
Comparaison de trois techniques dédiées au diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage

Abdennacer Aboubou*, – Mohammed Sahraoui*
Salaheddine Zouzou*– Noureddine Harid*
Hubert Razik** – Abderrezak Rezzoug****

* *Laboratoire M.S.E.*

Université Med KHIDER BP145, 07000 Biskra, Algérie.

{aboubou_nacer, s_moh78, zouzou_s, n_harid}@hotmail.com

** *Green-UHP UMR 7037*

Faculté des sciences et techniques-B.P.239

F-54506 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France

{Hubert.Razik, Abderrezak.Rezzoug}@green.uhp-nancy.fr}

RÉSUMÉ. Dans cet article, nous avons présenté une comparaison de trois méthodes dédiées à la détection des défauts rotoriques tels que les ruptures de barres et/ou de portions d'anneaux de court circuit dans un moteur asynchrone triphasé à cage. La première de ces méthodes est basée sur l'analyse spectrale du courant statorique, la deuxième est basée sur l'analyse du module du vecteur de Park du courant statorique et la troisième exploite le contenu spectral de la puissance instantanée absorbée par le moteur. Les principes théoriques de ces approches sont présentés. Des tests de simulation et d'expérimentations prouvent l'efficacité de ces trois méthodes pour différents degrés de sévérité de défauts et pour différentes charges. Nous avons montré à travers ces résultats l'efficacité de la méthode du courant statorique du point de vue sensibilité à la sévérité du défaut ainsi que la simplicité de la mise en œuvre.

ABSTRACT. In this article, we present a comparison in three methods of detection of the rotor defects such as the ruptures of bars and/or of the portions of rings of short circuit in a three-phase asynchronous cage motor. The first method is based on the spectral analysis of the stator current, second is based on the analysis of the module of Park current stator vector and third exploits the spectral contents of the instantaneous absorptive power by the motor. The theoretical principles of these approaches are presented. Tests of simulation and experimentation's make prove the effectiveness of these three methods for various degrees of severity of the defects and for various loads. We show through these results the effectiveness of the method of the stator current of the point of considering sensitivity to hardness of the defect as well as the simplicity of application.

MOTS-CLÉS: puissance instantanée, courant statorique, vecteur de park, diagnostic, défauts rotoriques, moteur asynchrone.

KEYWORDS: instantaneous power, statoric current, Park vector, diagnostic, rotoric fault, induction motor.

1. Introduction

Actuellement, le moteur asynchrone devient l'élément clé dans l'industrie et est de plus en plus utilisé dans les différents secteurs de pointe (l'aéronautique, le nucléaire, les transports ferroviaire, etc.). Malgré qu'il soit réputé pour être le plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de nature très différentes (électriques, thermiques, mécaniques et d'environnements) [BON 88], [BON 92] peuvent restreindre sa durée de vie, en faisant apparaître des pannes au niveau du stator, du rotor, voir les deux.

Une étude statistique [THO 01] a montrée que près de 41% des défaillances dans les moteurs asynchrones sont causées par des défauts au niveau des roulements, 37% par les défauts au niveau du stator et 10% par les anomalies au niveau du rotor ; le solde affecte les autres parties du moteur (figure 1).

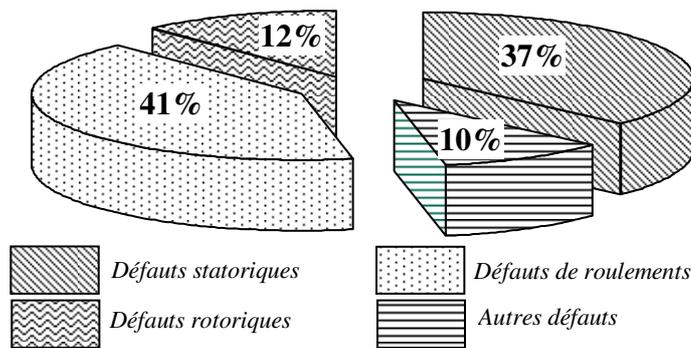


Fig. 1 Distribution des défauts dans les différentes parties d'un moteur asynchrone.

Selon cette étude, il s'est avéré que les défauts rotoriques sont moins fréquents que ceux statoriques, mais l'application des méthodes de diagnostic dans les installations industrielles a montré [THO 03] que les ruptures de barres rotoriques dans les moteurs à induction de grande puissance peuvent devenir un problème sérieux et délicat. Ceci est due principalement à l'inaccessibilité en fonctionnement des grandeurs rotoriques d'une part, et d'autre part, les cassures de barres n'occasionnent pas obligatoirement l'arrêt immédiat du moteur. Elles entraînent des effets secondaires très dangereux pour l'opérateur, la machine ainsi que pour toute la chaîne de production.

La figure 2 ci-dessous représente le rotor d'un moteur asynchrone triphasé de 1950 kW, 120 A, 50 Hz, 1485 tr/mn, utilisé dans une base pétrolière à la mer du nord [THO 03]. La photo représente après quelques modifications pour accentuer le contraste barres cassées - barres saines.

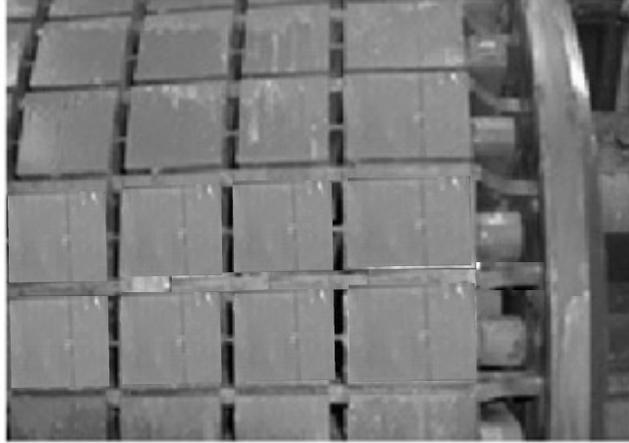


Fig.2 *Le rotor d'un moteur à l'état sain*

Suite à des contraintes trop sévères de différentes natures, une barre a été rompue. Le défaut n'étant pas été détecté au moment opportun, une portion de la barre rompue a été soulevée totalement (comme on peut le voir sur la figure 3) détruisant les enroulements statoriques et par conséquent engendrant l'arrêt total du moteur.

