



**HAL**  
open science

# Utilisation de deux capteurs de champ extérieur pour la détection des défauts de type court-circuit entre spires dans les machines synchrones

Miftah Irhoumah, Remus Pusca, Eric Lefevre, David Mercier, Raphaël Romary

## ► To cite this version:

Miftah Irhoumah, Remus Pusca, Eric Lefevre, David Mercier, Raphaël Romary. Utilisation de deux capteurs de champ extérieur pour la détection des défauts de type court-circuit entre spires dans les machines synchrones. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981920

**HAL Id: hal-02981920**

**<https://hal.science/hal-02981920v1>**

Submitted on 28 Oct 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Utilisation de deux capteurs de champ extérieur pour la détection des défauts de type court-circuit entre spires dans les machines synchrones

Miftah Irhoumah <sup>(1)(2)</sup>, Remus Pusca <sup>(1)</sup>, Eric Lefèvre <sup>(2)</sup>, David Mercier <sup>(2)</sup>, Raphael Romary <sup>(1)</sup>

(1)Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE)

(2)Univ. Artois, EA 3926, Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois (LGI2A)  
F-62400, Béthune, France

**RESUME** -Cet article présente une méthode de détection des défauts de court-circuit entre spires dans les machines synchrones. L'approche proposée est non invasive et repose sur le calcul d'un coefficient de corrélation issu de mesures du champ magnétique externe autour de la machine. Les mesures du champ extérieur sont obtenues en utilisant deux capteurs bobinés qui fournissent des informations sur la modification du champ magnétique au voisinage de la machine. Ainsi il est montré que l'analyse du coefficient de corrélation de Pearson entre deux signaux de champ délivrés par deux capteurs C1 et C2 lorsque la machine se trouve dans des conditions de charge différentes permet de diagnostiquer l'état de la machine. Des essais expérimentaux sont présentés dans l'article, ils ont été obtenus avec deux machines synchrones rebobinées pour permettre de créer des défauts de court-circuit entre spires avec différents niveaux de sévérité et deux machines sans défaut. La méthode proposée permet d'identifier les bobines défectueuses même pour des petites défaillances (une spire, deux spires) de court-circuit.

*Mots-clés*—Machines synchrones, coefficient de corrélation, capteur bobiné, court-circuit entre spires, champ magnétique extérieur, diagnostique.

## 1. INTRODUCTION

Les machines synchrones (MS) fournissent un service essentiel pour la production et l'utilisation de l'énergie électrique, avec un rendement assez élevé [1]. Les dommages causés à la machine entraînent des interruptions de service et des réparations coûteuses, ainsi les MS sont surveillées attentivement dans l'industrie et dans les centrales électriques. Il est très important de détecter le défaut rapidement avant le déclenchement des protections électriques, synonyme de perte de production. D'autre part, d'un point de vue énergétique, les petits défauts provoquent une perte d'environ 2% de l'énergie produite par la machine. Il est montré, dans de nombreux travaux, que les machines électriques sont soumises à un éventail de problèmes mécaniques communs à la plupart des machines tournantes [2][3], tel que le déséquilibre mécanique [4], les défauts de palier [5], ou la résonance [6]. Mais les machines électriques connaissent aussi leurs problèmes spécifiques comme le défaut du bobinage statorique, ou les barres de rotor cassées, qui vont produire des déséquilibres magnétiques. Pour cette raison, des dispositifs de surveillance s'appuyant sur les informations fournies par des capteurs de

flux magnétiques peuvent être efficacement utilisés pour détecter des petits déséquilibres internes.

Les méthodes classiques utilisées actuellement pour le diagnostic des machines électriques sont basées sur la mesure des bruits [7], courants [8], vibrations [9], couple et température [10]. Ces méthodes donnent actuellement de nombreux résultats significatifs mais se heurtent encore à quelques points problématiques. Il est par exemple nécessaire de détecter ces défauts en utilisant les mêmes capteurs standards que ceux utilisés à d'autres fins, tels que les capteurs de courant et de tension. Ces méthodes, appelées méthodes invasives, ont déjà fait leurs preuves dans l'industrie, cependant leur utilisation est généralement réservée à des applications spécifiques (centrales électriques, installations de sécurité, systèmes avec intérêt économique important) car elles fonctionnent souvent en association avec des systèmes de surveillance. Ainsi, leurs coûts, ou la nécessité d'utiliser du personnel spécialisé limitent leur généralisation. Récemment, des méthodes basées sur la mesure et l'analyse du flux magnétique à l'extérieur des machines électriques ont été développées pour le diagnostic de ces machines [11]. Sur la base d'une évaluation issue de nombreux essais, le flux de fuite externe peut être considéré comme étant un des signaux le plus pratique contenant des informations nécessaires à la détection des défauts, comme les barres cassées au rotor [12], les courts-circuits entre spires au stator [13][14], les excentricités [15]. Ces méthodes utilisent des techniques d'analyse variées et se sont révélées être des approches prometteuses pour le diagnostic industriel [16]. Citons par exemple, la fusion de l'information avec les fonctions de croyance[17], ou les méthodes basées sur coefficient de corrélation [14][18] pour détecter des défauts statoriques.

Dans la méthode proposée, la connaissance des propriétés des ondes d'induction du champ magnétique extérieur permettra une exploitation de celles-ci en vue d'aboutir à une méthode de diagnostic basée sur les variations des amplitudes des raies sensibles lors d'une modification du régime de charge de la machine [19]. Cette information peut être analysée statistiquement en comparant l'évolution de l'amplitude des harmoniques sensibles pour deux capteurs diamétralement opposés avec un indicateur nommé «Coefficient de Corrélation  $r$ ». Grace à cet indicateur, il est mis en évidence la possibilité

de détecter des défauts de court-circuit entre spires dans les machines synchrones avec en outre la possibilité de classifier les défauts selon leur sévérité.

La première partie de cet article est consacrée à la présentation de la méthode de diagnostic. La deuxième partie introduit les caractéristiques du capteur de champ utilisé. La troisième partie présente la méthode de calcul du coefficient de corrélation. La dernière partie, des résultats expérimentaux obtenus sur les quatre machines sont étudiés.

## 2. METHODE DE DIAGNOSTIC

La méthodologie utilisée permet de détecter des défauts de court-circuit entre spires à partir de plusieurs mesures comparatives, à vide et en charge du champ magnétique de dispersion. La mesure de ce champ est réalisée avec deux capteurs de type bobiné, décalés de 180° [19] comme le montre la Fig.1.

