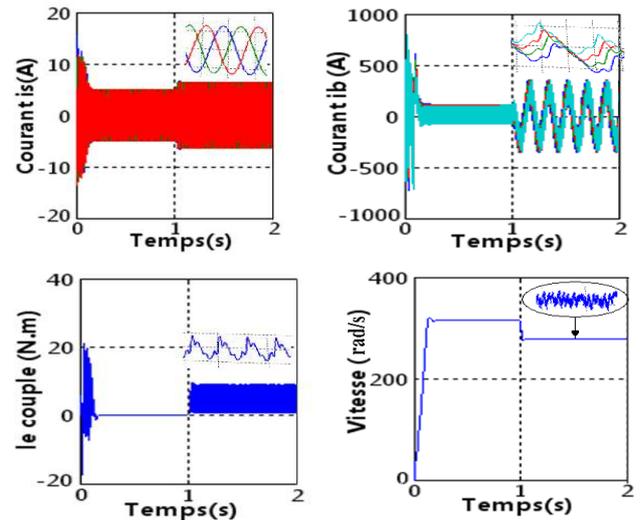


Fig.4. Caractéristiques de la machine asynchrone saine Jusqu'à la 15^{ème} harmonique d'espace.

Les courants dans les barres du rotor, le couple instantané et la vitesse de rotation obtenu jusqu'à la 15^{ème} harmonique d'espace sont très ondulés par rapport à celui obtenu avec le premier harmonique d'espace uniquement.

En ce qui concerne le temps de calcul, il est naturellement plus faible dans le cas du premier harmonique d'espace par rapport au cas où les harmoniques d'espace sont considérés.

La figure 5 représente les caractéristiques de la machine asynchrone à cage avec une barre cassée à $t = 2$ s et la deuxième barre cassée à $t = 2,5$ s.

L'analyse du couple électromagnétique (fig. 5) montre une modification importante de son allure lorsque les défauts rotoriques apparaissent. La présence d'une oscillation, lorsque le rotor de la machine est sain, est due à la prise en compte des harmoniques d'espace dans le modèle. Nous observons qu'une légère modulation vient perturber l'évolution du couple lorsque la première barre est cassée $t = 2$ s. Nous remarquons aussi que cette modulation prend plus d'importance avec l'apparition du second défaut $t = 2,5$ s. En théorie, cette modulation d'amplitude a une fréquence identique à celle de la vitesse, c'est-à-dire $2g$ f mais, comme nous pouvons le visualiser, il est relativement difficile de la discerner avec une simple analyse visuelle [1, 6, 15, 16]. Nous pouvons noter que la rupture de la première barre induit une très faible augmentation du courant rotorique qui la traverse (Fig.5).

D'après l'analyse précédente, nous pouvons noter que la détection d'une ou de plusieurs barres rotoriques défaillantes est très difficile si l'on ne se base que sur l'analyse des signaux temporels. Les signaux, tels que le couple ou encore le courant statorique sont riches en harmoniques, ce qui ne permet pas de discerner avec facilité la modulation d'amplitude de fréquence $2g$ f créée par le défaut rotorique. Une analyse des signaux temporels, dans le domaine fréquentiel, devient donc obligatoire pour

visualiser les composantes créées par la rupture d'une ou de plusieurs barres rotoriques.

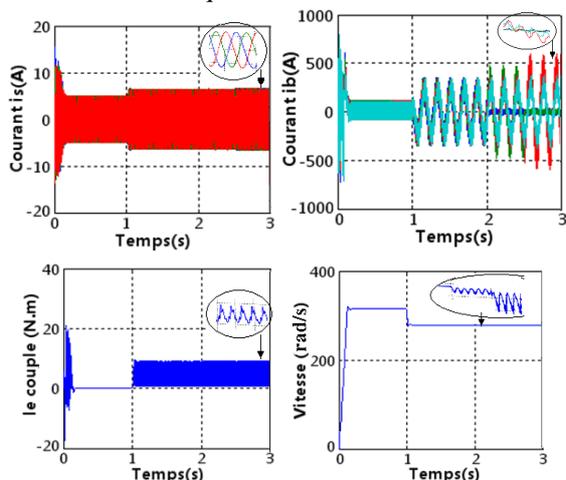


Fig.5. Caractéristiques de la machine asynchrone.

