



HAL
open science

Diagnostic prédictif basé sur une modélisation HF du bobinage des machines électriques

Mustapha Toudji, Guillaume Parent, Stéphane Duchesne

► **To cite this version:**

Mustapha Toudji, Guillaume Parent, Stéphane Duchesne. Diagnostic prédictif basé sur une modélisation HF du bobinage des machines électriques. 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Oct 2018, Alger, Algeria. pp.1049–1054. hal-04114201

HAL Id: hal-04114201

<https://hal.science/hal-04114201>

Submitted on 5 Jun 2023

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.

Diagnostic prédictif basé sur une modélisation HF du bobinage des machines électriques

Mustapha Toudji¹, Guillaume Parent¹ and Stéphane Duchesne¹

¹Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE), F-62400 Béthune, France
stephane.duchesne@univ-artois.fr

Abstract—Le vieillissement des machines électriques est le plus souvent dû à une dégradation du Système d’Isolation Électrique (SIE). Ce dernier subit des contraintes mécaniques, thermiques, électriques ou environnementales durant tout le cycle de vie de la machine et les matériaux organiques dont il est composé perdent progressivement leurs propriétés isolantes. L’objectif de cette étude est de montrer qu’il est possible d’anticiper ces modifications et de les implémenter dans un outil de diagnostic prédictif permettant de mettre en évidence les paramètres qui seront les plus judicieux à surveiller durant le fonctionnement normal de la machine.

Index Terms—Système d’Isolation Électrique, Vieillissement, Diagnostic prédictif

I. INTRODUCTION

La surveillance des machines électriques est un enjeu majeur pour la continuité de service de nombreux process industriels. Il est donc indispensable de disposer d’outils performants pour prédire avec le plus de précision possible les défaillances des machines électriques. Ces causes peuvent être nombreuses, mais, parmi les principales, celles liées au Système d’Isolation Électrique sont les plus courantes [1]. En effet, les matériaux organiques utilisés pour les fonctions d’isolations s’avèrent particulièrement sensibles aux contraintes thermiques, mais aussi aux contraintes électriques générées par les onduleurs de tensions. Ceci conduit à une réduction sensible de la durée de vie des machines et souligne de manière encore plus forte la nécessité de mettre au point des outils capables de diagnostiquer l’état de santé du SIE [2]. Des études antérieures ont montrées la possibilité de diagnostiquer l’état de santé de l’isolation d’une machine en analysant les variations des fréquences de résonances du bobinage [3]. La difficulté repose sur l’étalonnage de la méthode qui requiert des mesures pour déterminer la bande de fréquence à suivre. Parallèlement d’autres études ont montrées qu’il était possible de modéliser avec une précision satisfaisante un bobinage de machine dans une bande de fréquence prédéterminée [4]. Cette étude se concentre sur l’utilisation d’une modélisation Haute Fréquence (HF) du bobinage des machines électriques pour en tirer un outil d’aide au diagnostic du SIE. La première partie rappellera sommairement les hypothèses permettant le développement d’un modèle à constante localisées. Dans une seconde partie, les phénomènes physiques impliquées dans le vieillissement des SIE seront brièvement exposés avant d’être reliés à la modélisation mise en oeuvre. La troisième partie montrera comment il est possible de simuler des vieillissements complets ou localisés de bobinages afin de mettre en évidence

les paramètres de surveillance les plus pertinents. Enfin, dans une dernière partie une analyse plus fine des résultats essaiera de localiser un défaut ponctuel au sein d’une bobine.

II. MODÉLISATION RLC DES BOBINAGES

Un modèle à constantes RLC localisées a été choisi pour représenter le bobinage d’une machine en choisissant une spire comme brique élémentaire du modèle. Les principaux phénomènes physiques apparaissant dans un bobinage à n -spires sont alors représentés par un élément spécifique (Figure 1).

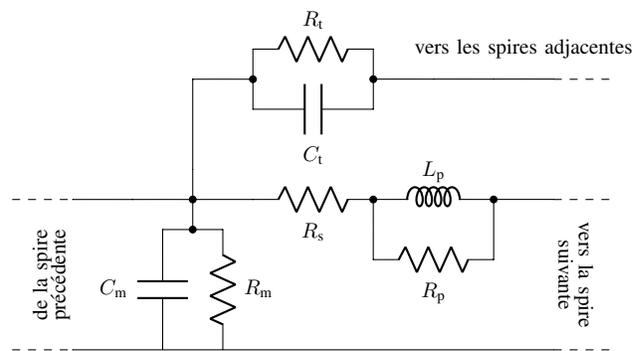


Fig. 1. Modèle à constantes localisées d’une seule spire.

