

Coefficient de corrélation et champ magnétique pour la détection de court-circuit entre spires dans les machines synchrones

Mouad TALBAOUI^a, Younes AZZOUG^a, Sébastien RAMEL^b, Remus PUSCA^a, Eric LEFEVRE^b, Raphaël ROMARY^a

^a Univ. Artois, UR 4025, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE), Béthune, F-62400, France
mouad.talbaoui@univ-artois.fr ; younes.azzoug@univ-artois.fr ; remus.pusca@univ-artois.fr ; raphael.romary@univ-artois.fr

^b Univ. Artois, UR 3926, Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois (LGI2A), Béthune, F-62400, France
sebastien.ramel@univ-artois.fr ; eric.lefevre@univ-artois.fr

RESUME – Cet article présente une méthode non invasive pour détecter et évaluer la gravité des défauts de court-circuit entre les spires statoriques d'une machine synchrone. Cette méthode repose sur l'utilisation du coefficient de corrélation de Pearson pour l'analyse du champ magnétique externe mesuré par plusieurs capteurs placés autour de la carcasse de la machine. Les résultats montrent une corrélation élevée (de l'ordre de 0.99) en l'absence de défaut, et une diminution significative de celle-ci pour les défauts impliquant 3 ou 5 spires, ce qui permet le diagnostic du défaut. Cette méthode semble intéressante pour la surveillance des machines synchrones, car elle est sensible aux défauts mineurs. De plus, nous observons que la corrélation dépend de l'emplacement des capteurs par rapport à la localisation du défaut.

ABSTRACT – This paper presents a non-invasive method for detecting the presence of an inter-turn short circuit in the stator windings of a synchronous machine. This method relies on the use of the Pearson Correlation Coefficient for analyzing the external magnetic field measured by multiple sensors placed around the machine's frame. The results show a high correlation (around 0.99) in the absence of faults, but a significant decrease for faults involving 3 or 5 windings, enabling fault diagnosis. This method appears promising for synchronous machine monitoring as it is sensitive to minor faults. Additionally, we observe that the correlation depends on the sensors' placement relative to the fault location.

MOTS-CLES – coefficient de corrélation de Pearson, court-circuit entre spires, champ magnétique extérieur, machine synchrone, diagnostic, éléments finis.

1. Introduction

Les machines électriques tournantes jouent un rôle crucial dans de nombreux aspects de notre vie quotidienne. Elles sont notamment utilisées dans beaucoup de domaines nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple avec une efficacité énergétique élevée. Parmi ces applications, on compte la production d'énergie électrique, la propulsion et la traction électrique, ainsi que diverses applications industrielles. Malheureusement, le dysfonctionnement de ces machines constitue une source majeure de pertes de rendement productif et engendre des coûts de réparation parfois très élevés. Les pannes mécaniques (défaut de roulement, barre cassée, excentricité, ...) et électriques (court-circuit entre spires, défaut d'isolation, ...) figurent parmi les défauts les plus fréquemment rencontrés dans les machines tournantes [1]. Selon diverses sources [2,3], les défauts du bobinage statorique représentent entre 25% et 35% des pannes électriques.

Face aux enjeux économiques actuelles et à l'augmentation de la productivité (et donc de la perte en cas de panne), de nombreuses recherches se sont concentrées sur le diagnostic des défauts électriques [1,4], et plus précisément sur la détection des courts-circuits entre les spires du bobinage statorique [1]. Les Courts-Circuits Entre Spires (CCES) sont souvent causés par un ensemble de facteurs incluant le vieillissement et la dégradation de l'isolation de la machine, les températures élevées, ou la présence de fronts de tension dans une alimentation par onduleur [1]. Les méthodes développées pour détecter les CCES peuvent être divisées en deux classes : les méthodes hors ligne et les méthodes en ligne [5]. Les méthodes hors ligne [6], telles que les tests de la résistance du bobinage ou de conductivité CC, de la résistance d'isolation, l'indice de polarisation, l'analyse de signature de la tension terminale après l'arrêt, les décharges partielles etc., sont généralement directes et précises, mais leur principal inconvénient est que la machine électrique doit être déconnectée de son alimentation pour être diagnostiquée. Les méthodes en ligne, comme la surveillance de la température, des courants, de l'impédance à haute fréquence, l'analyse de signature de la vibration etc. [6], sont préférées dans les applications en cours de fonctionnement car elles permettent une maintenance prédictive facilitée par une

surveillance constante de la machine. Cependant, une limitation est que les techniques de surveillance en ligne nécessitent l'installation d'équipements supplémentaires, parfois invasifs.

