



Analyse détaillée du contenu spectral dans le courant statorique des machines asynchrones sous un défaut de la cassure de barres rotoriques en utilisant la technique de la MCSA-FFT

Detailed analysis of spectral content in the stator current under broken rotor bar faults in induction motors using MCSA-FFT technique

Noureddine BESSOUS^{a*}, Mohamed Mounir REZAOUI^b, Imad MERZOUK^b, Abdelhalim BORNI^c, Laid ZAROUR^d

^a University of El Oued, Fac. Technology, Algeria .

^b LAADI, Faculty of Science and Technology, University of Djelfa 17000 DZ, Algeria.

^c Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria.

^d Université Frères Mentouri Constantine, 25000, Département d'électrotechnique, Laboratoire électrotechnique Constantine LEC, Algeria.

ARTICLE INFO

Article history :

Received 29 September 19

Received in revised form 07 January 20

Accepted 08 February 20

Keywords:

Asynchronous machine; Stator current; Motor current signature analysis; Fast Fourier transform; Spectral analysis

Mots clés:

Machine asynchrone; Courant statorique; Motor current signature analysis; Fast Fourier transform; Analyse spectral

RÉSUMÉ

Cet article s'inscrit dans le domaine de la surveillance des machines électriques tournantes qui permettent de vérifier la compatibilité et la fiabilité du système. La machine asynchrone (MAS) est utilisée plus de 90% dans le secteur industriel et/ou domestique lorsqu'on la compare avec d'autres types des machines électriques tournantes. Pour cela, le diagnostic des défauts dans les MAS est une phase primordiale. Parmi les défauts qui peuvent affectés la MAS est le défaut de la cassure de barres rotoriques. Plusieurs techniques ont été utilisées dans ce domaine afin de détecter les défauts dans les MAS. Parmi les techniques les plus utilisées actuellement, est l'analyse du courant statorique. Son principe se base sur le phénomène de la distribution du champ magnétique dans l'entrefer et l'influence de celui-ci sur les courants statoriques. Elle porte l'abréviation ASCM ou ASCS (Analyse les Signatures de Courant du Moteur 'ou du Stator', ou en anglais : Motor Current Signature Analysis 'MCSA'). Cette dernière est l'objectif de notre travail. Nous avons mis en lumière une étude bien précise en présence du défaut de la cassure de barres en se basant sur la transformée de Fourier rapide ou en anglais : fast Fourier transform (FFT). Donc, et pour mieux comprendre les phénomènes affectés par le défaut, une analyse détaillée du contenu spectral du courant statorique de la MAS sous un défaut de la cassure des barres a été effectuée attentivement afin d'aboutir à une décision judicieuse. En outre, une exploitation des résultats expérimentaux ont été bien discutés.

ABSTRACT

This paper is part of the monitoring rotating electrical machines field that verifies compatibility and reliability of system. Asynchronous machine (ASM) is used more than 90% in the industrial and / or domestic sector when compared with other types of rotating electrical machines. For this reason, fault diagnosis in ASM is an essential step. Among the faults which can affect the ASM

* Corresponding author. Tel.: +213 662801943.

E-mail address: bessous-noureddine@univ-eloued.dz

is the broken rotor bars (BRBs). Several techniques have been used in this field in order to detect ASM faults. Among them which used currently, is the stator current analysis. Its principle is based on the phenomenon of the magnetic field distribution in the air-gap with its influence on the stator currents. This technique called Motor Current Signature Analysis (MCSA). We have highlighted a very precise study in the presence of the BRB fault based on the Fast Fourier Transform (FFT) of the stator current. Thus, to better understand the phenomena which affected by the BRB fault; a detailed analysis of the spectral content of the stator current under BRB fault has been carried out carefully in order to reach a best decision. In addition, exploitation of the experimental results was well discussed.

1 Introduction

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques ont des causes variées [1, 2]. La rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux [3-5]. D'autres recherches ont suivi dans la même voie, où ont été étudiées dans le diagnostic d'autres défauts de la machine (désalignement entre la machine et la charge, les courts circuits statoriques, usure des paliers,...) [6, 7]. L'excentricité est l'une des principales causes de défaillance des entraînements électriques [8-11]. L'apparition de l'excentricité crée des vibrations :

- elles sont à l'origine d'une partie du bruit rayonné par cette machine et sont donc indésirables pour les utilisateurs situés à leur proximité ;
- elles peuvent être transmises aux structures avoisinantes et accélèrent la détérioration ou le vieillissement de la machine électrique ;
- elles peuvent également endommager les machines tournantes elles-mêmes ;
- elles sont considérées comme une source de dangers écologique et économique.

Il est certain que la non uniformité de l'entrefer est causée par l'excentricité ; cette dernière est due dans la plupart des cas à un défaut de roulement.

Les machines électriques, particulièrement les machines asynchrones, jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. L'assurance de la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci sont fondamentales. Il est donc nécessaire de développer des systèmes, permettant de surveiller et de diagnostiquer l'état de santé de ces dispositifs.

Plusieurs techniques peuvent traiter le signal du courant statorique afin d'extraire un ensemble d'informations en se basant sur la signature de celles-ci [12-16].

Dans ce travail, nous allons essayer d'exploiter les résultats expérimentaux des machines défectueuses, ayant pour objectif d'apporter un bon diagnostic en utilisant une méthode qui se base sur l'analyse du courant statorique.

La méthode d'Analyse de Signature du Courant Statorique (ASCS) ou du Courant de Moteur (ASCM) est connue sous l'appellation Anglaise : "Motor Current Signature Analysis" (MCSA). Elle se base sur les phénomènes électromagnétiques qui se transforment, par influence à une information dans le courant statorique.

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressant, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques [17, 18].

Une analyse spectrale du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier rapide 'FFT') a permis de mettre en évidence, la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [19, 20].

En présence du défaut en régime permanent, le système inverse de courant au rotor produit la composante oscillatoire de pulsation $2s\omega_s$ [21].

On peut signaler aussi qu'il est possible d'observer les oscillations dans la vitesse ou dans le couple de pulsation $2s\omega_s$ d'origine purement mécanique [21].

