

Effet d'un multiplicateur planétaire sur les signaux électriques de la machine à induction à rotor bobiné dans la production d'énergie éolienne

Mohammad Hoseintabar Marzebali^{(1),(2)}, Shahin Hedayati Kia⁽¹⁾, Humberto Henao⁽¹⁾, Gérard-André Capolino⁽¹⁾,
Jawad Faiz⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI - EA3899), Equipe Energie Electrique et Systèmes Associés (EESA), Université de Picardie « Jules Verne »

⁽²⁾ Research Center of Electrical Machines (RCEM), Université de Téhéran, Téhéran, Iran

RESUME – Cet article a pour objectif d'étudier l'effet des vibrations torsionnelles induites par un multiplicateur planétaire sur les signaux électriques d'une machine à induction à rotor bobiné utilisée dans les aérogénérateurs à vitesse variable. A cet effet, un simulateur numérique considérant les principaux éléments de la chaîne de transmission mécanique et de la machine à induction à rotor bobiné a été développé pour classer les fréquences caractéristiques de ce multiplicateur planétaire au niveau du couple électromagnétique et des courants statoriques de la machine à induction à rotor bobiné. Les résultats de simulation sont ensuite validés par expérimentation sur un banc simulateur éolien à échelle réduite d'une puissance de 5,5kW.

Mots-clés—Aérogénérateur, Engrenage planétaire, Eoliennes, Mesure non invasive, Machine à induction, Surveillance, Détection de défauts, Diagnostic.

1. INTRODUCTION

La production d'énergie électrique renouvelable d'origine éolienne a été intensifiée en France et plus particulièrement dans la région Hauts de France ces dernières années. L'objectif de cette région est d'atteindre une production d'énergie électrique d'origine éolienne de 2800MW correspondant à l'installation de 1100 éoliennes d'ici 2020 contre 749MW d'énergies produites et 367 éoliennes déjà installées en 2010. Cette augmentation importante de la production d'énergie électrique nécessite un fonctionnement fiable et sûr des parcs éoliens. Au niveau électrique, les points névralgiques sont les bobinages statoriques et rotoriques de la génératrice à induction, le convertisseur statique connecté à son rotor ainsi que l'interconnexion avec le réseau de distribution. Au niveau mécanique, en dehors des pâles dont la fiabilité est capitale, les arbres, les roulements à billes, le multiplicateur à engrenages planétaires, la nacelle et la tour sont les éléments qui demandent une surveillance rapprochée. La disponibilité de l'engrenage planétaire est cruciale dans la chaîne cinématique des éoliennes étant donné que sa maintenance nécessite une intervention lourde dans la nacelle. Les systèmes utilisés pour la surveillance de cet organe sont souvent basés sur l'analyse des signaux vibratoires. Les courants, les tensions et le flux de dispersion de la génératrice donnent aussi des indices pour indiquer des défauts électriques et mécaniques, ce qui est une alternative avantageuse en termes de coût et de la facilité de

mise en œuvre par rapport à l'analyse vibratoire comme cela a été évoqué dans plusieurs études récentes [1]- [4]. Dans cet article, une étude initiale est proposée par rapport aux effets des vibrations torsionnelles induites par un engrenage planétaire sur le couple électromagnétique et sur les courants statoriques de la machine à induction à rotor bobiné, utilisée dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Cette étude est effectuée à travers une modélisation numérique et une expérimentation sur un banc d'essai à échelle réduite d'une puissance utile de 5,5kW. Les résultats montrent qu'il est possible de détecter certaines fréquences caractéristiques mécaniques de l'engrenage planétaire dans les signatures électriques de la machine à induction à rotor bobiné, pour la surveillance et le diagnostic des aérogénérateurs dans les parcs éoliens.