Le prix de la réparation du rotor et le rebobinage complet du stator ainsi que les pertes causées en production ont dépassés 300.000 \$.

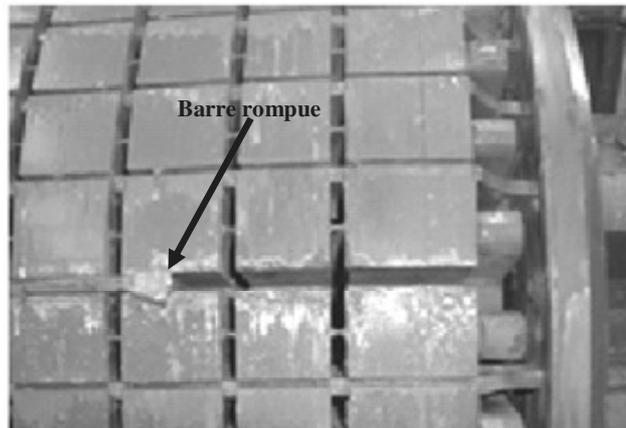


Fig. 3 *Le rotor avec une barre rompue et soulevée.*

Cet incident sans précédent dans son genre, représente une catastrophe technico-économique, sans compter les conséquences corporelles qu'il pouvait causer ; donc il est impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats afin d'éviter des arrêts imprévus et réduire au maximum les pertes économiques.

La surveillance est un moyen pour garantir le bon fonctionnement des systèmes industriels, elle sert d'une part à signaler les anomalies de fonctionnement et d'autre part, à prendre en compte les actions destinées à maintenir l'opération des systèmes.

Le diagnostic fait partie de la surveillance, qui a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle. Une stratégie du diagnostic doit impérativement prendre en compte les facteurs suivants :

- Les différents types de conceptions du rotor.
- La grande marge de la puissance.
- Les caractéristiques des charges.
- Les différentes composantes mécaniques qui constituent les systèmes d'entraînements.

La variété de ces facteurs ainsi que la diversité des défauts et les causes possibles entraînant une panne dans les moteurs asynchrones, facilitent les erreurs sur la nature et la localisation de cette panne. Un diagnostic fiable, nécessite donc une bonne connaissance des mécanismes des défauts ainsi que leurs conséquences sur les grandeurs électriques et mécaniques du moteur.

Selon [BON 92], les principales causes entraînant une rupture de barres sont :

- Un démarrage direct qui provoque des contraintes thermiques et mécaniques trop sévères sur le rotor qui n'est pas conçu pour supporter de telles contraintes ;
- Des pulsations mécaniques et des variations inattendues dans la charge.
- Des imperfections due à une mauvaise conception, mauvaise fabrication ou mauvais montage.

Pour effectuer le diagnostic d'un moteur asynchrone, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de cette machine. En effet, les évolutions temporelles et fréquentielle de ces signaux peuvent être exploitées pour obtenir des informations sur l'état de santé du moteur. D'après la littérature, les principaux signaux utilisés en diagnostic sont :

- Le courant statorique [KLI 92], [SCH 95], [BEL 01] ;
- La puissance instantanée [MAI 92], [LEG 96], [TRZ 00] ;
- Le vecteur de Park [CAR 95], [CRU 00] ;
- Le couple [HSU 95], [JAC 98] ;

- Les vibrations mécaniques [CAM 86] ;
- Le flux magnétique axial de fuite [TOL 02].

Nous présentons dans cet article, trois méthodes qui sont :

- La méthode du courant statorique,
- La méthode de la puissance instantanée et
- La méthode du vecteur de Park

Elles sont dédiées à la détection des défauts rotoriques dans un moteur asynchrone triphasé à cage de 3 kW alimenté directement du réseau.

2. Détection des défauts par l'analyse du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques [THO 01], [BEN 99], [SCH 95], [KLI 92]. Cette technique est dénommée "Motor Current Signature Analysis" (MCSA).

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles) ;
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant.

2.1. Modèle mathématique

La modélisation du moteur à cage nous permet de représenter la rupture de barres ou de portions d'anneaux de court-circuit sous forme de mailles reliés entre elles électriquement et couplés magnétiquement, où chaque maille est constituée de deux barres et des deux portions d'anneaux qui les relie (figure 4). Le nombre d'équations différentielles obtenues est égal au nombre de barres plus une (afin de prendre en considération l'un des deux anneaux) [BON 88]. La rupture d'une barre, dans notre cas, est modélisée par l'augmentation considérable de la résistance de la barre considérée.

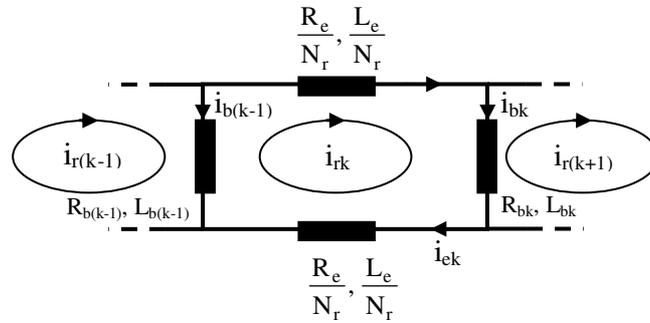


Fig. 4 Schéma équivalent d'une maille du rotor.

2.2. Mise en équation

Sous les hypothèses classiques, le modèle mathématique de la machine est donné par l'équation de tension globale :

$$\begin{bmatrix} v_{os} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad [1]$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park, dont le repère est lié au rotor.

