

Stratégie optimisée de caractérisation d'impédance de machines électriques en rotation pour le suivi de vieillissement des bobinages

Jérémy Creux^{1,2}, Najla Haje Obeid¹, Thierry Boileau² et Farid Meibody-Tabar²

¹IFP Energies Nouvelles, Institut Carnot IFPEN Transports Energie, 1 Av. de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison, France

²Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

jeremy.creux@ifpen.fr

RESUME – La tendance actuelle pour améliorer les performances et l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie électromécanique, consiste à augmenter les tensions d'alimentation et les fréquences de découpage des onduleurs. L'isolation des conducteurs de machines électriques est alors soumise à des contraintes électriques et mécaniques de plus en plus fortes, pouvant entraîner des dégradations. La surveillance de l'état de santé des enroulements est alors essentielle pour prévenir de défaillances critiques, comme des courts-circuits. Il a été montré que la capacité inter-spires des enroulements était directement liée à la qualité de l'isolant des enroulements de la machine et entraînait une modification de leur comportement impédant. La plupart des approches de caractérisation sont réalisées sur une machine à l'arrêt et déconnectée de sa source de puissance, ce qui limite leur application. Aussi, l'inconvénient majeur des méthodes de caractérisation en ligne est l'invasivité apportée par le couplage d'un système d'excitation auxiliaire. C'est pourquoi, dans de précédents travaux, nous avons proposé une nouvelle approche d'identification de la réponse fréquentielle impédante, réalisée dans l'environnement fonctionnel de l'actionneur et sans système d'excitation dédié. Afin d'améliorer la précision de la caractérisation fréquentielle lorsque la machine est mise en rotation, nous proposons ici un processus d'identification optimisé. L'intérêt de cette nouvelle approche est de réduire l'impact du bruit sur la caractéristique fréquentielle obtenue, et ainsi permettre une identification plus précise et plus fiable des différentes fréquences de résonance, utilisées pour le suivi de vieillissement.

Mots-clés – *impédance, comportement hautes fréquences, méthode de caractérisation, enroulements statoriques, suivi de vieillissement*

1. INTRODUCTION

Le suivi de l'état de santé des bobinages de machines électriques est aujourd'hui l'un des défis majeurs, engendré par la montée en tension d'alimentation et l'augmentation des fréquences de découpage. En effet, les systèmes d'isolation des conducteurs sont soumis à des contraintes électriques, thermiques et mécaniques très fortes, qui favorisent leur vieillissement. Plusieurs approches de diagnostic existent dans la littérature, telles que :

- la mesure des décharges partielles [1];
- la mesure des résistances d'isolement et de l'indice de polarisation [2];
- la mesure ou l'estimation des capacités équivalentes phase-masse ou inter-spires [3];
- des tests d'épreuve [4];
- des études statistiques [5].

La plupart de ces approches sont difficilement applicables dans un cadre industriel. En effet, elles nécessitent des appareils de mesure ou d'excitation dédiés. De plus, la mise à l'arrêt de la

machine électrique et la déconnexion de sa source de puissance sont généralement nécessaires. Aussi, certains tests étant destructifs, ils ne sont pas envisageables pour suivre le vieillissement des isolants. Enfin, les méthodes basées sur une approche statistique nécessitent des bases de données expérimentales propres à chaque machine. Ces bases de données ne sont pas génériques et sont souvent insuffisantes, ce qui empêche l'évaluation de l'état de santé des bobinages.

Toutefois, dans la littérature récente, de nombreuses approches se basent sur une analyse de la réponse fréquentielle du système pour déterminer l'état de santé des bobinages [6, 7, 8]. En effet, comme montré par F. Perisse, P. Werynski et D. Mercier dans leurs travaux [9, 10], il y a une corrélation entre la diminution de la tension de claquage du bobinage, synonyme de dégradation de l'isolation, et l'augmentation de la capacité équivalente de la machine. Or, cette capacité a un fort impact sur le comportement fréquentiel impédant de la machine, ce qui entraîne notamment la diminution de la première fréquence de résonance. Ce sont donc sur ces bases que nous avons développé une méthode de caractérisation, en ligne, pour suivre l'état de santé des enroulements des machines électriques alimentées par un onduleur de tension.