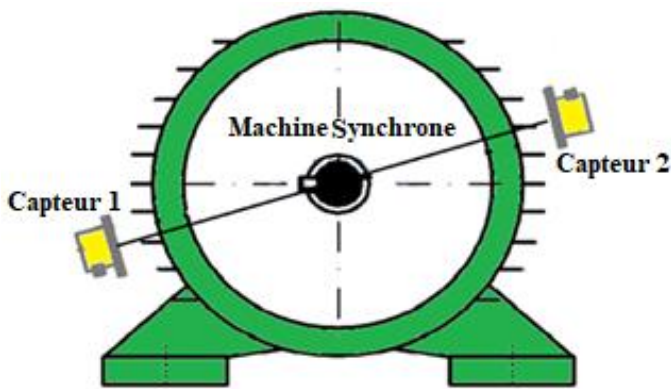


Fig. 1. Positionnement de capteurs autour de la machine.

Le comportement de l'amplitude des harmoniques sensibles  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  mesurés par chaque capteur C1 et C2 est ensuite exploité. La procédure utilisée consiste à analyser les variations de  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  par calcul du coefficient de corrélation de Pearson  $r$  entre ces deux quantités obtenues à partir des signaux délivrés par les capteurs lors de variations de charge. Cette caractéristique peut être extraite de ces variations et une procédure de diagnostic peut donc être définie. Ce processus comprend une série d'étapes illustrées à la Fig. 2.

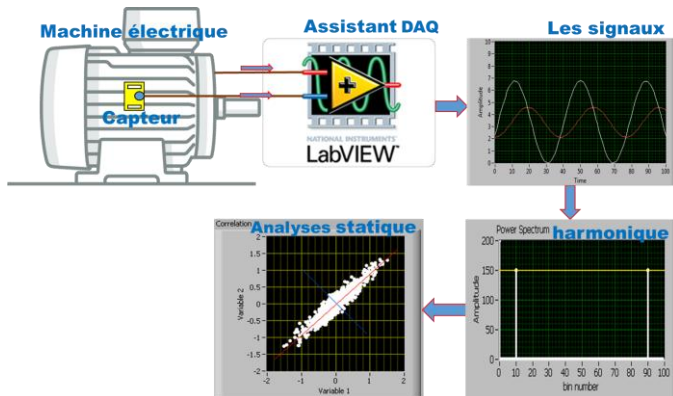


Fig. 2. Etapes de la technique de diagnostic basée sur l'analyse du champ magnetic extern.

Le principe consiste à relever les amplitudes d'un harmonique spécifique pour un fonctionnement à vide et en charge puis de comparer leur évolution pour les deux capteurs. Ces fréquences sensibles au défaut sont :

- 150 Hz pour les machines synchrones MS2, MS3 et MS4 alimentées sur le réseau 50Hz. Les caractéristiques des machines (MS1- MS4) sont présentes dans le tableau 1.
- $50 \pm N_t^r f_r$  pour la machine MS1 à rotor bobiné, ayant  $N_t^r$  encoches au rotor, tournant à une fréquence de rotation  $f_r$ , et alimentée sur réseau 50Hz. Pour la machine MS1 la fréquence sensible considérée est 750Hz.

## 3. CAPTEUR DE CHAMP

Le principe des capteurs de type bobiné est de mesurer le flux embrassé par une bobine localisée dans l'espace. Ce capteur qui a une surface  $S= 0,031416m^2$  et 360 spires présente de nombreux avantages : il est facile à installer, la mesure est simple et directe, et elle ne nécessite pas d'électronique associée, si ce n'est pour amplifier, éventuellement, le signal de force électromotrice induite (Fig. 3).

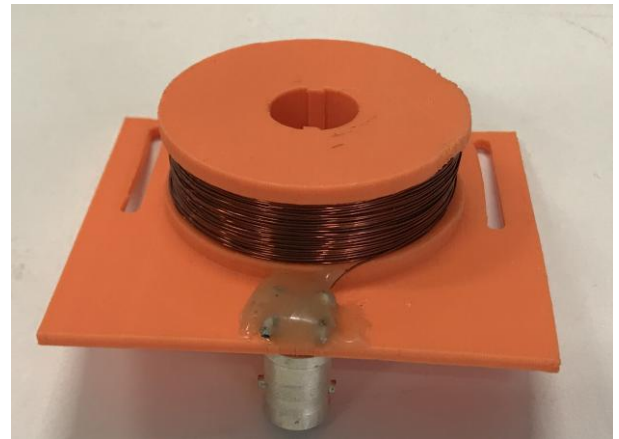


Fig. 3. Capteur de champ.

La bande passante du capteur est principalement déterminée par la première fréquence de résonance. Dans le cas d'une bobine sans circuit supplémentaire, la résonance peut se produire à certaines conditions dans une série de circuits R-L-C. La formule de la fréquence de résonance  $F$  est :

$$F = 1 / (2 \pi \sqrt{LC}) \quad (1)$$

Où  $L$  est l'inductance de la bobine et  $C$  la capacité parasite.

La Fig. 4. présente la réponse fréquentielle obtenue avec un analyseur d'impédances. On remarque que ce capteur présente une résonance à 660 kHz, ce qui signifie que la plage d'utilisation du capteur doit être éloignée de cette fréquence.

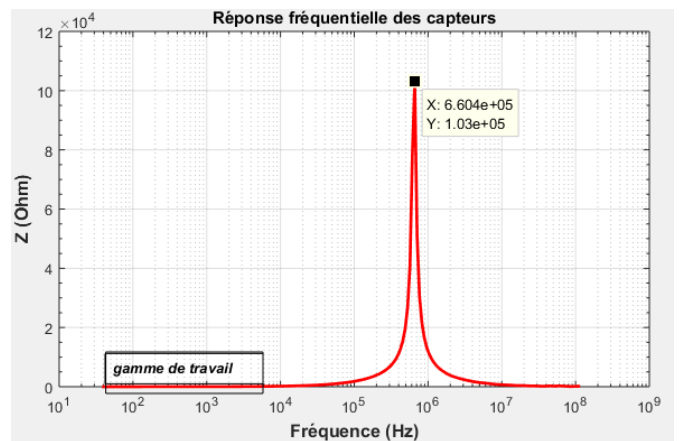


Fig. 4. Fréquence de résonance du capteur.

Ainsi, nous concluons que ces capteurs sont appropriés à la mesure de champ dans la gamme de fréquence que nous exploitons qui va de 50Hz à 1000Hz.

