

Diagnostic des défauts d'engrenages à base des indicateurs géométriques des signaux électriques dans les machines à induction triphasées

Marouane FRINI, Abdenour SOUALHI, Mohamed EL BADAOUI

Univ Lyon, UJM-Saint Etienne, LASPI, EA 3059, F-42334, SAINT-ETIENNE, France
{marouane.frini, abdenour.soualhi, mohamed.elbadaoui}@univ-st-etienne.fr

Résumé – Bien que ce soit largement utilisé, les mesures vibratoires classiques présentent plusieurs inconvénients : coût important, difficultés techniques d'accéder au système ainsi que des problèmes de sensibilité liés à la position du capteur. Par conséquent, l'analyse des signatures du courant électrique des moteurs pour la détection des défauts connaît récemment un intérêt grandissant. Cependant, seuls quelques travaux se sont orientés vers la diagnostic des défauts d'engrenages en utilisant les grandeurs électriques du moteur. Ainsi, on met en avant une nouvelle approche pour la détection des défauts d'engrenages basée sur un ensemble d'indicateurs (Park, Concordia, Frenet-Serret,...) qui exploitent les représentations géométriques des trajectoires suivies par les trois phases du courant électrique au sein du moteur asynchrone. Ce travail montre de bons résultats expérimentaux permettant la classification des fonctionnements sain et défaillant.

Abstract – Despite being widely used, classical vibration measurements present some drawbacks : important costs, practical difficulties of access to the system as well as sensitivity problems related to the sensor's position. Consequently, there is recently a growing interest for fault detection using motor current signal analysis (MCSA). Nevertheless, only few works have been centered around gear fault detection using the motor's electrical signals. Thus, we put forward a novel approach for gear fault detection based on a set of indicators (Park, Concordia, Frenet-Serret,...) that use the geometric representations of the trajectories pursued by the asynchronous motor's three-phase electrical signals. This work shows good experimental results enabling the clustering of the healthy and faulty conditions.

1 Introduction

En raison du besoin constant de couple important et de réduction de vitesse élevée, les systèmes de transmission à base de train d'engrenages ont été largement adoptés dans les applications industrielles. Étant donné les implications économiques qui interviennent dans ce secteur, le diagnostic précoce des éventuels dysfonctionnements d'engrenages prend une importance particulière afin de mettre en œuvre les processus nécessaires en temps opportun. Dans ce sens, les recherches s'intéressent à développer des techniques de détection des défauts d'engrenages de plus en plus fiables.

Le processus communément utilisé pour la détection des défaillances d'engrenages est la surveillance vibratoire en plaçant des accéléromètres le plus près possible des éléments tournants. Plusieurs recherches ont proposé des techniques développées pour le domaine vibratoire telles que l'analyse cepsatrale [1] et l'étude de la cyclostationnarité [2]. Cependant, les principales limites de l'analyse vibratoire sont l'accès difficile au système de transmission afin d'y placer le capteur ainsi que le coût conséquent de la mise en œuvre. Ceci résulte en des problèmes de sensibilité relatifs à la position de l'installation et de difficulté à distinguer la source de la vibration à cause de la diversité des excitations mécaniques qui existent dans l'environnement industriel [3].

L'analyse des signatures du courant électrique des moteurs a donc fait l'objet d'une attention grandissante au cours des dernières années en tant que méthode accessible et non-intrusive. Ce processus a été principalement utilisé pour la détection de défauts de moteurs tels que la rupture de barres du rotor [4] et les défauts d'excentricité [5] ainsi que les défauts de roulements [6]. Très peu de recherches concernent la détection des défauts d'engrenages en utilisant l'analyse du courant [7].

Ainsi, dans cet article, on propose une nouvelle approche pour le diagnostic des défauts d'engrenages par l'analyse des courants électriques basée sur un ensemble d'indicateurs de différentes natures. Ces indicateurs, tel que les propriétés géométriques de Frenet-Serret représentant la trajectoire des signaux dans un espace euclidien tridimensionnel et les transformées de Park et de Concordia qui modélisent les courants dans un repère bidimensionnel, sont d'abord présentés. Cette section est suivie par la présentation de l'algorithme qui assure le tri des indicateurs les plus pertinents selon un certain critère de performance et cette sélection est ensuite utilisée pour la classification non-supervisée selon l'état du système. Puis, les résultats expérimentaux pour la détection des défauts d'engrenages via les courants électriques sont montrés et discutés. Enfin, l'article se termine par une conclusion incluant la synthèse et les perspectives possibles des futurs travaux.