La méthode proposée, dans cet article, est une méthode applicable en ligne qui repose sur la mesure du champ magnétique de fuite autour d'une machine synchrone (MS), en utilisant des capteurs bobinés de constitution simple. La mesure du champ magnétique présente l'avantage d'être non invasive, économique et facile à mettre en œuvre, suscitant ainsi l'intérêt de nombreuses études. Cependant, la difficulté réside alors dans l'analyse des signaux récupérés par les capteurs pour trouver une signature adéquate. Les méthodes présentées dans [7,8], proposent l'utilisation du domaine fréquentiel pour l'analyse du champ magnétique et la détection du CCES.

Dans ce travail, nous proposons l'application du Coefficient de Corrélation de Pearson (CCP) directement sur les signaux temporels du champ magnétique extérieur pour détecter les défauts. Les signaux utilisés sont issus de la simulation par éléments finis de la MS avec la présence d'un CCES dans le bobinage statorique.

Cet article est organisé comme suit : la section 2 porte sur la description du modèle d'éléments finis de la MS, la section 3 présente les scénarios étudiés, et la section 4 introduit le CCP ainsi que son utilisation dans notre étude. Enfin, une conclusion et nos travaux futurs sont proposés dans la section 5.

2. Description du modèle d'éléments finis du moteur

Les phénomènes électromagnétiques caractérisant le fonctionnement d'une machine synchrone à rotor bobiné, tant en régime permanent que transitoire, sont obtenus en utilisant la modélisation par éléments finis avec le logiciel Flux2D. Ces modèles englobent aussi bien les moteurs sans défaut que ceux avec défaut, tels que les CCES statoriques [8 ,9].

La géométrie et le modèle du circuit développé avec Flux2D sont présentés dans la Figure 1 et 2. Ils correspondent à une machine synchrone à 2 paires de pôles dans les paramètres sont présentés dans le Tableau 1. Une boîte infinie représente le domaine de calcul infiniment étendu, incluant les noyaux du stator et du rotor représenté par des régions magnétiques non conductrices laminées, avec une épaisseur de tôle de 0.27 mm et un facteur d'empilement de 95%.

Tableau 1 : Les paramètres de la MS étudiée

Mesures	Valeurs
Stator	
Tension nominale	230/400 V
Courant nominale In	24,9/14,4 A
Vitesse	1500 tr/min
Fréquence	50 Hz
Facteur de puissance cos ϕ	0,7
Nombre d'encoches du stator	54
Nombre d'encoche par phase du stator	18
Nombre des conducteurs par encoche statorique	14 (2 bobines avec 7 conducteurs)
Entrefer	1,5mm
Rotor	
Tension d'excitation	47 V
Courant d'excitation	11,6 A
Nombre d'encoche du rotor	24 + 8 libres
Nombre des pôles du rotor	4
Nombre de spires par encoche	68