2. MODELE DE LA GENERATRICE A INDUCTION A ROTOR BOBINE

Les méthodes couramment utilisées pour modéliser les machines électriques sont basées sur les méthodes des éléments finis, des réseaux de perméances et du circuit interne équivalent (CIE) [5]. La modélisation de la génératrice à induction à rotor bobiné (GIRB) à partir de l'approche CIE considère la machine comme un transformateur triphasé tournant dans le repère « abc ». Cette méthode est la plus adaptée pour définir l'interaction entre les différents phénomènes physiques mis en jeu pour un fonctionnement normal et sous conditions de défaut tel que le déséquilibre dans les bobinages statoriques ou rotoriques [6]. Les hypothèses simplificatrices de ce modèle sont les suivantes :

- L'effet de variation de la saturation est négligé
- La répartition de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale
- Les résistances statorique et rotorique ne sont pas affectées par les variations de la température

Les inductances montrées sur la Fig. 1 peuvent être calculés à partir des relations :

$$L_{saa} = L_{sbb} = L_{scc} = L_{ls} + L_{ms} \quad (1)$$

$$L_{sab} = L_{sbc} = L_{sca} = -0.5L_{ms} \quad (2)$$

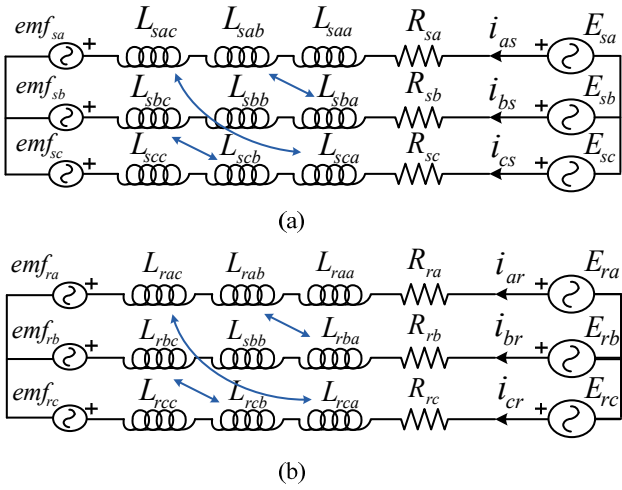


Fig. 1. Circuit interne équivalent de la génératrice à induction à rotor bobiné en mode équilibré : (a) Stator - (b) Rotor.

$$L_{raa} = L_{rbb} = L_{rcc} = L_{lr} + L_{mr} \quad (3)$$

$$L_{rab} = L_{rbc} = L_{rca} = -0.5L_{mr} \quad (4)$$

où L_{ms} , L_{mr} et L_{ls} , L_{lr} représentent respectivement les inductances magnétisantes et de fuite du stator et du rotor. Les inductances mutuelles entre les phases « abc » du stator et les phases « abc » du rotor sont définies par les relations :

$$L_{asr} = L_{bsr} = L_{csr} = L_{sr} \cos(\theta_r) \quad (5)$$

$$L_{asbr} = L_{bscr} = L_{csar} = L_{sr} \cos(\theta_r + 2\pi/3) \quad (6)$$

$$L_{ascr} = L_{bsar} = L_{csbr} = L_{sr} \cos(\theta_r - 2\pi/3) \quad (7)$$

Dans les expressions ci-dessus, L_{sr} représente la valeur maximum de l'inductance mutuelle entre les phases « abc » du stator et les phases « abc » du rotor et θ_r représente l'angle de rotation rotorique. Ainsi, les forces électromotrices statoriques et rotoriques sont définies par les équations :

$$emf_{sa} = L_{sr} \frac{d}{dt} [(i_{ar} \cos(\theta_r) + i_{br} \cos(\theta_r + 2\pi/3) + i_{cr} \cos(\theta_r - 2\pi/3))] \quad (8)$$

$$emf_{sb} = L_{sr} \frac{d}{dt} [(i_{ar} \cos(\theta_r - 2\pi/3) + i_{br} \cos(\theta_r) + i_{cr} \cos(\theta_r + 2\pi/3))] \quad (9)$$

$$emf_{sc} = L_{sr} \frac{d}{dt} [(i_{ar} \cos(\theta_r + 2\pi/3) + i_{br} \cos(\theta_r - 2\pi/3) + i_{cr} \cos(\theta_r))] \quad (10)$$

$$emf_{ra} = L_{sr} \frac{d}{dt} [(i_{as} \cos(\theta_r) + i_{bs} \cos(\theta_r + 2\pi/3) + i_{cs} \cos(\theta_r - 2\pi/3))] \quad (11)$$

$$emf_{rb} = L_{sr} \frac{d}{dt} [(i_{as} \cos(\theta_r - 2\pi/3) + i_{bs} \cos(\theta_r) + i_{cs} \cos(\theta_r + 2\pi/3))] \quad (12)$$

$$emf_{rc} = L_{sr} \frac{d}{dt} [(i_{as} \cos(\theta_r + 2\pi/3) + i_{bs} \cos(\theta_r - 2\pi/3) + i_{cs} \cos(\theta_r))] \quad (13)$$