A ces équations, on ajoute les équations électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad [2]$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad [3]$$

avec :

$$C_e = \sqrt{\frac{3}{2}} p L_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \cos(k a) - i_{ds} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \sin(k a) \right\} \quad [4]$$

2.3. Simulation de la rupture de barres

La figure 5 représente l'évolution du couple électromagnétique, le courant statorique ainsi que la vitesse de rotation et le courant dans la barre 1, lors de la rupture de celle-ci à l'instant $t = 2s$. Puis on simule la rupture de la barre 2 à l'instant $t = 3s$. On constate que la cassure d'une barre rotorique crée des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. Les amplitudes de ces oscillations et ces modulations augmentent avec le nombre de barres cassées.

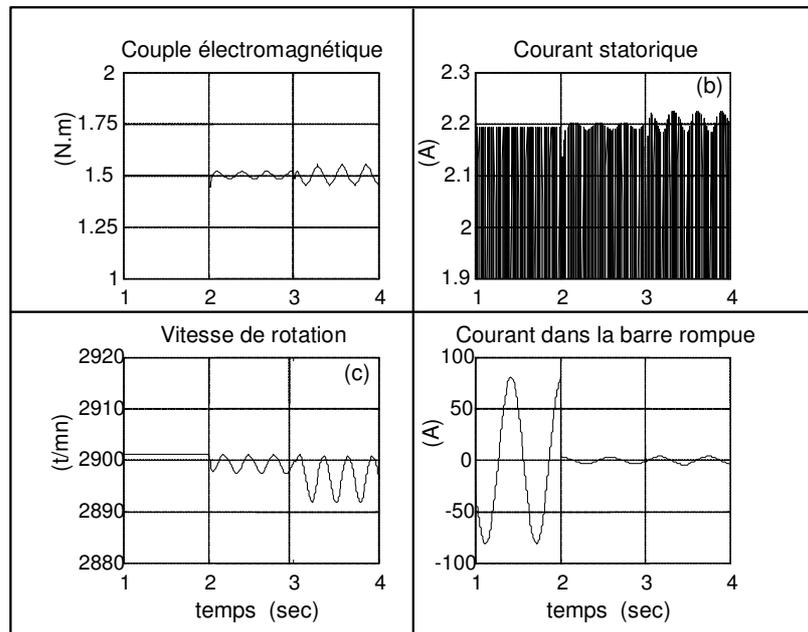


Fig.5 Moteur avec une barre cassée puis deux barres cassées (Agrandissement)

Dans un moteur asynchrone triphasé et lorsque la cage est symétrique (absence de défauts), les courants rotoriques produisent un champ magnétique tournant direct de fréquence gf_s par rapport au rotor, ayant le même nombre de pôles que celui du stator.

Cependant, la présence d'un défaut de barres et/ou de portions d'anneaux de court-circuit provoque une asymétrie tant géométrique que magnétique. Par conséquent, les courants rotoriques vont créer en plus du champ tournant direct un autre champ tournant inverse de fréquence $-gf_s$ induisant une série d'harmoniques de fréquences $(1 \pm 2k)gf_s$ dans les enroulements statoriques, accompagné par des pulsations de fréquence $2kgf_s$ dans le couple et la vitesse de rotation.

Le lecteur peut se reporter pour plus de détail sur le fonctionnement du moteur asynchrone avec des barres rompues à [DOR 96] et [ABE 02]. Les ruptures de barres rotoriques sont donc caractérisées par l'apparition des raies dans les courants statoriques de fréquences [SCH 95] :

$$(1 \pm 2.k.g)f_s \quad [5]$$

ou :

$$\left[\frac{k}{p}(1-g) \pm g \right] f_s \quad [6]$$

avec, $k/p = 1, 5, 7, \dots$

3. Détection des défauts par l'approche du vecteur de park étendu

Cette approche a été proposée par [CRU 00], elle est basée sur l'exploitation du contenu spectral du module du vecteur de Park. Les composantes i_d et i_q du vecteur de Park dans un repère lié au stator sont données par :

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a - \sqrt{\frac{1}{6}} i_b - \sqrt{\frac{1}{6}} i_c \\ i_q = \sqrt{\frac{1}{2}} i_b - \sqrt{\frac{1}{2}} i_c \end{cases} \quad [7]$$

Pendant l'état sain, les courants i_a , i_b et i_c sont des signaux purement sinusoïdaux.

$$\begin{cases} i_{a,0}(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha) \\ i_{b,0}(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{c,0}(t) = i_m \cos(\omega_s t - \alpha - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad [8]$$

Cependant, la présence d'une anomalie (rupture de barres, variation de la charge,) dans un système d'entraînement affecte, d'une manière périodique, les courants, le couple et la vitesse.

Si on suppose une distribution idéale des enroulements statoriques autour de la périphérie de l'entrefer, les courants statoriques i_a , i_b et i_c sont modulés par une fréquence f_{osc} des oscillations créées par l'anomalie, on peut écrire, donc :

$$\begin{cases} i_a(t) = i_{a,0}(t) [1 + M \cos(\omega_{osc} t)] \\ i_b(t) = i_{b,0}(t) [1 + M \cos(\omega_{osc} t)] \\ i_c(t) = i_{c,0}(t) [1 + M \cos(\omega_{osc} t)] \end{cases} \quad [9]$$

où, M représente l'indice de modulation qui dépend de la sévérité du défaut

et $\omega_{osc} = 2\pi f_{osc}$.

En remplaçant [9] dans [7] et en calculant le carré du module du vecteur de Park, nous obtenons :

$$(i_d^2 + i_q^2) = \frac{3}{2} i_m^2 \left(1 + \frac{M^2}{2}\right) + 3i_m^2 M \cos(\omega_{osc} t - \alpha) + \frac{3}{2} i_m^2 M^2 \cos(2\omega_{osc} t - \alpha) \quad [10]$$

On peut remarquer que le module du vecteur de Park est la somme d'une composante continue et une autre oscillatoire dont les pulsations ω_{osc} et $2\omega_{osc}$ caractérisent la présence d'un défaut.

Dans le cas d'une rupture de barres la pulsation est $\omega_{osc} = 2g\omega_s$.