Notre objectif est de détecter, localiser ou bien identifier le défaut de la cassure de barres dès leur apparition dans les MAS. Autrement dit pour la contribution du travail, il a discuté attentivement les problèmes rencontrés non seulement autour de la fréquence fondamentale (50Hz), mais aussi, on a fait un zoom pour différentes bandes fréquentielles, autour du 5^{ème} et du 7^{ème} harmoniques et même alentours d'harmoniques d'encoches rotoriques.

Nous allons réaliser des résultats expérimentaux pour différentes conditions sur la machine asynchrone afin d'aboutir à une décision judicieuse concernant la détection du défaut de la cassure de barres du rotor.

2 Banc d'essai

Lorsqu'on veut surveiller un système ou un processus physique, on doit, à un certain stade des opérations, mesurer et surveiller les grandeurs physiques dépendantes, souvent directement du dispositif. Pour présenter des résultats, il faut que les grandeurs mesurées restent dans une fourchette acceptable de valeurs, dans le but d'assurer la qualité de l'ensemble des systèmes.

Pour cette raison, on présentera dans cette partie la conception d'un banc d'essai du moteur asynchrone, dont les paramètres sont :

- Une carte d'acquisition en temps réel;
- Une MAS à rotor à cage d'écureuil : Moteur AZAZGA de 3kW, $f_s=50\text{Hz}$, couplage triangle, $p=2$;
- Une charge pour le freinage, soit : machine à courant continu ou bien un frein à poudre magnétique.

Généralement, ce banc est dédié à la mesure de plusieurs grandeurs comme : les courants, les tensions, les signaux de vibration et le couple. Dans ce travail, on s'intéresse seulement à la mesure du courant statoriques.

Les capteurs sont les moyens les plus importants pour accomplir les tests. Si le choix de ces capteurs n'est pas adapté, le reste du traitement ne pourra pas donner de bonne mesure ou aider à prendre la bonne décision. Un capteur peut être défini comme un convertisseur d'une grandeur physique en un signal électrique.

Le banc est constitué d'une machine asynchrone de test accouplée à une charge (frein). Ces tests expérimentaux nous ont permis d'effectuer les analyses sur les défauts électriques et/ou mécaniques afin de faire la validation avec certains algorithmes de diagnostic.

L'élaboration du banc de test exige plusieurs machines de même type sous différents états tels que, moteur sain, avec barres cassées ou autres.

La figure (1) illustre une photo de système expérimental connecté avec la carte d'acquisition qui se traduit par Matlab/Simulink sous une fréquence d'échantillonnage $f_e=10000\text{Hz}$.



Fig. 1 – Photo du banc d'essai dédié au diagnostic.

Prenons la MAS à l'état sain afin de garder un ensemble d'informations de référence. Alors, tous les symptômes ou variations qui seront identifiées après, dépendent de la base des données de l'état normal de la machine.

Nous avons réalisé deux tests, le premier pour une seule barre cassée et le second pour deux barres cassées. La figure (2) représente la photographie des rotors de la machine asynchrone utilisée pratiquement pour les différents états.



Fig. 2 – Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour un état sain (à gauche), une barre cassée (au centre), deux barres cassées (à droite).

3 Application de la MCSA-FFT

Le courant électrique instantané d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (3) sous un défaut de 01 barre cassée (BC) et de 02 BC pour les conditions : à vide et en charge. La figure (5) montre le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à vide des deux machines : l'une saine et l'autre défectueuse avec une barre cassée (01 BC).

D'après [21] et autres les fréquences caractéristiques causées par le défaut de la cassure de barres sont :

$$f_{cb} = (1 \pm 2ks).f_s \quad (1)$$

En outre, d'autres séries d'harmoniques dus au défaut de l'excentricité mixte sont existes tout au long du spectre qui ont la formule suivante [22]:

$$f_{Mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (2)$$

tel que :

$$f_r = \frac{(1-s)}{p} f_s \text{ est la fréquence mécanique du rotor, } p \text{ est le nombre de paires de pôles.}$$

Il est important de noter que les fréquences qui correspondent aux ordres : 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ... ($6k \pm 1$) ; ont les fréquences $(6k \pm 1)f_s$. Ces harmoniques sont connus sous le nom des harmoniques de la force magnétomotrice (FMM). On explique ses apparitions par l'existence de la rupture de barres rotorique avec un glissement s . La formule ci-après montre bien les valeurs des autres fréquences appelées : fréquences de bande latérale (FBL).

Généralement, les harmoniques du courant statorique de fréquence $(6k \pm 1)f_s$ sont modulés en amplitude à la fréquence $2(6k \pm 1)sf_s$ par l'expression suivante [23-25] :

$$f_{cb} = [(6k \pm 1) \pm 2ks] f_s, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

Cette formule a été vérifiée dans notre étude par des bandes latérales présentées dans la figure (5).

En plus, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est en fonction de différents paramètres, tels que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage [26-28]. A cause de cette structure, il a été démontré, qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique, des harmoniques dites d'encoches rotoriques (RSHs).

On va voir un autre indicateur du défaut de la rupture des barres qui est représenté par des bandes latérales autour des harmoniques d'encoches rotoriques (RSHs). Ces fréquences sont attachées avec les RSHs et espacées de $2sf_s$; on conclut, donc, à la formule suivante :

$$f_{cb} = RSH \pm 2ksf_s \quad (4)$$

avec,

$$f_{RSH} = \left(\frac{kn_b(1-s)}{p} \pm v \right) f_s \quad (5)$$

ou bien,

$$f_{cb} = \left(\frac{kn_b(1-s)}{p} \pm v \pm 2ks \right) \cdot f_s = kn_b \cdot f_r \pm v f_s \pm 2ks \cdot f_s \quad (6)$$

tel que :

$k=1,2,3$ etc. et v est l'ordre d'harmoniques du temps qui ont les valeurs : 1, 3, 5, etc.

Dans cette étude, tout ce qui est simulé en bleu désigne l'état sain et tout ce qui est en rouge désigne l'état défectueux.

On remarque que les composants harmoniques du courant statorique ne sont pas influencés par le changement de l'état de la MAS à vide pour une barre cassée. Dans ce cas, les fréquences supplémentaires causées par la rupture de barre sont encore presque invisibles ; ceci est dû à la valeur du glissement pour un fonctionnement à vide proche de zéro.