Le couple électromagnétique T_e peut être écrit par la relation:

$$T_e = i_{as} L_{sr} [-i_{ar} \sin(\theta_r) - i_{br} \sin(\theta_r + 2\pi/3) - i_{cr} \sin(\theta_r - 2\pi/3)] p + i_{bs} L_{sr} [-i_{ar} \sin(\theta_r - 2\pi/3) - i_{br} \sin(\theta_r) - i_{cr} \sin(\theta_r + 2\pi/3)] p + i_{cs} L_{sr} [-i_{ar} \sin(\theta_r + 2\pi/3) - i_{br} \sin(\theta_r - 2\pi/3) - i_{cr} \sin(\theta_r)] p \quad (14)$$

où p est le nombre de paires de pôles de la génératrice à induction à rotor bobiné.

3. MODELE DE L'ENGRENAGE PLANETAIRE

Les équations du modèle cinématique d'un multiplicateur de type épicycloïdal (planétaire) à quatre engrenages satellites et à couronne fixe peuvent être écrites comme suit [7] (Fig. 2):

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}_m \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}_m(t) \mathbf{X}(t) = \bar{\mathbf{F}} + \mathbf{F}(t) \quad (15)$$

avec

$$\mathbf{X}(t) = [r_c \theta_c(t), r_r \theta_r(t), r_s \theta_s(t), r_{rp1} \theta_{rp1}(t), \dots, r_{rp4} \theta_{rp4}(t)]$$

$$\mathbf{M} = \text{Diag} \left[\frac{J_c}{r_c^2} + 4m_p, \frac{J_r}{r_r^2}, \frac{J_s}{r_s^2}, \frac{J_{p1}}{r_{p1}^2}, \dots, \frac{J_{p4}}{r_{p4}^2} \right]$$

$$\mathbf{C}_m = \begin{bmatrix} 4(c_{rp} + c_{sp}) & -4c_{rp} & -4c_{sp} & c_{rp} - c_{sp} & \dots & c_{rp} - c_{sp} \\ 4c_{rp} & 0 & -c_{rp} & \dots & \dots & -c_{rp} \\ & 4c_{sp} & c_{sp} & \dots & \dots & c_{sp} \\ & & c_{rp} + c_{sp} & \dots & \dots & 0 \\ & \text{sym} & & \ddots & & \vdots \\ & & & & & c_{rp} + c_{sp} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{K}_m(t) =$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 (K_{rp_i}(t) + K_{sp_i}(t)) & -\sum_{i=1}^4 K_{rp_i}(t) & -\sum_{i=1}^4 K_{sp_i}(t) & K_{rp1}(t) - K_{sp1}(t) & \dots & K_{rp4}(t) - K_{sp4}(t) \\ \sum_{i=1}^4 K_{rp_i}(t) & 0 & -K_{rp1}(t) & \dots & \dots & -K_{rp4}(t) \\ & \sum_{i=1}^4 K_{sp_i}(t) & K_{sp1}(t) & \dots & \dots & K_{sp4}(t) \\ & & K_{rp1}(t) + K_{sp1}(t) & \dots & \dots & 0 \\ & \text{sym} & & \ddots & & \vdots \\ & & & & & K_{rp4}(t) + K_{sp4}(t) \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \left[\frac{T_c}{r_c}, \frac{T_r}{r_r}, \frac{T_s}{r_s}, 0, \dots, 0 \right]^T$$

$$\mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^4 (c_{rp} \dot{e}_{rp_i}(t) + c_{sp} \dot{e}_{sp_i}(t)) \\ \sum_{i=1}^4 c_{rp} \dot{e}_{rp_i}(t) \\ \sum_{i=1}^4 c_{sp} \dot{e}_{sp_i}(t) \\ -c_{rp} \dot{e}_{rp1}(t) + c_{sp} \dot{e}_{sp1}(t) \\ \vdots \\ -c_{rp} \dot{e}_{rp4}(t) + c_{sp} \dot{e}_{sp4}(t) \end{bmatrix}$$

où

J_v

Moments d'inertie du porte-satellite ($v=c$), de la couronne ($v=r$), de l'engrenage solaire ($v=s$) et des satellites ($v= p_1, \dots, p_4$).

