



OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: [http://oatao.univ-toulouse.fr/n° 21664](http://oatao.univ-toulouse.fr/n°21664)

To cite this version:

Trajin, Baptiste: Détection automatique et diagnostic des défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques, Conférences des jeunes chercheurs en Génie électrique, Lyon, France, 2008 (Décembre)

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Détection automatique et diagnostic des défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques

B. Trajin

Université de Toulouse ; LAPLACE ; CNRS, INPT, UPS ; 2 rue C. Camichel, BP 7122, 31071 Toulouse Cedex 7
email : baptiste.trajin@laplace.univ-tlse.fr

Résumé—Cet article traite de la détection de défauts de roulements dans les entraînements à base de machine asynchrone par analyse des courants de phase statoriques. D'une part, on démontre que les défauts de roulements entraînent des oscillations du couple de charge à des fréquences caractéristiques du roulement. D'autre part, un modèle de courant statorique démontre qu'en présence d'oscillations du couple de charge, il existe des modulations de phase sur ces courants. Ces modulations de phase se manifestent dans le domaine fréquentiel par l'apparition de composantes latérales sur le spectre du courant qui sont utilisées pour la détection des défauts de roulements. Pour mettre en place un schéma de détection efficace, il est impératif d'étudier les lois de variations des amplitudes de ces composantes en fonction de la fréquence de modulation considérée. La fonction de transfert électromécanique de l'entraînement qui relie l'amplitude de ces composantes latérales à la fréquence des oscillations de couple, est ainsi étudiée. Elle fait apparaître l'existence d'une résonance permettant d'amplifier les effets des oscillations de couple sur les courants statoriques et permet ainsi d'améliorer la qualité de la détection des défauts. Un indicateur de détection de défauts de roulements est donc présenté puis testé sur des roulements artificiellement dégradés. Finalement, l'indicateur est validé sur des roulements usés provenant du service après-vente d'un fabricant de machines.

I. INTRODUCTION

Les entraînements électriques à base de machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leur faible coût, de leurs performances et de leur robustesse. Cependant, des modes de fonctionnements dégradés peuvent apparaître durant la vie de la machine. Les références [1] – [2] passent en revue un grand nombre de cas de défaillances, ainsi que des techniques de détection associées. La raison principale des défaillances de machine reste les défauts de roulements à billes [3] – [4] qui ont de nombreuses causes telles que la contamination du lubrifiant, une charge excessive [5] ou encore des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs à MLI [6] – [7].

Dans les cas de défaillances de roulements à billes, une surveillance vibratoire peut être mise en place [8] mais celle-ci est souvent onéreuse du fait des capteurs piézoélectriques et de leurs conditionneurs. Pour y remédier, la détection et la surveillance peuvent être basées sur l'analyse de grandeurs

électriques telles que les courants de phase du moteur. Plusieurs études ont démontré que des signatures relatives aux défauts de roulements apparaissent dans les spectres de courant [9] – [10]. Pour cela, deux approches sont envisagées : l'une dans laquelle les défauts de roulements induisent de l'excentricité [9], l'autre dans laquelle les mêmes défauts induisent des oscillations du couple de charge [10]. Les signatures spectrales du courant sont alors explorées dans [11]. Cependant, peu d'articles concernent la mise en place d'une détection automatisée à partir de ces signatures spectrales sur les courants statoriques [12]. Ce travail présente la définition et la validation d'un indicateur automatique pour la détection de défauts de roulements par extraction d'énergie dans le spectre des courants statoriques de la machine asynchrone.

Dans cet article, un récapitulatif des effets mécaniques des défauts de roulements est donné dans le paragraphe II. Le paragraphe III rappelle quant à lui la formulation d'un modèle de courant statorique en cas d'oscillations de couple. Par ailleurs, pour plusieurs points de fonctionnement de l'entraînement, la réponse fréquentielle des harmoniques de courant relatifs aux oscillations du couple de charge est étudiée en simulation et en expérimentation sur le banc de test. La réponse fréquentielle fait apparaître une résonance qui est ensuite utilisée pour favoriser la détection des défauts de roulements. Dans le paragraphe IV, un indicateur de défauts de roulements est présenté, intégrant une extraction énergétique localisée dans des bandes fréquentielles spécifiques aux défauts étudiés. Celui-ci est validé sur des roulements avec des défauts localisés puis sur un roulement naturellement dégradé.

II. EFFETS MECANIQUES DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore [5] et l'apparition de vibrations. Nous montrerons également que les défauts de roulements induisent des variations dans le couple de charge de la machine asynchrone.

