

ANALYSE DU CONTENU SPECTRAL DE LA TENSION DE NEUTRE DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN VUE DE SON DIAGNOSTIC

A. ABOUBOU, M. SAHRAOUI, A.GHOUGAL, S. E. ZOUZOU

Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques - Département d'Electrotechnique.
Université Mohamed KHIDER BP 145, Biskra. Algérie.

RESUME

Ce papier présente une nouvelle approche pouvant être utilisée pour le diagnostic de barre(s) cassée(s) au rotor(s) dans les moteurs asynchrones de grandes puissances. La tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre du moteur asynchrone lorsque celui-ci est connecté en étoile est analysée dans le domaine spectral en utilisant le Périodogramme moyenné. Différents défauts de la cage rotorique (1 barre partiellement cassée et 1 barre cassée) ont été étudiés sous différents niveaux de charge. Nous présentons des résultats de simulations et d'expérimentations afin de montrer que l'analyse de ce signal donne des résultats plus pertinents que ceux obtenus avec l'analyse habituelle du courant absorbé.

MOTS CLES : Diagnostic, Défauts rotoriques, Barre cassée, Analyse spectrale, Tension de neutre.

1 INTRODUCTION

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

Nous savons qu'une variété importantes de défauts peuvent se produire au rotor des machines asynchrones [1] [2]. Nous pouvons citer des défauts de type barres rotorique ou portions d'anneaux de court circuit cassés ou bien encore des défauts d'excentricité statique et/ou dynamique entre le rotor et le stator de la machine. En fait, si ces défauts ne sont pas détectés, ils peuvent mener à des échecs potentiellement catastrophiques (mise hors service du moteur). Les conséquences d'un rotor défectueux peuvent être diverses. Nous pouvons citer comme exemples : un accroissement des vibrations du moteur, des performances au démarrage amoindries, des fluctuations sur le couple de charge ou encore une augmentation de la température au point de cassure et dans les bobinages statoriques. La rupture d'une barre rotorique peut être induite par plusieurs

facteurs, citons par exemple :

- une augmentation de la température due à une surcharge de la machine,
- des efforts magnétiques provoqués par les forces électromagnétiques, le bruit électromagnétique et les vibrations,
- un effort résiduel dû aux problèmes de fabrication,
- un effort dynamique résultant des couples d'axe, des forces centrifuges et des efforts de répétition,
- des efforts environnementaux provoqués par la contamination et l'abrasion du matériel rotorique dues aux produits chimiques ou à l'humidité.

Tous ces problèmes impliquent un intérêt énorme pour leur analyse et diagnostic. On a proposé ces dernières années diverses techniques pour détecter un défaut au rotor des machines asynchrones. Une des approches bien connues pour la détection des barres cassées rotorique est basé sur la surveillance des courants de ligne pour détecter la présence de bandes latérales autour de la fréquence d'alimentation [3] - [10]. D'autres méthodes existent pour la détection de barres cassées. Nous savons qu'il est possible de détecter ce type de défauts grâce à l'analyse des harmoniques de couple, du flux externe ou encore de la vitesse rotorique [11]. Cependant, la méthode MCSA (Motor Current Signature Analysis) reste la plus populaire car elle ne nécessite qu'une instrumentation simple et peu chère.

Dans cet article, nous proposons une détection de défauts de barres cassées en utilisant la tension présente entre le neutre du moteur asynchrone et le neutre de la source

d'alimentation qu'on appellera $V_{n_m n_s}$ (le moteur étant connecté en étoile) que l'on comparera avec ceux du courant statorique. Une analyse similaire a déjà été effectuée par Cash en 1998 pour la détection de spires en court circuit au stator des machines asynchrones [9]. Cet auteur a additionné les trois tensions présentes aux bornes de la machine asynchrone pour obtenir une tension résiduelle et a basé son diagnostic sur la valeur RMS (efficace) de celle-ci.

Dans notre cas, nous montrons que la détection de barres cassées rotoriques peut être reliée à l'analyse harmonique de la tension présente entre les deux neutres. Cette analyse va nous permettre de montrer que les informations données par cette tension sont plus pertinentes que celles données par le spectre du courant statorique lors de l'apparition du défaut rotorique.

2 LA SIGNATURE DE LA TENSION DE NEUTRE

La combinaison de la tension entre le neutre du moteur asynchrone et le neutre de la source d'alimentation $V_{n_m n_s}$ dans le programme de simulation est effectuée grâce à la relation mathématique suivante :

$$V_{n_m n_s} = R_a \cdot I_{sa} + L_a \cdot \frac{dI_{sa}}{dt} + \frac{dL_a}{d\theta} \cdot \Omega \cdot I_{sa} - V_{source} \quad (1)$$

où R_a représente la résistance de la phase statorique a, L_a son inductance, I_{sa} le courant la traversant, Ω la vitesse de rotation de la machine, θ la position angulaire du rotor et V_{source} la tension simple générée par le réseau d'alimentation.

Nous savons que lorsqu'un défaut apparaît (cassure d'une barre rotorique), une asymétrie au niveau du rotor est créée.