#### 4. TECHNIQUES DE DETERMINATION DE LA CORRELATION

Utiliser le coefficient de corrélation de Pearson est une technique pour examiner la puissance et la direction de la relation linéaire qui existe entre deux variables (X, Y) continues.

L'expression mathématique pour calculer le coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) pour deux ensembles de valeurs  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  et  $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$  est :

$$r = \frac{\sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k - \frac{\sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k}{n}}{\sqrt{\left( \sum_{k=1}^n x_k^2 - \frac{\left( \sum_{k=1}^n x_k \right)^2}{n} \right) \left( \sum_{k=1}^n y_k^2 - \frac{\left( \sum_{k=1}^n y_k \right)^2}{n} \right)}} \quad (2)$$

Où  $n$  est le nombre de valeurs considérées (dans cette application la valeur de  $n$  est égale à 6 pour les machines MS1 et MS2).

L'équation (2) devient avec les mesures de champs magnétiques obtenues :

$$r_i = \frac{\sum_{k=1}^n e_{Ci}(k) e_{C(i+3)}(k) - \frac{\sum_{k=1}^n e_{Ci}(k) \sum_{k=1}^n e_{C(i+3)}(k)}{n}}{\sqrt{\left( \sum_{k=1}^n e_{Ci}(k)^2 - \frac{\left( \sum_{k=1}^n e_{Ci}(k) \right)^2}{n} \right) \left( \sum_{k=1}^n e_{C(i+3)}(k)^2 - \frac{\left( \sum_{k=1}^n e_{C(i+3)}(k) \right)^2}{n} \right)}} \quad (3)$$

Dans cette relation  $i$  représente la position de la paire de capteur ( $i = 1, \dots, 3$ ) et  $e_{Ci}(k)$  la mesure du champ par le capteur  $Ci$  pour la charge  $k$  avec  $k = 1, \dots, n$  et  $n = 6$ .

Le coefficient de corrélation peut avoir une valeur comprise entre -1 et +1. Pour étudier le comportement de ce coefficient, deux facteurs doivent être pris en compte :

1. La valeur absolue : plus la valeur absolue du coefficient est importante, plus la relation linéaire entre les variables est forte. Pour la corrélation de Pearson, une valeur absolue de 1 indique une relation linéaire parfaite (Fig. 5.a et Fig. 5.c). Une corrélation proche de 0 indique l'absence de relation linéaire entre les variables (Fig. 5.b).
2. Le signe du coefficient : il indique si les deux variables ont tendance à varier dans le même sens ou non. Si le coefficient est positif alors les variables évoluent dans le même sens (la pente de la droite représentant l'évolution de ces variables est alors positive, comme le montre la Fig. 5.a). Si une variable a tendance à augmenter lorsque l'autre diminue (ou inversement), le coefficient est négatif (la pente est alors négative comme le montre la Fig. 5.c).

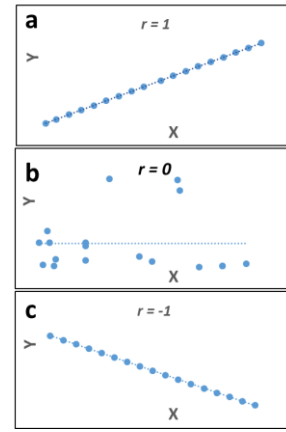


Fig. 5. Diagramme de dispersion et coefficient de corrélation pour trois relations différentes.

L'utilisation du coefficient de corrélation, appliqué à la surveillance de la variation du champ magnétique, est une technique nouvelle qui permet de mettre en évidence la présence de défauts de court-circuit entre les spires dans les machines synchrones.

La dissymétrie magnétique, générée par le défaut, conduit à une différence entre les signaux délivrés par deux capteurs  $C1$  et  $C2$  placés à  $180^\circ$  autour de la machine électrique comme le montre la Fig. 1. Considérons  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  les amplitudes de ces variables, qui sont utilisées comme entrées pour calculer le coefficient de Pearson. Différentes valeurs de  $e_{C1}(k)$  et  $e_{C2}(k)$  correspondant à différentes conditions de charge  $k$  sont considérées. La méthode peut être décrite comme suit :

- Si  $r$  est proche de 1 (comme l'illustre la Fig.5.a), cela indique une relation linéaire forte entre les amplitudes des harmoniques  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$ . La relation est positive car les variables évoluent dans le même sens lors de la variation de la charge  $k$  (Fig. 6). Ceci indique qu'il n'y a pas de défaut dans le stator de la machine.

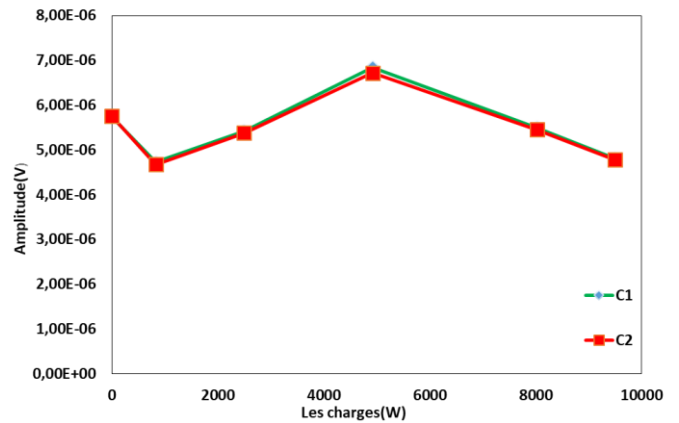


Fig. 6. Variation des amplitudes des harmoniques pour la machine MS1 de 10 KW.

- Si  $r$  est proche de 0 (Fig. 5.b), cela signifie que les amplitudes des harmoniques  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  ne varient pas de manière similaire et donc qu'il n'existe aucune relation linéaire entre ces variables (Fig. 7). Ceci indique la présence d'un défaut dans le stator de la machine.

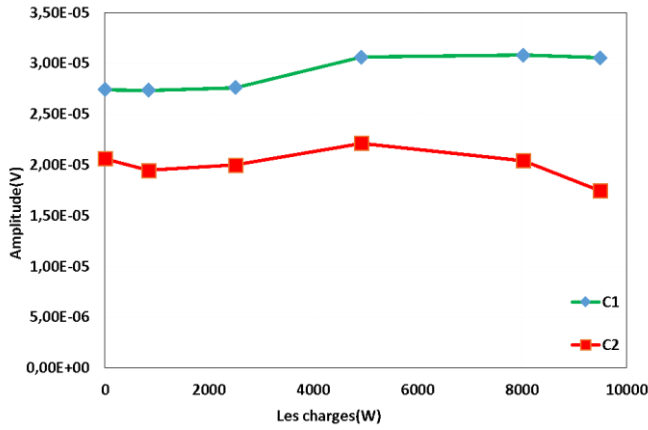


Fig. 7. Variation des amplitudes des harmoniques 750Hz pour la machine en défaut MS1 de 10 KW.