On peut voir les composantes de fréquence à f_s-f_r , f_s+f_r , f_s+2f_r , etc. qui sont déjà présentes dans le spectre de la machine saine due à l'excentricité mixte. Ces séries des fréquences caractéristiques sont décrites par la formule (2).

En outre, des fréquences dues à la saturation sont apparues au spectre des résultats expérimentaux. Ces fréquences ont des raies importantes et remarquables.

$$f_{sat} = 3kf_s \quad k \text{ est impair} \quad (7)$$

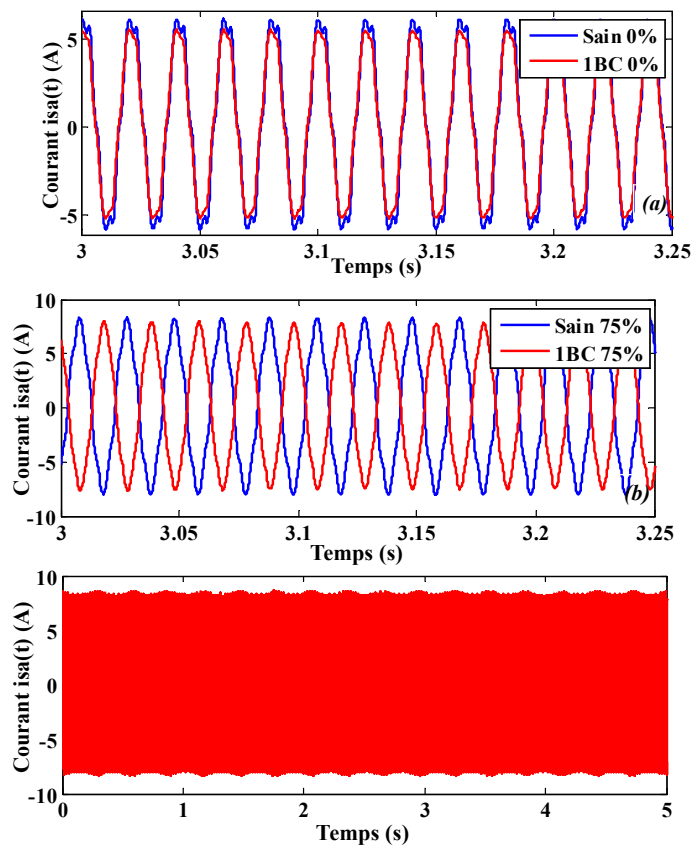


Fig. 3 – Le courant statorique en fonction du temps (IBC) ; (a) : 0% de la charge, (b) : 75% de la charge, (c) : Phénomène du battement (2BC).

Une fréquence a été trouvée dans le spectre de la MAS pour les deux états du moteur (sain et défectueux) ; c'est la composante de double de la fréquence d'alimentation 100 Hz, la formule générale est :

$$f_{doub-s} = f_{100Hz} = 2f_s \quad (8)$$

D'après la littérature, cette fréquence a plusieurs sources, telles que : le déséquilibre d'alimentation (champ statorique) et/ou la déformation du stator. Nous avons effectué une acquisition (mesure) de la tension d'alimentation par un oscilloscope numérique qui nous permet de faire l'opération FFT. La figure (4) représente le contenu spectral de la tension d'alimentation qui est mesurée deux fois par jour. On voit clairement l'existence de la fréquence de 100 Hz qui est le double de la fréquence d'alimentation 50 Hz.

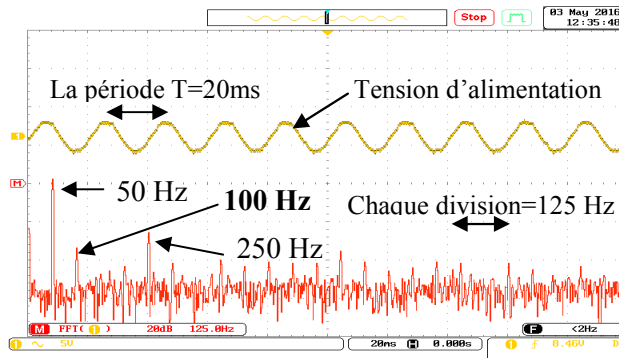


Fig. 4 – Spectre de la tension d'alimentation.