Cette asymétrie produit un champ tournant inverse à la fréquence de glissement par rapport au champ tournant rotorique [10]. Elle induit des composantes additionnelles dans le spectre des courants statoriques aux fréquences données par la relation $f_{bc} = (1 \pm 2g)fs$ où g représente le glissement de la machine et fs la fréquence fondamentale des courants [2][3]. D'après la relation 1, il est évident que si le courant I_{sa} est modulé après l'apparition du défaut rotorique, la tension $V_{n_m n_s}$ se voit, elle aussi, modifiée. Nous étudions cette tension dans le domaine spectral en utilisant une estimation non paramétrique du spectre de puissance appelée moyennage des périodogrammes au lieu du périodogramme classique [11].

L'information donnée par le spectre de cette tension au niveau du troisième harmonique, c'est à dire près de la raie spectrale ayant pour fréquence 150 Hz, peut être utilisée pour le diagnostic de défaut du moteur. Nous avons vérifié cette information de deux façons différentes. Dans un premier temps, nous avons analysé l'influence d'un défaut rotorique sur cette tension à travers un programme de simulation de machine, puis nous avons effectué divers essais expérimentaux pour valider et compléter l'analyse théorique.

3 ESTIMATION DES HARMONIQUES PAR UNE METHODE NON-PARAMETRIQUE

Le but de cette étude consiste à utiliser une méthode non-paramétrique permettant de localiser les composantes fréquentielles utiles contenant dans un signal entaché par un bruit additif sensé être blanc. Nous pouvons ainsi constater un problème fondamental concernant la résolution fréquentielle qui représente l'écart minimum en fréquence qu'il faut mettre entre deux sinusoïdes d'amplitudes différentes pour observer sur le spectre de leur somme un creux de plus de 3dB entre les deux maxima.

En effet, le fait d'avoir limité le nombre de valeurs traitées à N , conduit à l'apparition de lobes sur le spectre résultant. Le lobe principal a une largeur égale à $2/N$. Il s'ensuit que, si $x(n)$ contient deux sinusoïdes dont les fréquences sont séparées de moins $1/N$, les lobes principaux de chacune d'elles seront si proche qu'il sera difficile de les distinguer avec certitude. Et ceci est d'autant plus vrai que les deux amplitudes sont très différentes.

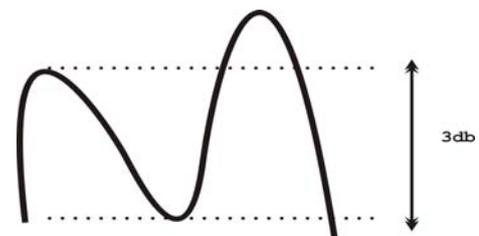


Figure 1 : Séparation de sinusoïdes

Ainsi, si $Fe = \frac{1}{T}$ désigne la fréquence d'échantillonnage, la résolution R exprimée en Hz est de l'ordre de grandeur de $\frac{Fe}{N}$ qui est précisément l'inverse du temps total d'analyse à savoir la durée d'enregistrement $Durée = N \cdot T_e$

Le produit $R \cdot Durée$ joue en quelque sorte le rôle de facteur de mérite dans l'utilisation de la TFD pour détecter et localiser les fréquences. Dans le cas général la formule à utiliser pour détecter que les pics utiles assurant une meilleure séparation des fréquences voisines sera dénotée par :

$$\Delta f = 0,99 \left(\frac{Fe}{N} \right) \text{écart},$$

où écart est l'écart en fréquence entre deux raies voisines sur le spectre du module de la densité spectrale de puissance.

Nous présentons sur les figures 2 et 3 le spectre de puissance de la tension $V_{n_m n_s}$ lorsque nous avons un fonctionnement expérimental de la machine asynchrone avec un rotor sain. Il est clair que le niveau de bruit du spectre (ou variance) de la figure 3 où nous utilisons le périodogramme moyenné est réduit en comparaison avec le

spectre de la figure 2 où nous utilisons le périodogramme classique. Grâce à cette amélioration, l'analyse et la détection des composantes spécifiques aux défauts rotorique sera améliorée.