- Si  $r$  est proche de -1, cela indique une relation négative forte entre les variables (Fig. 5.c.). La relation est négative car lorsqu'une variable augmente, l'autre variable diminue (ou inversement). Comme cela est décrit dans [20], lorsque les amplitudes des harmoniques  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  varient en sens opposés en cas de variation de charge (Fig. 8), il y a présence d'un défaut au stator de la machine.

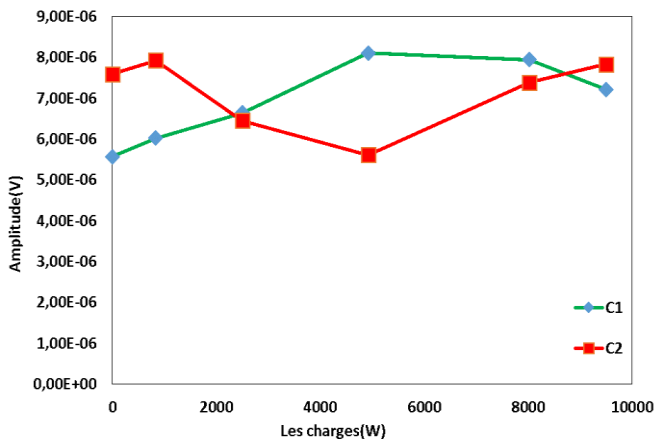


Fig. 8. Variation des amplitudes des harmoniques pour la machine en défaut MS1 de 10 KW.

## 5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

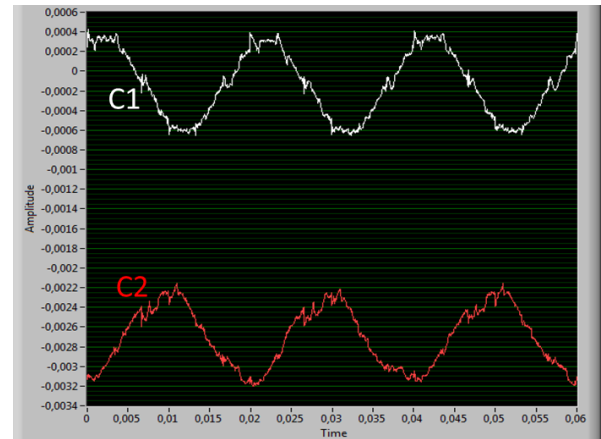
Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus sur quatre machines électriques synchrones dont les paramètres sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des machines utilisées dans l'étude expérimentale.

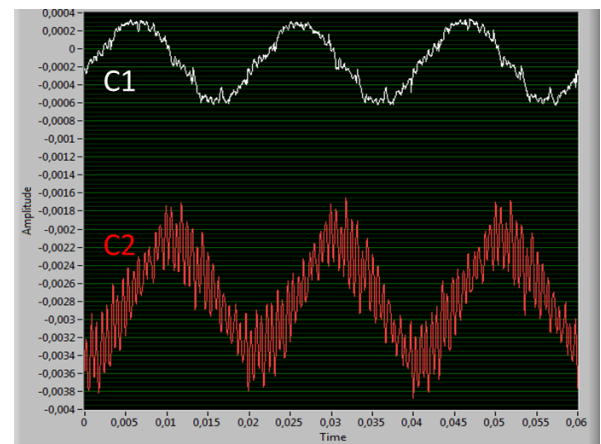
	MS1	MS2	MS3	MS4
Tension de ligne(V)	220/400	400	200/380	231/400
Vitesse (tr/min)	1500	1500	1500	1500
Puissance (KW)	10	4,4	12	1,2
$\cos\phi$	0,7	0,75	0,8	0,8
Fréquence (Hz)	50	50	50	50
Nombre des pôles du rotor	4	4	4	4
Nombre d'encoches du stator	54	36		36
Nombre d'encoche du rotor	32	Aimants permanents		

Les machines MS1 et MS2 utilisées ont été modifiées de façon à ce qu'elles offrent la possibilité de réaliser des courts circuits entre spires. Les stators des machines ont été rebobinés de sorte que les entrées et les sorties des différentes sections élémentaires statoriques soient extraites de la carcasse et ramenées à un bornier qui est fixé au-dessus de la machine comme l'illustre la Fig. 10 pour MS1 et la Fig. 13 pour MS2. Les amplitudes  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  sont analysées en considérant une augmentation de la charge pour toutes les machines. La charge est assurée par une machine à courant continu (MCC) connectée à une caisse de charge résistive.

Les signaux émis par les capteurs sont transmis à l'analyseur LABVIEW (Fig. 9). Si la machine est saine, la distribution du champ de chaque côté de la machine est uniforme. Dans ce cas, les amplitudes des signaux sont approximativement les mêmes de chaque côté. Lorsque, la machine est défectueuse, les amplitudes des signaux diamétralement opposés sont significativement différentes.



(a) Machine saine.



(b) Machine en défaut.

Fig. 9. Force électromagnétique pour la machine MS1 de 10 KW.

### A. Etude de la machine MS1

La Fig. 10 présente le banc de la machine MS1 utilisé pour les tests expérimentaux. Les sections élémentaires ont été choisies de manière à pouvoir étudier un court-circuit proche de l'entrée de la phase (phase A), en phase milieu (phase B) ou proche du neutre (phase C).

La Fig. 11 présente le schéma de bobinage de la machine MS1 avec les connexions entre entrées et sorties des sections et les pôles de chaque phase.

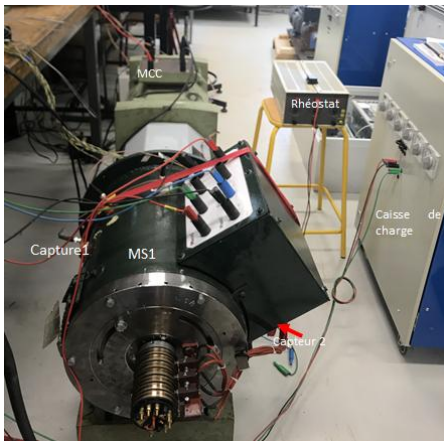


Fig. 10. Machine synchrone expérimentale MS1 de 10KW.