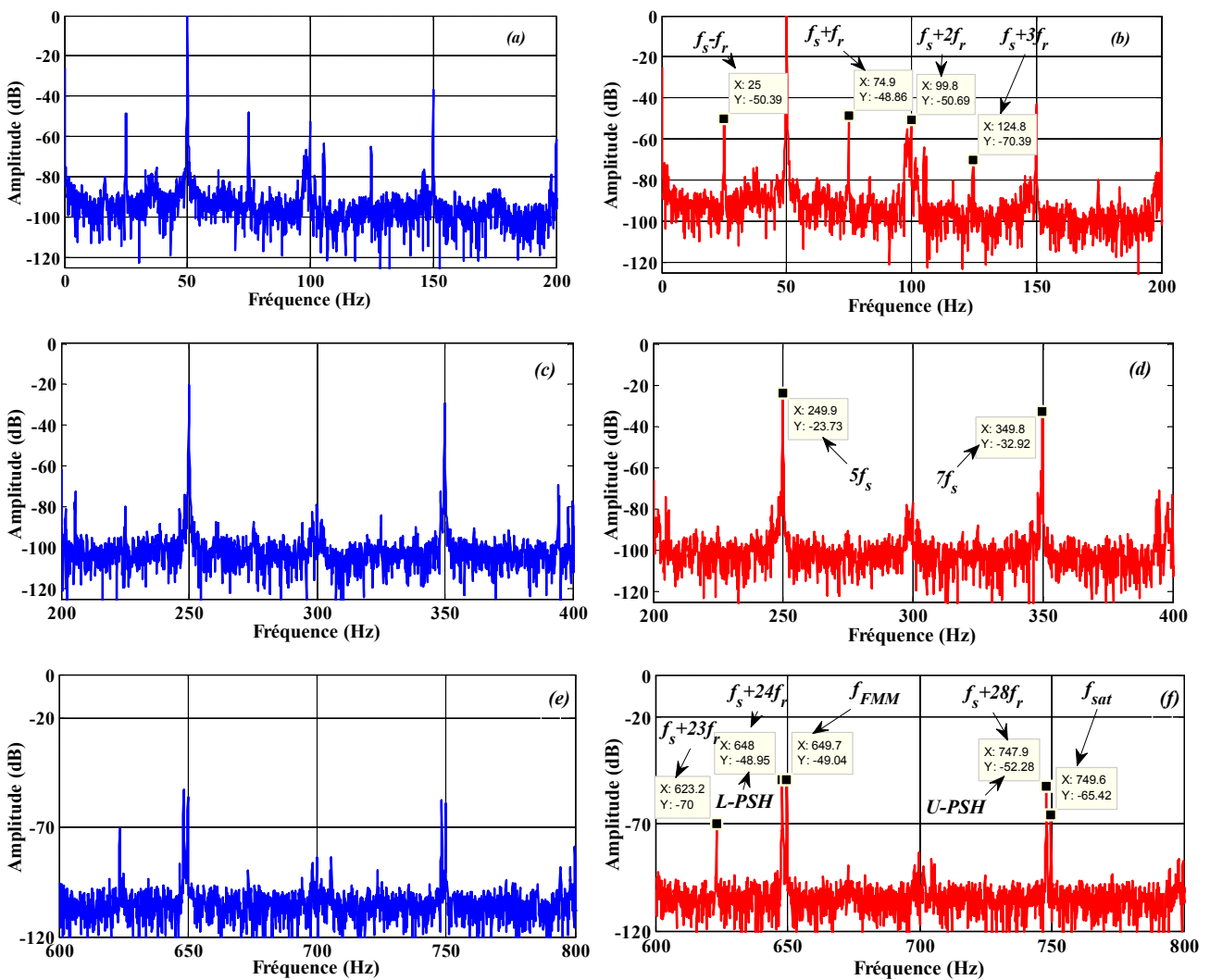


Fig. 5 – Spectre du courant statorique (IBC, à vide) ; (a) et (b) : Basses fréquences, (c) et (d) : Autour des PSHs, (e) et (f) : Autour des 5 et 7.

La variation de la charge affecte une variation du glissement. On applique maintenant un couple résistant qui assure une charge de 75% ($s=3.6\%$). La représentation temporelle du courant statorique a été montrée dans la figure (3-b). Nous vérifions que le défaut de cassure de barres induit des fréquences de bandes latérales (FBL) autour des fréquences suivantes : la fondamentale f_s , les harmoniques 5, 7 et les *RSHs*. La figure (6) représente les FBL dans laquelle les fréquences se déplacent avec l'ordre d'harmonique.

Sous des conditions anormales (présence d'un défaut de la rupture de barre), des harmoniques dans le courant sont générées, accompagnées par des déformations dans celui-ci.

Une série de nouvelles composantes fréquentielles de valeurs $(1\pm 2ks)f_s$ et autres citées précédemment, caractérise ce type de défaut. Ces nouveaux harmoniques apparaissent dans le spectre du courants statorique. Les valeurs de raies qui caractérisent le défaut de cassure des barres autour de la fréquence fondamentale, 5, 7, et des *RSHs* sont résumées dans le tableau (1). Les vérifications des trois types des FBL sont liées aux formules (1), (2), (3) et (4).

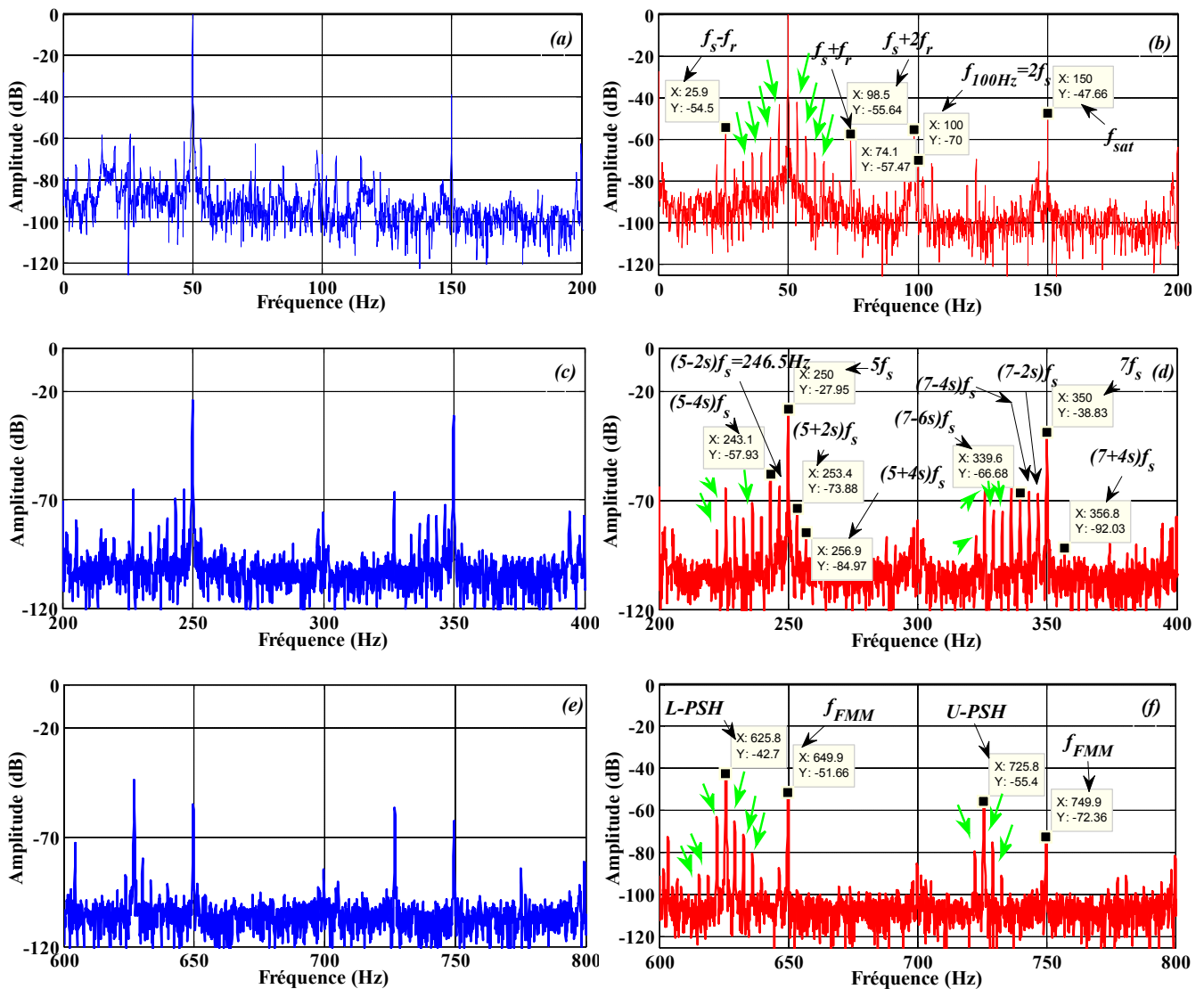


Fig. 6 – Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) et (b): 0-200Hz, (c) et (d): 200-400Hz, (e) et (f): 600-800Hz

Un zoom autour de quelques bandes pour clarifier l'influence du défaut de la rupture de barres est présenté dans la figure (7).