4. Détection des défauts par l'analyse de la puissance instantanée

Parmi les travaux sur l'utilisation de la puissance instantanée pour le diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones nous trouvons ceux de R. MAIER [MAI 92] et S. F. LEGOWSKI [LEG 96].

Il est important de noter que la puissance instantanée peut être mesurée en tant que puissance totale absorbée $P_{s, \text{tot}}$

$$P_{s, \text{tot}}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad [11]$$

ou, en tant que puissance partielle ($P_{s, \text{ab}}$ et $P_{s, \text{cb}}$) qui est égale au produit d'un courant de ligne (i_a par exemple.) et une tension entre ligne (v_{ab} par exemple.) [TRZ 00]:

$$P_{s, \text{ab}}(t) = v_{ab}(t)i_a(t) \quad [12]$$

Le principe de l'approche que nous présentons, repose sur l'exploitation du contenu spectral de la puissance instantanée totale $P_{s, \text{tot}}$ absorbée par le moteur.

Pour un moteur idéal entraînant une charge constante et alimenté par une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_{a,0}(t) = v_m \cos(\omega_s t) \\ v_{b,0}(t) = v_m \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{c,0}(t) = v_m \cos(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad [13]$$

En remplaçant [7] et [13] dans [11], on obtient :

$$P_{s, \text{tot},0}(t) = \frac{3}{2} v_m i_m \cos \alpha \quad [14]$$

Elle correspond à la puissance moyenne réelle absorbée par le moteur pendant l'état sain. Pour trouver l'expression de la puissance instantanée totale absorbée par un moteur avec un défaut rotorique, il faut substituer [9] et [13] dans [11], on obtient finalement :

$$P_{s, \text{tot}}(t) = P_{s, \text{tot},0}(t)[1 + M \cos(\omega_{osc} t)] \quad [15]$$

On remarque que cette puissance contient une composante continue (puissance moyenne) et une composante à la fréquence des oscillations f_{osc} , appelée composante caractéristique. Cette dernière est très importante, puisqu'elle apporte des informations précieuses sur le défaut.

5. Résultats et discussions

Les essais expérimentaux sont effectués sur un banc expérimental au sein du laboratoire du GREEN-UHP à Nancy en France. Le moteur utilisé est de : 3kW, 230/400v, 2800tr/mn et 50Hz, fabriqué par Sew-Usocom. Les caractéristiques détaillées sont présentées dans l'annexe. Le moteur est couplé avec une génératrice de courant continu chargée par des résistances variables (figure 6).

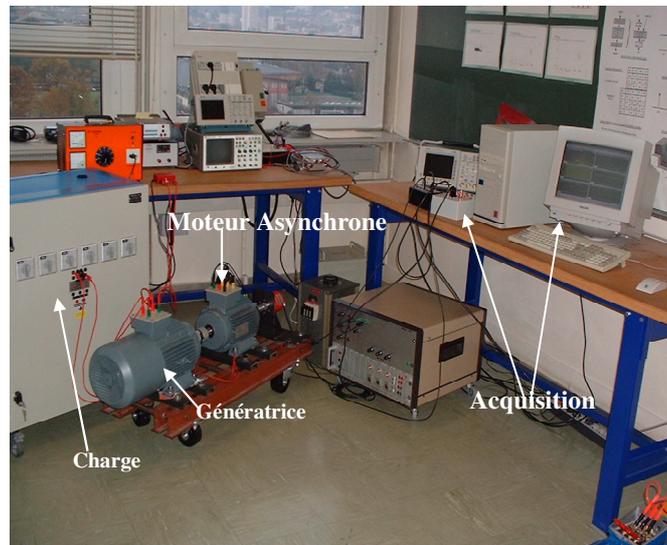


Fig.6 Le banc d'essai utilisé

Dans un premier temps, les courants et les tensions statoriques sont enregistrés. Puis, pour obtenir des informations sur l'état de santé de notre moteur, les trois techniques ont été appliquées ; à savoir celle du courant statorique, de la puissance instantanée et celle de l'approche du vecteur de Park étendu.

Le calcul de la transformée de Fourier rapide ainsi que la visualisation des spectres sont assurés en utilisant un programme implémenté sous l'environnement MATLAB.

D'après la figure 7, on peut constater que même à l'état sain, on observe toujours des raies dans le spectre du courant, du module du vecteur de Park et de la puissance instantanée. Ceci est dû, comme nous avons mentionnés précédemment, à l'asymétrie naturelle du rotor. Pour illustrer ce point là, nous rappelons que la présence d'une excentricité mixte (dynamique plus statique) du rotor se traduit par la création des harmoniques de fréquence [TOL 02] : $f_{exc} = f_s \pm f_r$ dans le courant statorique, où f_s est la fréquence d'alimentation et f_r est la fréquence de rotation. Sans oublier de mentionner que ces mêmes fréquences peuvent révéler aussi un défaut d'alignement mécanique du moteur à sa charge.