2. MESURE D'IMPÉDANCE DANS LES MACHINES ÉLECTRIQUES

2.1. Types de mesures

Plusieurs types de mesures d'impédance peuvent être réalisées sur une machine électrique triphasée. Les plus répandues sont l'étude des comportements de mode commun (MC) et de mode différentiel (MD). Ces derniers sont notamment évalués lors d'études de compatibilité électromagnétique (CEM) [11]. Sur une machine connectée en étoile, ces mesures sont réalisées en connectant les différentes phases comme explicité en Figure 1(a)&(b). Aussi, dans une optique de suivi de vieillissement et de localisation d'une défaillance, afin d'isoler les informations recueillies, il est possible d'analyser successivement le comportement de deux des phases de la machine, comme le montre la Figure 1(c). Enfin, si un accès au point de neutre existe, il est alors possible de caractériser indépendamment le comportement de chacune des phases, comme le souligne la Figure 1(d).

2.2. Méthodes de caractérisation

Traditionnellement, la mesure d'impédance s'effectue sur une machine à l'arrêt et déconnectée de sa source de puissance, à l'aide d'un analyseur d'impédance [11, 12]. Une autre approche de caractérisation hors-ligne des bobinages consiste à mesurer à l'oscilloscope les courants et tensions aux bornes d'un enroulement, ainsi que le déphasage temporel entre ces deux si-

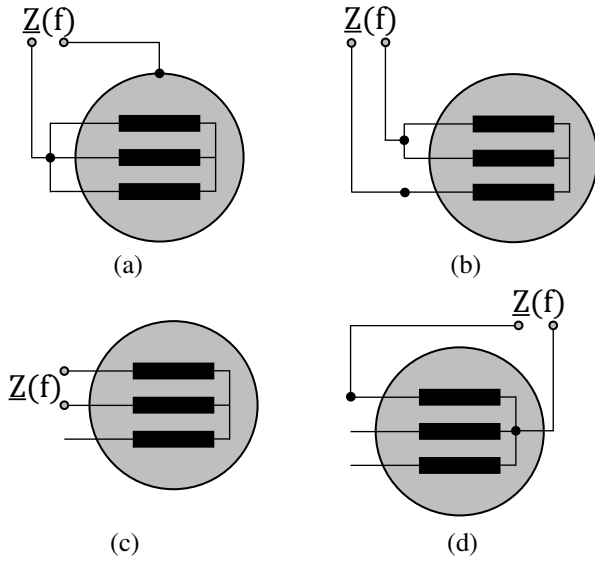


FIG. 1. Schéma de câblage et de mesure de la caractéristique impédante de MC (a), de MD (b), Phase/Phase (c) et Phase/Neutre (d), dans une machine triphasée connectée en étoile.

gnaux. Ainsi, à l'aide de la loi d'Ohm généralisée, l'impédance de cet enroulement peut être explicitée. L'inconvénient de ces méthodes de caractérisation réside dans la mise à l'arrêt de la machine pour réaliser la mesure, ce qui, dans un cadre industriel, est parfois impossible.

Toutefois, des méthodes de caractérisation en ligne existent. Elles consistent à superposer un signal de tension hautes fréquences (HF) à l'alimentation fondamentale de la machine, à l'aide de couplages actif [13], passif [14] ou inductif [15]. Puis, à calculer l'impédance aux moyens de deux mesures de tensions réalisées de part et d'autre d'une résistance « shunt ». L'inconvénient majeur de ces approches est leur caractère invasif. En effet, l'injection HF peut avoir un impact significatif sur le fonctionnement de la machine, voire sur le vieillissement des bobinages. De plus, en raison des fréquences injectées, un générateur dédié doit être utilisé, ce qui limite leur intérêt pour les applications de traction automobile.

3. STRATÉGIE D'IDENTIFICATION D'IMPÉDANCE OPTIMISÉE POUR LA CARACTÉRISATION DE MACHINES ÉLECTRIQUES EN ROTATION

3.1. Système d'étude

Le système d'étude utilisé pour caractériser le comportement impédant de bobinages est décrit en Figure 2. La machine électrique est alimentée par un onduleur de tension à base de composants SiC, et pilotée via modulation par largeur d'impulsion (MLI). La fréquence de découpage est, pour ce type d'applications, généralement comprise entre 10kHz et 35kHz. En effet, en fonction du point de fonctionnement considéré, la fréquence électrique fondamentale de la machine (f_e) appartient à l'intervalle $[100Hz; 500Hz]$. On notera que les bobinages sont ici connectés en étoile.