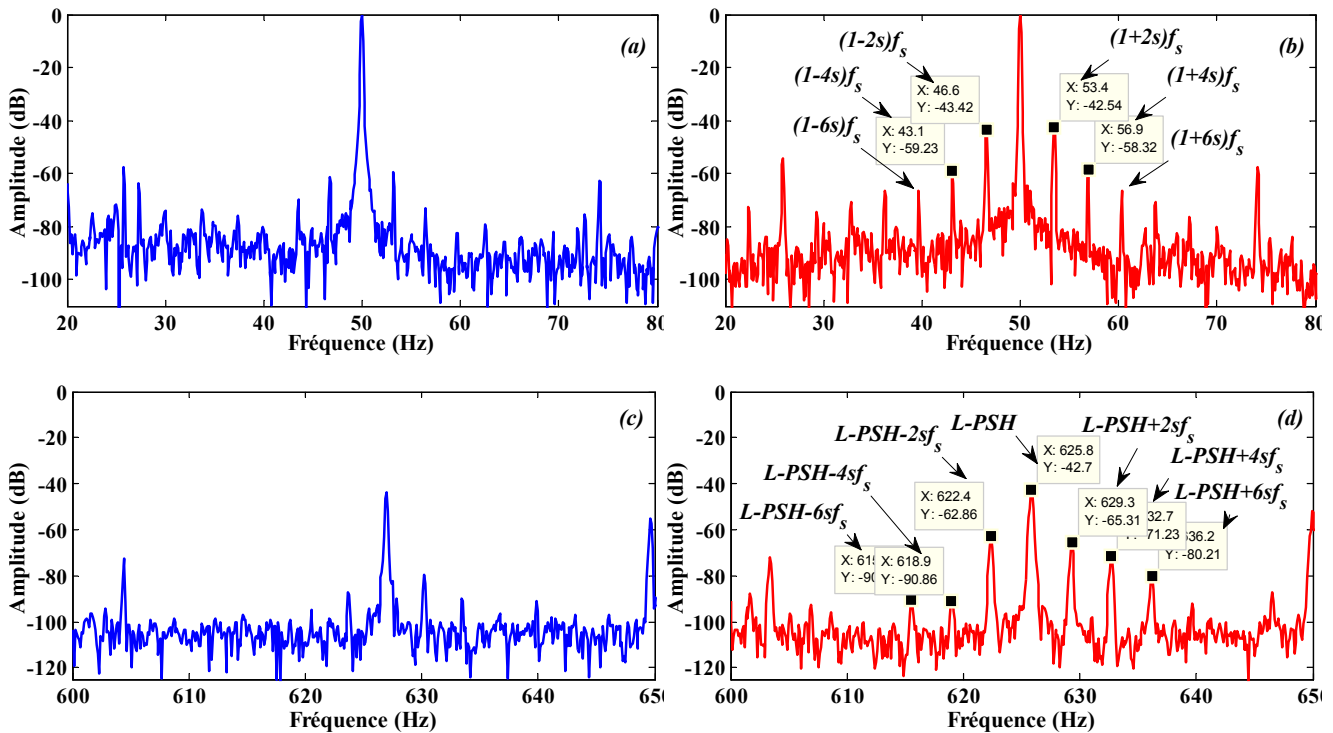


Fig. 7 – Spectre du courant statorique (s=3.6%, 1BC) ; (a) et (b): 20-800Hz, (c) et (d): 600-650Hz

Tableau 1 – Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC, s=3.6%).

Formules	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amp. «état sain » (dB)	Amp. pour 1BC (dB)
$(1-2s)f_s$	46.4 Hz	46.6 Hz	-61.7	-43.42
$(1+2s)f_s$	53.6 Hz	53.4 Hz	-59.67	-42.54
$5f_s$	250 Hz	250 Hz	-23.91	-27.95
$(5-2s)f_s$	246.4 Hz	246.5 Hz	-65.15	-63.36
$(5+2s)f_s$	253.6 Hz	253.4 Hz	-83.2	-73.88
$7f_s$	350 Hz	350 Hz	-31.51	-38.83
$(7-4s)f_s$	342.8 Hz	343.1 Hz	-77.46	-66.23
$(7+4s)f_s$	257.2 Hz	356.8 Hz	-100.4	-92.03
$RSH_1^+ = L-PSH$	624.8 Hz	625.8 Hz	-43.55	-42.7
$RSH_1^{(-)} - 2sf_s$	621.2 Hz	622.4 Hz	-87.38	-62.86
$RSH_1^{(-)} + 2sf_s$	628.4 Hz	629.3 Hz	-79.64	-65.31
$RSH_1^{(-)} - 4sf_s$	617.6 Hz	618.9 Hz	-94.66	-90.86
$RSH_1^{(-)} + 4sf_s$	632 Hz	632.7 Hz	-90.06	-71.23

L'évolution de l'amplitude des harmoniques est un indicateur qui vérifie plusieurs points intéressants. L'un est la sévérité du défaut ; pour cette raison, on présente une troisième machine défectueuse avec deux barres cassées. L'évolution de l'amplitude du courant statorique en fonction du temps est indiquée dans la figure (3). Il est clair que l'influence du degré de sévérité du défaut, se traduit par une déformation du courant. Généralement, et d'après la littérature, la cassure de barres rotorique impose une allure du courant statorique qui est similaire au phénomène du battement. Une superposition du FFT de trois machines : saine, avec 1BC et avec 2BC est présentée dans la figure (8).