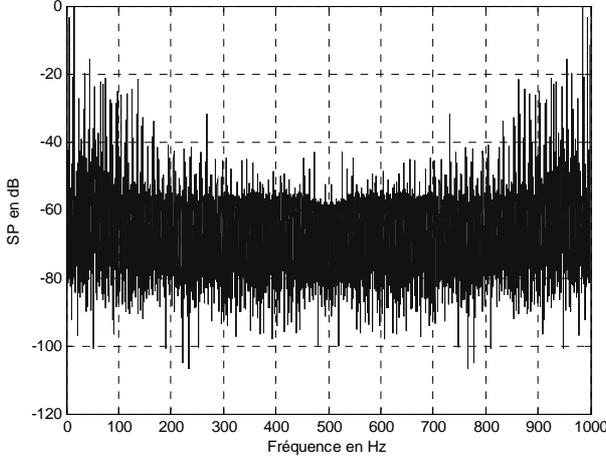


Figure 2 : Périodogramme classique de $V_{n_m n_s}$

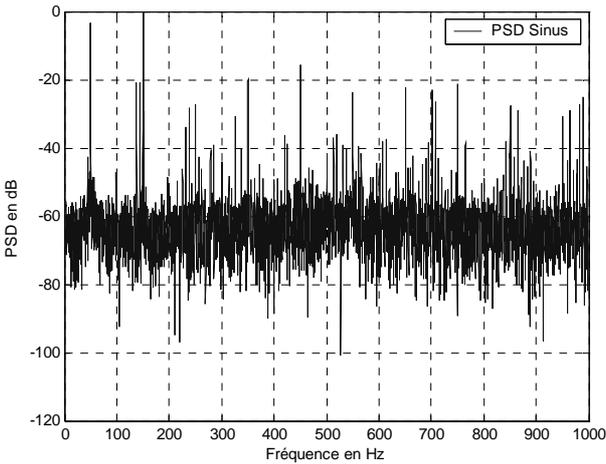


Figure 3 : Périodogramme moyenné de $V_{n_m n_s}$

4 MODELE DE SIMULATION

Le modèle développé pour la simulation de la machine est basé sur le couplage magnétique des circuits électriques [5] [6]. Nous prenons en compte dans ce modèle les harmoniques de la tension d'alimentation les plus importants mais aussi un grand nombre d'harmoniques d'espace. Ces harmoniques d'espace vont permettre d'obtenir un modèle de machine plus proche de la réalité mais ils vont aussi faire apparaître dans le spectre de la tension $V_{n_m n_s}$ des harmoniques supplémentaires qui seront utilisés pour le diagnostic de défaut. En effet, la principale information pour le diagnostic de barre(s) cassée(s) se situe au niveau de l'harmonique 3 de cette tension. Le programme de simulation ne prend en compte aucune transformation (Park, Clark, ...) ce qui oblige à inverser la matrice inductance (de rang 31) à chaque pas de simulation.

Ce mode de simulation nous permet de ne perdre aucune information.

Les équations électriques d'une machine asynchrone à cage d'écurueil en appliquant quelques hypothèses simplificatrices sont données par les relations suivantes [12]:

$$[V] = [R][I] + \frac{d([\phi])}{dt} \quad (2)$$

$$[\phi] = [[\phi_s][\phi_r]]^T \quad (3)$$

$$[V] = [[V_s][V_r]]^T \quad (4)$$

$$[I] = [[I_s][I_r]]^T \quad (5)$$

où

$$[V_s]^T = [v_{s1} \ v_{s2} \ v_{s3}] \quad (6)$$

$$[\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (7)$$

$$[\phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (8)$$

$$[I_s] = [i_{s1} \ i_{s2} \ i_{s3}] \quad (9)$$

$$[I_r] = [i_{r1} \ i_{r2} \ \dots \ i_{rNr}] \quad (10)$$

La machine expérimentale étant couplée en étoile sur le réseau d'alimentation, le modèle de simulation doit prendre en compte ce couplage. La méthode des départements est une des méthodes qui permet d'établir un modèle de la machine électrique avec un couplage étoile ou triangle. Si nous considérons un circuit électrique ayant $(x + 1)$ nœuds et z branches, la méthode des départements utilise alors les $(z-x)$ courants auxiliaires. En effet, les z branches découpent le plan du circuit en $(z-x)$ départements. Une décomposition complète du modèle de la machine dans cette configuration est décrite en [4]. La méthode utilisée pour la prise en compte des harmoniques d'espace dans le calcul des inductances de la machine est donnée en [5]. Le système final à résoudre pour la simulation de la machine asynchrone est donné à l'équation 11 où J_t représente le moment d'inertie de la machine et f_v son frottement visqueux

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\theta} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta} & f_v & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Pour la simulation d'un défaut rotorique de type barre cassée, la résistance d'une barre de la cage est augmentée de 40 fois sa valeur saine ($R_{bc} = 40 \cdot R_b$) dans la matrice $[R]$ pour obtenir un fonctionnement avec une barre quasiment cassée.

Cette augmentation permet d'atténuer le courant la traversant de 85 % par rapport au fonctionnement normal. Pour la simulation d'une barre partiellement cassée, la résistance rotorique est augmentée à partir de 2 fois sa valeur saine, jusqu'à 8 fois, ce qui permet d'atténuer le courant la traversant de 12 à 48 %.

5 ANALYSE ET COMPARAISON DES SPECTRES DE SIMULATION DE LA TENSION $V_{n_m n_s}$ ET DU COURANT STATORIQUE I_{st}

Nous représentons ci-dessous les courbes des spectres de puissance de la tension $V_{n_m n_s}$ et du courant statorique I_{st} et pour différentes valeurs du couple de charge ; afin de voir l'influence de cette charge sur l'amplitude la fréquence des raies révélatrices de défauts.

Sur les figures 4(a) à 4(d) sont représentés les spectres de puissance du courant statorique et sur les figures 5(a) à 5(d) ceux de la tension $V_{n_m n_s}$, pour un rotor sain et un rotor ayant une barre rotorique complètement cassée lorsque nous avons 50%, 75% et 100% du couple de charge.