Seules les mesures de tensions aux bornes de la machine et des courants qui circulent dans chacune des phases sont utiles pour l'approche de caractérisation d'impédance. Ces signaux sont évalués à l'aide de sondes, dont la bande passante va définir la largeur de la plage fréquentielle qui sera caractérisée. Dans notre étude, cette bande passante est comprise entre 12Hz et 50MHz. Afin de mesurer ces données, l'acquisition est réalisée à l'aide d'un oscilloscope à une fréquence d'échantillonnage fixée à 62,5MHz. Le théorème de Nyquist garantit que les composantes fréquentielles allant jusqu'à 31,25MHz sont convena-

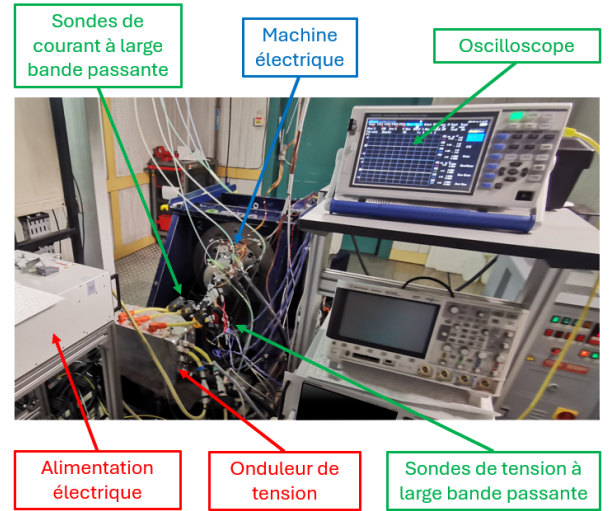


FIG. 2. Photographie du système d'étude et description des mesures réalisées.

blement représentées au sein des signaux discrets obtenus [16].

3.2. Approche de base

Dans de précédents travaux nous avons développé une nouvelle approche d'identification de la réponse fréquentielle impédante, pour le suivi de vieillissement des bobinages [17]. La méthode proposée permet de caractériser le comportement impédant d'un actionneur électrique alimenté par un onduleur de tension, dans son environnement fonctionnel, et sans système d'excitation dédié. Nous sommes partis du principe qu'une alimentation via un onduleur de tension permettait d'exciter de manière intrinsèque les bobinages statoriques des machines électriques, sur une large plage fréquentielle. En effet, chaque multiple de la fréquence de découpage est présent dans le signal de tension appliqué aux bornes de la machine [18].

La méthode consiste dans un premier temps à mesurer les tensions (U_{abc} ou V_{abc}), ainsi que les courants qui circulent dans la machine (i_{abc}), puis d'évaluer leur contenu harmonique. On identifie ensuite les composantes fréquentielles dont l'amplitude est supérieure à un seuil fixé. Ces composantes sont alors notées f_{prep} . Puis, on calcule l'impédance Z correspondante (en termes d'amplitude (relation (1)) et de phase (relation (2))), pour chacune des f_{prep} sur les tensions et les courants.

$$|Z(f_{prep})| = \frac{|V_{abc}(f_{prep})|}{|I_{abc}(f_{prep})|} \quad (1)$$

$$\angle Z(f_{prep}) = \angle V_{abc}(f_{prep}) - \angle i_{abc}(f_{prep}) \quad (2)$$

Afin de ne tenir compte que des fréquences réellement excitées, un nettoyage de la caractérisation d'impédance brute autour des multiples de la fréquence de découpage est alors réalisé. Finalement, le comportement impédant et les informations nécessaires au suivi de vieillissement sont stockées. Pour limiter la quantité de données à stocker au cours du temps, une interpolation ou une modélisation par fonction de transfert peuvent être envisagées.