C_{sp}, C_{rp}

Coefficients d'amortissement de contact solaire-satellites, couronne-satellites.

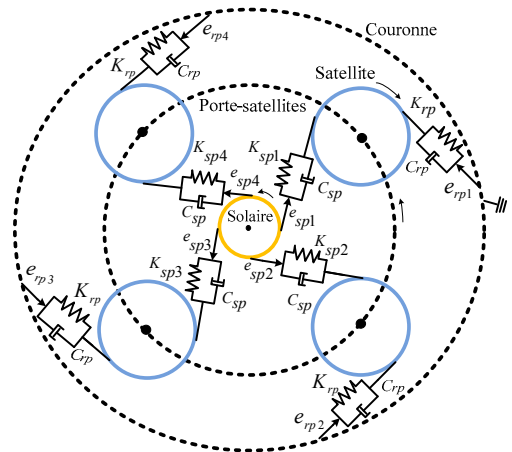


Fig. 2. Modèle de l'engrenage planétaire avec couronne fixe pour couplage au modèle de la génératrice à induction.

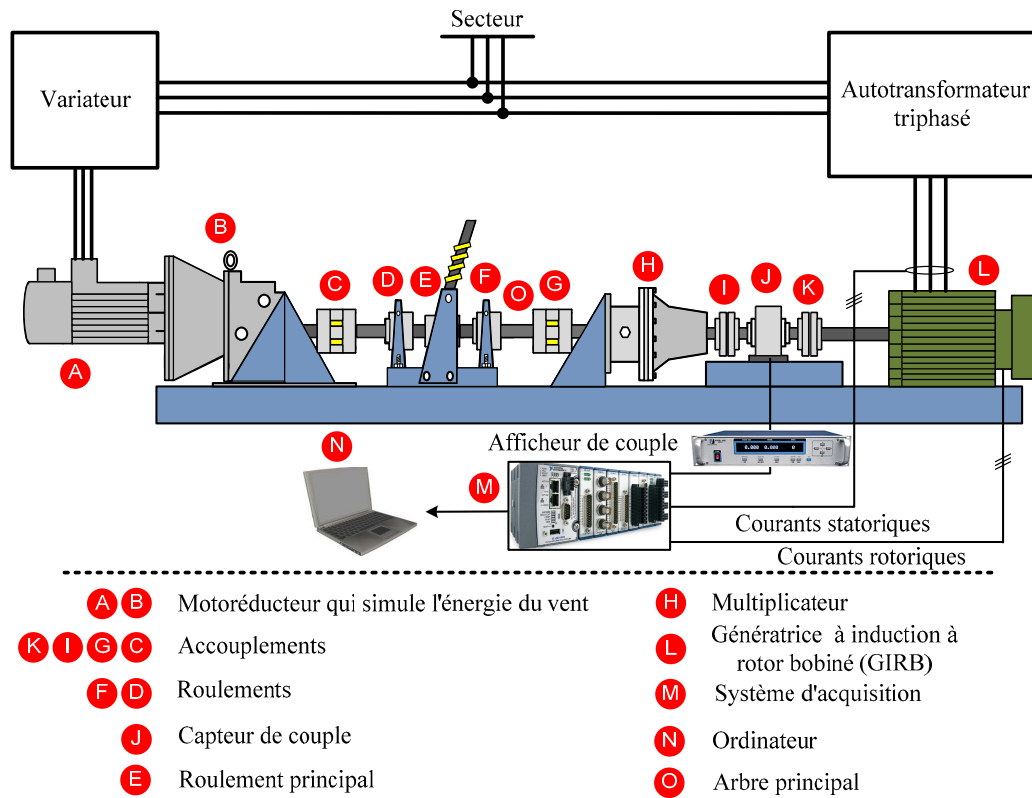


Fig. 3. Banc d'essai à échelle réduite simulant le fonctionnement d'un aérogénérateur.