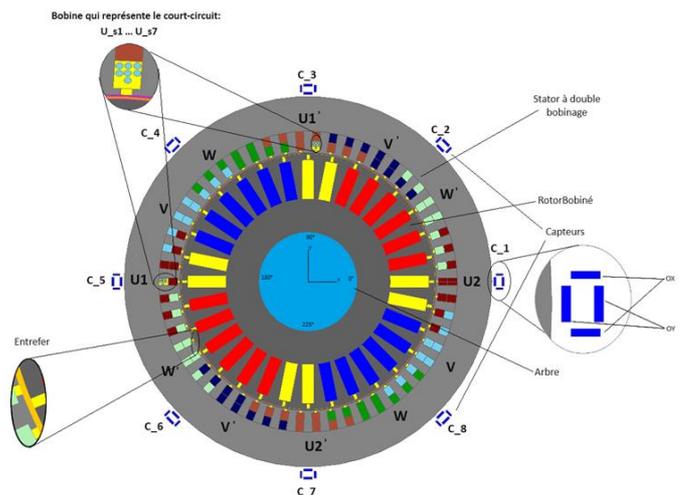


Figure 1 : Géométrie du modèle de la MS sur Flux2D

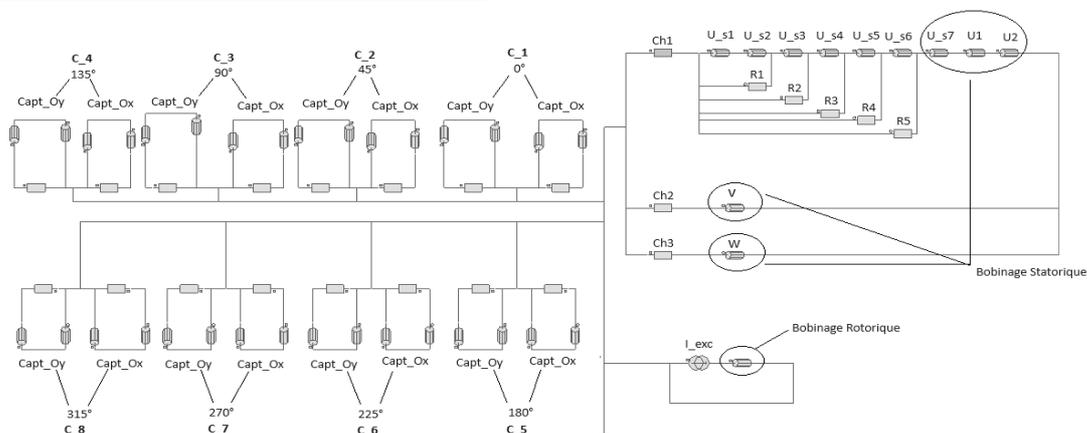


Figure 2 : Circuit électrique du modèle de la MS sur Flux2D

Les encoches statoriques et rotoriques sont des zones de bobinage conducteur, avec respectivement des facteurs de remplissage de 23% et 50% et un entrefer de 1.5 mm d'épaisseur. Les noyaux magnétiques non linéaires sont caractérisés par une saturation à 2.03 T et une perméabilité magnétique relative initiale de 15100 H/m.

Le défaut de court-circuit entre les spires est simulé dans les encoches où les spires sont modélisées (voir Figure 1). La géométrie illustrée dans la Figure 1, comprend également deux zones de bobine extérieure présentant un capteur, à savoir zone Ox et Oy pour l'évaluation des composantes radiale et azimutale du champ magnétique à l'extérieur du moteur [10].

Le modèle de circuit, illustré dans la Figure 2, est composé de 44 éléments de circuit, comprenant 32 conducteurs bobinés représentant les 8 capteurs bobinés externes associés aux zones Ox et Oy dans leur géométrie respective. Des résistances sont intégrées pour évaluer la tension de sortie des capteurs. Ce modèle d'éléments finis vise principalement à réaliser un diagnostic non invasif des défauts en se basant sur le champ magnétique extérieur de la machine.

Un conducteur représente le bobinage rotorique lié à une source de courant continu $I_{exc} = 11.6 A$, tandis que les conducteurs U, V et W représentent respectivement les bobines des trois phases du stator. La bobine U est subdivisée en plusieurs bobines élémentaires U1, U2 plus une autre bobine correspondant aux spires dans une encoche où le court-circuit est réalisé. Cette bobine est divisée en petits groupes de spires (2 à 6 spires par groupe) pour simuler le défaut de CCES. Des résistances en parallèle R1, R2, R3, R4 et R5 ont été ajoutées pour faciliter le passage de l'état sain de la machine à l'état en défaut et vice versa. Les résistances ont des valeurs entre 0.1 Ω et 0.3 Ω pour un fonctionnement avec défaut de CCES et des valeurs de 10 M Ω pour un fonctionnement sans défaut.