(15^{ème} harmonique d'espace) avec une et deux barres cassées.

Nous savons que la présence d'un défaut au sein de la cage rotorique fait apparaître des composantes additionnelles dans le spectre fréquentiel des grandeurs temporelles analysées précédemment. Par conséquent, une comparaison entre les spectres obtenus avec un rotor sain et un rotor défaillant nous permettra de mieux discerner les composantes créées par le défaut rotorique.

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus utilisée car le spectre résultant contient une source d'informations sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone.

Le contenu spectral du courant statorique (Fig.6) ne se limite pas seulement à la composante fondamentale de fréquence 50 Hz. En effet, les harmoniques d'espace contribuent à augmenter la richesse harmonique de ce signal. Nous pouvons remarquer la présence de plusieurs composantes dont les fréquences sont bien connues à ce jour ($1 \pm 2kf$).

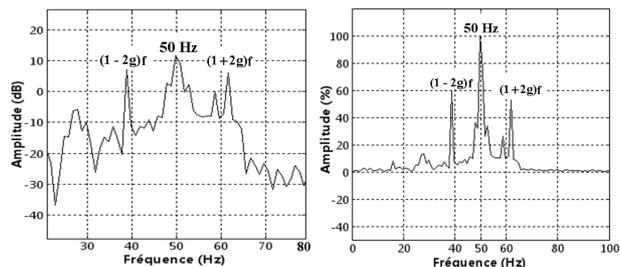
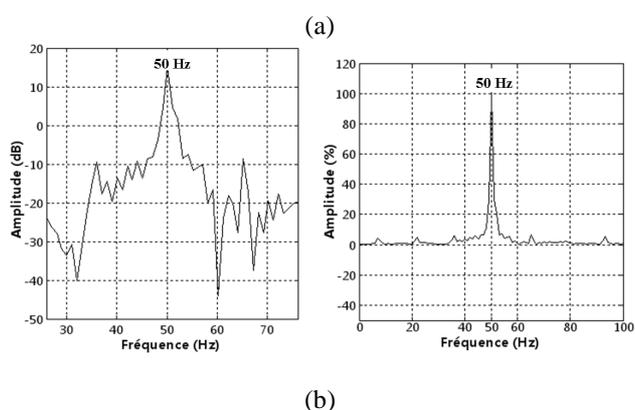


Fig. 6. Analyse des spectres du courant statorique.

(a) Machine saine

(b) Machine avec deux barres cassées

Nous savons que la rupture d'une barre de la cage rotorique induit dans le spectre du courant statorique une composante de fréquence $(1-2g)f$ [1], [5], [6], [9] et [10]. En effet, la rupture d'une barre rotorique crée, dans l'entrefer de la machine, un champ tournant inverse de fréquence gf . L'interaction de ce champ tournant avec la vitesse rotorique crée une composante de fréquence $(1-2g)f$ dans le spectre du courant statorique. La présence de cette modulation dans le courant statorique induit une oscillation au niveau du couple électromagnétique de la machine de fréquence $2gf$.

Cette oscillation de couple crée inévitablement une oscillation de la vitesse rotorique à la même fréquence. Cette oscillation de vitesse induit une nouvelle composante de fréquence $(1+2g)f$ dans le spectre du courant statorique.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, on a présenté l'effet de cassure des barres rotoriques avec une prise en compte des harmoniques d'espace, et ainsi identifié les signatures les plus significatives sur le spectre du courant statorique à partir des résultats obtenus par la simulation.

Les cassures de barres engendrent :

- des oscillations sur le couple et la vitesse ;
- l'augmentation d'amplitude du couple moyen ;
- l'apparition d'harmoniques sur les courants statoriques.