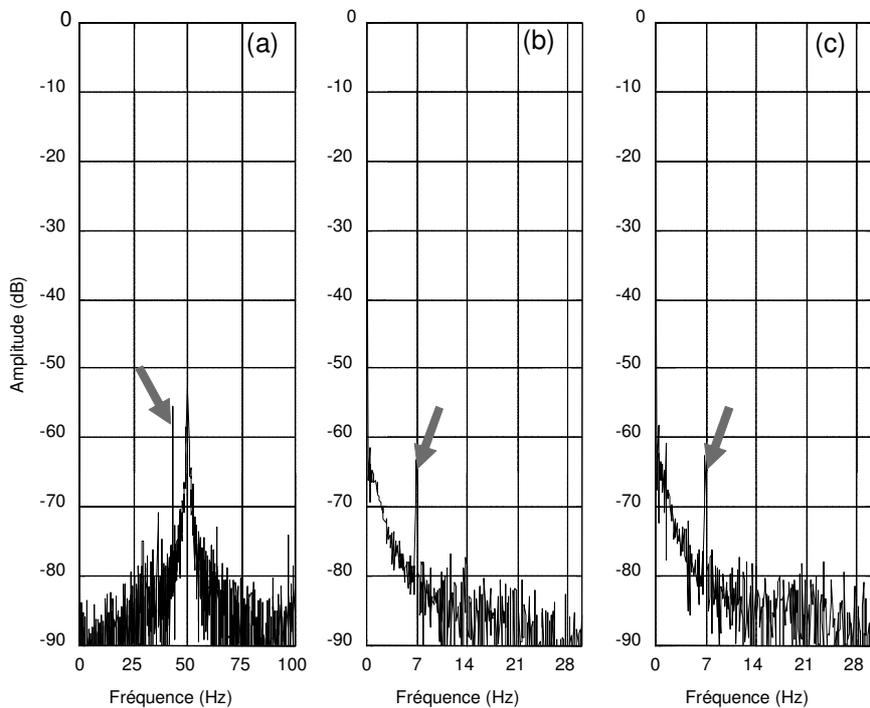


Fig.7 Spectre expérimental (pour un moteur à l'état sain en pleine charge) :
 (a) courant statorique, (b) module du vecteur de Park,
 (c) puissance instantanée totale

Dans notre cas, et pour un moteur de 3 kW à l'état sain, la fréquence de rotation est de 46,55 Hz, donc, les raies caractérisants l'excentricité mixte sont : 3,45 Hz et 96,55 Hz. Les figures 8 et 9 mettent en évidence l'apparition de ces deux raies. Par conséquent, on peut constater que ce moteur présente un certain degré d'excentricité mixte ou d'un défaut d'alignement dû à des imperfections naturelles du rotor.

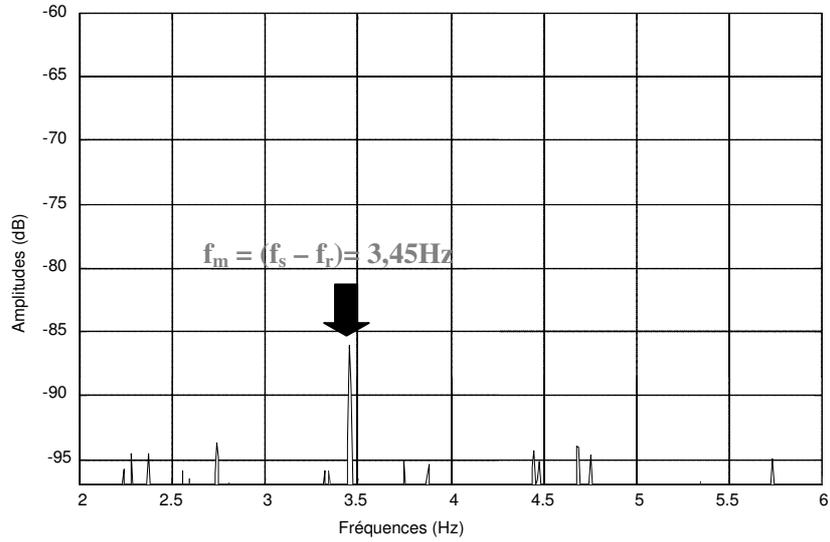


Fig. 8 Spectre du courant statorique pour un moteur en pleine charge à l'état sain (Analyse basses fréquences)

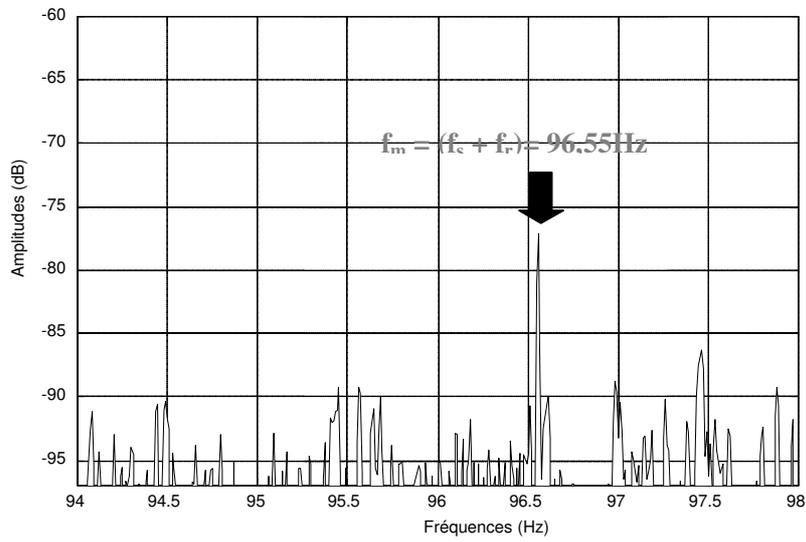


Fig. 9 Spectre du courant statorique pour un moteur en charge à l'état sain (Analyse hautes fréquences).

A cause de cette contrainte et afin d'éviter les fausses alarmes, il est très important de définir un seuil à partir duquel on déclarera l'existence d'un défaut. En effet, selon R.HIRVONEN [HIR 94], si l'amplitude de l'harmonique, la plus significative, caractérisant le défaut est inférieure à -50 dB, on peut considérer que le rotor est en bon état.

Maintenant, le moteur fonctionne en régime nominal avec une barre rompue (Voir la barre rompue ci-dessous), et le glissement correspondant pour un tel régime de fonctionnement tourne autour de 0,085; cela implique que les composantes spectrales caractérisant le défaut doivent être apparues à :

- 41,5 Hz et 58,5 Hz dans le spectre du courant
- 8,5 Hz dans le spectre du module du vecteur de Park et de celui de la puissance instantanée.