En outre, lorsque le rotor est défectueux, les fréquences du défaut sont clairement présentées dans le spectre. Les composantes de $f_s \pm f_r$, données par l'équation (2) apparaissent dans le spectre du courant pour l'état sain et l'état défectueux ; cela explique que l'excentricité mixte existe systématiquement.

La figure (8) représente les plages fréquentielles autour des harmoniques fondamentaux, *PSHs* ainsi que les 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques. Nous trouvons de façon évidente, les raies engendrées par une oscillation de vitesse provoquée par la rupture d'une barre du rotor. Ces résultats ont conduit à une émergence claire de raies significatives qui nous permettent de décider judicieusement sur le type du défaut.

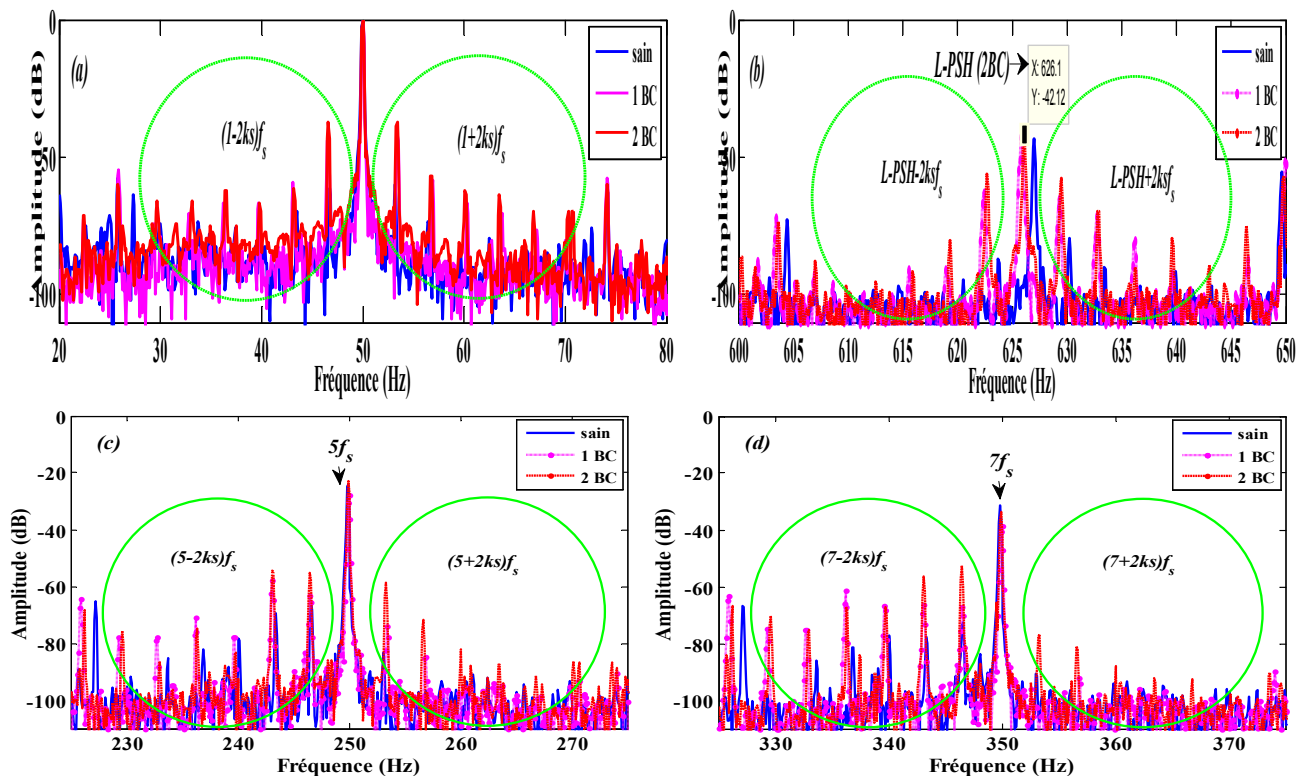


Fig. 8 – Spectre du courant statorique (MAS sain, 1BC et 2BC) ; (a) : Autour du fondamental, (b) : Autour de L-PSH, (c) : Autour de 5, (d) : Autour de 7

Un autre facteur important qui entre en jeu, est le pourcentage de la charge appliquée à la sortie du MAS. Plusieurs représentations fréquentielles du courant statorique ont été effectuées afin de calculer l'amplitude. Le glissement dans ce cas sera changé systématiquement ; et les positions des harmoniques seront déplacées.

La sévérité de la cassure de barres peut provoquer aussi des déplacements des raies harmoniques, même avec des valeurs faibles. Il est important d'indiquer la valeur du glissement qui peut être calculé par plusieurs méthodes. Parmi elles, les fréquences caractéristiques de l'excentricité mixte autour de la fréquence fondamentale sont $f_s - f_r$ et $f_s + f_r$. Ces dernières, donnent les valeurs du glissement $s=0.032$ et $s=0.036$ respectivement. On remarque aux alentours des *PSHs*, l'influence de nombre des barres cassées sur ses valeurs. Les valeurs logiques des glissements sont dues à la variation de la vitesse en régime permanent qui impose quelques marges de différences entre les résultats théoriques et pratiques. La figure ci-dessous montre les FBL autour de l'harmonique fondamental pour deux barres cassées.

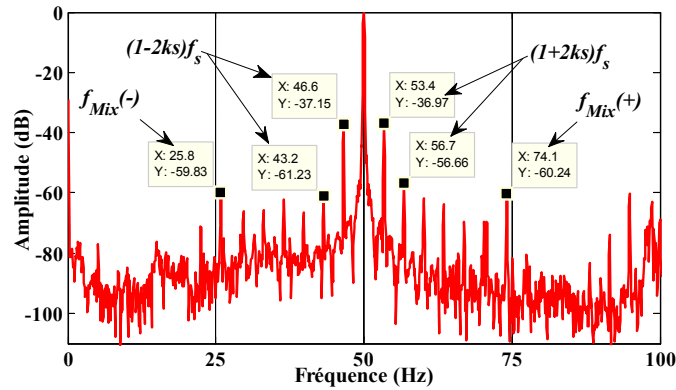


Fig. 9 – Spectre du courant statorique (2BC) de 0 à 100 Hz

Le tableau (2) décrit et généralise les harmoniques du défaut de rotor induites dans les bobinages statoriques avec deux barres cassées (2BC). Nous rappelons que cette étude nous permet de vérifier l'existence des harmoniques d'une part, et d'autre part de suivre les positions de celles-ci.