Une spire est alors représenté par une résistance R_s en série avec une inductance L_p représentant respectivement les pertes joules et les phénomènes magnétiques. L’interaction magnétique entre les différentes spires est par ailleurs représentée par une inductance mutuelle notée M_{ij} se rapportant aux phénomènes intervenant entre la $i^{\text{ème}}$ spire et la $j^{\text{ème}}$ spire. L’adjacence inter-spores génère des déplacements de charges électriques dans l’espace inter-spores ainsi que des pertes diélectriques qui sont représentés par une capacité notée par C_t et une résistance notée par R_t . Ces deux éléments, placés en parallèle, relient uniquement les spires adjacentes. La présence du noyau magnétique se traduit par l’introduction de la résistance R_p , placée en parallèle de l’inductance principale afin de prendre en compte les pertes par courant de Foucault. Les phénomènes capacitifs sont également ajoutés à l’aide des éléments R_m et C_m .

À titre d’illustration, le circuit équivalent de la bobine de 6 spires présentée à la figure 3 est développé à la figure 2.

Sur ce modèle, chacun des noeuds (numéroté de 1 à 6) correspond à l’entrée d’une spire. Le noeud n°1 se rapporte ainsi à la première spire. Les couplages capacitifs et les pertes

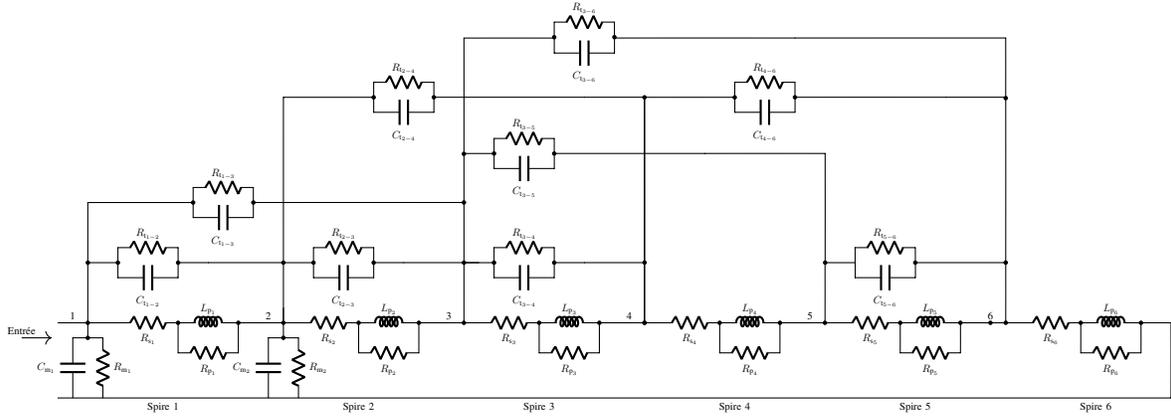


Fig. 2. Modèle d'une bobine à 6 spires.

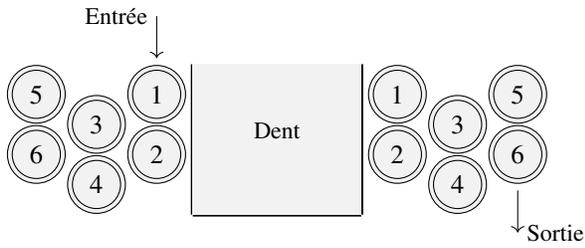


Fig. 3. Exemple d'une bobine à 6 spires.

diélectriques causés par la proximité des spires n°2 et n°3 sont exprimés par les éléments C_{1-2} , C_{1-3} , R_{1-2} et R_{1-3} . Sur ce schéma, les interactions magnétiques entre les spires ne sont pas représentées mais sont bien évidemment prises en compte. La spire n°1, est adjacente à la paroi de l'encoche, et possède alors une capacité par rapport à la masse C_{m1} associée à une résistance spire-masse R_{m1} . Il en va de même pour la spire 2, en revanche les spires suivantes n'étant plus contiguës au noyau ces deux éléments n'apparaissent plus. La même démarche est appliquée aux autres spires.