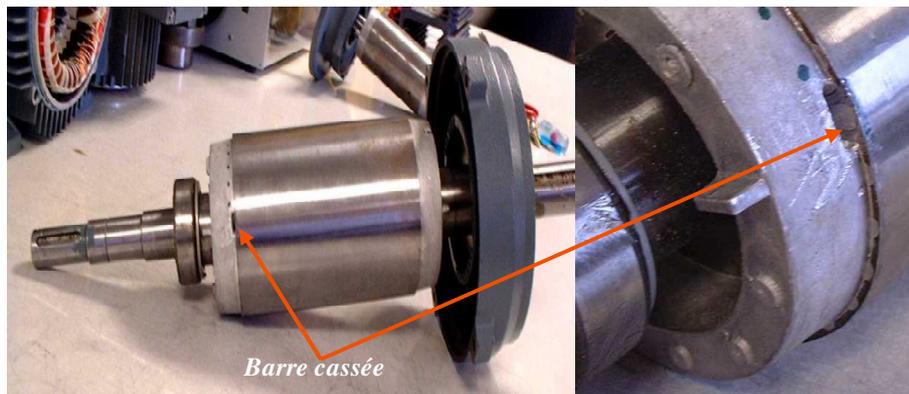


Fig. 10 Rotor avec une barre cassée

La figure 11, met en évidence la présence de ces composantes spectrales indiquant l'existence d'un défaut de barre ; le problème réside dans la prédiction du nombre de barres rompues. Il y a plusieurs formules qui estiment ce nombre [THO 03], [BEL 01], mais à cause de la diversité des phénomènes qui entrent en jeu lors d'une cassure de barres, l'estimation exacte du nombre de ces barres rompues est alors très difficile.

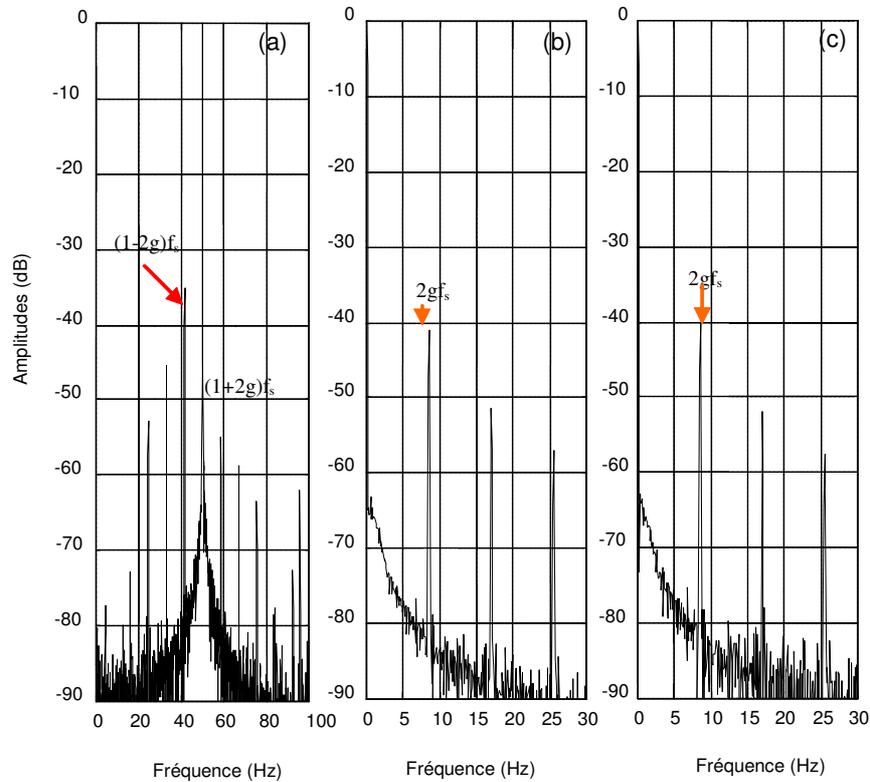


Fig. 11 Spectre expérimental (pour un moteur avec une barre cassée en charge) : (a) courant statorique; (b) module du vecteur de Park; (c) puissance instantanée totale.

"Quelle est la meilleure méthode du diagnostic ?" En réalité, il est difficile de répondre à cette question, puisque chaque technique a des avantages et des inconvénients.

Du point de vu quantité d'information, il est clair que la puissance instantanée totale, qui prend en considération les courants et les tensions dans les trois phases statoriques, apporte plus d'informations pour le procédé du diagnostic surtout lorsqu'il s'agit d'étudier le diagnostic des défauts en présence d'un déséquilibre de tension d'alimentation. De plus, l'utilisation du signal de la puissance instantanée permet la détection des défauts même à de faibles valeurs du glissement.

Du point de vu de la sensibilité à la sévérité du défaut et selon la figure11, on a obtenu les résultats suivants :

- L'amplitude de la composante inférieure $(1-2g)f_s$ du courant statorique est de : -34,5dB ;
- L'amplitude de la composante $2gf_s$ du module de vecteur de Park est de : -41,5dB ;
- L'amplitude de la composante $2gf_s$ de la puissance instantanée est de : -40dB.

Il est clair que l'harmonique $(1-2g)f_s$ est plus sensible à la présence de l'anomalie et pour confirmer ce constat, nous avons suivis l'évolution de l'amplitude des harmoniques caractérisant le défaut en fonction du nombre de barres cassées (voir figure 12 ci-dessous).

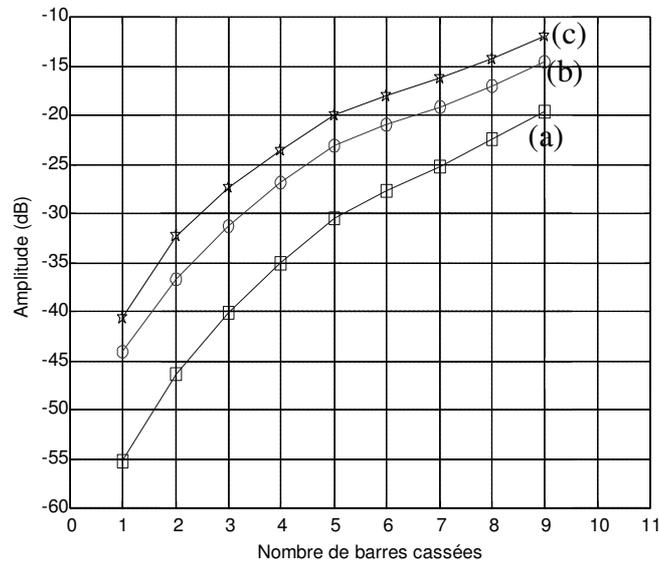


Fig. 12 Evolution simulée en fonction du nombre de barres rompues de :
 (a) Amplitude de l'harmonique $2gf_s$ du vecteur de Park ; (b) Amplitude de l'harmonique $2gf_s$ de la puissance ; (c) Amplitude de l'harmonique $(1-2g)f_s$ du courant statorique.