En appliquant cette méthode pour la machine d'étude, nous avons constaté une forte corrélation entre les comportements fréquentiels obtenus via notre approche de caractérisation en ligne et ceux obtenus avec un analyseur d'impédance. Les résultats sont présentés en Figure 3. Par souci de confidentialité, le "per unit" sera utilisé dans la suite de l'étude. L'écart relatif entre les deux fréquences caractéristiques de la première résonance parallèle est inférieur à 10%. En termes d'amplitudes, les deux approches renvoient le même résultat. En revanche, on constate une déviation importante du comportement autour de

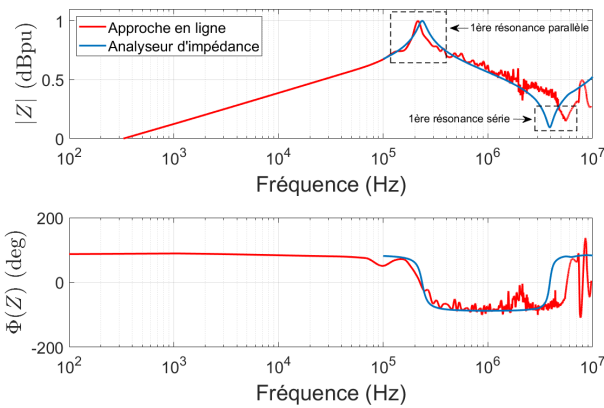


FIG. 3. Comparaison des caractéristiques impédantes obtenues à l'aide de l'approche de caractérisation en ligne et avec un analyseur d'impédance.

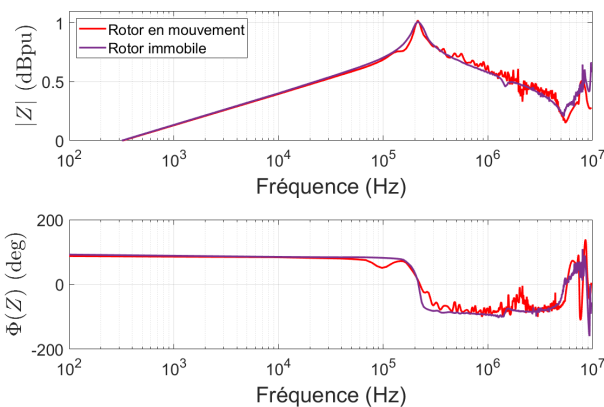


FIG. 4. Comparaison des caractéristiques impédantes obtenues à l'aide de l'approche de caractérisation en ligne lorsque le rotor est en mouvement, puis maintenu immobile.

la première résonance série. Cette observation est directement liée à l'utilisation de pinces de fixation et de câbles de mesure entre l'analyseur d'impédance et la machine étudiée [17, 19]. En effet, la première résonance série est particulièrement sensible à l'approche de mesure utilisée. Les câbles de mesure supplémentaires nécessaires avec l'analyseur d'impédance viennent modifier le comportement fréquentiel dans cette zone. De plus, la caractéristique impédante est sensible à la calibration de l'appareil de mesure, c'est pourquoi il est nécessaire d'être très rigoureux dans les conditions de réalisation de la mesure.

L'approche proposée s'affranchit de ces aléas de connexion et garantit une forte répétabilité. La caractérisation qui en résulte semble donc plus fiable pour évaluer avec précision le comportement impédant des phases de la machine. Il faut donc souligner l'intérêt de se placer à iso-méthode et à iso-conditions de mesure, afin d'exploiter convenablement les résultats issus de ces caractérisations fréquentielles. Ainsi, des comparaisons avec un état de référence permettront d'analyser l'état de santé des bobinages.

En revanche, des fluctuations d'amplitudes non négligeables sont présentes sur la caractéristique impédante obtenue via l'approche en ligne proposée, lorsque les fréquences sont supérieures à 500kHz. Ce comportement bruité est directement lié au point de fonctionnement de la machine et à la rotation des parties tournantes. En effet, on peut voir sur la Figure 4 qu'un tel comportement n'existe pas lorsque la caractérisation est réalisée sur une machine dont le rotor est maintenu immobile. Il semble donc pertinent de faire évoluer la méthode afin d'améliorer la précision de l'approche quand le rotor est en mouvement.

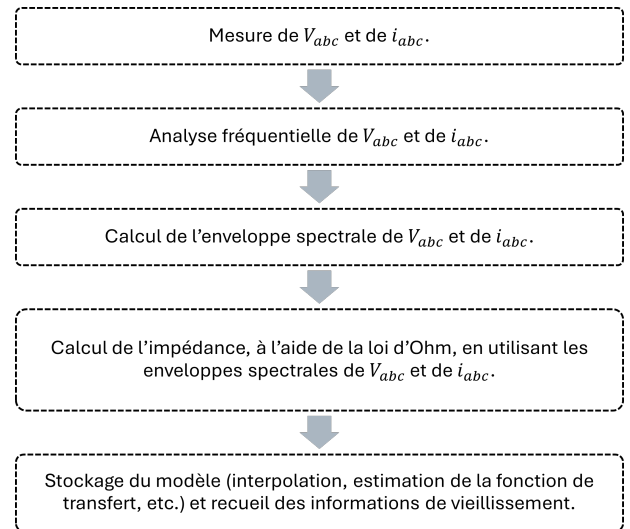


FIG. 5. Processus d'identification du comportement fréquentiel impédant, optimisé pour la caractérisation en ligne.