A. Fréquences caractéristiques des roulements à billes

Des fréquences caractéristiques, provenant de calculs cinématiques, sont associées avec les différents organes constitutifs d'un roulement à billes : la bague externe, la bague interne, la cage et les billes [3], [13] (1). En cas de défaut se présentant sur une partie du roulement, des vibrations à la fréquence caractéristique associée sont

engendrées. Des harmoniques supplémentaires, issus de combinaisons entre les fréquences caractéristiques peuvent apparaître dans les spectres vibratoires (cf. Fig. 1).

$$\begin{cases} f_{be} = \frac{f_r}{2} N_B \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_p} \right) \\ f_{bi} = \frac{f_r}{2} N_B \left(1 + \frac{D_B \cos(\theta)}{D_p} \right) \\ f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_p} \right) \\ f_{bille} = \frac{f_r}{2} N_B \left(1 - \left(\frac{D_B \cos(\theta)}{D_p} \right)^2 \right) \end{cases} \quad (1)$$

avec :

- f_{be} est la fréquence de bague externe,
- f_{bi} est la fréquence de bague interne,
- f_c est la fréquence de cage,
- f_{bille} est la fréquence de bille,
- f_r est la fréquence de rotation mécanique,
- N_B est le nombre de billes du roulement,
- D_B est le diamètre des billes,
- D_p est le diamètre moyen du roulement,
- θ est l'angle de contact.

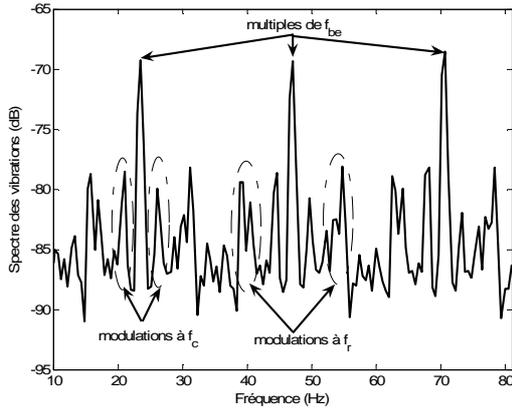


Fig. 1. Spectre vibratoire en cas de défaut bague externe

Dans le cas des roulements à billes de type 6208 équipant notre machine asynchrone, pour une fréquence statorique de 50Hz et donc une fréquence de rotation mécanique proche de 25Hz, les fréquences de bague externe, interne et de cage valent respectivement $f_{be}=89\text{Hz}$, $f_{bi}=136\text{Hz}$ et $f_c=9.9\text{Hz}$.

B. Oscillations du couple de charge dues aux défauts de roulements

Lors de la rotation d'un roulement présentant un défaut mécanique, il se produit des chocs entraînant des vibrations mais également des à-coups de couple. La répétition périodique de ces à-coups de couple dans le temps induit des oscillations du couple de charge qui sont mesurées sur le banc de test à l'aide d'un couplemètre. La Fig. 2 montre, sur une plage fréquentielle réduite du spectre du couple de charge, une comparaison du contenu harmonique pour une machine saine et pour une machine équipée d'un roulement présentant un défaut localisé sur la bague externe. La vitesse

de rotation est nominale, soit proche de 25Hz.

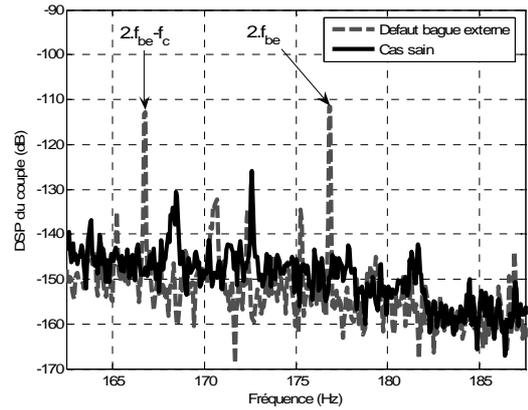


Fig. 2. Spectre du couple de charge – Comparaison cas sain et cas défaillant

On peut remarquer en Fig. 2, sur les spectres de couple en présence d'un défaut de roulement, l'apparition de raies harmoniques à des fréquences caractéristiques des défauts bague externe. En revanche, notons que toutes les combinaisons possibles des fréquences caractéristiques n'existent pas. En conséquence, le contenu spectral du couple de charge relatif aux défauts de roulements ne peut être prévu de manière complète et théorique.