T_v	Couple mécanique appliqué au porte-satellites ($v=c$), à la couronne ($v=r$) et à l'engrenage solaire ($v=s$).
$K_{spi}(t), K_{rpi}(t)$	Raideurs de contact solaire-satellite et couronne-satellite ($i=1, \dots, 4$).
$e_{spi}(t), e_{rpi}(t)$	Erreurs de transmissions dans le contact solaire-satellite et couronne-satellite ($i=1, \dots, 4$).

Pour la partie mécanique, l'indice s représente l'engrenage solaire, l'indice r représente la couronne, l'indice c représente le porte-satellite et les indices p_1 à p_4 représentent les satellites 1 à 4 respectivement. Les variations des raideurs $K_{spi}(t)$ et $K_{rpi}(t)$ sont liées aux évolutions des contacts entre les dents des engrenages solaire-satellite et couronne-satellite dont les formes précises peuvent être obtenues par la modélisation par éléments finis. Néanmoins, il est possible d'approximer les variations de la raideur de contact par une fonction rectangulaire en utilisant les paramètres mécaniques de l'engrenage planétaire comme cela a été démontré précédemment [8]. Ainsi, les coefficients d'amortissement sont considérés constants et peuvent être déterminés en fonction des valeurs moyennes calculées pour les raideurs de contact. Les erreurs de transmissions $e_{rpi}(t)$ et $e_{spi}(t)$ représentent aussi les erreurs de l'excentricité de la couronne et de l'engrenage solaire dans un multiplicateur planétaire [8].

4. RESULTATS DE SIMULATIONS ET EXPERIMENTATIONS

4.1. Banc d'essai à échelle réduite

La figure 3 montre le schéma du banc d'essai à échelle réduite simulant le fonctionnement d'un aérogénérateur à base de la GIRB. Cette plate-forme est constituée d'un motoréducteur de 11kW qui simule la force du vent à une vitesse de rotation de 125tr/min. Celui-ci est commandé par un

variateur de vitesse qui permet de donner différents profils de vitesse à l'arbre principal. La sortie du motoréducteur est couplée à l'entrée d'un multiplicateur planétaire en passant par un support mécanique qui tient compte de la présence d'un roulement principal. Le rapport de transmission de ce multiplicateur est de 6,57 pour atteindre en sortie la vitesse de 800 tr/min correspondant à la vitesse nominale d'entraînement de la génératrice à induction pour une production d'énergie électrique de 5,5kW. Les caractéristiques électriques et mécaniques de la GIRB sont indiquées dans le tableau I. Les paramètres mécaniques de l'engrenage épicycloïdal sont donnés dans le tableau II. L'instrumentation équipant cette plate-forme est constituée de capteurs électriques et mécaniques qui permettent de retrouver expérimentalement les corrélations physiques entre les différentes variables associées aux phénomènes mis en jeu qui ont été formulés pour le système complet. Le capteur mécanique utilisé est un capteur d'effort torsionnel de type couplemètre. Ce dernier est installé entre le multiplicateur planétaire et la GIRB. Les capteurs électriques sont installés principalement autour de la GIRB pour mesurer les tensions et les courants statoriques et rotoriques.

TABLEAU I PARAMETRES ELECTRIQUES ET MECANIQUES DE LA GIRB	
Paramètres	Valeur
R_s (Ω)	0.5280
L_s (H)	0.0473
L_r (H)	0.0145
R_r (Ω)	0.2820
L_{ms} (H)	0.0348
L_{mr} (H)	0.0118
L_{sr} (H)	0.0226
J_m (kg.m^2)	0.1125
p (paires de pôles)	4

TABLEAU II			
PARAMETRES MECANIKQUES DE L'ENGRENAGE PLANETAIRE			
Type de l'engrenage	Solaire	Satellite	Couronne
Nombre de dents	14	31	78
Rayon du cercle de base (mm)	16.9	38.5	93.9
Rapport de vitesse		6.57	
$K_{spi} (i=1, \dots, 4)$		$K_{min}=4 \times 10^8$	
$K_{rpi} (i=1, \dots, 4)$		$K_{min}=4 \times 10^8$	
α (°)		20	
e_{spi}, e_{rpi} (µm)		10	
e_{bs} (µm)		5	
e_{br} (µm)		10	
C_{spi}, C_{rp}		$4.9 \times 10^4, 6.4 \times 10^4$	
J_p (kg.m ²)		0.0011	

Cette instrumentation est dotée d'un système d'acquisition temps-réel modulaire avec une précision de 24 bits [9].

