

Détermination et diagnostic des modulations des courants statoriques d'une machine asynchrone en présence d'oscillations de couple

Baptiste TRAJIN¹, Jérémi REGNIER^{2,3}, Jean FAUCHER^{2,3}

¹Université de Toulouse; INP; ENI de Tarbes, LGP, 47 avenue d'Azereix, BP1629, 65019 Tarbes Cedex

²Université de Toulouse; INP, UPS; LAPLACE; ENSEEIHT, 2 rue Camichel, F-31071 Toulouse Cedex 7

³CNRS; LAPLACE; F-31071 Toulouse Cedex 7

RESUME – Cet article présente une modélisation de la machine asynchrone permettant le diagnostic des modulations des courants statoriques dans le cas d'oscillations du couple de charge. Les composantes oscillatoires du couple de charge entraînent l'apparition de modulations d'amplitude et de modulations de phase sur les courants d'alimentation de la machine. Les caractéristiques de ces modulations dépendent des paramètres électriques et mécaniques, du point de fonctionnement de l'entraînement, de la fréquence des oscillations de couple. Un modèle analytique de l'entraînement, basé sur le modèle d'état linéaire dans le domaine fréquentiel est proposée afin de prédire les composantes spectrales des courants statoriques. Le modèle proposé est validé par des mesures expérimentales.

MOTS-CLES – Modulations, Entraînement asynchrone, Oscillations de couple, Modèle d'état fréquentiel.

1 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 fonctionnement dégradés peuvent apparaître durant la vie de la machine [1], [2]. Afin d'accroître la productivité et la sûreté des entraînements électromécaniques, des méthodes de surveillance et de diagnostic ont été étudiées. Classiquement, ces méthodes sont basées sur une surveillance vibratoire. La détection et la surveillance peuvent être basés sur l'analyse de grandeurs électriques telles que les courants de phase moteur, souvent déjà mesurés pour des application de contrôle-commande [3]-[6].

Dans le cas d'oscillations de couple de charge, des harmoniques de modulation apparaissent dans les spectres de courant. Plusieurs travaux traitent de la détection et du diagnostic des modulations en régime permanent ou transitoire [7]-[9].

Cet article propose une modélisation dans le domaine fréquentiel de l'entraînement permettant de prédire et d'étudier les signatures des défauts sur les courants statoriques. La paragraphe 2 présente la construction d'un signal complexe reflétant les caractéristiques de modulation des courants statoriques réels. Par ailleurs, un indicateur vectoriel est introduit afin de caractériser les modulations extraites. La modélisation d'état de l'entraînement asynchrone en présence de défauts mécaniques est présentée dans le paragraphe 3. Enfin, dans le paragraphe 4, l'indicateur vectoriel précédemment construit est associé au modèle développé dans le paragraphe 3 et validé sur des résultats expérimentaux.

2 Diagnostic des modulations sur les courants statoriques

2.1 Construction d'un signal complexe associé aux courants statoriques

Dans le cadre du diagnostic des modulations des courants statoriques, il est nécessaire de construire un signal complexe associé aux signaux réels. Classiquement, la transformée de Hilbert est utilisée [10]. Cependant, cette transformée est limitée par les conditions du théorème de Bedrosian et le diagnostic de modulations rapides, c'est-à-dire lorsque la fréquence de modulation est supérieure à la fréquence fondamentale, est impossible [7]. Dans le cadre des systèmes électriques triphasés équilibrés, la transformée de Concordia, dans le référentiel statorique fixe, peut être avantageusement utilisée pour construire un signal complexe associé aux courants statoriques. En effet, comme les composantes sur les axes α et β sont en quadrature, il devient possible de construire le signal complexe $z_{TC}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}(x_\alpha(t) + jx_\beta(t))$ [7], [8].

Ainsi, l'amplitude instantanée, représentative des modulations d'amplitude $AI(t) = |z_{TC}(t)|$ et la fréquence instantanée $FI(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\arg(z_{TC}(t)))}{dt}$ relative aux modulations de phase peuvent être extraites sans perte d'information.

2.2 Indicateur vectoriel

Considérons un système de trois signaux réels représentant trois courants statoriques triphasés équilibrés modulés en amplitude et en phase à la même fréquence. L'indicateur vectoriel \tilde{G} est défini selon (5) avec I l'amplitude fondamentale, α et β les indices de modulation respectivement d'amplitude et de phase et f_d la fréquence des modulations. La phase de ce vecteur permet de diagnostiquer la modulation prédominante : la modulation d'amplitude (respectivement de phase) est prédominante si la phase de \tilde{G} est inférieure (respectivement supérieure) à $\frac{\pi}{4}$. De plus, le module de \tilde{G} rend compte de la puissance des modulations.

$$\tilde{G} = I\alpha + jf_d\beta \quad (1)$$

3 Modélisation de l'entraînement asynchrone en présence d'oscillations du couple de charge

3.1 Modèle d'état de la machine asynchrone dans le domaine fréquentiel

Dans cet article, nous considérerons le modèle d'état de la machine asynchrone dans le repère de Concordia, avec les tensions d'alimentations comme variable d'entrée, les flux rotoriques comme variables d'état et les courants statoriques comme variables d'état et de sortie [11].