Pour ce faire, nous avons utilisés un modèle mathématique adéquat afin de simuler le fonctionnement de notre moteur de 3kW (paramètres présentés en annexe) avec plusieurs barres cassées, autrement dit ; différents degrés de sévérité du défaut.

D'après la figure 12, nous remarquons que l'amplitude de l'harmonique inférieur $(1-2g)f_s$ du courant statorique est toujours plus grande que celle $2gf_s$ des autres signaux quelque soit le nombre de barres rompues, ce qui certifie la sensibilité de l'approche du courant statorique par rapport aux autres approches. Par contre nous pouvons voir clairement que la pente de l'amplitude de l'harmonique $2gf_s$ du vecteur de Park est plus signifiante ; ce qui certifie la rapidité de la détection du défaut par l'approche de Park.

Il nous semble très intéressant de mentionner qu'il est parfois possible d'observer, dans le spectre du courant statorique des raies aux mêmes fréquences que celles qui caractérisent une rupture de barres mais de nature purement mécanique (oscillations dans le couple de la charge) [SCH 95], nous les avons d'ailleurs remarqué dans les spectres de la puissance et du module du vecteur de Park (voir figure 7), ce qui peut conduire à un diagnostic erroné (fausse alarme). Pour lever cette ambiguïté, on peut se baser (pour la détection des défauts de barres) sur les harmoniques de hautes fréquences $[k/p (1-g) \pm g]f_s$. Par exemple, dans notre cas, et pour $g = 0,085$, $k/p = 5$ et $f_s = 50$ Hz, l'observation de la raie à 233 Hz indique une cassure de barres (figure 13).

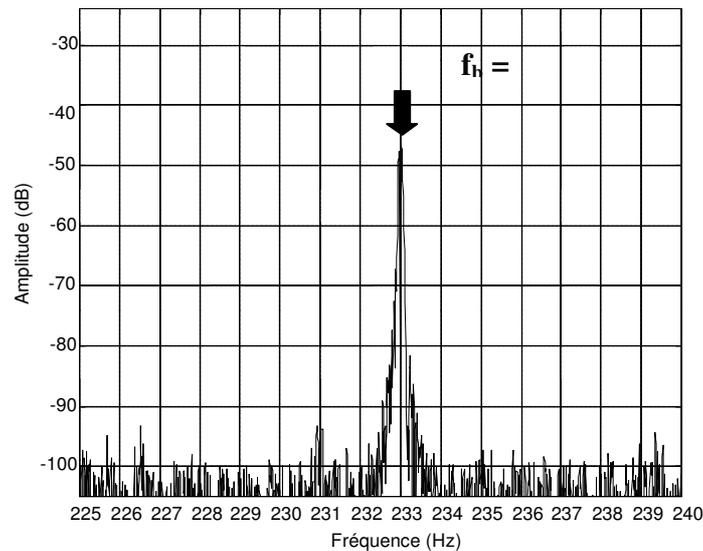


Fig. 13 Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec une barre cassée (Analyse hautes fréquences).

6. Conclusion

Après avoir situé la tâche du diagnostic dans un contexte de la maintenance, nous avons présenté le principe théorique de trois approches dédiées à la détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage.

A travers les résultats obtenus, nous avons constaté ce qui suit :

- Les trois approches sont basées sur l'analyse du courant statorique et que chaque approche possède des avantages et des inconvénients.
- La mesure du courant statorique seule, suffit pour faire un diagnostic valide.
- En plus du diagnostic ; le vecteur de Park est plus adapté au régime du déséquilibre.
- La puissance et en plus du diagnostic, donne aussi un complément d'information sur une chaîne de production par exemple (surcharge).

Enfin il est judicieux de dire que les trois approches suscités fournissent des résultats très proches les uns des autres ; ils sont plus souples quant à leurs accessibilité et mesure à l'extérieure du moteur d'une part et d'autre part, leurs harmoniques sont plus sensibles à la sévérité du défaut. Nous pouvons donc dire que les trois méthodes sont très favorables et avantageuses à la détection des défauts de barres cassées dans les moteurs asynchrones.

Ce constat, bien sur découle des différents essais expérimentaux pour diverses conditions de fonctionnement.

Remerciements

Nous tenons à remercier amplement le ministère de la recherche pour sa contribution financière à l'élaboration du banc d'essais et de mesures.

Nous tenons aussi à remercier monsieur W.T THOMSON [THO 03] pour nous avoir permis de prendre comme référence les photos des figures 1 et 2.