Le nombre total de spires dans la phase A est de 126 et un court-circuit entre 1 à 2 correspond à une spire en court-circuit (0,8% d'une phase complète), entre 2 à 3 à trois spires en court-circuit (2,3%) et entre 1 à 4 à cinq spires en court-circuit (4%).

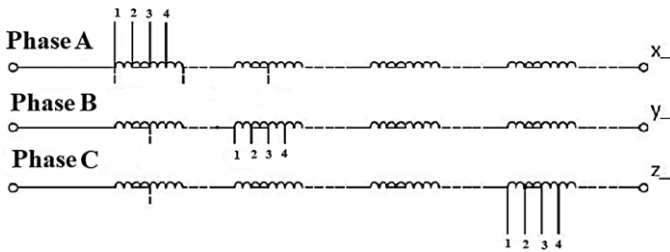


Fig. 11. Schéma électrique de l'enroulement statorique de la machine synchrone MS1.

Pour la machine MS1, une série de mesures a été réalisée pour plusieurs charges et pour différentes positions du court-circuit. Les essais réalisés se font en fonctionnement en génératrice avec débit sur résistance, et dans les configurations suivantes :

- sans court-circuit
- trois défauts (courts-circuits entre 1-2, 2-3 et 1-4) pour les trois phases (A, B et C)

La valeur du courant mesuré dans chaque cas de court-circuit ('sc') est :

- $I_{cc} = 3A$  pour les courts-circuits sur la bobine '1- 2', une spire en court-circuit.
- $I_{cc} = 9A$  pour les courts-circuits sur la bobine '2-3', trois spires en court-circuit.
- $I_{cc} = 15A$  pour les courts-circuits sur la bobine '1-4', cinq spires en court-circuit'.

Pour cette machine l'amplitude analysée correspond à l'harmonique 750 Hz pour une utilisation en fonctionnement génératrice.

Pour la machine saine, le coefficient de corrélation calculé entre les amplitudes  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  est très élevé et proche de 1 ( $r = 0,998$ , Fig. 12). Cela signifie que la densité de flux reste pratiquement identique autour de la machine en cas de variation de charge. En cas de défaut, le coefficient de corrélation montre une faible valeur ( $r = -0,5297$ ). Le résultat est négatif car la variation entre  $e_{C1}$  et  $e_{C2}$  est en sens inverse. Cette valeur est obtenue avec un courant de court-circuit mesuré de 3A pour un court-circuit entre les sorties 1-2 (1 spire). Cela signifie que les amplitudes ne changent pas de la même façon, ce qui peut indiquer un défaut dans les

enroulements du stator de la machine. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2 et à la Fig. 12.

Tableau 2. Valeur du coefficient de corrélation 'r' obtenu pour la machine MS1.

Court-circuit	Sans défaut	$I_{cc}=3A$ 1 spire	$I_{cc}=9A$ 3 spires	$I_{cc}=15A$ 5 spires
Phase A	0,9987	-0,5297	0,7469	0,9681
Phase B	0,9987	0,4935	0,8122	0,8078
Phase C	0,9987	0,5945	0,0173	0,4495

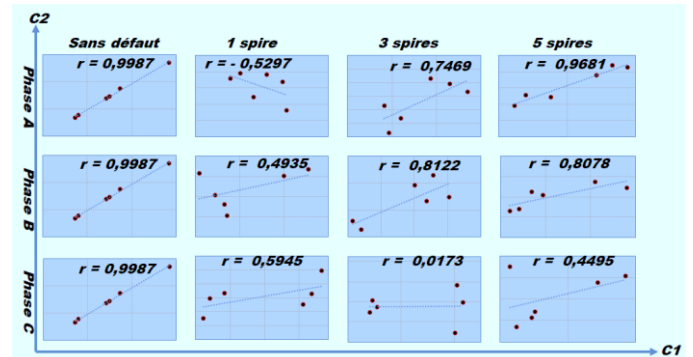


Fig. 12. Coefficient de corrélation 'r' calculé avec les mesures de C1 et C2 pour la machine MS1 sans défaut et avec défaut.

## B. Etude de la MS2

La deuxième machine étudiée est la machine MS2 avec les caractéristiques présentées dans le tableau 1. Cette machine est une machine à aimants permanents qui a la particularité de présenter une saillance inversée au rotor avec une seule section élémentaire sortie par phase. Comme pour MS1 les sections élémentaires ont été choisies de telle sorte qu'il soit possible d'étudier un court-circuit près de l'entrée de la phase (phase A), en milieu de phase (phase B) ou près du neutre (phase C).



Fig. 13. Machine synchrone expérimentale MS2 de 4KW.

Chacune de ces sections élémentaires est décomposée en trois parties égales ; ce qui permet de court-circuiter 1/3 ou 2/3 de la section élémentaire, voir la section élémentaire complète. La Fig.13 présente le banc moteur utilisé. La charge est une machine à courant continu connectée à une caisse de charge résistive. La Fig. 14 présente le schéma de bobinage avec les possibilités de défaut.

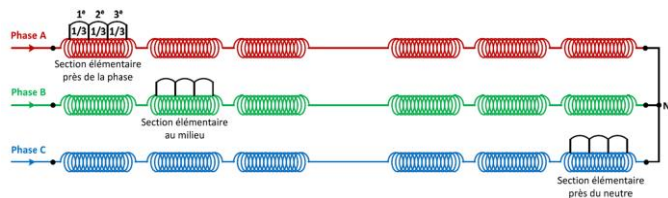


Fig. 14. Structure du bobinage statorique de la machine MS2.

Les tests correspondant à la machine saine et défaillante, pour le fonctionnement à vide et en charge, en considérant plusieurs niveaux de sévérité du défaut sont les suivantes :

- sans court-circuit,
- trois défauts sur la phase A (courts-circuits entre Co1-Co2, Co1-Co3 et Co1-Co4),
- trois défauts sur la phase B (courts-circuits entre Co1-Co2, Co1-Co3 et Co1-Co4),
- trois défauts sur la phase C (courts-circuits entre Co1-Co2, Co1-Co3 et Co1-Co4),

Les valeurs des courants mesurées dans chaque cas de court-circuit sont :

- $I_{cc} = 4A$  pour les courts-circuits sur la bobine 'Co1- Co2'.
- $I_{cc} = 7A$  pour les courts-circuits sur la bobine 'Co1- Co3'.
- $I_{cc} = 10A$  pour les courts-circuits sur la bobine 'Co1- Co4'.