Notons aussi que la détection des défaillances de roulements pourrait se faire via l'analyse du contenu spectral du couple de charge. Cependant, l'implantation d'un couplemètre est bien souvent difficile à réaliser et très onéreuse.

III. MODELE DE COURANT EN CAS D'OSCILLATION DU COUPLE DE CHARGE

A. Modèle de courant statorique

De nombreux travaux [4], [11], [14] montrent que les oscillations du couple de charge provoquent préférentiellement des modulations de phase (PM) sur les courants statoriques. Comme le montre la Fig. 2, le couple de charge peut être représenté par une composante continue d'amplitude C_0 égale au couple électromagnétique de la machine C_{em} et par une série de n harmoniques d'amplitude C_n et de pulsation ω_n , relatifs aux défauts de roulements (2).

$$C_{charge}(t) = C_0 + \sum_n C_n \cos(\omega_n t) \quad (2)$$

Physiquement, en considérant connue la fonction de transfert mécanique $F(j\omega_n)$, l'expression de la position angulaire du rotor $\theta(t)$ (3) de la machine asynchrone comporte également des oscillations aux mêmes fréquences.

$$\theta(t) = \theta_0 + \Omega_0 t + \sum_n \frac{C_n}{\omega_n |F(j\omega_n)|} \cos(\omega_n t + \varphi_n) \quad (3)$$

La position mécanique permet de calculer la force magnétomotrice (FMM) rotorique qui se trouve modulée en phase [11]. Par ailleurs, la FMM statorique est purement sinusoidale. La multiplication de ces FMM par la perméance d'entrefer, considérée comme constante selon la position angulaire et le temps, conduit à l'expression du champ magnétique. L'intégrale de ce champ sur la surface d'entrefer mène au flux magnétique et ainsi à la force électromotrice

(FEM) aux bornes d'une phase par dérivation temporelle. En considérant une relation linéaire liant la FEM au courant de phase, on obtient une expression du courant de phase (4) avec I_s l'amplitude du courant statorique, I_r l'amplitude du courant rotorique, ω_s la pulsation fondamentale des courants statoriques et p le nombre de paires de pôles de la machine.

$$i(t) = I_s \cos(\omega_s t + \phi_s) + I_r \sin \left[\omega_s t + \sum_n \beta_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \right] \quad (4)$$

avec $\beta_n = p \frac{C_n}{\omega_n |F(j\omega_n)|}$.

Le premier terme de (4) est lié à la contribution de la FMM statorique et le second terme, modulé en phase, est lié à la contribution de la FMM rotorique. En considérant des modulations de phase de faible amplitude, on obtient une expression simplifiée du module de la Transformée de Fourier (FT) du courant (5) en fonction de la fréquence f avec $f_s = \omega_s / 2\pi$ et $f_n = \omega_n / 2\pi$ [11].

$$FT\{i(t)\} = (I_s + I_r) \delta(f - f_s) + I_r \sum_n \frac{\beta_n}{2} \delta(f - (f_s \pm f_n)) \quad (5)$$

L'apparition des défauts de roulements peut donc être repérée en analysant les variations énergétiques des composantes fréquentielles à $f_s \pm f_n$ dans le spectre du courant. Le paramètre théorique β_n est obtenu sous des conditions restrictives comme le fait de considérer le couple électromagnétique de la machine constant. Une connaissance plus approfondie de ce paramètre de modulation est donc nécessaire pour caractériser le système en vue de son diagnostic.

B. Variation d'amplitude des composantes latérales

Pour caractériser plus précisément la loi d'évolution de β_n en fonction de la fréquence des oscillations du couple de charge, nous utilisons dans un premier temps un dispositif expérimental. La charge de la machine asynchrone (MAS) est constituée d'une machine à courant continu (MCC) dont l'induit est connecté à un banc de charge résistif par l'intermédiaire d'un hacheur contrôlé en courant. La référence de courant du hacheur permet d'imposer un couple constant plus un couple alternatif oscillant à la pulsation ω_{osc} . Ainsi, en mesurant dans les spectres du couple l'amplitude de l'oscillation imposée par la MCC et, dans le spectre des courants, l'amplitude des composantes latérales de modulation aux fréquences $f_s \pm f_{osc}$, il est possible, pour plusieurs fréquences d'oscillation, de tracer le gain entre l'amplitude de l'oscillation de couple et l'amplitude des raies de modulation, c'est-à-dire obtenir le ratio β_{osc}/C_{osc} en fonction de f_{osc} .