4.2. Résultats de simulations

Pour cette étude, le modèle dynamique du multiplicateur planétaire à quatre engrenages satellites et à une couronne fixe est couplé au modèle du circuit interne équivalent de la machine à induction à rotor bobiné dans le repère 'abc' à travers l'engrenage solaire (Fig. 4). Plusieurs simulations sont effectuées à différents niveaux de charge lorsque la machine à induction à rotor bobiné est couplée à un réseau triphasé équilibré de 380V entre phases. Les spectres du couple électromagnétique et du courant statorique en charge nominale sont montrés sur les Figures 5.a et 5.b respectivement. Sur ces figures, les composantes fréquentielles relatives au

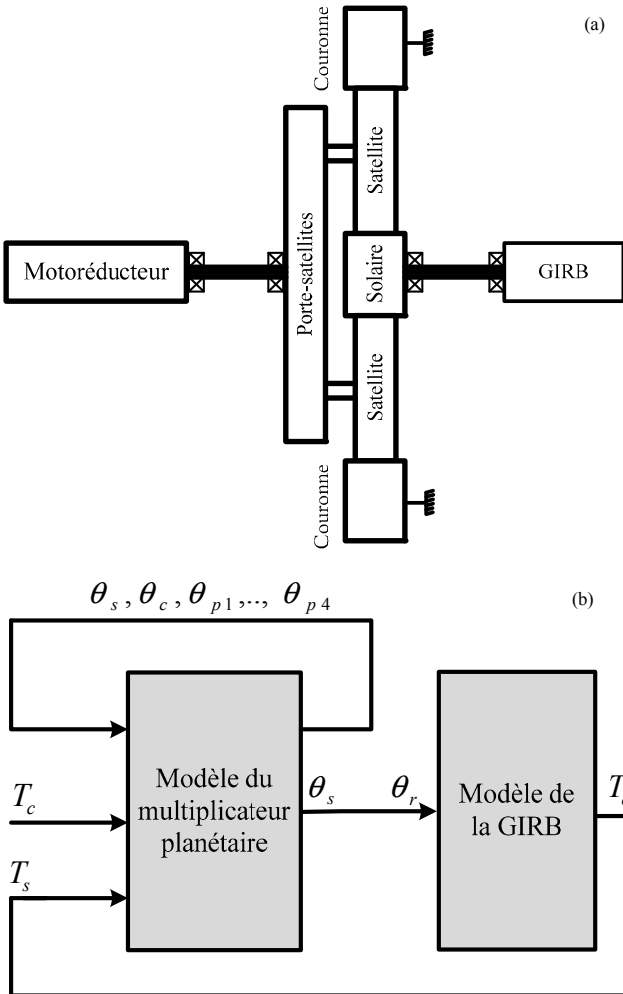


Fig. 4. Représentation simplifiée du banc d'essai : (a) Configuration mécanique. - (b) Schéma-bloc pour la simulation numérique.

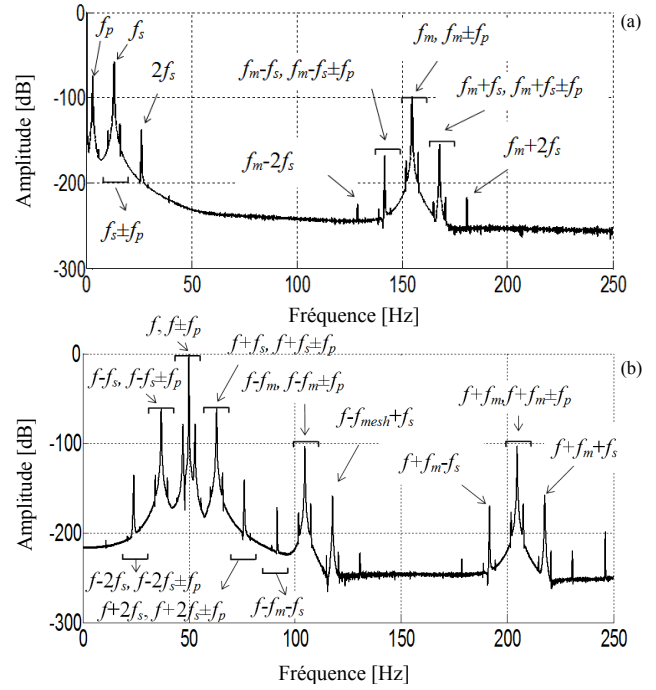


Fig. 5. Résultats de simulation pour le fonctionnement en charge nominale de la génératrice à induction à rotor bobiné : (a) Spectre du couple électromagnétique - (b) Spectre du courant statorique.