Les amplitudes des harmoniques à 150 Hz ont été analysées et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3 et la Fig. 15.

Tableau 3. Coefficients de corrélation 'r' obtenus pour la machine MS2.

Court circuit	Sans défaut	Co1-Co2 $I_{cc}=4A$	Co1-Co3 $I_{cc}=7A$	Co1-Co4 $I_{cc}=10A$
Phase A	0,9988	0,9967	0,6277	0,9890
Phase B	0,9988	0,9939	0,9932	0,9935
Phase C	0,9988	0,8997	0,9752	0,8702

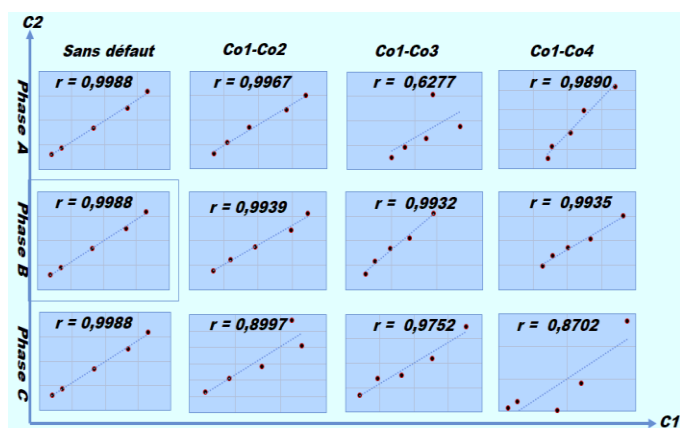


Fig. 15. Coefficient de corrélation 'r' calculé avec les mesures de C1 et C2 pour la machine MS2 sans défaut et avec défaut.

A partir du tableau 3 et de la Fig.15 pour la machine saine on observe que le coefficient (r) est très proche de +1, ( $r = 0,9988$ ). Cela signifie que la relation entre les deux capteurs est linéaire et cela correspond au comportement obtenu avec une machine saine.

Pour la machine en défaut, les valeurs de r dépendent de la gravité du défaut et de la position du court-circuit dans les enroulements de la machine par rapport à l'emplacement des capteurs. La baisse de r signifie que les variables ne varient pas

de la même façon, cela peut indiquer un défaut dans l'enroulement statorique de la machine. Toutefois, il apparaît que pour un défaut sur la phase B, 'r' garde des valeurs proches de 1, ce qui conduit à une non détection du défaut.

### C. Etude de la MS3

Afin de valider les méthodes de diagnostic proposées, une troisième campagne expérimentale a été menée sur la machine synchrone MS3 saine montrée à la Fig. 16.

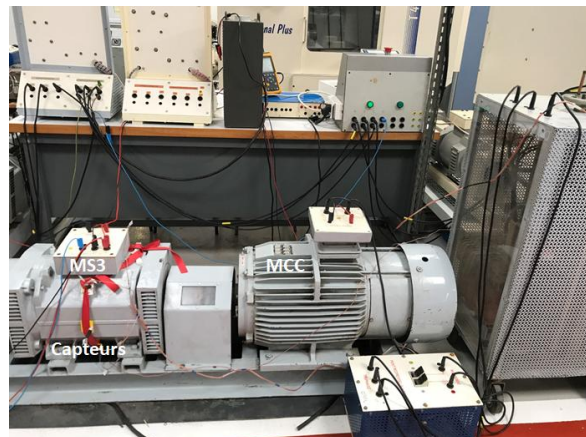


Fig. 16. Machine synchrone expérimentale saine MS3 de 12KW.

Pour cette machine, la mesure du champ extérieur est réalisée avec six capteurs, chaque paire de capteurs est décalée de 180° comme le montre la Fig.17. On a donc trois positions : position 1 (P1) pour les capteurs C1-C4, position 2 (P2) pour les capteurs C2-C5 et position 3 (P3) pour les capteurs C3-C6.

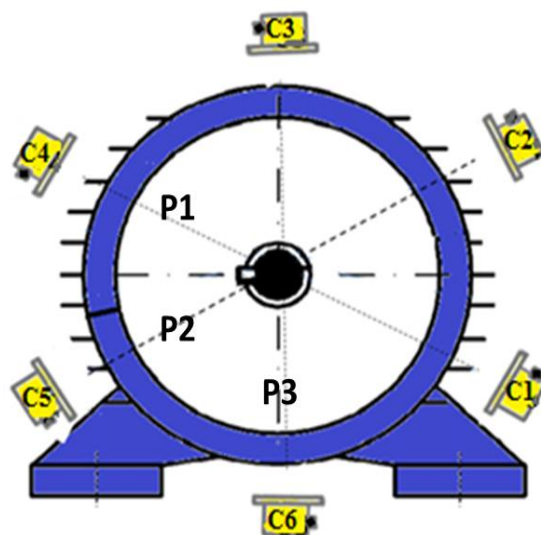


Fig. 17. Positionnement les capteurs autour de la machine MS3.

Les résultats correspondant sont présentés à la Fig. 18 et dans le tableau 4. Les valeurs du coefficient de corrélation entre chaque paire des capteurs sont très élevés (proche de 1). Cela signifie que les amplitudes sensibles varient dans le même sens avec la variation de la charge. Pour l'étude les amplitudes de l'harmonique sensible 150Hz ont été utilisées.

Tableau 4. Coefficients de corrélation 'r' obtenu pour la machine MS2.

Les positions	(r) Fonctionnement en génératrice
Position 1	0,9945
Position 2	0,9900
Position 3	0,9944

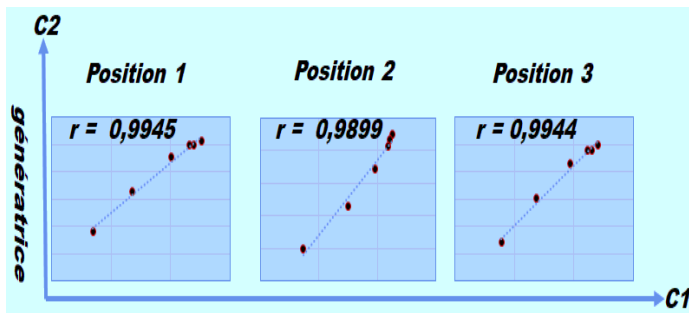


Fig. 18. Coefficient de corrélation 'r' calculé avec les mesures de capteurs C1, C2, C3 et C4, C5, C6 pour la machine saine MS3 de 12 KW.