L'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres de la cage rotorique. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence, présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique, permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique de la machine par la présence des harmoniques de fréquences $(1-2g)f$.

L'analyse de l'amplitude des harmoniques d'espace dans le spectre du courant statorique donne des informations supplémentaires non négligeables pour le diagnostic des défauts rotoriques.

Paramètres de la machine étudiée :

Puissance nominale	1,5 kW
Couple de charge nominale	N.m
Tension nominale	230 V
Fréquence statorique nominale	f = 50 Hz
Nombre de paires de pôles	p = 1
Résistance d'une phase du stator	$R_s = 7,828 \Omega$
Résistance d'une barre rotorique	$R_b = 0,0510-7 \Omega$
Résistance d'un segment d'anneau rotorique	$R_a = 52e-7 \Omega$
Inductance de fuite statorique	$L_{fs} = 0,161 H$
Inductance de fuite rotorique	$L_{rb} = 1e-7 H$
Inductance d'un segment d'anneau rotorique	$L_{fa} = 1e-7 H$
Moment d'inertie des masses tournantes	$J = 1,5 \cdot 10^{-4} SI$
Coefficient de frottement	f = 0.000015
Nombre de barre rotorique	$N_r = 28$
Longueur active du circuit magnétique	l = 0.065 m
Rayon moyen à l'entrefer	r = 0.02575 m
Nombre de spires par phase au stator	$N_{sw} = 160$
Longueur moyenne de l'entrefer	e = 0.002 m

Références

- [1] D. Gaetan, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillance », Thèse de doctorat, octobre 2004, Nancy I.
- [2] Smail bachir, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », PhD thesis, Ecole supérieure d'ingénieurs de POITIERS, France, 1992.
- [3] E. Schaeffer, « Diagnostique des machines asynchrones : modèle et utile paramétrique dédiés à la simulation et à la détection de défauts », thèse de doctorat, décembre 1999, Nantes.
- [4] H. Razik et D. Gaiten, « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone », 2003.
- [5] Roland Kasmir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes », Lyon, décembre 2003 [5] Hubert Razik, « Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art », juin 2002.
- [6] M. E. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys. « Induction Motors Faults Detection and Localisation Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques », IEEE, Transaction on Power Electronics, Vol 14 n°1, pp 14-22, Jan 1999.
- [7] O. Touhami and M. Fadel, « Faults diagnosis by parameter identification of the squirrel cage induction machine », International Electric Machines & Drives Conference, IEEE IEMDC '07, pp. 821–825, 3-5 May 2007. Antalya.
- [8] Hosini Yacine, Mekki Mohammed, « Emploi de l'approche des vecteurs de Park à la détection des défauts rotoriques du moteur à induction », thèse d'ingénieur d'état, Juin 2005, USTO
- [9] S. A. Al Kazzaz Sa'ad, G.K. Singh. « Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques », Electric Power Systems Research 65, pp 179-221, 2003.
- [10] M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman. « What Stator Current Processing Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis? », IEEE, Transaction on Energy Conversion, VOL 18 n°2, pp 238-244, Jun 2003.
- [11] T. Boumegourat, « Recherche de Signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateur en une diagnostic », thèse de doctorat 2001, l'école doctorale de Lyon.
- [12] M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman. « What Stator Current Processing Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis? », IEEE, Transaction on Energy Conversion, VOL 18 n°2, pp 238-244, Jun 2003.
- [13] Malek Bouharkat, « Étude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique », thèse de doctorat février, 2006.
- [14] M. E. H. Benbouzid. « A review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection », IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp1950-1955, 1998.
- [15] Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults H. A. Toliyat and T. A. Lipo IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, pp. 214-247, June 1995.
- [16] Zhongming Ye; Bin Wu; "Induction motor mechanical fault simulation and stator current signature analysis", Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on Volume 2, 4-7 Dec. 2000 Page(s):789 - 794 vol.2