multiplicateur planétaire sont clairement observées. Dans le spectre du couple électromagnétique à f_p : fréquence de rotation des engrenages satellites, f_s : fréquence de rotation de l'engrenage solaire et f_m : fréquence d'engrènement ainsi qu'à d'autres composantes tel que $f_s \pm f_p$, $2f_s \pm f_p$, $f_m \pm f_p$, $f_m \pm f_s$, $f_m \pm f_s \pm f_p$, $f_m \pm 2f_s$ sont issues de l'effet de modulation entre les composantes de base [10]-[12]. Ces dernières composantes fréquentielles peuvent être retrouvées dans le spectre du courant statorique selon l'expression suivante [13] :

$$f_{eng} = |f \pm kf_s \pm mf_p \pm nf_m| \quad (16)$$

avec $k, m, n=0,1,2,3, \dots$ et f fréquence du réseau électrique.

4.3. Résultats expérimentaux

Les expérimentations sont effectuées dans des conditions identiques à celles obtenues par simulation. Les signaux du courant d'une phase au stator et du couple mécanique ont été mesurés sur le simulateur éolien à échelle réduite pour une durée d'acquisition de 180s avec une fréquence d'échantillonnage de 5kHz afin de pouvoir observer les composantes fréquentielles associées au multiplicateur planétaire dans les spectres des signaux mesurés. Les spectres du courant statorique et du couple mécanique sont ensuite moyennés par la technique de Welch qui permet de minimiser la variance du spectre et de mieux localiser les composantes fréquentielles relatives au multiplicateur planétaire. Les résultats obtenus en appliquant la technique de Welch au courant statorique et au couple mécanique sont montrés sur les figures 6.a à 6.c. Les composantes fréquentielles les plus remarquables dans le spectre du couple mécanique mesuré sont f_s , $2f_s$, f_m . Les autres composantes fréquentielles n'ont pas été détectées car leurs amplitudes sont inférieures au niveau du bruit de fond (-90dB), comme cela a été constaté dans les simulations numériques (figs. 5.a et 5.b). Ces composantes fréquentielles sont aussi localisées dans le spectre du courant statorique de la GIRB asynchrone hormis celles associées à la fréquence d'engrènement comme cela est illustré sur la figure 6.c. Pour l'impact de la charge sur les amplitudes des

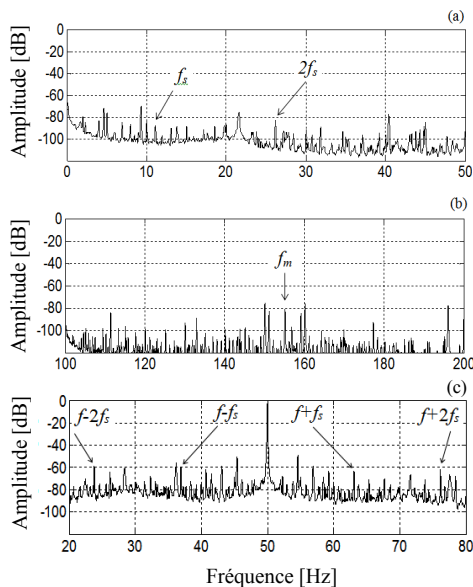


Fig. 6. Spectre du couple mécanique mesuré dans les bandes fréquentielles : (a) [0Hz, 50Hz] et (b) [100Hz, 200Hz] - (c) Spectre du courant statorique dans la bande fréquentielle [20Hz, 80Hz].