Les résultats permettent de mettre en évidence une symétrie entre les trois positions P1, P2 et P3 et la valeur très élevée de 'r' nous permet de conclure que la machine est sans défaut.

#### D. Etude de la MS4

On considère dans cette section une machine synchrone saine à pôles saillants (bobinés), que l'on nomme MS4 et dont les spécifications sont résumées dans le Tableau 1. Comme pour la MS3, la MS4 est une machine saine, mais une seule position de capteur sera considérée. La charge est composée d'une machine à courant continu et d'un banc de résistances illustrés à la Fig. 19. La fréquence sensible pour cette machine est encore 150 Hz.

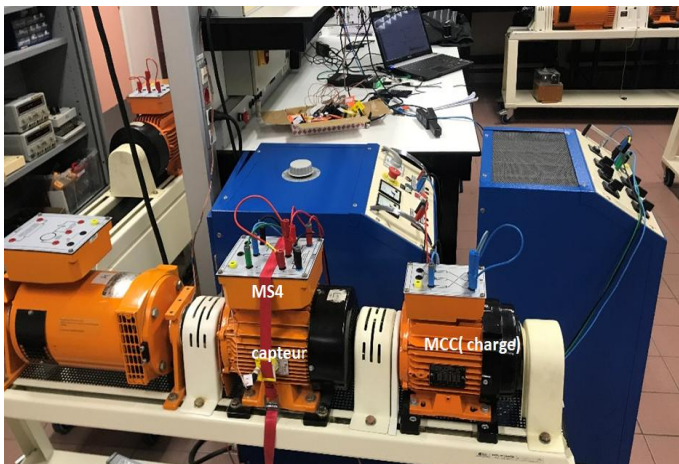


Fig. 19. Machine synchrone expérimentale saine MS4 de 1,2KW. La fréquence de l'harmonique sensible vaut 150Hz pour cette machine.

Nous avons effectué trois tests de diagnostic sur cette machine, c'est-à-dire trois montées en charge. Chaque test a été réalisé sur un jour différent.

Tableau 4. Résultats obtenus avec la machine MS4.

N° Test	r
TEST1	1,000
TEST2	1,000
TEST3	1,000

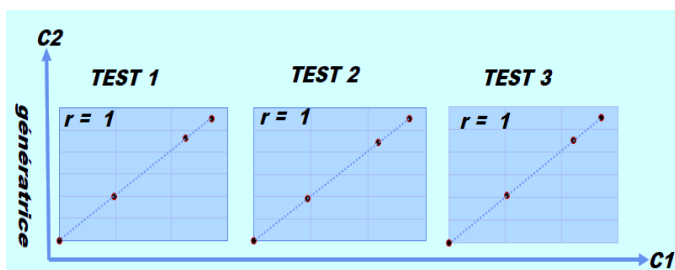


Fig. 20. Coefficient de corrélation r entre C1 et C2 pour la machine MS4.

Les résultats de ces tests, nommés TEST1, TEST2 et TEST3, sont exposés dans le Tableau 4 et à la Fig. 20. Nous pouvons observer que le coefficient r est égal à 1 pour chacun des trois tests. Cela signifie que la relation entre les deux capteurs est linéaire et l'amplitude de l'harmonique d'induction considéré reste pratiquement identique autour de la machine pour tous les points de charge. Au vu de ces résultats, la machine est donc considérée à juste raison comme saine. Ces résultats confirment l'efficacité de la méthode fournie pour détecter les défauts de court-circuit entre les spires pour cette machine MS4.

#### E. Bilan des tests sur les machines MS1 à MS4

Nous venons de voir que pour toutes les machines MS1 à MS4 testées, le coefficient de corrélation est très élevé et proche de 1 pour le cas sain, par exemple :  $r = 0,9987$  pour MS1,  $r = 0,9988$  pour MS2,  $r_{P1} = 0,9945$ ,  $r_{P2} = 0,9899$  et  $r_{P3} = 0,9944$  pour MS3 et  $r = 1$  pour les trois tests avec MS4.

Dans les cas de défaut, la dissymétrie magnétique générée par un défaut conduit à une différence entre les signaux délivrés par chacun des capteurs opposés, ce qui implique que le coefficient r de corrélation va être inférieur à 1.

Nous souhaitons maintenant analyser quelle valeur de seuil du coefficient r de corrélation pourrait être fixée en dessous de 1 pour prendre une décision en faveur d'un défaut.

Pour analyser l'influence d'un seuil de valeur sur l'efficacité de la détection de défaut, nous avons représenté à la Fig. 21 les coefficients r de corrélation obtenus pour différents tests pour chacune des machines MS1 à MS4.

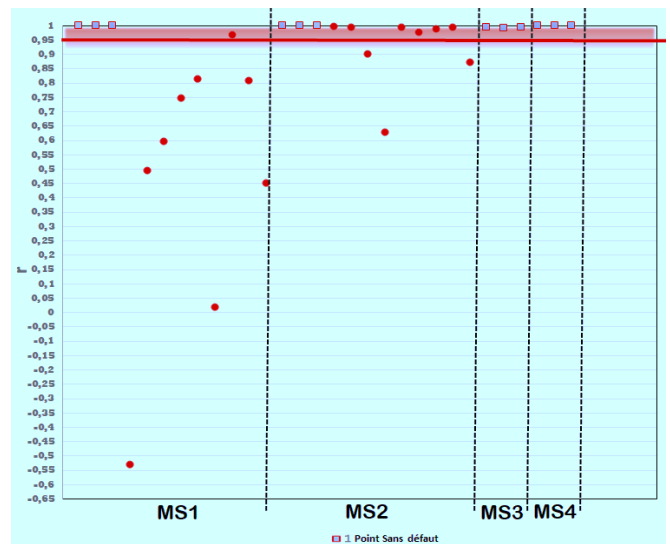


Fig. 21. Coefficients de corrélation 'r' obtenus entre les mesures de deux capteurs opposés pour différents tests pour les machines MS1, MS2, MS3 et MS4 (En bleu, tests sur machine saine, en rouge, test sur une machine avec un défaut de spires).