Nous apercevons sur ces spectres de puissances l'apparition de composantes aux fréquences données par la relation $(1-2g)f_s$ pour le courant statorique et $[k(1-g) \pm g].f_s$ avec $k = 1, 3, 5, \dots$ pour la tension $V_{n_m n_s}$ lorsque nous sommes en présence d'un défaut rotorique. Si nous portons notre attention dans la bande de fréquence [130 Hz - 160 Hz] du spectre de la tension $V_{n_m n_s}$, et plus particulièrement sur les composantes ayant pour fréquences $f_{bc3} = [3(1-g) \pm g].f_s$ nous remarquons l'apparition de raies importantes à ces mêmes fréquences lorsque nous sommes en présence du défaut rotorique.

Nous pouvons remarquer nettement que les amplitudes des raies du spectre de puissance de la tension $V_{n_m n_s}$ sont plus prééminentes par rapport à celle du courant I_{st} et donc sont plus pertinentes. Pour mieux voir cette différence, nous avons représentés dans le tableau 1 les valeurs d'amplitudes du courant statorique et ceux de la tension de neutre.

Amplitude de I_{st}			Amplitude de $V_{n_m n_s}$		
50%	75%	100%	50%	75%	100%
-40	-37	-34	-12	-8	-5

Nous pouvons nous apercevoir grâce à ce résultat que l'augmentation des amplitudes des composantes de la tension $V_{n_m n_s}$ est beaucoup plus significative que celle du courant lors de l'apparition du défaut rotorique.

Donc et d'après les résultats donnés par les essais de simulations, nous pouvons conclure sur le fait que l'analyse du spectre de la tension $V_{n_m n_s}$ près de l'harmonique 3 pour le diagnostic de défaut est plus probant que l'analyse du spectre du courant statorique.