Dans un second temps, afin de caractériser de manière théorique la loi recherchée, une approche de modélisation est proposée. La machine asynchrone est modélisée par ses équations d'état avec comme variables d'état les courants statoriques et les flux rotoriques dans le repère de Concordia (α, β) [15]. La charge mécanique est modélisée selon le

schéma de la Fig. 3 par des inerties J , une raideur d'accouplement k_c et des frottements f . La paramétrisation de ce modèle est réalisée à partir de mesures pour les inerties et frottements, la raideur k_c est quant à elle ajustée de manière empirique par rapport aux données constructeurs pour être en accord avec les mesures. La modélisation du système mécanique conduit à une fonction de transfert d'ordre 2 au numérateur et 3 au dénominateur.

Il est alors possible de comparer les résultats de simulation et de mesure en Fig. 4 pour une fréquence d'alimentation de la MAS de 50Hz.

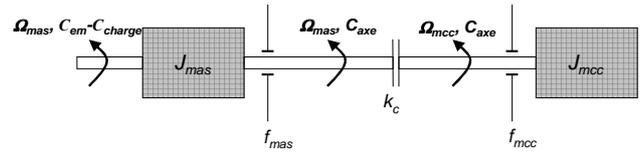


Fig. 3. Modèle du système mécanique

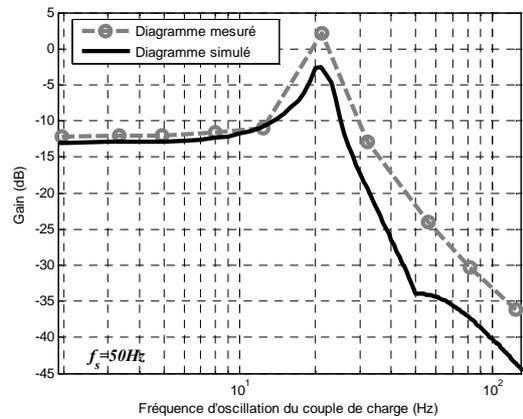


Fig. 4. Comparaison des diagrammes de gain simulés et mesurés

On peut voir sur la Fig. 4 que la simulation est réaliste comparativement aux mesures. Les deux approches montrent l'apparition d'une résonance vers $f_{res} \approx 20$ Hz. Ceci conforte l'approche par modélisation qui permet d'évaluer le comportement fréquentiel recherché sans pour autant effectuer de mesures sur banc de test.

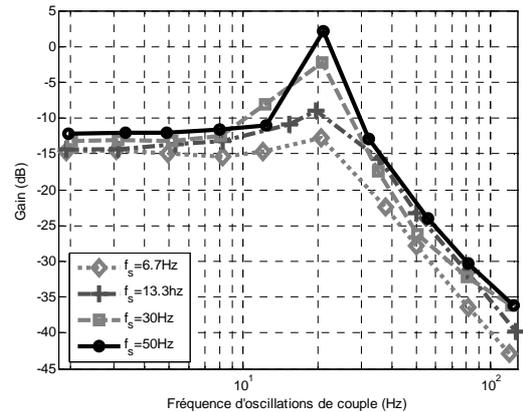


Fig. 5. Diagrammes de gain mesurés pour plusieurs fréquences d'alimentation

On constate, en simulation comme par l'expérience, que le comportement fréquentiel du système varie en fonction de la fréquence d'alimentation statorique. La Fig. 5 illustre ce point en montrant, pour différentes fréquences d'alimentation, l'évolution du diagramme de gain.

On peut remarquer que l'amplitude de la résonance décroît

avec la fréquence statorique mais que sa fréquence est constante. La présence de cette résonance permet d'envisager son utilisation pour amplifier les effets des oscillations de couple sur les signatures fréquentielles des courants lors d'une détection.

C. Exploitation du point de résonance

Il a été démontré que les défauts de roulements à billes induisaient des oscillations du couple de charge. Ces oscillations sont en général de faible amplitude. Or, nous avons montré l'existence d'une résonance dans les diagrammes précédents, qu'il pourrait être utile d'utiliser comme un amplificateur naturel des défauts de roulements.

Sachant que les fréquences caractéristiques des roulements sont linéairement dépendantes de la fréquence de rotation mécanique et donc de la fréquence d'alimentation de la MAS, il faut identifier les fréquences statoriques de sorte que les fréquences caractéristiques du roulement soient dans la bande passante d'amplification du diagramme de gain.