2 Présentation des indicateurs de défaut

Ce travail regroupe un total de 56 indicateurs tel que les signatures fréquentielles connues, le facteur de puissance et l'impédance directe [8]. Cependant, par soucis de concision, il s'agit de détailler dans cette section uniquement les indicateurs les plus pertinents.

2.1 Transformations de Park et de Concordia

La transformation de Park est une représentation bidimensionnelle qui permet de projeter les équations électriques du repère triphasé 'abc' dans un repère orthonormé 'dq0' lié au stator. Les variables projetées sur l'axe homopolaire 0 étant nulles (car le système triphasé est équilibré), le système équivalent qui en résulte est diphasé 'd-q'. La transformation de Park est décrite par la formule 1.

$$\begin{aligned} [I_{s_{d,q}}] &= [T] \cdot [I_{s_{abc}}] \\ [V_{s_{d,q}}] &= [T] \cdot [V_{s_{abc}}] \end{aligned} \quad (1)$$

Tel que $[T]$ est représentée par la formule 2.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Avec θ_s l'angle électrique entre le stator et l'axe d.

Ces composantes sont stationnaires par rapport au rotor. Étant donné que le vecteur de courant statorique tourne à la fréquence angulaire ω_s , θ_s peut être remplacée par la vitesse angulaire du rotor ω_r [9].

Si θ_s est nul alors la matrice de transformation devient la matrice $[C]$, appelée matrice de Concordia et exprimée par la formule 3. Dans ce cas, les axes d et q sont appelés α et β .

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{2}{3}} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Les modules $|I_{s\alpha,\beta}|$ et $|V_{s\alpha,\beta}|$ des composantes de Concordia sont exprimés par la formule 4.

$$\begin{aligned} |I_{s\alpha,\beta}| &= \sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2} \\ |V_{s\alpha,\beta}| &= \sqrt{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

La puissance active P et réactive Q sont directement calculées à partir de ces grandeurs comme le montre la formule 5.

$$\begin{aligned} P &= V_{s\alpha} \cdot I_{s\alpha} + V_{s\beta} \cdot I_{s\beta} \\ Q &= V_{s\beta} \cdot I_{s\alpha} - V_{s\alpha} \cdot I_{s\beta} \end{aligned} \quad (5)$$

Les puissances actives et réactives calculées sont normalisées par la valeur quadratique moyenne de la puissance apparente $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ et sont nommées P' et Q'. Les valeurs moyennes extraites de P' et Q' sont nommées m_p et m_q .

2.2 Propriétés du repère de Frenet-Serret

L'expression du courant électrique en fonction du temps t peut être considérée comme une courbe différentielle régulière paramétrée tel que t son paramètre [10]. Ainsi, il est possible de représenter ce signal dans un espace tridimensionnel euclidien où chaque composant suit un axe de l'espace.

Cette trajectoire est caractérisée par des propriétés géométriques qui sont des indicateurs de l'état du système. Le repère de Frenet-Serret est un système de coordonnées naturelles qui permet de décrire efficacement une courbe au voisinage d'un point p comme montré dans la figure 1.

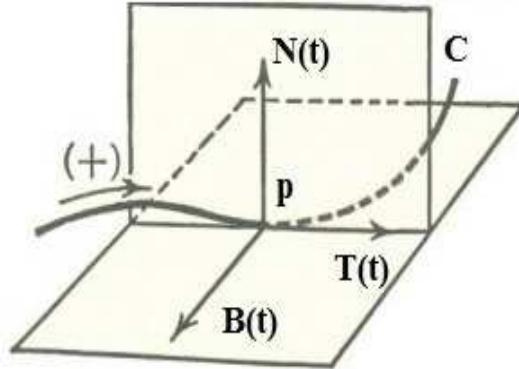


FIGURE 1 – Les vecteurs normal, binormal et tangent de Frenet

Les formules de Frenet-Serret, écrits sous forme matricielle dans la formule 6, proviennent des équations différentielles de Frenet-Serret [11]. Les scalaires $\kappa(t)$ et $\tau(t)$ sont respectivement définis comme étant la courbure et la torsion au point i(t).