Donc, les barres rotoriques fissurées vont générer des bandes latérales espacées de la fréquence de passage des pôles autour de la fréquence fondamentale et de ses harmoniques, si les amplitudes des bandes latérales sont -55 à -60 dB inférieures à l'amplitude du pic de la fréquence de ligne, les barres rotoriques sont considérées comme bonnes, mais si ces bandes latérales augmentent jusqu'à -40 dB en-dessous du pic principal, cela indique un endommagement des barres rotoriques. Si le nombre des barres rotoriques cassées augmente les amplitudes des bandes latérales augmentent aussi.

Un autre tableau récapitulatif, est présenté ci-dessous qui montre un bilan comparatif des amplitudes pour 1BC et 2BC.

Tableau 2 – Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (2BC, $s=3.2\%$).

Formules	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amp. « état sain » (dB)	Amp. pour 2BC (dB)
$(1-2s)f_s$	46.8 Hz	46.6 Hz	-61.7	-37.15
$(1+2s)f_s$	53.2 Hz	53.4 Hz	-59.67	-36.97
$5f_s$	250 Hz	249.9 Hz	-23.91	-22.72
$(5-2s)f_s$	246.8 Hz	246.5 Hz	-65.15	-55.03
$(5+2s)f_s$	253.2 Hz	253.4 Hz	-83.2	-58.64
$7f_s$	350 Hz	349.9 Hz	-31.51	-33.57
$(7-2s)f_s$	346.8 Hz	346.5 Hz	-72.53	-52.56
$(7+2s)f_s$	353.2 Hz	353.3 Hz	-90.46	-76.71
$(7-4s)f_s$	343.6 Hz	343.1 Hz	-77.46	-56.46
$(7+4s)f_s$	356.4 Hz	356.7 Hz	-100.4	-80.97
$RSH_1^{(-)} = L-PSH$	627.6 Hz	626.1 Hz	-43.55	-42.12
$RSH_1^{(-)} - 2sf_s$	624.4 Hz	622.7 Hz	-87.38	-56.2
$RSH_1^{(-)} + 2sf_s$	630.8 Hz	629.5 Hz	-79.64	-57.78
$RSH_1^{(-)} - 4sf_s$	621.2 Hz	619.3 Hz	-94.66	-80.14
$RSH_1^{(-)} + 4sf_s$	634 Hz	632.9 Hz	-90.06	-69.48

Tableau 3 – Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (1BC+2BC, $s=3.2\%$).

Fréquences caractéristiques	Amp. pour 1BC (dB)	Amp. pour 2BC (dB)
$(1-2s)f_s$	-43.42	-37.15
$(1+2s)f_s$	-42.54	-36.97
$5f_s$	-27.95	-22.72

$(5-2s)f_s$	-63.36	-55.03
$(5+2s)f_s$	-73.88	-58.64
$7f_s$	-38.83	-33.57
$(7-2s)f_s$	-67.06	-52.56
$(7+2s)f_s$	-95.9	-76.71
$(7-4s)f_s$	-66.23	-56.46
$(7+4s)f_s$	-92.03	-80.97
$RSH_1^{(-)} = L - PSH$	-42.7	-42.12
$RSH_1^{(-)} - 2sf_s$	-62.86	-56.2
$RSH_1^{(-)} + 2sf_s$	-65.31	-57.78
$RSH_1^{(-)} - 4sf_s$	-90.86	-80.14
$RSH_1^{(-)} + 4sf_s$	-71.23	-69.48

Ces tableaux expliquent bien l'influence de la cassure de barres et la sévérité du défaut pour 01 barre cassée et pour 02 barres cassées.

Généralement, on a constaté, l'apparition d'harmoniques de fréquences lié à $2ksf_s$ dans le spectre du courant statorique. On a remarqué également que le spectre du courant donne des informations plus claires et plus visibles par une série des FBL aux alentours de la fondamentale, les $(6k\pm 1)f_s$ et les $RSHs$.

4 Conclusions

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

- ✓ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- ✓ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts.

Après avoir décrit les effets qui peuvent survenir suite à une rupture de barres ; notre étude montre la bonne correspondance et l'exactitude en comparant avec la littérature. Toutes les formules, le déplacement des harmoniques et le degré de sévérité du défaut de la rupture de barres sont vérifiés.

Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide a été appliquée sur le signal du courant statorique afin de déterminer le contenu fréquentielle du courant. Par conséquent, nous avons trouvé les harmoniques caractéristiques des cassures de barres qui conduisent à un diagnostic efficace. Néanmoins, ces fréquences caractéristiques ont été détectées pour un fonctionnement en charge de la machine. Il est important de noter à la difficulté de la détection du défaut de la cassure de barres en fonctionnement à vide. En plus, nous avons vu dans le spectre du courant statorique les harmoniques causés par cassure de barres. Cette information nous conduit à une confusion entre l'état sain et l'état défectueux de la MAS sous un fonctionnement à vide. Notre interprétation de l'existence des fréquences caractéristiques du défaut de la cassure de barres pour ce fonctionnement est en raison de la vibration de la MAS en comparaison avec une machine chargée. Donc, la cause réside dans la vitesse qui a une forme plus oscillante par rapport à une MAS qui fonctionne en charge. Ce point, nous conduit à prédire l'existence des fréquences caractéristiques du défaut de la cassure de barres sous un régime non-stationnaire de la MAS.

Généralement et comme perspective, ce travail peut l'élargir en le comparant avec la technique de l'analyse vibratoire. Cette comparaison pourrait prendre une décision sur l'efficacité de l'une par rapport à l'autre.

D'autres techniques de traitement du signal peuvent introduire dans ce sujet afin de l'enrichir et l'améliorer comme : CWT, DWT, EMD, PCA, etc.

Remerciements

Une partie de cette étude a été réalisée dans le laboratoire de génie électrique de Biskra (LGEB), Université Mohamed Khider Biskra, BP 145 RP, 07000 Biskra, Algérie. Nous remercions nos collègues du LGEB qui ont fourni un aperçu et une

expertise qui ont grandement facilité la recherche, même s'ils ne sont peut-être pas d'accord avec toutes les interprétations et/ou conclusions de ce document.