3.3. Optimisation de la méthode

Pour cela, nous avons modifié certaines étapes du processus d'identification développé dans [17]. En effet, l'enveloppe fréquentielle des tensions et courants a notamment été utilisée pour reconstruire la caractéristique impédante des bobinages. Les étapes de recherche des composantes fréquentielles dont l'amplitude est supérieure à un seuil, ainsi que le nettoyage de la caractéristique impédante brute autour des multiples de la fréquence de découpage, ont donc été supprimées. Le nouveau processus de caractérisation d'impédance proposé est décrit par le schéma de la Figure 5. Il permet ainsi d'améliorer la précision de l'approche d'identification du comportement fréquentiel des bobinages lorsque le rotor est en mouvement.

3.4. Résultats

Pour la machine d'étude considérée et pour un point de fonctionnement donné, la forme d'onde des tensions simples et des courants de phase est donnée en Figures 6&7(a). Ces signaux sont considérés comme stationnaires, c'est-à-dire que le régime de la machine est établi. L'analyse fréquentielle utilisée pour extraire le contenu harmonique de ces signaux repose sur la transformation de Fourier rapide (FFT). Les contenus fréquentiels, en termes d'amplitude (b) et de phase (c), des signaux analysés sont présentés en Figures 6&7. L'échelle logarithmique en abscisse et la transformation en décibels de l'amplitude des signaux traités ont été utilisés par souci de clarté visuelle.

L'enveloppe supérieure du spectre fréquentiel discret de ces signaux est ensuite évaluée par interpolation sur des maxima locaux, séparés par au moins N_p échantillons. N_p est défini comme le nombre de points séparant chaque multiple de la fréquence d'échantillonnage f_p sélectionnée. Sachant qu'avec une alimentation via un onduleur de tension, les composantes dont les amplitudes sont prépondérantes au sein du spectre fréquentiel sont autour des multiples de la fréquence de découpage (f_{MLI}), nous avons sélectionné cette fréquence d'échantillonnage pour notre calcul. L'impact du bruit sur la caractéristique impédante ainsi obtenue est alors limité. Dans l'exemple proposé, l'enveloppe spectrale des tensions simples et des courants de phase est représentée par la courbe en pointillés de couleur cyan sur les Figures 6&7(b). Ces enveloppes sont alors utilisées afin de caractériser l'évolution fréquentielle de l'impédance.

Comme décrit par la relation (3), la loi d'Ohm généralisée permet de calculer l'amplitude de l'impédance des phases de la machine, et de décrire son comportement fréquentiel.

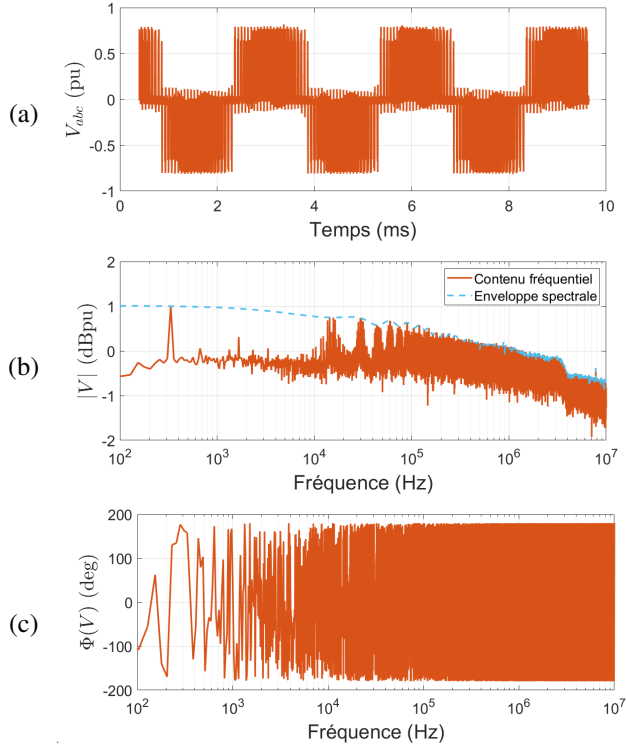


FIG. 6. Formes d'ondes (a), contenu fréquentiel (amplitude (b) et phase (c)) et enveloppe spectrale des tensions simples de la machine étudiée.