Ainsi, pour détecter via l'analyse des spectres de courant, préférentiellement les effets des défauts localisés sur la bague externe du roulement (défauts entraînant l'apparition d'harmoniques de couple de charge relatifs à la fréquence de bague externe) il est nécessaire d'identifier f_s telle que $f_{be} \approx f_{res}$. Cette condition est réalisée pour une fréquence d'alimentation de 13.3Hz soit une vitesse de rotation d'environ 400tr/min. Dans ce cas, la fréquence caractéristique de la bague interne est de $f_{bi} \approx 36$ Hz. Pour une telle fréquence statorique, les effets sur les courants des oscillations de couple dues à un défaut localisé sur la bague interne sont atténués d'environ 6dB par rapport aux effets dus au défaut de la bague externe. Ceci permet bien de focaliser la détection sur un type de défaut particulier. Réciproquement, pour détecter préférentiellement les effets des défauts localisés sur la bague interne du roulement, il est nécessaire d'identifier f_s telle que $f_{bi} \approx f_{res}$. Cette condition est réalisée pour une fréquence statorique de 6.7Hz soit une vitesse de rotation d'environ 200tr/min. Dans ce cas, la fréquence caractéristique de la bague interne vaut $f_{be} \approx 12$ Hz. Les harmoniques sur le courant liés au défaut de la bague externe sont donc atténués d'environ 3dB par rapport à ceux liés au défaut de la bague interne. Par ailleurs, plus la vitesse de rotation est basse plus les effets des défauts de roulements sur le couple de charge sont faibles. Ainsi, pour une fréquence statorique de 6.7Hz, les défauts de roulements mis préférentiellement en évidence grâce à la résonance, sont des défauts localisés sur la bague interne.

IV. INDICATEUR SPECTRAL SUR LES COURANTS STATORIQUES DE DEFAUT DE ROULEMENTS

Comme nous l'avons évoqué précédemment, une détection des défauts de roulements peut être envisagée à partir des mesures des courants statoriques via une recherche dans le domaine fréquentiel des harmoniques de modulation relatifs aux fréquences caractéristiques du roulement.

Cependant, l'amplitude des harmoniques de modulation peut être faible et noyée dans le bruit de fond des spectres de courant. Afin d'améliorer le rapport signal à bruit des

mesures, les transformées de Fourier (FT) de deux courants de phase sont multipliées afin de corrélérer les signatures [16]. Cette méthode permet d'augmenter l'efficacité de la détection d'harmoniques.

A. Définition de l'indicateur spectral

L'étude du couple de charge en cas de défauts de roulements montre que les contenus spectraux du couple et donc du courant ne peuvent être connus de manière théorique. Par conséquent, il est nécessaire de rechercher dans les spectres de courant, non pas l'apparition d'harmoniques particuliers, mais plutôt une augmentation d'énergie dans des bandes spectrales où des harmoniques relatifs aux défauts sont susceptibles d'apparaître.

L'indicateur de défaut est donc défini comme une extraction d'énergie dans les bandes latérales de modulation à $f_s \pm n f_{def}$ où f_{def} peut être la fréquence caractéristique de bague externe ou de bague interne. De plus les bandes de fréquences sont étendues de façon à tenir compte des éventuels harmoniques faisant intervenir la fréquence de rotation mécanique et la fréquence de cage (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} f_s \pm [n f_{def} - f_c; n f_{def} + f_c] \\ f_s \pm [n f_{def} - f_r - f_c; n f_{def} - f_r + f_c] \\ f_s \pm [n f_{def} + f_r - f_c; n f_{def} + f_r + f_c] \end{array} \right. \quad (8)$$

avec $n \in [1;5]$

Pour estimer la vitesse de rotation, les harmoniques d'encoches rotoriques sont détectés sur les courants de phase [17]. Pour chaque intervalle fréquentiel, l'énergie spectrale est intégrée et normalisée par la valeur maximum dans la bande. La Fig. 6 décrit le principe de l'extraction énergétique. L'indicateur proposé utilise la différence d'énergie relative entre un spectre de courant sain (référence de mesure) et les spectres en cas de défaut dans chaque intervalle de fréquence indicé par k . Les écarts relatifs pour les bandes de fréquences relatives aux fréquences de bague externe et interne (ΔE_{fbe} et ΔE_{fbi} respectivement) sont sommés (9) pour obtenir un écart relatif global ΔE_{tot} .

$$\Delta E_{tot}(k) = \Delta E_{fbe}(k) + \Delta E_{fbi}(k) \quad (9)$$

Enfin, une somme cumulée de ΔE_{tot} est calculée pour construire l'indicateur. Seule la dernière valeur de la somme cumulée définit l'indicateur de défaillance (cf. Fig. 7).