Le couple électromagnétique est obtenu par interaction entre les courants statoriques et les flux rotoriques puis comparé au couple de charge, vu comme une entrée externe, pour déterminer la vitesse de rotation grâce à la fonction de transfert mécanique du système.

En régime permanent, le modèle d'état de la machine asynchrone peut être exprimé dans le domaine fréquentiel afin de déterminer les composantes oscillatoires des courants statoriques. Dans ce cas, les produits entre variables temporelles deviennent des produits de convolution entre variables fréquentielles (*). Le modèle d'état se met alors sous la forme (2) avec ν la fréquence, X le vecteur d'état, A la matrice d'état et B la matrice d'entrée.

$$(2\pi j\nu)X(\nu)A(\nu) * \underbrace{\begin{pmatrix} I_{s\alpha}(\nu) \\ I_{s\beta}(\nu) \\ \Phi_{r\alpha}(\nu) \\ \Phi_{r\beta}(\nu) \end{pmatrix}}_{X(\nu)} + B \begin{pmatrix} V_{s\alpha}(\nu) \\ V_{s\beta}(\nu) \end{pmatrix} \quad (2)$$

3.2 Modèles des variables d'entrée et des variables d'état

Afin de résoudre le système d'état et d'extraire les composantes fréquentielles des courants statoriques, on considérera que les tensions d'alimentation sont parfaitement sinusoïdales de fréquence f_s . On considérera de plus que le couple de charge et le couple électromagnétique s'expriment comme une constante plus une composante oscillante de fréquence f_{osc} et d'amplitude C_{osc} [12].

Concernant les variables d'état, il est démontré dans [6] que des composantes de fréquences $f_s \pm f_{osc}$ apparaissent sur les courants statoriques (3)-(4) avec $I_{\alpha\beta}$, I^+ , I^- les amplitudes respectivement du fondamental, de

la composante à $f_s + f_{osc}$ et de la composante à $f_s - f_{osc}$ des courants dans le repère de Concordia et ψ_i le déphasage des courants.

$$I_{s\alpha}(\nu) = \frac{I_{\alpha\beta}}{2} [e^{j\psi_i} \delta(\nu - f_s) + e^{-j\psi_i} \delta(\nu + f_s)] + \frac{1}{2} [I^+ e^{j\psi_i} \delta(\nu - f_s - f_{osc}) + \bar{I}^+ e^{-j\psi_i} \delta(\nu + f_s + f_{osc})] + \frac{1}{2} [I^- e^{j\psi_i} \delta(\nu - f_s + f_{osc}) + \bar{I}^- e^{-j\psi_i} \delta(\nu + f_s - f_{osc})] \quad (3)$$

$$I_{s\beta}(\nu) = \frac{I_{\alpha\beta}}{2j} [e^{j\psi_i} \delta(\nu - f_s) - e^{-j\psi_i} \delta(\nu + f_s)] + \frac{1}{2j} [I^+ e^{j\psi_i} \delta(\nu - f_s - f_{osc}) - \bar{I}^+ e^{-j\psi_i} \delta(\nu + f_s + f_{osc})] + \frac{1}{2j} [I^- e^{j\psi_i} \delta(\nu - f_s + f_{osc}) - \bar{I}^- e^{-j\psi_i} \delta(\nu + f_s - f_{osc})] \quad (4)$$

Les composantes I^+ et I^- sont alors déterminées à partir de la résolution des équations d'état pour les fréquences $f_s \pm f_{osc}$ et s'expriment en fonction des paramètres caractéristiques de l'entraînement, du point de fonctionnement et des caractéristiques des oscillations du couple de charge.

4 Diagnostic des modulations en présence d'oscillations du couple de charge

4.1 Indicateur vectoriel en cas d'oscillations du couple de charge

En utilisant l'expression des courants statoriques dans le domaine fréquentiel, on obtient directement l'expression de $z_{TC}(\nu)$, puis par inversion de la transformée de Fourier, son expression temporelle. L'amplitude et la fréquence instantanées sont alors extraites de l'expression de $z_{TC}(t)$ pour construire l'indicateur vectoriel \tilde{G} (5).

$$\tilde{G} = \sqrt{\frac{2}{3}} |I^+ + \bar{I}^-| + j \frac{f_{osc}}{I_{\alpha\beta}} |I^+ - \bar{I}^-| \quad (5)$$

4.2 Résultats expérimentaux

Sur le banc expérimental la fréquence et l'amplitude des oscillations du couple de charge sont imposées et contrôlées. La fréquence d'alimentation de la machine asynchrone est fixée à 50Hz. Le vecteur complexe \tilde{G} est extrait à partir des mesures de courants et est représenté pour une fréquence d'oscillation de 5Hz et une fréquence d'oscillations de 120Hz en figure 1.