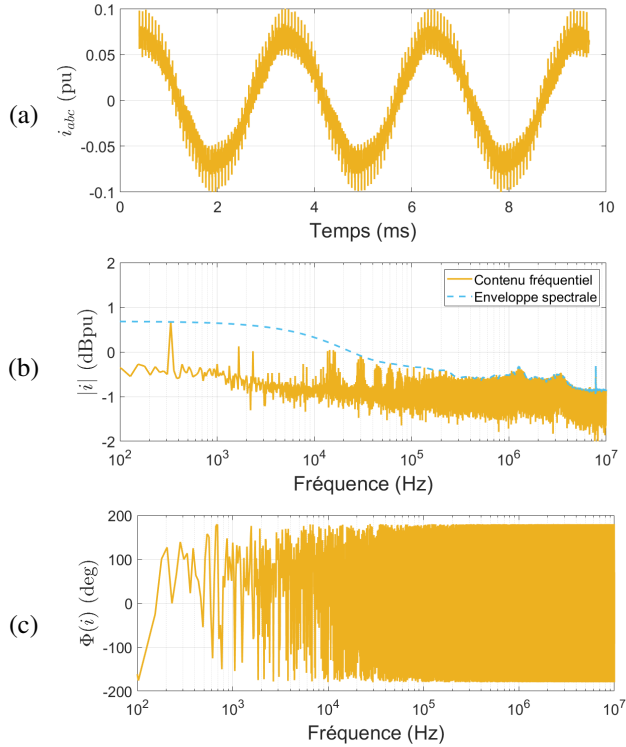


FIG. 7. Formes d'ondes (a), contenu fréquentiel (amplitude (b) et phase(c)) et enveloppe spectrale des courants circulant dans les phases de la machine étudiée.

$$Z(f) = \frac{ES(|V_{abc}(f)|)}{ES(|i_{abc}(f)|)} \quad (3)$$

où Z est l'impédance recherchée, f représente la fréquence

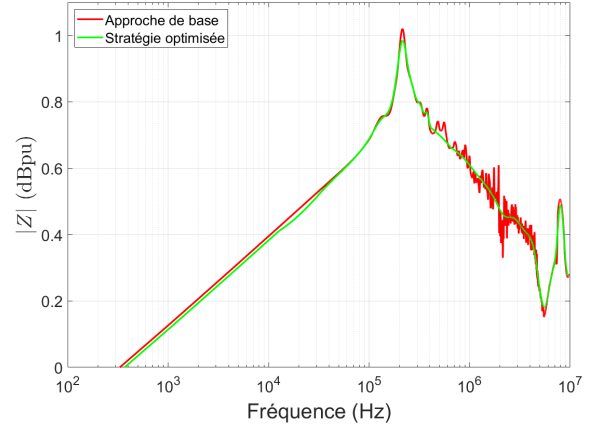


FIG. 8. Comparaison des caractéristiques impédantes obtenues en fonction de l'approche de calcul utilisée.

d'excitation, ES correspond à l'enveloppe spectrale d'un signal, V_{abc} sont les tensions simples et i_{abc} sont les courants circulant dans chacune des phases.

La Figure 8 compare les profils impédants de la machine d'étude, obtenus lors de son fonctionnement nominal, via l'approche développée dans [17] et le processus d'identification optimisé proposé ici.

Dans un premier temps, on constate que la caractéristique impédante calculée avec la nouvelle stratégie proposée permet de réduire les fluctuations qui étaient observées au-delà des 500kHz. En effet, le profil obtenu est beaucoup plus lisse. Les déviations liées aux bruits de mesure et/ou de calcul semblent ainsi atténuées par la nouvelle stratégie mise en place.