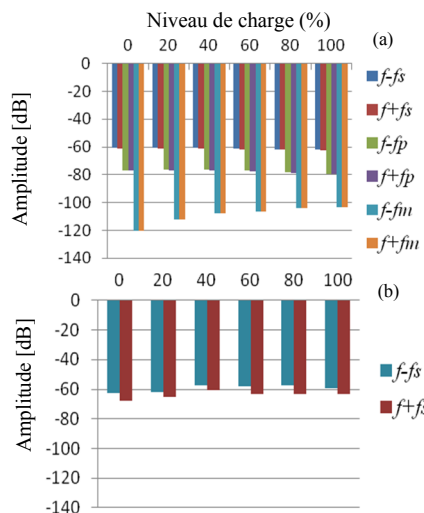


Fig. 7. Amplitudes des composantes fréquentielles dans le spectre du courant statorique à différents niveau de charge: (a) Résultats de simulation - (b) Résultats expérimentaux.

composantes fréquentielles trouvées, on peut constater une légère diminution comme cela a été montré sur les figures 7.a et 7.b. On constate une parfaite cohérence entre la simulation numérique et les expérimentations sur le banc d'essai éolien à échelle réduite.

5. CONCLUSIONS

Dans cet article, une étude initiale est menée sur l'effet des vibrations torsionnelles du multiplicateur planétaire sur le couple électromagnétique et sur le courant statorique de la génératrice à induction à rotor bobiné utilisée dans les éoliennes à vitesse variable au travers de simulations numériques et d'expérimentations à échelle réduite. Les résultats obtenus par simulation sont en parfaite cohérence avec les expérimentations et ils sont aussi très représentatifs. Ceci permet l'utilisation de ces composantes fréquentielles dans le courant statorique de la génératrice à induction pour la surveillance et le diagnostic des défauts sur le multiplicateur planétaire.

6. REFERENCES

- [1] S.H. Kia, H. Henao, G.A. Capolino, « Gear tooth surface damage fault detection using induction machine stator current space vector analysis, » *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1866-2001, March 2015.
- [2] A.R. Mohanty, C. Kar, « Fault detection in multistage gearbox by demodulation of motor current waveform, » *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1285-1297, Jun. 2006.
- [3] I.P. Girsang, J.S. Dhupia, E. Muljadi, M. Singh, L.Y. Pao, « Gearbox and drivetrain models to study dynamic effects of modern wind turbines, » *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 3777-3786, Nov./Dec. 2014.
- [4] N. Feki, G. Clerc, P. Velex, « Gear and motor fault modeling and detection based on motor current analysis, » *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 95, pp. 28-37, Feb. 2013.
- [5] H.A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin-Kelk, *Electrical machines: modeling, condition monitoring and fault diagnosis*, Boca Raton, FL 33487-2742, CRC Press, 2013.
- [6] A. Yazidi, H. Henao, G.-A. Capolino, D. Casadei, F. Filippetti, C. Rossi, « Simulation of a doubly-fed induction machine for wind turbine generator fault analysis, » in *Proc. of 5th IEEE Int. SDEMPED*, Vienna, Austria, Sept. 7-9, 2005, pp. 279-284.
- [7] H. Ding, Dynamic wear model for gear system, *Thèse de doctorat*, Département de Génie Mécanique, Ohio State University, USA, 2007.
- [8] Z. Daneshi-Far, H. Henao, G.-A. Capolino, « Planetary Gearbox Effects on Induction Machine in Wind Turbine: Modeling and Analysis, » in *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Marseille, France, 2-5 Sept. 2012, pp.1790-1796.
- [9] S.H. Kia, H. Henao, G.-A. Capolino, « Development of a test bench dedicated to condition monitoring of wind turbines, » in *Proc. of IEEE-IECON'2014*, Dallas, TX, USA, 28 Oct. - 1 Nov. 2014, pp. 2044-2049.
- [10] W. Kim, J.Y. Lee, J. Chung, « Dynamic analysis for a planetary gear with time-varying pressure angles and contact ratios, » *J. Sound and Vibration*, vol. 331, no. 4, pp. 883-901, Feb. 2012.
- [11] L. Hong, J.S. Dhupia, S. Sheng, « An explanation of frequency features enabling detection of faults in equally spaced planetary gearbox, » *J. Mechanism and Machine Theory*, vol.73, pp. 169-183, March 2014.
- [12] Z. Feng, M.J. Zuo, « Fault diagnosis of planetary gearboxes via torsional vibration signal analysis, » *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 36, no. 2, Apr. 2013, pp. 401-421.
- [13] S.H. Kia, H. Henao, G.-A. Capolino, « Analytical and experimental study of gearbox mechanical effect on the induction machine stator current signature, » *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 4, pp. 1405-1415, July/Aug. 2009.