$$\begin{bmatrix} T'(t) \\ N'(t) \\ B'(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{||i'(t)||} \begin{bmatrix} 0 & \kappa(t) & 0 \\ -\kappa(t) & 0 & \tau(t) \\ 0 & -\tau(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(t) \\ N(t) \\ B(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Les équations de Frenet-Serret peuvent être explicitement exprimées en fonction de la position de la courbe i, comme montré dans les formules 7, 8, 9 et 10.

$$||i(t)|| = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2} \quad (7)$$

Où i_1 , i_2 et i_3 désignent les trois phases du courant électrique.

$$B(t) = \frac{i'(t) \times i''(t)}{||i'(t) \times i''(t)||} \quad (8)$$

$$\kappa(t) = \frac{||i'(t) \times i''(t)||}{||i'(t)||^3} \quad (9)$$

$$\tau(t) = \frac{(i'(t) \times i''(t)) \cdot i'''(t)}{||i'(t)|| \times ||i''(t)||^2} \quad (10)$$

Où \cdot désigne le produit scalaire et

Ainsi, ces paramètres peuvent servir à détecter les défauts d'engrenages en utilisant le courant électrique. L'algorithme pour implémenter ces équations ainsi que son application sont présentés dans les sections suivantes.

3 Algorithme d'estimation

L'algorithme pour l'estimation des paramètres et leur classification est comme montré dans la figure 2.

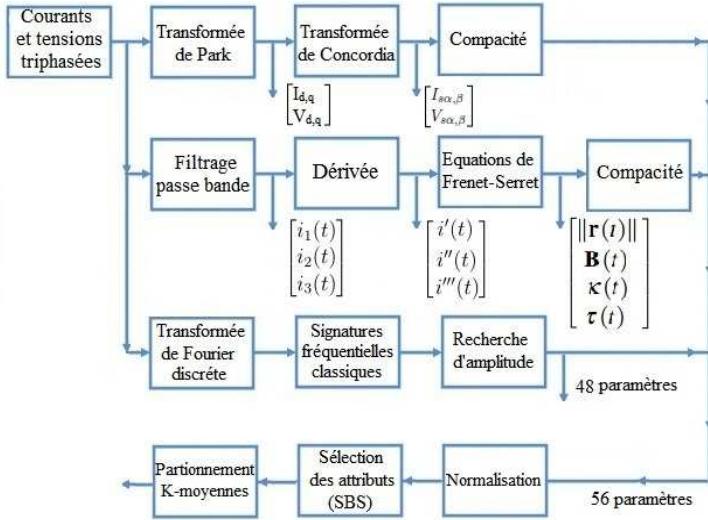


FIGURE 2 – Schéma-bloc de l'algorithme proposé

Les fichiers de données électriques acquis sont subdivisés en segments de durée d'une seconde chacun. Suite à la transformée de Park et de Concordia, les courbes obtenues sont traduites en valeurs numériques via le calcul de la compacité de leur dispersion, comme montré dans la formule 11, et cela pour permettre leur comparaison avec le reste des indicateurs.

$$Compacité = \sum_{j=0}^N (x_j - g) \cdot {}^t(x_j - g) \quad (11)$$

Avec x_j un point de donnée pour chaque itération j, g la moyenne des données appelé centre de gravité et N le nombre de points.

Pour les équations de Frenet-Serret, il est important de filtrer les signaux électriques autour de la fréquence de défaut pour enlever le bruit et avoir des formes d'onde sinusoïdales relativement propres. Un filtre passe-bande à réponse impulsionnelle finie FIR est donc utilisé. Ensuite, pour la dérivée, un filtre dérivateur et lissoir est appliqué pour réduire les hautes fréquences introduites par cette opération. Enfin, les compacités des propriétés géométriques estimées sont calculées.

Après la transformée de Fourier des signaux, les signatures fréquentielles classiques sont implémentées et l'algorithme recherche les amplitudes correspondantes, donnant ainsi 48 paramètres. Tous les indicateurs sont regroupés dans une matrice de taille 80x56 et sont après normalisés par rapport à l'amplitude de la fréquence fondamentale. Ensuite, les cinq indicateurs les plus pertinents sont extraits par l'algorithme de sélection séquentielle rétrograde (SBS) qui, à chaque itération, élimine l'indicateur le moins pertinent selon un critère basé sur la dispersion. Enfin, la méthode de classification non-supervisée K-moyennes basée sur la distance euclidienne des points est utilisée pour distinguer les deux classes de fonctionnement.