REFERENCES

- [1] N. Bessous, S. E. Zouzou, W. Bentrah, S. Sbaa, and M. Sahraoui, "Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 9 (2), pp. 335-343, 2018.
- [2] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 28 (4), pp. 921-937, 1992.
- [3] Y. Gritli, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, F. Filippetti, C. Rossi, "Vibration signature analysis for rotor broken bar diagnosis in double cage induction motor drives," *IEEE on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, pp. 1814-1820, 2013.
- [4] K. M. Sousa, I. B. V. da Costa, E. S. Maciel, J. E. Rocha, C. Martelli, and J. C. C. da Silva, "Broken Bar Fault Detection in Induction Motor by Using Optical Fiber Strain Sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, pp. 3669-3676, 2017.
- [5] C. Morales-Perez, J. Rangel-Magdaleno, H. Peregrina-Barreto, J. P. Amezcua-Sanchez, M. Valtierra-Rodriguez, "Incipient Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors Using Vibration Signals and the Orthogonal Matching Pursuit Algorithm," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp. 1-11, 2018.
- [6] G. Mirzaeva and K. I. Saad, "Advanced Diagnosis of Stator Turn-to-Turn Faults and Static Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement," *IEEE Trans. Ind. App.*, 2018.
- [7] B. Corne, J. Knockaert, and J. Desmet, "Misalignment and unbalance fault severity estimation using stator current measurements," *IEEE conference in Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, pp. 247-253, 2017.
- [8] N. Bessous, S. E. Zouzou, S. Sbaa, A. Khelil, "New vision about the overlap frequencies in the MCSA-FFT technique to diagnose the eccentricity fault in the induction motors," *IEEE Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)*, pp. 1-6, 2017.
- [9] N. Bessous, S. E. Zouzou, S. Sbaa, W. Bentrah, Z. Becer, R. Ajgou, "Static eccentricity fault detection of induction motors using MVSA, MCSA and discrete wavelet transform (DWT)," *IEEE International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)*, pp. 1-10, 2017.
- [10] J. Faiz, S. M. M. Moosavi, "Eccentricity fault detection—From induction machines to DFIG—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 169-179, 2016.
- [11] M. Ojaghi, and M. Mohammadi, "Unified Modeling Technique for Axially Uniform and Nonuniform Eccentricity Faults in Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, vol. 65 (7), pp. 5292-5301, 2018.
- [12] J. Faiz, V. Ghorbanian, B. M. Ebrahimi, "EMD-based analysis of industrial induction motors with broken rotor bars for identification of operating point at different supply modes," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, pp. 957-966, 2014.
- [13] M. Moghadasian, S. M. Shakouhi, S. S. Moosavi, "Induction motor fault diagnosis using ANFIS based on vibration signal spectrum analysis," *IEEE International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*, pp. 105-108, 2017.
- [14] M. Irhoumah, D. Mercier, R. Pusca, E. Lefèvre, R. Romary, "Information fusion of external flux sensors for detection of inter-turn short circuit faults in induction machines," *IEEE Conference on industrial Electronics Society, IECON 2017*, pp. 8076-8081, 2017.
- [15] N. Lashkari, J. Poshtan, H. F. Azgomi, "Simulative and experimental investigation on stator winding turn and unbalanced supply voltage fault diagnosis in induction motors using Artificial Neural Networks," *ISA transactions*, vol. 59, pp. 334-342, 2015.
- [16] N. Bessous, S. E. Zouzou, S. Sbaa, W. Bentrah, "A comparative study between the MCSA, DWT and the vibration analysis methods to diagnose the dynamic eccentricity fault in induction motors," *IEEE 6th International Conference on Systems and Control (ICSC'17)*, pp. 414-42, 2017.
- [17] G. B. Kliman and J. Stein, "Methods of motor current signature analysis," *Electric Machines and power systems*, pp. 463-474, 1992.
- [18] N. Bessous, Z. S. Eddine, and S. Mohamed, "Experimental exploitation for the diagnosis to the induction machine under a bearing fault-using MCSA," *IEEE 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1-4, 2015.

- [19] N. G. Lo, A. Soualhi, M. Frini, and H. Razik, "Gear and Bearings Fault Detection using Motor Current Signature Analysis," IEEE in Industrial Electronics and Applications Conference, 2018.
- [20] C. E. Rouabhia, S. Bouras, A. Bouras, "Predictive diagnosis of unbalance and misalignment defects Based on the FFT and DWT of the stator current of an induction motor: Experimental approaches," *Recueil De Mécanique*, 2018.
- [21] F. Filippetti, M. Martelli, G. Franceschini, C. Tassoni "Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors". IEEE in Industry Applications Society Annual Meeting Conference, pp. 92-99, 1992.
- [22] N. Bessous, A. Chemsas, S. Sbaa, "New Vision about the Mixed Eccentricity Fault Causes in Induction Motors and its relationship with the Rolling Element Bearing Faults: Analytical model dedicated to the REB faults". IEEE International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE), pp. 1-11, 2018.
- [23] W. Deleroi, "Broken Bar in Squirrel Cage Rotor of an Induction Motor, Part I: Description by Superimposed Fault Currents," *Arch. für Elektrotechnik*, pp. 91-99, 1984.
- [24] G.B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, M. W. Madden, "Noninvasive detection Of broken rotor bars in operating induction motors". *IEEE Trans. Energ. Conv.*, pp. 873-879, 1988
- [25] A. Lebaroud, G. Clerc, "Study of Rotor Asymmetry Effects of an Induction Machine by Finite Element Method," *JEET, Journal of Electrical Engineering and Technology*, pp. 342-349, 2011.
- [26] P. L. Alger, "The nature of induction machines", Gordon and Breach, science publisher inc., New York, 1965.
- [27] N. Bessous, "Contribution au diagnostic des défauts dans les machines asynchrones : Comparaison entre l'analyse vibratoire et l'analyse du courant d'alimentation," *Doctoral thesis in Mohamed Khider University of Biskra, Algeria*, 2017.
- [28] J. Faiz and S. M. M. Moosavi, "Eccentricity fault detection—From induction machines to DFIG—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 169-179, 201