Concernant la précision des résultats, on observe que l'optimisation du processus d'identification n'entraîne pas de variations concernant les fréquences des principales résonances caractéristiques. Dans l'exemple présenté, les deux premières résonances parallèles se situent respectivement à 215kHz et 8MHz avec les deux approches. Les fréquences de la première résonance série sont également identiques et valent 5,52MHz. En revanche, une légère atténuation de l'ordre de 0,02 à 0,03dBpu est constatée sur les différentes résonances du profil impédant. Ces déviations restent toutefois négligeables devant la réduction importante du bruit constatée sur la caractéristique impédante obtenue à l'aide de l'approche optimisée.

Ainsi, la nouvelle stratégie de caractérisation d'impédance proposée permet d'optimiser le processus d'identification de la caractéristique impédante et d'améliorer le calcul de son comportement fréquentiel. Dans une optique de suivi de vieillissement, l'évaluation des différentes fréquences de résonance sera alors d'autant plus précise, notamment lorsque le rotor est en mouvement.

4. CONCLUSIONS

La stratégie de caractérisation proposée dans cet article permet d'améliorer les performances du processus de caractérisation fréquentiel du comportement impédant, notamment lorsque la machine est en fonctionnement nominal et que le rotor est en mouvement. Les mesures utilisées sont les tensions aux bornes de la machine et les courants circulant dans chacune des phases. Une analyse fréquentielle de ces signaux est alors réalisée au moyen d'une transformée de Fourier rapide. Sachant que seuls les fréquences proches des multiples de la fréquence de découpage sont intrinsèquement excités par l'onduleur, l'enveloppe spectrale des tensions et des courants est alors calculée, à l'aide de cette fréquence d'échantillonnage. Puis, ces enveloppes permettent de reconstruire la caractéristique fréquentielle de l'impédance des phases de la machine. Cette nouvelle approche permet de limiter le bruit de mesure et de calcul, introduit par le

fonctionnement de la machine et la rotation de son rotor, notamment pour des fréquences supérieures à 500kHz.

Finalement, l'intérêt de la méthode de caractérisation d'impédance en ligne proposé, peut être résumé en trois points.

1. Sachant que l'excitation HF est naturellement réalisée via l'onduleur de tension, la méthode n'est par conséquent pas invasive, puisqu'elle n'impacte pas le fonctionnement de l'actionneur, ni son vieillissement.
2. La méthode est basée sur la seule utilisation de sondes de courants et de tensions à larges bandes passantes, sans nécessiter de phase de calibration spécifique. Ainsi, sans pré-conditionnement, il devient simple et rapide de se placer à iso-conditions de mesure pour réaliser la caractérisation. La méthode est alors parfaitement répétable, et permet une identification d'autant plus fiable et robuste des différentes fréquences de résonance.
3. Le suivi de vieillissement est réalisé à tout instant et sans retirer la machine de son environnement fonctionnel, ce qui devrait permettre d'identifier de manière précoce une dégradation d'isolation dans les bobinages.