7. Bibliographie

- [ABE 99] ABED A., BAGHLI L., RAZIK H., REZZOUG A., « Modelling induction motors for diagnosis purposes », *EPE'99*, Lausanne, Switzerland, 1999.
- [ABE 02] ABED A., Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone, Thèse de l'Université Henri Poincaré, Faculté des Sciences de Nancy 1, 2002.
- [BAG 01] BAGHLI L., RAZIK H., REZZOUG A., CAIRONI C., DURANTAY L., AKDIM M., « Broken bars diagnosis of 3600 rpm 750 kW induction motor comparison modelization and measurement of phase currents », *SDEMPED'01*, Gorizia, Italia, 2001, p. 3-9.
- [BEL 01] BELLINI A., FILIPPETTI F., and All., « Quantitative evaluation of induction motor broken bars by mean of electrical signature analysis », *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 37, no 5, 2001, p. 1248-1255.
- [BEN 99] BENBOUZID M., VIEIRA M., THEYS C., « Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques », *IEEE Trans. on Indus. Appli.*, vol. 14, no 1, 1999, p. 14-22.
- [BON 88] BONNETT A., SOUKUP C., « Analysis of rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors », *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 24, no 6, 1988, p. 1124-1130.
- [BON 92] BONNETT A., SOUKUP C., « Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors », *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 28, no 4, 1992, p. 921-937.
- [CAM 86] : CAMERON J. R. and al. « Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors », *IEE Proceedings*, Vol. 133, Pt. B, No. 3, 1986, p. 155-163.
- [CAR 95] CARDOSO A. J. M., CRUZ S. M. A., CARVALHO J. F. S. et SARAIVA E. S., « Rotor cage fault diagnosis in three phase induction motors by park's vector approach », *Rec. 1995 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. Orlando, Florida USA*, Vol. I, p. 642-646.
- [CAM 86] CAMERON J., THOMSON W., DOW A., « Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors », *Inst. Elec. Eng.*, 1986, p. 155-163.
- [CRU 00] CRUZ S. M. A., CARDOSO A. J. M., « Rotor cage fault diagnosis in three phase induction motors by extended park's vector approach », *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 28, 2000, p. 289-299
- [DID 01] DIDIER G., RAZIK H., « Sur la détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones », *3EI*, vol. 27, 2001, page 10.
- [DOR 96] DORRELL D., PATERSON N., WATSON J., « The causes and quantification of side-band currents for use in rotor fault detection systems for cage induction motors », *ICEM'96*, Vigo, Spain, 1996, p. 414-419.
- [FAU 01] FAUCHER J., BARAKAT G., HOUDOUIN G., DAKYO B., DESTOBBELEER E., HÉ-NAO H., DELMOTTE C., EKWE G., CAPOLINO G.-A., BAGHLI L., ABED A., RAZIK H., REZZOUG A., BACHIR S., TNANI S., CHAMPENOIS G.,

TRIGEASSOU J.-C., DEVAN-NEAUX V., DAGUES B., « Modélisation de la machine asynchrone en vue de la surveillance et du diagnostic », *Journées SDSE*, Lyon, 2001, page 8.

- [FIL 94] FILLIPPITTI F., FRANCESHINI G., TASSONI C., VAS P., « Broken bar detection in induction machine: comparison between current spectrum approach and parameter estimation approach », *IAS'94*, New York, USA, 1994, p. 95-102.
- [HAR 82] HARGIS C., GAYDON B., KAMASH K., « The detection of rotor defects in induction motors », *IEE ICEM*, London, UK, 1982, p. 216-220.
- [HIR 94] HIRVONEN R., « On-line condition monitoring of defects in squirrel cage motors », *ICEM'94*, Paris, France, vol. 2, 1994, p. 267-272.
- [HSU 95] HSU J. S., « Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation », *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 31, No.5, 1995, pp. 1016-1021.
- [JAC 98] JACO A., MAKKI A., YAHOUH H., GRELLET G., « Modelling of three phase asynchronous motors application to magnetic faults diagnostic », *ICEM 98, Istanbul, Turkey*, Vol 1, 1998, p. 443-447.
- [KLI 88] KLIMAN G. B., STEIN J., ENDICOTT R., MADDEN R., « Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors », *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 3, no 4, 1988, p. 873-878.
- [KLI 92] KLIMAN G., STEIN J., « Methods of motor current signature analysis », *Electrical Machines and Power Systems*, vol. 20, no 5, 1992, p. 463-474.
- [LEG 96] LEGOWSKI S. E., SADRUL ULA A. H. M., TRZYNADLOWSKI A. M., « Instantaneous power as medium for the signature analysis of induction motors », *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 32, No.4, 1996, p. 904-909.
- [MAI 92] MAIER R., « Protection of squirrel-cage motor utilizing instantaneous power and phase information » *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 28, No. 2, 1992, p. 376-380.
- [SCH 95] SCHOEN R., HABETLER T., KAMRAN F., BARTHELD R., « Effect of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines », *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 31, no 4, 1995, p. 900-906.
- [THO 01] THOMSON W.T, FENGER M., « Current signature analysis to detect faults in induction motor drive », *IEEE-IAS Magazine*, vol. 7, no 4, 2001, p. 26-34.
- [THO 03] THOMSON W.T, FENGER M., « Case histories of current signature to detect faults induction motor », *Proceeding of the IEEE-IEMDC*, Madison, Wisconsin, USA, p. 1459-1466.
- [TOL 02] : TOLIYAT H. A., « Condition monitoring and fault diagnosis of electric machinery », *US Army Vetronics Institute – 2002 Winter Workshop*.
- [TRZ 00] TRZYNADLOWSKI A. M., RITCHIE E., « Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors : A Case of Rotor Cage Faults », *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, 2000, p. 1092-1099.

[VAS 94] VAS P., FILLIPPITTI F., FRANCESHINI G., TASSONI C., « Transient modelling oriented to diagnostics of induction machines with rotor asymmetries », *ICEM'94*, Paris, France, 1994, p. 62-67.

8. Annexe

P	Puissance nominale	3kW
U(Y/Δ)	Tension nominale de ligne	230/400V
f_s	Fréquence d'alimentation	50Hz
p	Nombre de paire de pole	1
D	Diamètre moyen	89 mm
l	Longueur	125 mm
e	Epaisseur d'entrefer	0,172 mm
N_r	Nombre de barre	28
N_s	Nombre de spire par phase	80
R_s	Résistance d'une phase statorique	2,86 Ω
L_{sf}	Inductance de fuite statorique	0,009594 H
R_b	Résistance d'une barre rotorique	28,56 $\mu\Omega$
R_c	Résistance d'un anneau de court circuit	15,74 $\mu\Omega$
L_b	Inductance de fuite d'une barre rotorique	1,27 μH
L_c	Inductance de fuite d'anneau de court circuit	1,27 μH
J	Moment d'inertie	0,023976 Kg.m ²
k_0	Coefficient de frottement	5 10 ⁻⁶ Nms