4 Résultats expérimentaux

4.1 Installation expérimentale

L'acquisition des signaux électriques utilisés dans cette étude a été réalisée au niveau du banc de test GOTIX¹ comme montré dans la Figure 3. Un moteur asynchrone triphasé de 55 kW, 50 Hz, 380V, 119.5A, 735 tr/min entraîne deux arbres connectés par un train d'engrenages à un étage avec un nombre de dents en entrée Nr1=57 et Nr2=15 en sortie. Le train d'engrenages a un rapport de multiplication de 3.8 avec des dentures droites à axe parallèle en acier cémenté. L'alimentation électrique du moteur est un onduleur Altivar 66 avec une fréquence $f_s = 32$ Hz. Ainsi, la vitesse de rotation est de 470 tr/min avec un couple de 200 Nm et le niveau de charge est donc de 20%.

Les signaux de courants électriques sont mesurés en utilisant une pince ampèremétrique SC 1C 300A/1V avec une largeur de bande de 10 KHz et les tensions sont acquises par des sondes différentielles DP25 avec une largeur de bande de 15 MHz. Une chaîne synchrone OROS 38 est utilisée pour l'acquisition du signal avec une fréquence d'échantillonnage de 25 KHz, une bande passante de 10 KHz pour 25.6 Kéch/s et un temps d'acquisition de 80 secondes.

L'expérimentation d'usure a commencé à l'heure 2795 et vise à produire l'usure sans initialisation artificielle du défaut. Cependant, à partir de l'heure 5131, la configuration de l'alimentation a été modifiée. De ce fait, les données de l'heure 5131 sont considérées comme étant le signal dans les conditions d'engrenage sain et seront comparés avec les dernières données à l'heure 7000 qui représentent la condition d'engrenage défaillant. L'usure est située au niveau de la roue (Nr1=57) dont la fréquence de rotation $f_r = 7.83$ Hz. Ainsi, les fréquences de défauts sont $f_{def+} = 40$ Hz and $f_{def-} = 24$ Hz [10], ce qui a été confirmé par l'analyse spectrale du courant électrique.

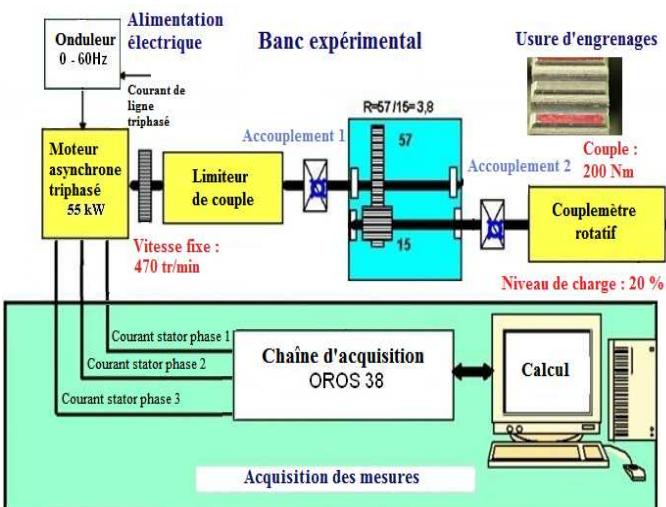


FIGURE 3 – Schéma de l'installation proposée¹

4.2 Résultats expérimentaux

L'application de l'algorithme d'estimation des indicateurs dans le cas des données expérimentales donne la figure 4.