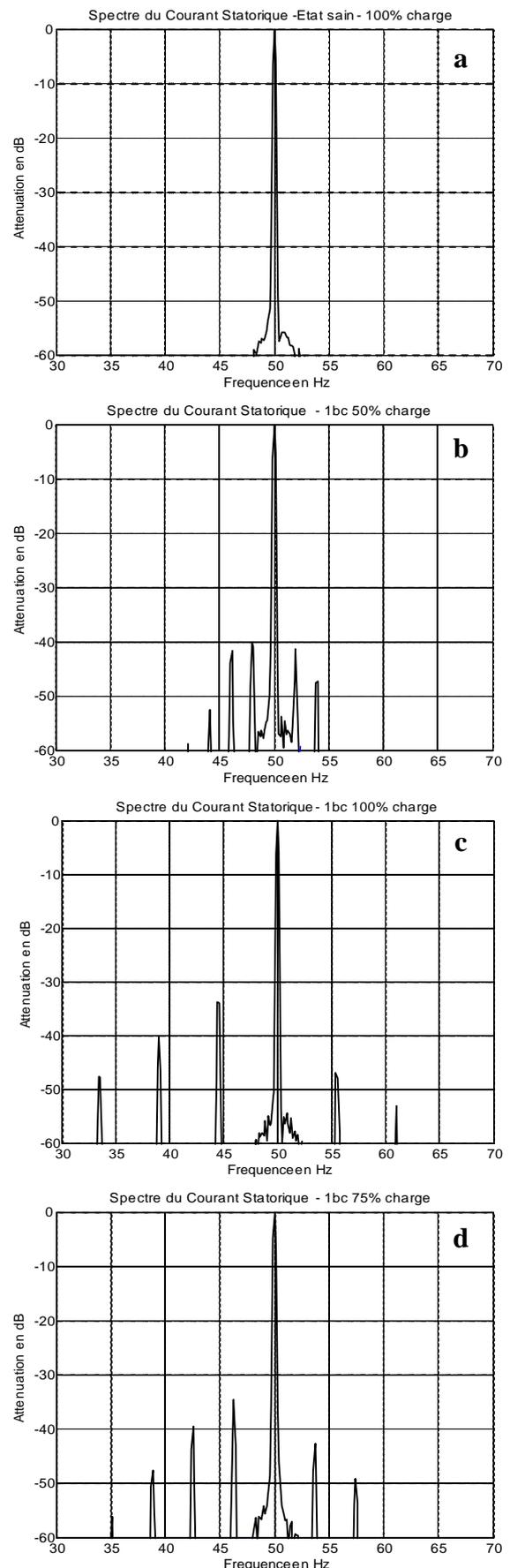


Figure 4

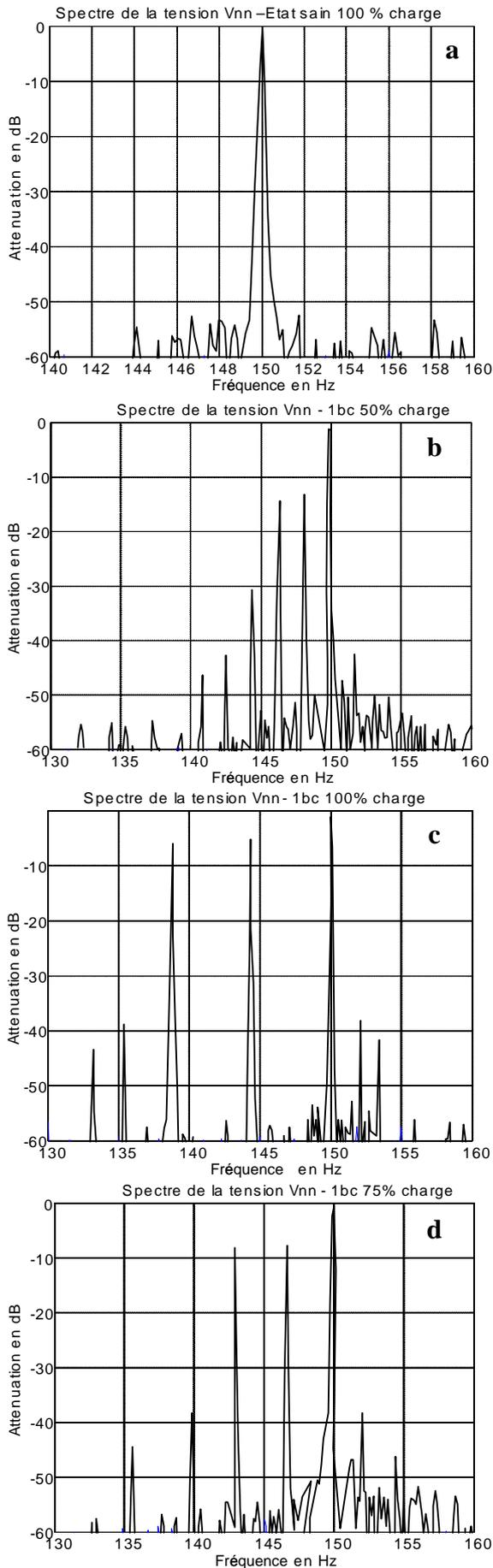


Figure 5

Cette conclusion reste valide en simulation mais des essais expérimentaux doivent venir confirmer cette hypothèse car une grande différence entre des résultats de simulations et d'expérimentations peuvent exister. La partie suivante est donc consacrée à l'analyse de la tension $V_{n_m n_s}$ ainsi qu'à l'analyse du courant statorique à travers différents essais expérimentaux.

6 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. Banc d'essai et mesure

Le moteur utilisé en expérimentation est un moteur asynchrone triphasé, 50 Hz, 2 pôles, d'une puissance de 3 kW.

Un banc de charges résistives connecté aux bornes de l'induit d'un moteur à courant continu permet d'appliquer différents couples de charge à la machine asynchrone (Fig. 6). Afin de valider la méthode de détection suggérée, nous avons en notre possession différents rotors pouvant être échangés sans affecter les caractéristiques électriques et/ou magnétiques du circuit. La cage rotorique étudiée se compose de 28 barres aluminium et l'emplacement de la cassure est précisé sur la figure 7. La tension entre les deux neutres est enregistrée lorsque le moteur fonctionne en régime établi. La fréquence d'échantillonnage choisie est de 2 kHz et le nombre de points d'acquisition est égal à 2^{18} = 262144 valeurs, comme défini précédemment.

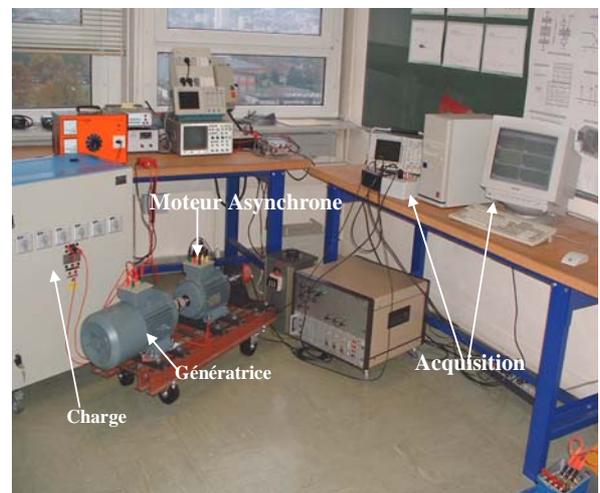


Figure 6 : Banc d'essai

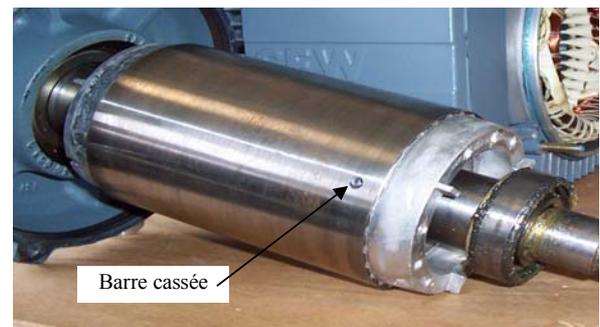


Figure 7 : Rotor avec une barre cassée

Pour les machines de grandes puissances et vu la conception de leurs cages rotorique, une cassure de barre peut entraîner la dislocation du rotor ainsi que le stator, ce qui entraînera l'arrêt de la machine puis le processus économique [14]. En plus la détection de la fréquence de leurs défaut peut s'avérer difficile à cause de la faible valeur du glissement ($\sim 1\%$) et surtout si la barre est partiellement cassée. Dans ce qui suit, nous allons voir que l'utilisation du spectre de la tension du neutre pour la détection de cassures de barres est la plus convaincante.