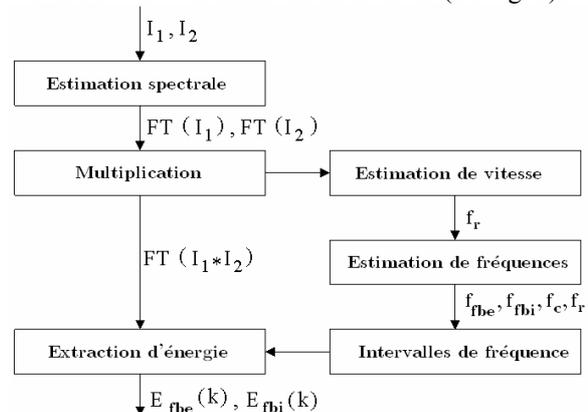


Fig. 6. Principe de l'extraction spectrale d'énergie pour la détection de défauts de roulements

Conformément à la définition de l'indicateur, celui-ci doit être proche de 0, et donc proche de la référence énergétique lorsqu'un roulement sain est testé et doit être largement positif lorsqu'un roulement défaillant est testé.

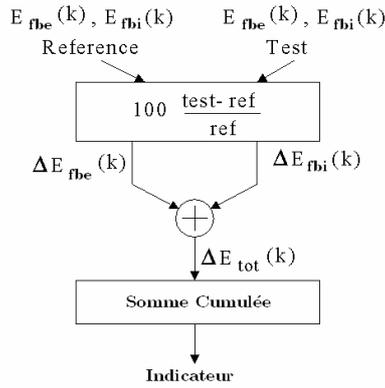


Fig. 7. Calcul de l'indicateur

B. Détection de défauts localisés artificiels

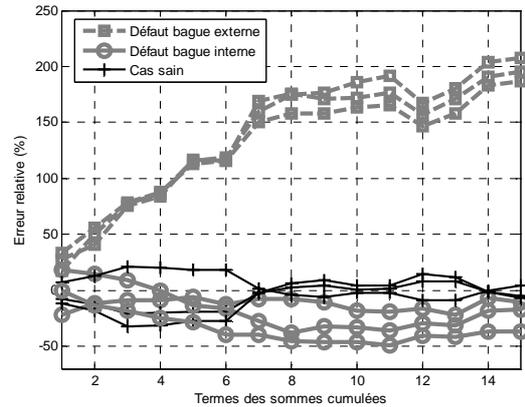
Tout d'abord, afin d'illustrer la pertinence de l'indicateur pour des défauts de roulements, deux cas de défauts localisés sont étudiés. Le premier concerne un défaut constitué d'un trou de 3mm de diamètre dans la bande de roulement externe et le second d'un trou identique dans la bande de roulement interne. Enfin un troisième roulement sain est utilisé à titre de comparatif et de référence énergétique. Tous les signaux sont échantillonnés à 6400Hz pendant 80s.

Dans un premier temps, afin d'utiliser le point de résonance des diagrammes de gain en Fig. 5, la fréquence statorique est réglée à 13.3Hz pour détecter préférentiellement le défaut de la bague externe. Les trois indicateurs pour les différents cas de roulements sont présentés sous forme de somme cumulée en Fig. 8(a). Pour ce point de fonctionnement, seul le roulement avec une bague externe défaillante est détecté de manière significative. Pour le roulement avec une bague interne défaillante, l'indicateur reste proche du cas sain, montrant ainsi l'inefficacité de la détection de ce type de défaut pour cette fréquence d'alimentation. Dans un second temps, les indicateurs pour les trois cas de roulements sont présentés en Fig. 8(b) pour une fréquence d'alimentation de 6.7Hz permettant de mettre en exergue les effets des défauts de la bague interne sur les courants statoriques. On constate alors une détection efficace du défaut bague interne tandis que l'indicateur pour le roulement possédant une bague externe défaillante n'est pas distingué.

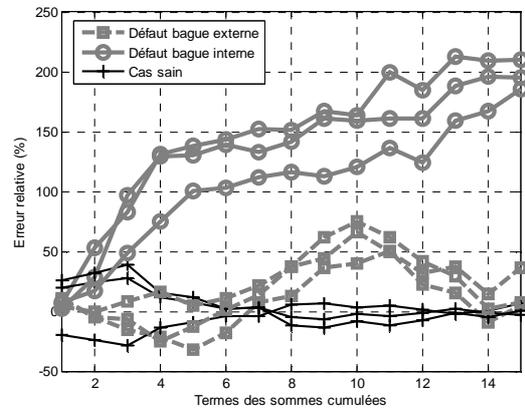
On peut voir en Fig. 8(a) et 8(b) que le roulement sain reste toujours proche énergétiquement de la référence. Pour chaque cas, trois calculs d'indicateurs pour des enregistrements différents sont réalisés afin de vérifier la reproductibilité de la détection.