5. RÉFÉRENCES

- [1] G. C. Stone, « Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment », in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, éd. 5, oct. 2005.
- [2] IEEE Standard 43-2013, « Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery », ISBN : 978-0-7381-8937-6, 2014.
- [3] W. Liu, E. Schaeffer, L. Loron et P. Chanemouga, « High frequency modelling of stator windings dedicated to machine insulation diagnosis by parametric identification », in *IEEE International Symposium on Diagnostic in Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Cracow, Poland, 2007.
- [4] J. Yang, T.-J. Kang, B. Kim, et al., « Experimental evaluation of using the surge PD test as a predictive maintenance tool for monitoring turn insulation quality in random wound AC motor stator windings », in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, éd. 1, fév. 2012.
- [5] N. Lahoud, M. Q. Nguyen, P. Maussion, et al., « Lifetime model of the inverter-fed motors secondary insulation by using a design of experiments », in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, éd. 6, déc. 2015.
- [6] N. Haje Obeid, « Contribution à la détection des défauts statoriques des actionneurs à aimants permanents — Application à la détection d'un défaut inter-spikes intermittent et au suivi de vieillissement », Thèse de doctorat, Université de Lorraine (GREEN), Nancy, France, 2016.
- [7] N. J. Jameson, M. H. Azarian et M. Pecht, « Impedance-based condition monitoring for insulation systems used in low-voltage electromagnetic coils », in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, éd. 5, mai 2017.
- [8] Z. Zou, S. Liu et J. Kang, « Degradation mechanism and online electrical monitoring techniques of stator winding insulation in inverter-fed machines », in *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, éd. 10, sep. 2024.
- [9] F. Perisse, P. Werynski et D. Roger, « A new method for AC machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances », in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, éd. 5, oct. 2007.
- [10] F. Perisse, D. Mercier, E. Levefre et D. Roger, « Robust diagnostics of stator insulation based on high frequency resonances measurements », in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, éd. 5, oct. 2009.
- [11] J.I. Ramos Chavez, « Design of high frequency operating mechatronic systems : tools and methods of characterization of electromagnetic couplings between electromechanic converters and power electronics converters », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (ENIT-LGP), Toulouse, France, 2016.
- [12] L. Ranzinger, S. Uhrig et S. Tenbohlen, « Analysis and modeling the frequency response of rotating machines regarding fault diagnosis using SFRA », in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 39, éd. 3, mars 2024.
- [13] B. R. Gama, W. C. Sant'ana, G. Lambert-Torres, et al., « FPGA prototyping using the stemlab board with application on frequency response analysis of electric machinery », in *IEEE Access*, vol. 9, fév. 2021.
- [14] G. Bucci, F. Ciancetta, A. Fioravanti, et al., « Online SFRA for reliability of power systems, Characterization of a batch of healthy and damaged induction motors for predictive maintenance », in *Sensors*, vol. 23, éd. 5, fév. 2023.
- [15] S. B. Rathnayaka et K. Y. See, « Early detection of induction motor's defects using an inductively coupled impedance extraction method », in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, USA, 2017.
- [16] M. Mishali, et Y. Eldar, « Sub-Nyquists sampling », in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, éd. 6, nov. 2011.
- [17] J. Creux, N. Haje Obeid, T. Boileau et F. Meibody-Tabar, « Online high frequency impedance identification method of inverter-fed electrical machines for stator health monitoring », in *Applied Sciences*, vol. 14, éd. 23, nov. 2024.
- [18] W. Chen, H. Sun, X. Gu, et C. Xia, « Synchronized space-vector PWM for three-level VSI with lower harmonic distortion and switching frequency », in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, éd. 9, sept. 2016.
- [19] H. Jie, K. Y. See, Y. Chang, R. X.-K. Gao, F. Fan, et Z. Zhao, « Enhancing motor impedance measurements : broadening the spectrum from low to high frequencies », in *Measurement Science and Technology*, vol. 35, éd. 8, mai 2024.

BIOGRAPHIES

Jérémy Creux a obtenu son diplôme d'ingénieur en génie électrique à l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique, Université de Lorraine, Nancy, France, en 2020. En 2021, il a rejoint IFP Énergies Nouvelles, Rueil-Malmaison, France, où il prépare actuellement un doctorat, au sein de la direction Mobilité & Systèmes. Il fait également parti du Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA). Ses recherches actuelles portent sur la modélisation, la détection des défauts et le contrôle des systèmes d'entraînement électriques.

Najla Haje Obeid a reçu le titre de docteur de l'Université de Lorraine, Nancy, France, spécialisation en génie électrique, en 2016. Depuis, elle a rejoint la direction Mobilité & Systèmes d'IFP Énergies Nouvelles, Rueil-Malmaison, France. Ses recherches actuelles portent sur la modélisation, la détection de défauts et le contrôle des systèmes d'entraînement électriques.

Thierry Boileau a reçu le titre de docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, spécialisation en génie électrique, en 2010. En 2012, il a rejoint l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique, Université de Lorraine, Nancy, France, où il est actuellement Maître de Conférence. Il fait également parti du Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), avec lequel il obtient en 2025, l'Habilitation à Diriger des Recherches. Ses recherches actuelles portent sur le diagnostic et le contrôle des moteurs électriques alimentés par des onduleurs, ainsi que sur le contrôle des systèmes thermo-électriques.

Farid Meibody-Tabar a reçu le titre de docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, spécialisation en génie électrique, en 1986. Il intègre ensuite l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique, Université de Lorraine, Nancy, France, où il obtient l'Habilitation à Diriger des Recherches en 2000 et le poste de Professeur. Il fait également parti du Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA). Ses recherches actuelles portent sur l'architecture, la modélisation et le contrôle des systèmes électriques et des micro-réseaux, ainsi que sur le contrôle et le diagnostic des moteurs électriques alimentés par des onduleurs.