B. Analyse de la tension expérimentale $V_{n_m n_s}$

Nous avons effectué plusieurs essais expérimentaux pour analyser la tension $V_{n_m n_s}$ et le courant statorique I_{sa} . Nous avons dans un premier temps analysé ces signaux lorsque le moteur fonctionne avec un rotor sain. Puis nous avons effectué l'analyse d'une barre partiellement cassée (1er cas environ 20% de la barre est cassée et le 2ème cas 50% de la barre est cassée) puis d'une barre complètement cassée sous 50, 75 et 100% de la charge.

Avant d'entamer les analyses de spectres, il est important de noter que lorsque nous sommes dans le cas d'une simulation sans défaut, le spectre du courant statorique tout comme celui de la tension $V_{n_m n_s}$ ne contient aucune composante spécifique au défaut, ce qui est en théorie tout à fait normal. Ce n'est pas le cas lors des expérimentations. En effet, nous savons que la construction de la machine n'est pas parfaite et qu'il existe une légère asymétrie dite naturelle au niveau du rotor. Cette asymétrie se traduit par l'apparition de composantes aux fréquences de défaut dans les spectres de puissances (fig.8a).

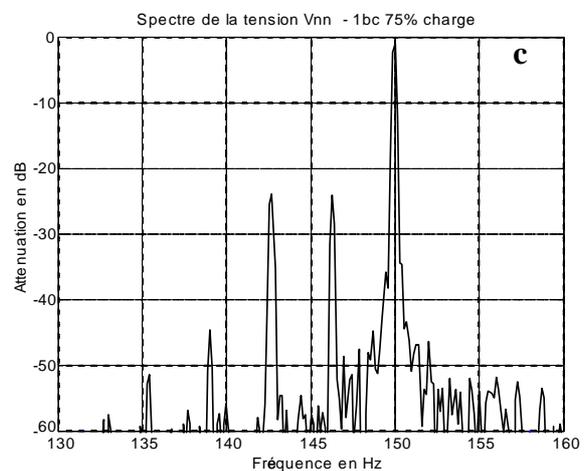
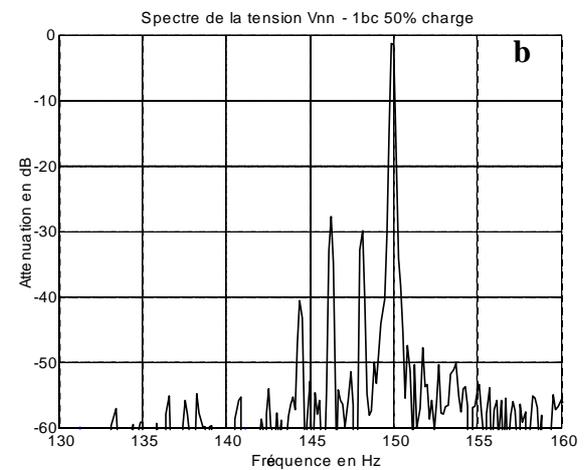
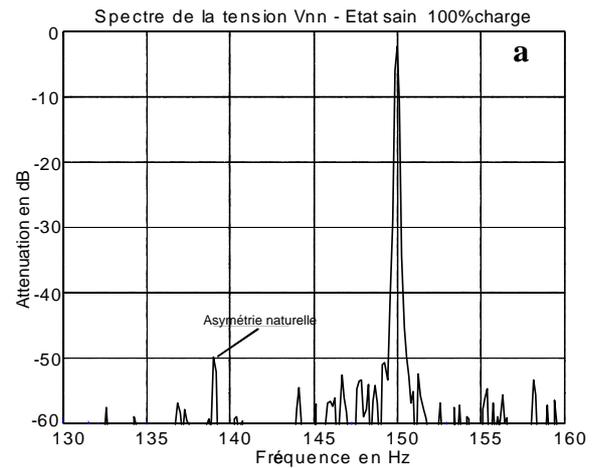
Après une analyse des figures 8(b) à 8(d) pour 50, 75 et 100% du couple et 8(e) à 6(f) pour 50 et 100% du couple avec une demie barre cassée. Nous constatons une augmentation de l'amplitude des raies ayant pour fréquences :

$$f_{bc3} = [3(1 - g) \pm g].fs.$$

Comme nous l'avons montré en simulation, cette augmentation est spécifique à la rupture d'une barre cassée au rotor, et le plus important que nous pouvons remarquer, est la grandeur des amplitudes de ces raies malgré une légère fissuration de la barre et à faible charge (fig 8f) contrairement à ceux du courant statorique (fig 9 a et b).

Un suivi de ces amplitudes permettrait d'effectuer un diagnostic fiable et précis du moteur asynchrone, surtout lorsqu'il s'agit d'une petite fissure de barre.