Chaque type de défaut peut être détecté grâce à l'indicateur, à condition de régler de manière adéquate la fréquence d'alimentation de la MAS afin d'exploiter la résonance pour amplifier les deux types de défauts investigués. Cependant, ceci implique que, pour d'autres fréquences de fonctionnement, l'indicateur ne réagit pas à la présence des défauts. Ainsi, la caractérisation fréquentielle de l'entraînement et l'utilisation des éventuels points de

résonance est essentielle pour la détection des défauts de roulements. Notons que l'utilisation de la résonance permet, en plus d'assurer la détection des défauts, d'effectuer un diagnostic du défaut en précisant sa localisation.



(a). $f_s=13.3\text{Hz}$



(b). $f_s=6.7\text{Hz}$

Fig. 8. Indicateur de défaut de roulements

C. Détection de défauts d'usure naturelle

Le détecteur est maintenant appliqué sur un roulement dégradé considéré comme usé et défaillant par le service après-vente d'un constructeur de machine. Conformément à l'analyse du paragraphe IV.B, pour détecter de manière certaine la présence de défauts sur le roulement, il est nécessaire de tester deux fréquences d'alimentation particulières ($f_s=6.7\text{Hz}$ et $f_s=13.3\text{Hz}$).

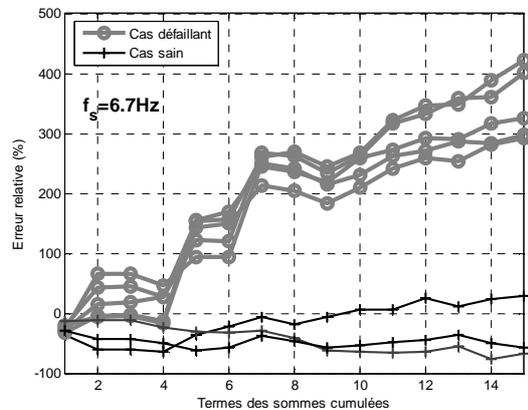


Fig. 9. Indicateur de défaut de roulements – Cas d'un roulement usé

La Fig. 9 montre les sommes cumulées relatives au calcul de l'indicateur pour une fréquence statorique de 6.7Hz dans

le cas du roulement usé.

L'indicateur de défaut ne réagit qu'à cette vitesse, ce qui prouve d'une part que la détection est possible et d'autre part que les défauts principaux sont situés sur la bague interne du roulement. Pour s'en assurer, un spectre vibratoire du roulement défaillant est étudié et confirme, comme le montre le tableau 1, que la majorité des harmoniques de défaut sont relatifs à la bague interne.

HARMONIQUE DE DEFAUT	VARIATION D'ENERGIE
$f_{fbi} + f_r - f_c / 2$	+21dB
$2f_{fbi} - f_c / 2$	+26.5dB
$2f_{fbi}$	+31dB
$3f_{fbi} + f_r - f_c$	+27dB
$3f_{fbi} + f_r$	+18.8dB

TABLEAU 1. EXEMPLE D'HARMONIQUES DE DEFAUT DANS LE SPECTRE VIBRATOIRE DU ROULEMENT USE POUR $F_s=50\text{Hz}$

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons étudié la faisabilité de la détection de défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse des courants statoriques. Tout d'abord, les effets mécaniques des défauts de roulements sur les grandeurs vibratoires et sur le couple ont été présentés. Il a été montré que, sur ces grandeurs, apparaissait en cas de défaut des harmoniques relatifs aux fréquences caractéristiques du roulement à billes. Par ailleurs, un modèle de courant statorique de la MAS en cas d'oscillations du couple de charge démontre l'existence de modulations de phase relatives aux fréquences des oscillations de couple. Afin de compléter le modèle de courant, la loi de variation d'amplitude des raies de modulation en fonction de la fréquence des oscillations a été précisée. Pour cela, la machine, ainsi que la charge mécanique, ont été modélisées sous forme de modèle d'état et de fonction de transfert. Le diagramme de gain obtenu fait apparaître une résonance électromécanique confirmée par les mesures sur le banc de test. Par ailleurs, les mesures ont montré que la résonance était de fréquence fixe mais d'amplitude variable en fonction de la fréquence d'alimentation de la MAS. La caractérisation fréquentielle du système a conduit à définir des points de fonctionnement de la machine permettant de détecter plus aisément les défauts de roulements.