Pour recueillir des informations lors du fonctionnement en mode génératrice, des charges Ch1, Ch2 et Ch3 sont ajoutées aux bornes du stator, avec des valeurs élevées pour un fonctionnement à vide. Le maillage du domaine de calcul est d'une précision relative pour la distance entre deux nœuds de 10^{-5} ce qui garantit un maillage suffisamment fin à l'intérieur et à l'extérieur du moteur, ainsi que dans les zones conductrices, pour assurer une bonne précision de la résolution numérique.

3. Détection non invasive du défaut de CCES

Dans cette étude, tous les tests ont été réalisés à vitesse constante (1500 tr/min) sur trois cas de figure, à savoir :

- Machine saine,
- Machine avec court-circuit entre 3 spires,
- Machine avec court-circuit entre 5 spires.

La Figure 3 présente les lignes de champ magnétique à l'extérieur du moteur au même instant ($t=0.0261s$). La Figure 3.a présente la machine à l'état sain, la Figure 3.b avec défaut de court-circuit entre 3 spires et la Figure 3.c avec défaut de court-circuit entre 5 spires.

Dans le cas du moteur sain (Figure 3.a), les lignes de champ magnétique à l'extérieur du moteur sont identiques pour les quatre pôles, en revanche, on observe une contraction d'un pôle et de légères différences pour les autres pôles en cas de court-circuit entre 3 spires (Figure 3.b). Enfin, si le nombre de spires en court-circuit augmente encore, la dissymétrie devient de plus en plus importante (Figure 3.c).

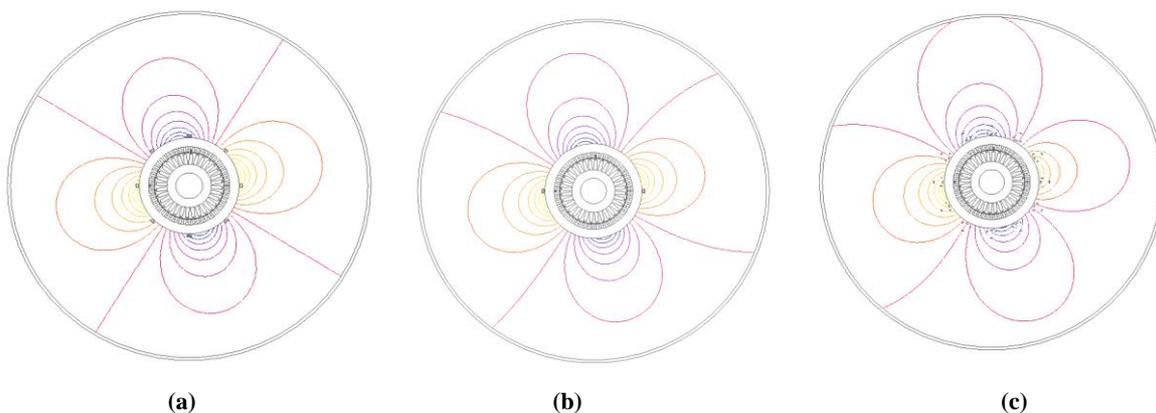


Figure 3 : Champ extérieur à l'extérieur de la machine dans les trois cas : (a) machine sans défaut, (b) avec défaut de 3 spires, (c) avec défaut de 5 spires