Si nous observons ces résultats, nous voyons que l'amplitude des composantes à f_{bc3} augmente significativement avec le défaut rotorique, que l'on soit sous 50% ou 100 % de la charge. Nous pouvons noter que la détection de la barre partiellement cassée peut être effectuée pour une charge supérieure ou égale à 50 % si nous nous basons sur l'évolution de l'amplitude des composantes spécifiques au défaut rotorique.



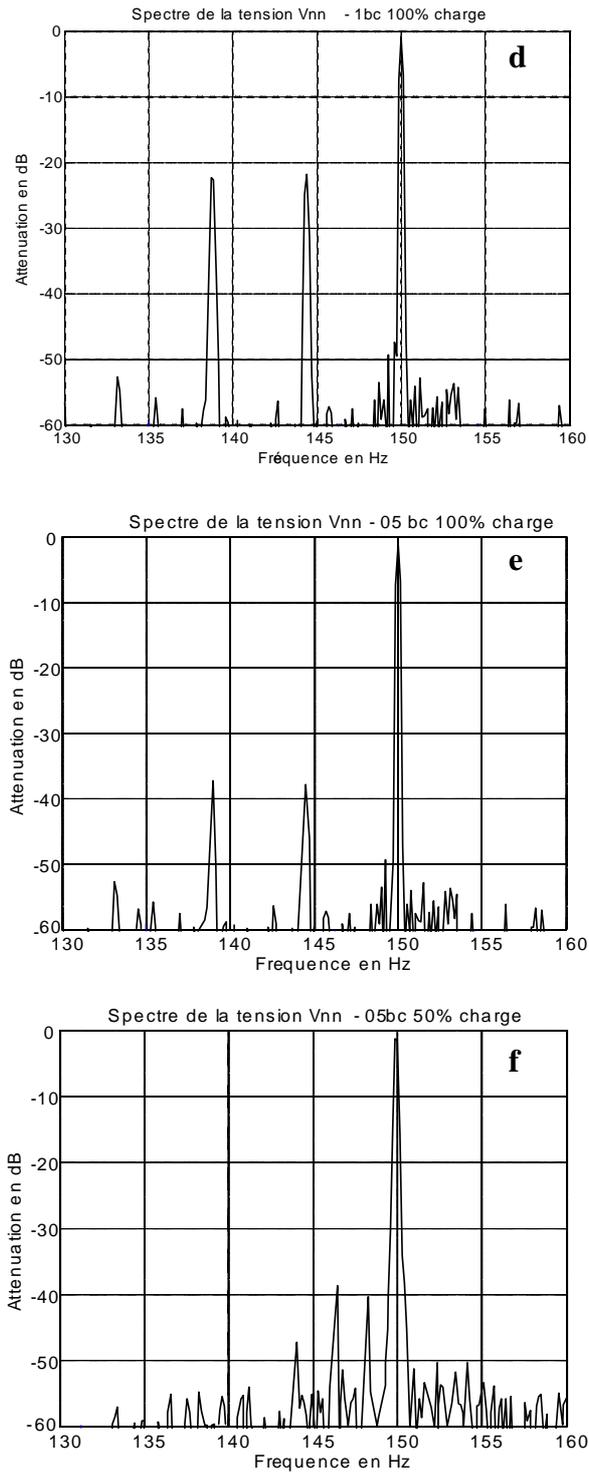


Figure 8 : Spectres de la tension de neutre pour différentes valeurs de charges et différentes fissurations de barre

La comparaison entre les composantes du spectre de la tension $V_{n_m n_s}$ et la première raie à gauche du spectre du courant statorique nous montre l'efficacité de celle de la tension à faible charge et faible fissure.

Il faut noter qu'il existe une grande différence entre les spectres de la tension $V_{n_m n_s}$ obtenus en simulation et ceux obtenus en expérimentation. Si nous prenons le cas de la simulation d'une barre partiellement cassée, nous nous

apercevons que les amplitudes des composantes pour une fréquence de défaut donnée ont une valeur assez différente de la réalité. Cette remarque nous montre que les résultats de simulation pour une barre partiellement cassée sont assez difficile à analyser même si les conditions de défaut sont respectées (le courant dans la barre défaillante est bien réduit d'environ 50%). Cependant, même si ces différences sont non négligeables, les résultats obtenus grâce aux essais expérimentaux viennent quand même confirmer les attentes prévues par l'analyse théorique.