Un détecteur automatique utilisant les signatures spectrales des défauts de roulements sur le courant statorique a été mis en œuvre. Celui-ci est basé sur une extraction d'énergie dans des bandes fréquentielles où sont susceptibles d'apparaître les signatures recherchées. L'indicateur a tout d'abord été testé et validé sur des roulements possédant des défauts artificiels localisés puis sur un roulement naturellement usé. Le point de résonance a été utilisé de manière à amplifier les effets des défauts de roulements sur les courants et à préciser quel type de défaut était détecté. Le schéma de détection proposé permet effectivement de détecter avec un bon indice

de confiance les défauts de roulements de type localisés ou d'usure en utilisant les grandeurs électriques.

Dans les perspectives liées à ce travail, il est prévu d'étudier l'implantation sur des systèmes embarqués et/ou temps réel de ce type d'algorithme de détection en intégrant les aspects associés aux ressources matérielles nécessaires (mémoire de stockage nécessaire pour le calcul de la FFT, puissance de calcul, ...). Une autre voie va consister à étudier la pertinence de l'utilisation de ce type d'indicateur sur des grandeurs mécaniques reconstruites, qui comportent des signatures exploitables pour détecter les défauts de roulement.

REFERENCES

- [1] S. Nandi, H. A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines - a review", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, n. 4, pp. 719-729, Dec. 2005.
- [2] R. Casimir *et al.*, "Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts", *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 8, n. 2, pp. 287-330, 2005.
- [3] J.R. Stack, T.G. Habetler, R.G. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 40 n. 3, pp. 735-739, May-Jun. 2004.
- [4] B. Raison, G. Rostaing, O. Butscher, C. S. Maroni, "Investigations of algorithms for bearing fault detection in induction drives", in *Proc. IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, Sevilla, Spain., 2002, vol. 2, pp. 1696-1701.
- [5] R. A. Guyer, *Rolling Bearings Handbook and Troubleshooting Guide*, Chilton Book Company, Radnor, Pennsylvania, 1996.
- [6] D. F. Busse, J. M. Erdman, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel, G. L. Skibinski, "The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 33, n. 2, pp. 567-576, Mar-Apr. 1997.
- [7] J. R. Stack, T. G. Habetler, R. G. Harley, "Experimentally Generating Faults in Rolling Element Bearings Via Shaft Current", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, n. 1, pp. 25-29, Jan-Feb. 2005.
- [8] S. A. McInerny, Y. Dai, "Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection", *IEEE Trans. on Education*, vol. 46, n. 1, pp. 149-156, Feb. 2003.
- [9] J. R. Stack, R. G. Harley, T. G. Habetler, "An amplitude modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, n. 5, pp. 1097-1102, Oct. 2004.
- [10] R. R. Obaid, T. G. Habetler, J. R. Stack, "Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors", *Proc. Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, USA, 2003, pp. 182-187.
- [11] M. Blodt, M. Chabert, J. Regnier, J. Faucher, "Mechanical Load Fault Detection in Induction Motors by Stator Current Time-Frequency Analysis", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 42, n. 6, pp. 1454-1463, Nov-Dec. 2006.
- [12] J. H. Jung, J. J. Lee, B. H. Kwon, "Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, n. 6, pp. 1842-1852, Dec. 2006.
- [13] T.A. Harris, *Rolling bearing Analysis*, Wiley, New-York, 3rd ed., 1991.
- [14] R. R. Schoen, T. G. Habetler, "Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 31, n. 4, pp. 900-906, Jul-Aug. 1995.
- [15] B. Trajin, M. Chabert, J. Regnier, J. Faucher, "Space vector analysis for the diagnosis of high amplitude and phase modulations in induction motor stator current", *Proc. Condition monitoring*, Edinburgh, UK, July 2008.
- [16] B. Trajin, J. Regnier, J. Faucher, "Bearing Fault Indicator in Induction Machine Using Stator Current Spectral Analysis", *Proc. Power Electronics Machine and Drives Conference*, York, U.K., Apr. 2008, pp. 592-596.
- [17] S. Nandi, S. Ahmed, H. A. Toliyat, "Detection of Rotor Slot and Other Eccentricity Related Harmonics in a Three Phase Induction Motor with Different Rotor Cages", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 16, n. 3, pp. 253-260, Sep. 2001.