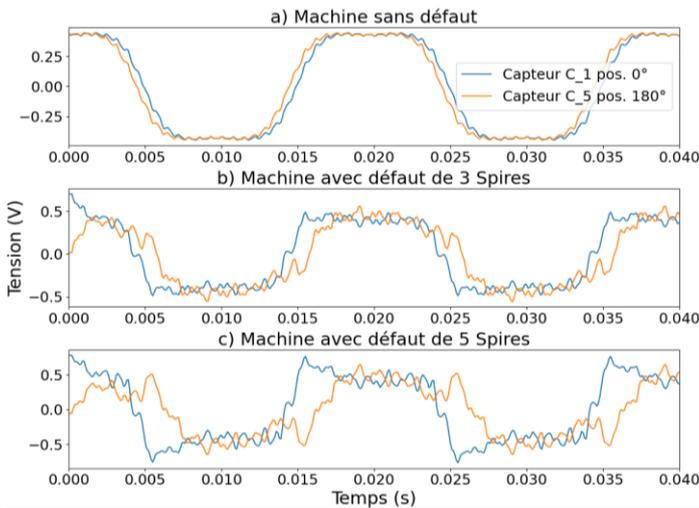


Figure 4 : Signaux des capteurs C_1 et C_5, positionnés à 0° et 180°

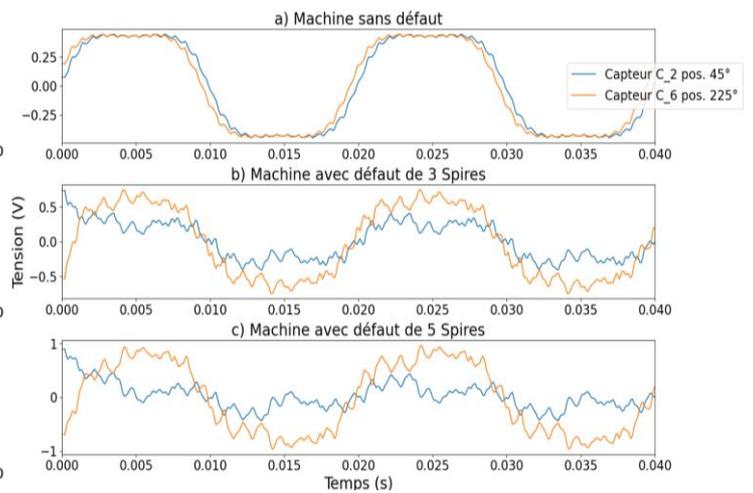


Figure 5 : Signaux des capteurs C_2 et C_6, positionnés à 45° et 225°

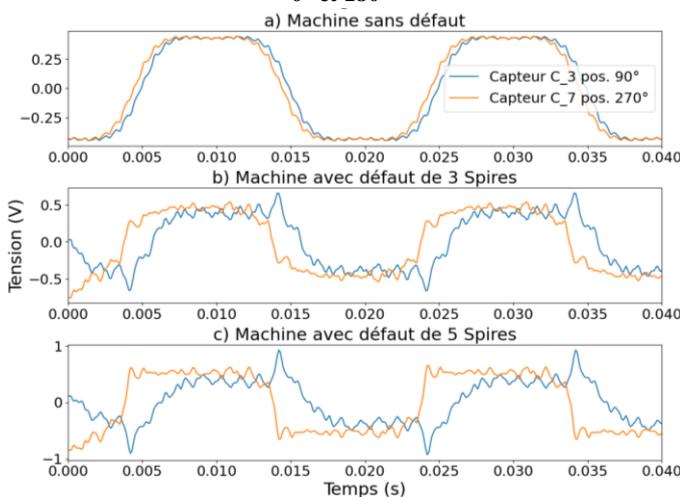


Figure 6 : Signaux des capteurs C_3 et C_7, positionnés à 90° et 270°

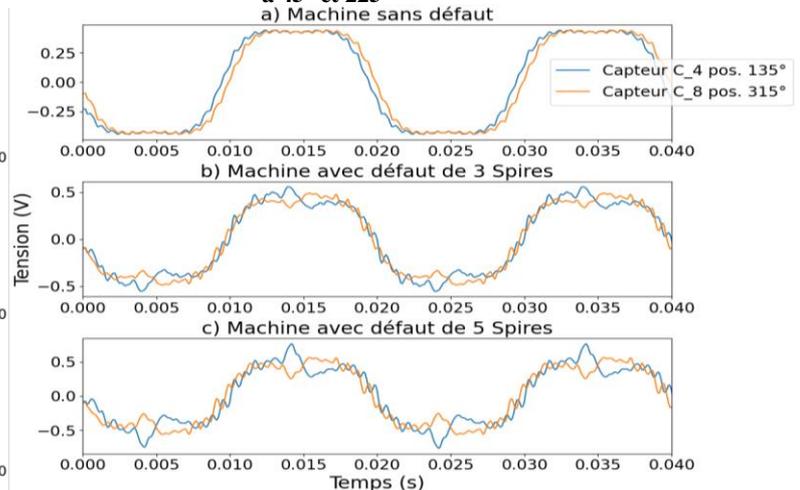


Figure 7 : Signaux des capteurs C_4 et C_8, positionnés à 135° et 315°

Notre étude a pour objectif d'analyser les variations des séries temporelles du champ magnétique externe en utilisant des capteurs bobinés pour mesurer le champ radial. Plusieurs paires de capteurs ont été installées sur la carcasse de la machine pour ce faire. Inspirée de la méthodologie présentée dans [11], cette approche de diagnostic global présente l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance préalable de la signature d'un état sain. Lors de l'application d'une charge, des variations distinctes dans les amplitudes des signaux peuvent indiquer un défaut, tandis que des variations similaires signalent l'absence de défaut. Comme expliqué dans [11], lorsque les capteurs sont éloignés de la bobine endommagée, les résultats peuvent faussement indiquer que la machine est en bon état. Pour éviter cette confusion, il est nécessaire de réaliser plusieurs mesures à différentes positions. Nous avons donc choisi d'utiliser quatre paires de capteurs, placées à des intervalles de 45°, pour analyser les signaux captés à la fois par les capteurs proches et éloignés du défaut. Cette configuration permet une détection plus précise des anomalies et pourrait, dans de futures études, aider à localiser plus précisément les défauts en fonction des positions des capteurs. Les Figures 4, 5, 6 et 7 illustrent les tensions générées à la sortie des capteurs par la rotation du champ magnétique externe de la machine. La Figure 4.a montre les signaux provenant des capteurs placés à 0° et 180° dans des conditions de fonctionnement normal. La Figure 4.b présente les