On retrouve sur la Fig. 21 :

- Les 12 tests effectués sur la machine MS1 : 3 tests sans défaut ( $r=0,9987$ ) et 9 tests avec défaut ( $r \leq 0,9681$ ).
- Les 12 tests effectués sur la machine MS2 : 3 tests sans défaut ( $r=0,9988$ ) et 9 tests avec défaut ( $r \leq 0,9967$ ).
- Les 3 tests effectués sur la machine MS3 : 3 tests sans défaut ( $r=0,9945$ ,  $r=0,9899$  ou  $r = 0,9944$ ).
- Les 3 tests effectués sur la machine MS4 : 3 tests sans défaut ( $r=1$ ).



Dans le domaine de la détection de défaut de bobinage de machine électrique, il est moins grave de dire qu'il n'y a pas de défaut à tort (il peut aussi s'agir d'un petit défaut) plutôt qu'il y a un défaut à tort, ce dernier cas impliquant le coût du changement du bobinage d'une machine saine.

Aussi, à partir de l'ensemble des tests effectués, nous conseillons un seuil de valeur de  $r$  à 0,95 (comme illustré sur la Fig. 21).

Avec un tel seuil, cela signifierait une seule erreur pour la machine MS1, 6 erreurs sur la machine MS2, pas d'erreur sur les machines MS3 et MS4, avec dans tous les cas aucune machine saine diagnostiquée en défaut à tort. On peut toutefois préciser que les résultats pour MS2 peuvent être améliorés en prenant plus de positions de capteurs. On sait en effet que la position idéale des capteurs pour la détection de défaut est dans l'axe de la phase en défaut [19].

## 6. CONCLUSION

L'utilisation du coefficient de corrélation ' $r$ ' appliquée à la surveillance de la variation du champ magnétique est une technique nouvelle qui permet de mettre en évidence la présence de défauts de court-circuit entre les spires dans les machines synchrones. Cette technique prometteuse utilise la variation du champ magnétique externe dû à une variation de la charge pour détecter de faibles niveaux de court-circuit (une à deux spires) dans le stator de la machine. De plus, la méthode donne de bons résultats sur différents types de machines synchrones ce qui augmente les performances dans la détection des défauts de court-circuit naissants. L'optimisation et l'augmentation de la fiabilité de la méthode est possible en considérant plusieurs positions de capteurs.

## 7. REFERENCES

- [1] Y. Hu, T. Wu, L. Chow, Y. Bai, and W. Wu, "Design of a 3kW 150k RPM super high-speed permanent magnet synchronous motor," Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. IECM 2014, pp. 2543–2548, 2014.
- [2] V. Climente-Alarcon, D. Nair, R. Sundaria, J. A. Antonino-Daviu, and A. Arkkio, "Combined model for simulating the effect of a heavy transient on a damaged rotor cage," Proc. - 2016 22nd Int. Conf. Electr. Mach. IECM 2016, pp. 2867–2873, 2016.
- [3] A. Petrov, I. Plokhov, A. Rassölkin, T. Vaimann, A. Kallaste, and A. Belahcen, "Adjusted electrical equivalent circuit model of induction motor with broken rotor bars and eccentricity faults," 2017 IEEE 11th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives, pp. 58–64, 2017.
- [4] F. Etienne, P. Antoine, R. Jérémie, Y. Mathias, Tientcheu, J.-M. Andréjak, and M. Pascal, "Current-based detection of mechanical unbalance in an induction machine using spectral kurtosis with reference," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 3, pp. 1879–1887, 2015.
- [5] M. Hamadache, D. Lee, and K. C. Veluvolu, "Rotor Speed-Based Bearing Fault Diagnosis (RSB-BFD) under Variable Speed and Constant Load," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 10, pp. 6486–6495, 2015.
- [6] M. Kato and K. Hirata, "Proposal of electro mechanical resonance for linear oscillatory actuator," Proc. - 2016 22nd Int. Conf. Electr. Mach. IECM 2016, pp. 871–876, 2016.
- [7] D. Arifianto, "Source Separation using Independent Component Analysis Techniques for Machine Fault Detection in the presence of Background Noise," no. November, pp. 274–278, 2011.
- [8] M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 2, pp. 238–244, 2003.
- [9] H. Sugimoto, M. Miyoshi, and A. Chiba, "Axial Vibration Suppression by Field Flux Regulation in Two-Axis Actively Positioned Permanent Magnet Bearingless Motors with Axial Position Estimation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 2, pp. 1264–1272, 2018.
- [10] G. F. and C. L. and K. L. V. I. and N. C. Kar, "Torque ripple modeling and minimization for PMSM drives with consideration of magnet temperature variation," 2016 XXII Int. Conf. Electr. Mach., pp. 612–618, 2016.

- [11] H. Henao, C. Demian, and G. A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 5, pp. 1272–1279, 2003.
- [12] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093, 2012.
- [13] R. Pusca, R. Romary, and A. Ceban, "Detection of inter-turn short circuits in induction machines without knowledge of the healthy state," Proc. - 2012 20th Int. Conf. Electr. Mach. IECM 2012, pp. 1637–1642, 2012.
- [14] M. Irhoumah, R. Pusca, E. Lefèvre, D. Mercier, and R. Romary, "Diagnosis of Induction Machines Using External Magnetic Field and Correlation Coefficient," 11th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives, no. Tinos, Greece, pp. 531–536, 2017.
- [15] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Eccentricity and broken rotor bars faults - Effects on the external axial field," 19th Int. Conf. Electr. Mach. IECM 2010, 2010.
- [16] R. Pusca, C. Demian, D. Mercier, E. Lefevre, and R. Romary, "An improvement of a diagnosis procedure for AC machines using two external flux sensors based on a fusion process with belief functions," IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.), pp. 5096–5101, 2012.
- [17] M. Irhoumah, R. Pusca, E. Lefevre, D. Mercier, R. Romary, and C. Demian, "Information Fusion with Belief Functions for Detection of Interturn Short-Circuit Faults in Electrical Machines Using External Flux Sensors," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 3, 2018.
- [18] M. Irhoumah, R. Pusca, E. Lefevre, D. Mercier, and R. Romary, "Diagnostic de machines électriques utilisant six capteurs de champ extérieur," no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [19] R. Pusca, R. Romary, A. Ceban, and J. F. Brudny, "An online universal diagnosis procedure using two external flux sensors applied to the AC electrical rotating machines," Sensors (Switzerland), vol. 10, no. 11, pp. 10448–10466, 2010.
- [20] A. Ceban, "Méthode globale de diagnostic des machines électriques," Thèse de Doctorat, LSEE, Université d'Artois, 2012.