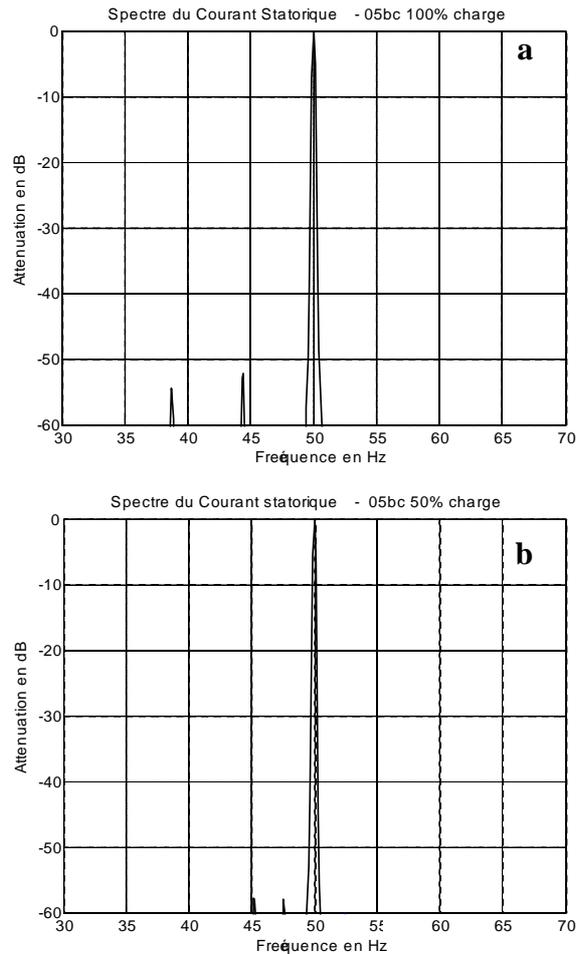


Figure 9 : Spectre du courant statorique pour différentes valeurs de charges et différentes fissurations de barre.

7 CONCLUSION

Nous avons montré que l'analyse de la tension entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone donne des informations efficaces sur l'état du moteur asynchrone. En effet, lorsqu'une rupture de barre rotorique apparaît au rotor d'une machine asynchrone, les composantes dont les fréquences sont données par la relation $f_{b3} = [3(1-g) \pm g].f_s$ augmentent en amplitude. Nous avons montré que l'amplitude des composantes présentes dans le spectre de la tension $V_{n_m n_s}$ augmente avec une plus grande importance que celle présente dans le spectre du courant statorique lors de l'apparition du défaut. Cette

remarque nous amène à conclure que le spectre de puissance du courant statorique donne des informations moins pertinentes que le spectre de puissance de la tension $V_{n_{ms}}$, surtout lorsqu'il s'agit d'une faible charge avec une légère fissure. Cette conclusion a pu être vérifiée à travers différents résultats théoriques et pratiques. Nous avons montré qu'une barre partiellement cassée sous une charge de 50 % pouvait être détectée grâce à l'analyse du spectre de puissance de la tension $V_{n_{ms}}$.

Ces différents résultats nous montrent que cette tension est un signal complémentaire à celui du courant statorique pour l'analyse et le diagnostic de défaut des moteurs asynchrones.

Nous devons souligner que l'instrumentation nécessaire pour analyser cette tension reste simple et peu coûteuse et que seul un accès au neutre du moteur et au neutre du réseau d'alimentation est nécessaire.

REFERENCES

- [1] A.H. Bonnet, "Analysis of Rotor Failures in Squirrel Cage Induction Machines", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 24, No 6, pp. 1124–1130, November/December 1988.
- [2] S. Nandi and H.A. Toliyat, "Fault Diagnosis of Electrical Machine – A Review", in *IEMDC'99*, pp. 219–221, May 1999.
- [3] W.T. Thomson and M. Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", *IEEE Trans. On IAS Magazine*, Vol. 7, No. 4, pp. 26–34, July/August 2001.
- [4] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones: modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation de défaut", *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, Décembre 1999.
- [5] G. Didier and H. Razik and A. Rezzoug, "On the Modelling of Induction Motor Including the First Space Harmonics for Diagnosis Purposes", *International Conference on Electrical Machine ICEM'02*, August 2002.
- [6] G. Didier and H. Razik and A. Abed and A. Rezzoug, "On Space Harmonics Model of a Three Phase Squirrel Cage Induction Motor for Diagnosis Purposes", *International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC'02*, Croatia, September 2002.
- [7] A. Bellini, F. Filipetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G. B. Kliman, "Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Rotor Bars by Means of Electrical Signature Analysis", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No 5, pp. 1248–1255, September/October 2002.
- [8] G. Didier and H. Razik and O. Caspary and E. Ternisien, "Rotor Cage Fault Detection in Induction Motor using global modulation index on the Instantaneous Power Spectrum", *IEEE-SDEMPED03*, August 24– 26, Atlanta, USA, 2003.
- [9] M. A. Cash, T. G. Habetler, G. B. Kliman, "Insulation Failure Prediction in AC Machines Using Line-Neutral Voltages", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, No 6, pp. 1234–1239, November/ December 1998.
- [10] G. Didier and H. Razik, "Sur la détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones", *La Revue 3EI*, pp. 53–62, Décembre 2001.
- [11] M.S. Bartlett, "Smoothing Periodograms from Time Series with Continuous Spectra", *Nature*, London, vol. 161, pp. 686–687, May 1948.
- [12] H. R. Fudeh and C. M. Ong, "Modeling and Analysis of Induction Machines Containing Space Harmonics. Part I", in *IEEE Transactions on Power App. and Systems*, Vol. PAS-102, No. 8, pp. 2608–2628, 1983.
- [13] S.L. Marple, "Digital Spectral Analysis with Applications", *Prentice-Hall*, New Jersey, 1987.
- [14] A. Aboubou "Comparaison de trois techniques dédiées au diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage" *Revue la RIGE* 2005.