signaux en présence d'un court-circuit entre trois spires, tandis que la Figure 4.c montre les signaux avec un court-circuit entre cinq spires. Les Figures 5, 6 et 7 suivent le même schéma avec des positions de capteurs différentes. On observe que, dans le cas d'une machine sans défaut, les signaux issus de chaque paire de capteurs opposés sont presque superposés. En revanche, pour les machines présentant des défauts, les signaux des capteurs diamétralement opposés diffèrent les uns des autres et par rapport à l'état sain. Ces différences peuvent se manifester par un déphasage, l'apparition d'ondulations, la déformation des signaux et des variations d'amplitude.

4. Coefficient de corrélation de Pearson

Cette section se focalise sur l'emploi du CCP afin de conduire une analyse des signaux collectés, en exposant sa mise en œuvre pour chaque ensemble de capteurs.

4.1 Principe du Coefficient de Corrélation de Pearson

Le CCP, désigné par r , est un coefficient permettant d'évaluer la corrélation existante entre deux variables, x et y , avec r prenant des valeurs comprises entre -1 et $+1$ [12]. La corrélation mesure la manière dont deux variables évoluent ensemble. Une corrélation positive forte indique que les deux variables varient ensemble dans le même sens, tandis qu'une corrélation négative forte indique qu'elles se déplacent dans des directions opposées. Le coefficient de Pearson peut être interprété de la manière suivante :

- $r = 0$: Aucune corrélation entre les deux variables
- $0 < r \leq 0.35$: Corrélation faible
- $0.35 < r \leq 0.8$: Corrélation moyenne
- $0.8 < r < 1$: Corrélation forte
- $r = 1$: Corrélation parfaite

Ces interprétations peuvent varier en fonction du type de données analysées. La formule mathématique du CCP pour deux variables x et y , est donnée comme suit :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

où : x représente la première variable, y la seconde, \bar{x} et \bar{y} sont les moyennes des échantillons de x et y , et n est le nombre d'échantillons.