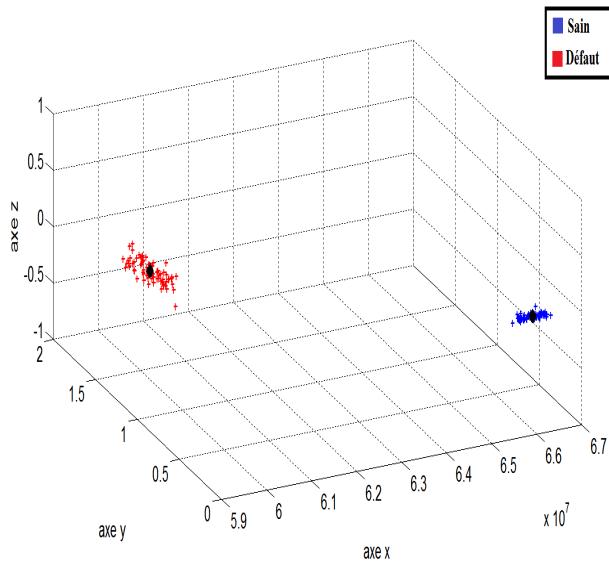


FIGURE 4 – Classification des indicateurs de défauts

Les cinq indicateurs les plus pertinents sélectionnés par l'algorithme sont la compacité de la composante de Concordia $I_{s\alpha,\beta}$ (3), la compacité de la torsion $\tau(t)$ (10), la compacité du vecteur binormal $B(t)$ (8), le module de la composante de Concordia $|I_{s\alpha,\beta}|$ (4) et la moyenne de la puissance réactive normalisée $m_q(5)$.

Le résultat de la classification K-moyennes des indicateurs choisis nous donne, dès la première itération, des classes de fonctionnement sain (couleur bleu) et défaillant (couleur rouge) clairement distinctes. Les deux classes de nuages de points sont nettement éloignées et l'erreur de classification est donc quasiment nulle.

Ainsi, à partir des indicateurs géométriques extraits et en utilisant le courant et la tension électriques du moteur triphasé, on arrive à assurer une détection efficace des défauts mécaniques d'engrenages.

5 Conclusion

Dans cet article, une méthode de détection des défauts d'engrenages à base des indicateurs géométriques des signaux électriques dans les moteurs asynchrones triphasés a été présentée. Les indicateurs issus de la transformation de Park et de Concordia ainsi que des équations de Frenet-Serret sont sélectionnés en raison de leur pertinence et sont combinés avec l'analyse des courants électriques. Les résultats montrent une excellente classification des fonctionnements sain et défaillant. Cette méthode est sujette aux améliorations notamment par rapport à l'intégration des défauts de roulements dans la classification.

Remerciements

1 Le projet GOTIX (<http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/projet/gotix/>) est géré par le GIPSA-lab à Grenoble, France. Toutes les données produites sont gratuitement partagées sur demande. Ce projet est mené par Nadine Martin, Pierre Granjon et Christine Servière du groupe de recherche SAIGA ainsi que Xavier Laval et Denis Faure-vincent de l'équipe technique.

Références

- [1] M. El Morsy et G. Achtenova, "Envelope detection and cepstrum analysis for gear fault diagnosis - A comparative study", 10th International Conference of Measurement, pages 187-190, 2015.
- [2] T. Kidar, M. Thomas, M. Badaoui et R. Guilbault, "Diagnosis of gear faults by cyclostationarity analysis", International Conference Surveillance 7, pages 1-7, 2013.
- [3] S. Villwock et M. Pacas, "Time domain identification method for detecting mechanical backlash in electrical drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pages 568-573, 2009.
- [4] K. M. Siddiqui et V.K. Giri, "Broken rotor bar fault detection in induction motors using wavelet transform", International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies, pages 1-6, 2012.
- [5] K. M. Siddiqui, K. Sahay, V.K. Giri et N. Gothwal, "Diagnosis of airgap eccentricity fault in the inverter driven induction motor drives by transformative techniques", Journal of Electrical Engineering, pages 94-103, 2016.
- [6] S. Singh, A. Kumar et N. Kumar, "Motor current signature analysis for bearing fault detection in mechanical systems", International Conference on Materials Processing and Characterisation, pages 171-177, 2014.
- [7] S. H. Kia, H. Henao et G.A. Capolino, "Trends in gear fault detection using electrical signature analysis in induction machine-based systems", IEEE Workshop on Electrical Machines Diagnosis, pages 297-303, 2015.
- [8] R. Casimir, "Faults diagnosis of induction motors by pattern recognition", Thesis, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [9] I. Onel et M. Benbouzid, "Induction Motor Bearing Failure Detection and Diagnosis : Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study", IEEE Transactions on Mechatronics, pages 257-262, 2008.
- [10] M. Frini, A. Soualhi, M. El Badaoui et G. Marrakchi, "Gear fault detection using the geometric properties of electrical currents in three-phase induction motor-based systems", International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention, pages 1-12, 2016.
- [11] G. Phua and P. Granjon, "Estimation of geometric properties of three component sinusoidal signals for system monitoring", International conference Surveillance 7, pages 1-12, 2013.