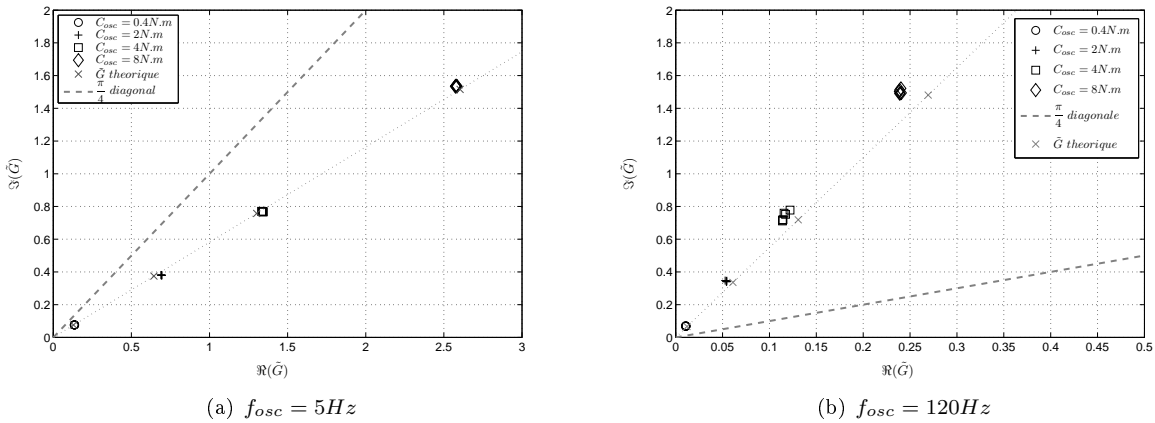


FIGURE 1 – Vecteur complexe \tilde{G} en cas d'oscillations du couple de charge - Résultats théoriques et résultats expérimentaux

Les résultats théoriques et expérimentaux sont concordants. On note en figure 1(a) que les modulations d'amplitude sont prédominantes pour une fréquence d'oscillation du couple de charge de 5Hz. A contrario, pour une fréquence d'oscillation de 120Hz (voir figure 1(b)), les modulations de phase sont prédominantes. De plus,

il apparaît clairement que pour une fréquence d'oscillation fixe, le module du vecteur \tilde{G} est proportionnel à l'amplitude des oscillations du couple de charge.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle approche analytique pour prédire les modulations des courants statoriques d'une machine asynchrone soumise à des oscillations du couple de charge. Pour cela, le modèle d'état de la machine asynchrone dans le repère de Concordia a été exprimé dans le référentiel fréquentiel permettant alors de déterminer l'expression analytique des composantes latérales au fondamental. Cette approche conduit à la caractérisation des composantes de modulation afin de construire des indicateurs de diagnostic des oscillations de couple de charge.

Le modèle proposé a été validé par des mesures expérimentales sur un entraînement asynchrone et a montré que les oscillations du couple de charge entraînaient des modulations d'amplitude et de phase dont les puissances dépendent du point de fonctionnement, de la fréquence et de l'amplitude des oscillations de couple.

Références

- [1] S. Nandi et H. A. Toliyat, *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines - a review*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 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] R. R. Obaid et T. G. Habetler, *Current-based algorithm for mechanical fault detection in induction motors with arbitrary load conditions*, Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1347-1351, Oct. 2003.
- [4] B. Akin, U. Orguner, H. A. Toliyat et M. Rayner, *Phase-Sensitive Detection of Motor Fault Signatures in the Presence of Noise*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 6, pp. 2539-2550, Juin 2006.
- [5] S. H. Kia, H. Henao et G. A. Capolino, *A Modeling Approach for Gearbox Monitoring Using Stator Current Signature in Induction Machines*, Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-6, Oct. 2008.
- [6] B. Trajin, J. Regnier, J. Faucher, *Comparison between stator current and estimated mechanical speed for the detection of bearing wear in asynchronous drives*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4700-4709, Nov. 2009.
- [7] B. Trajin, M. Chabert, J. Regnier et J. Faucher, *Hilbert versus Concordia transform for three-phase machine stator current time-frequency monitoring*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 23, no. 8, pp. 2648-2657, Nov. 2009.
- [8] B. Trajin, M. Chabert, J. Regnier, J. Faucher, *Space vector analysis for the diagnosis of high frequency amplitude and phase modulations in induction motor stator current*, 5th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, pp. 1423-1431, Juil. 2008.
- [9] M. Blodt, M. Chabert, J. Faucher et B. Dagues, *Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp. 1881-1888, Mai 2005.
- [10] B. Picinbono, *On instantaneous amplitude and phase signal*, IEEE Transactions on signal processing, vol. 45, no. 3, pp. 552-560, Mars 1997.
- [11] P. Vas, *Electrical Machines and Drives - A space-vector theory approach*, Oxford Science Publications, Oxford, 1992.
- [12] A. Bellini, F. Immovilli, R. Rubini et C. Tassoni, *Diagnosis of Bearing Faults of Induction Machines by Vibration or Current Signals : A Critical Comparison*, IEEE 2008 Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-8, Oct. 2008.