4.2 Application du Coefficient de Corrélation de Pearson dans l'étude

L'analyse du CCP appliquée à deux signaux suppose que la variable x représente le vecteur des valeurs du premier signal et y le vecteur des valeurs du second signal. Les valeurs de ce coefficient pour chaque paire de capteurs sont présentées dans la Figure 8, ce qui permet d'évaluer la différence entre les signaux issus des capteurs du champ extérieur.

Dans le cas de la machine sans défaut, une corrélation presque parfaite est observée avec un CCP égale à 0.99 pour tous les capteurs. En revanche, pour les défauts impliquant 3 spires, les couples de capteurs (C_1, C_5 - 0°, 180°) et (C_2, C_6 - 45°, 225°) présentent une forte corrélation, au contraire, du couple (C_3, C_7 - 90°, 270°) où le CCP est de 0.68. Pour un défaut impliquant 5 spires, les valeurs du CCP pour les couples (C_1, C_5), (C_2, C_6) et (C_3, C_7) diminuent. Pour les (C_1, C_5) et (C_2, C_6) la corrélation est qualifiée de moyenne alors que pour le couple (C_3, C_7) elle est faible. Il est à noter que quelque soit l'importance du défaut, les valeurs du CCP pour le couple (C_4, C_8 - 135°, 315°) sont relativement élevées ne connaissant qu'une légère baisse lorsque 5 spires sont en court-circuit.

En examinant de plus près les variations des coefficients de corrélation, nous constatons que celles-ci dépendent principalement de l'emplacement des capteurs par rapport aux défauts. Plus précisément, les capteurs C_3 et C_5 sont positionnés en face du défaut, ce qui explique les variations importantes du coefficient de corrélation entre les signaux générés par les couples de capteurs (C_3, C_7) et (C_1, C_5). Cette observation souligne l'importance de prendre en compte la localisation des capteurs par rapport aux défauts dans l'analyse des corrélations pour une meilleure interprétation des données.

Ces résultats montrent l'intérêt de l'analyse du CCP pour la détection et la compréhension des défauts potentiels dans les systèmes étudiés.

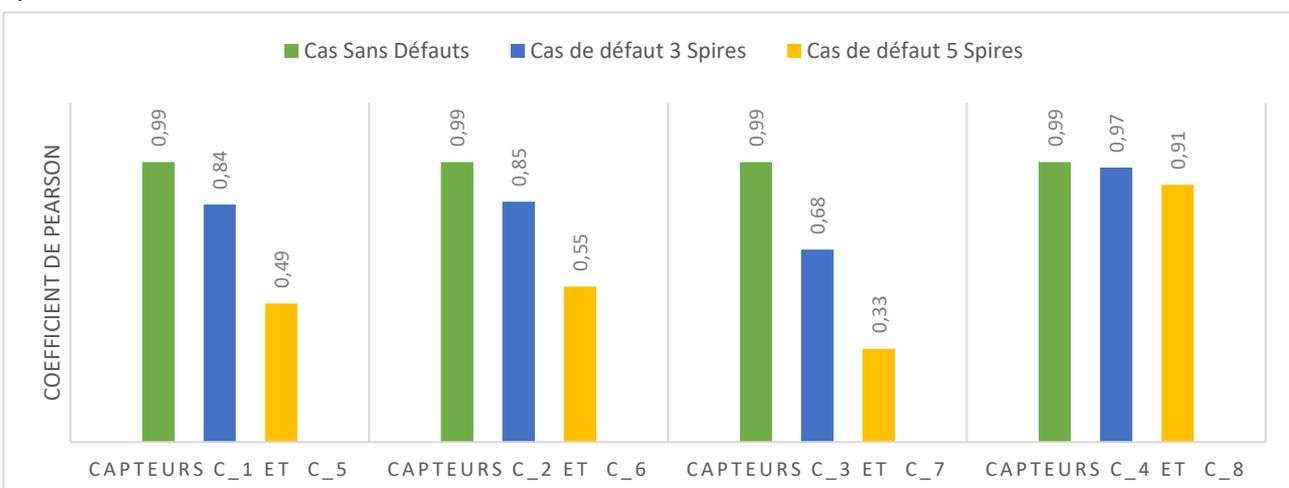


Figure 8 : Comparaison entre les valeurs du CCP sur les différents scénarios de simulation

5. Conclusion et perspectives

Cette étude met en lumière l'importance de l'analyse des signaux de capteurs de champs magnétiques externes positionnés à 180° l'un de l'autre dans le domaine temporel. Nous avons constaté une variation significative de la corrélation entre ces signaux en fonction de l'état de la machine. Ces résultats montrent l'importance de la prise en compte des signaux, dans le domaine temporel, d'un couple de capteurs de champs magnétique extérieur. Toutefois, l'utilisation du coefficient de corrélation de Pearson nécessite de fixer des seuils afin de définir la présence ou non d'un défaut ce qui rend difficile son utilisation. C'est pourquoi pour la suite de nos travaux nous envisageons d'utiliser des outils de l'apprentissage automatique afin d'exploiter les signaux temporels d'un coupleur de capteurs.

Remerciement

Ce travail de recherche, soutenu et financé par l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche), entre dans le cadre du Labcom (Laboratoire Commun) MYEL (MobilitY and Reliability of Electrical chain Lab) associant le LSEE, le LGI2A et la société CRITTM2A.



Références

- [1] H. Henao, G.A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pusca, J. Estima, M. Riera-Guasp and S. Hedayati-Kia, "Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 31–42, Jun. 2014.
- [2] R. N. Bell, D. W. McWilliams, P. O'Donnell, C. Singh, and S. J. Wells, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 853–864, 1985.
- [3] R. N. Bell, C. R. Heising, P. O'Donnell, S. J. Wells, and C. Singh, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 865–872, 1985.
- [4] T. Orłowska-Kowalska, M. Wolkiewicz, P. Pietrzak, M. Skowron, P. Ewert, G. Tarchala, M. Krzysztofiak, and C.T. Kowalski, "Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of PMSM Drives—State of the Art and Future Challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 59979–60024, 2022.
- [5] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, "A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136, Dec. 2008.
- [6] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, "Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair: Second Edition," *Electr. Insul. Rotating Mach. Des. Eval. Aging, Testing, Repair Second Ed.*, vol. 9781118057, pp. 1–643, 2014.
- [7] M. Irhoumah, R. Pusca, E. Lefèvre, D. Mercier, and R. Romary, "Utilisation de deux capteurs de champ extérieur pour la détection des défauts de type court-circuit entre spires dans les machines synchrones," *Symp. Génie Électrique EF-EPF-MGE*, pp. 3–5, 2018.
- [8] A. Ceban, R. Pusca, R. Romary, and J. Lecointe, "Diagnosis of Inter-Turn Short Circuit Fault in Induction Machine," *Ann. Univ. Craiova, Electr. Eng. Ser.*, no. 35, pp. 103–110, 2011.
- [9] M. Irhoumah, R. Pusca, E. Lefevre, D. Mercier, and R. Romary, "Diagnosis of induction machines using external magnetic field and correlation coefficient," in *Proceedings of the 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2017*, pp. 531–536, Aug. 2017,.
- [10] V. Fireteanu, P. Taras, R. Romary, R. Pusca, and A. Ceban, "Effects of Rotor Faults on Operation Parameters and the Low Frequency Harmonics of the Magnetic Field Outside Induction Motors," no. July 2015, 2011.
- [11] A. Ceban, "Méthode globale de diagnostic des machines électriques," *Thèse de doctorat, Univeristé d'Artois*, p. 121, 2012.
- [12] R. Bonnardel, "Fiche pour le calcul du coefficient de corrélation de pearson," vol. 2, pp. 109–115, 1948.