En utilisant une modélisation Éléments Finis (EF) 2D pour déterminer les différents paramètres du schéma [4], il est possible d'obtenir les réponses temporelles et fréquentielles présentées aux figures 4 et figure 5.

Ainsi, en partant de ce principe, il est possible de modéliser des bobinages bien plus complexes et de simuler leurs réponses temporelles ou fréquentielles.

III. VIEILLISSEMENT DES SIE

A. Effets physiques du vieillissement de l'isolation d'une machine

Un matériau isolant sujet au vieillissement est caractérisé par une perte progressive et irréversible de certaines de ses propriétés électriques. Compte tenu de leur structure complexe, les polymères, qui constituent les matériaux les plus courants, réagissent avec différents éléments de leur environnement (la chaleur, l'oxygène ambiant, la lumière, l'eau,...etc.). Il est possible de tirer de la littérature un classement des phénomènes agissant sur le vieillissement

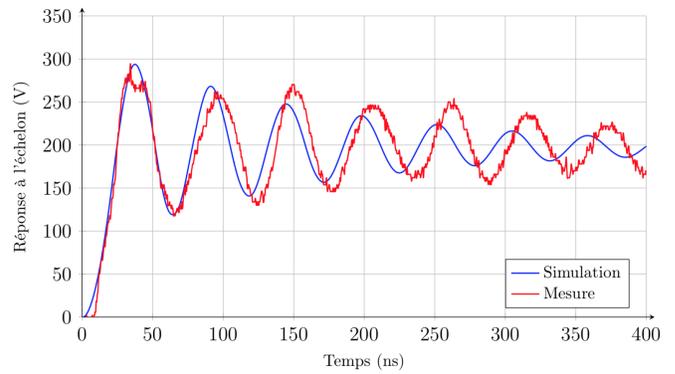


Fig. 4. Réponse à un échelon, simulée et mesurée

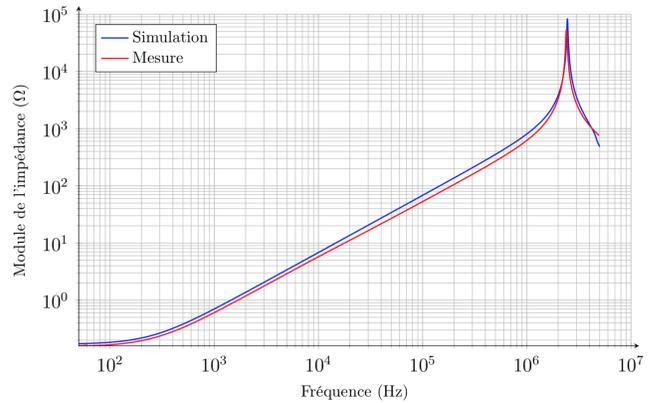


Fig. 5. Réponse fréquentielle, simulée et mesurée

d'un matériau isolant et de le subdiviser en plusieurs catégories [5], [6]. Les plus répandus restent les problèmes liés à l'interface cuivre-polymère, l'oxydation externe du polymère et le vieillissement interne de la matrice du polymère. Ces principaux facteurs du vieillissement provoquent une diminution du Seuil d'Apparition des Décharges Partielles (SADP) alors que la tension de fonctionnement du système

reste constante. Par conséquent, les Décharges Partielles (DP), qui n'apparaissent au départ que rarement et avec des énergies faibles, s'intensifient avec le vieillissement. Ce phénomène conduit à l'accélération du vieillissement et affaiblit l'isolation inter-spires du bobinage causant l'apparition de courts-circuits aléatoires entre les spires. Ces courts-circuits provoquent des échauffements qui, de proche en proche, accélèrent le vieillissement des couches organiques jusqu'à leur destruction. Ainsi, le vieillissement d'une machine électrique est principalement lié à la détérioration de son SIE. Par conséquent, la connaissance approfondie des différents phénomènes physico-chimiques agissant sur la dégradation du SIE permet d'envisager la mise au point de systèmes de surveillance de l'état de l'isolation avant sa destruction. Différentes méthodes de surveillance basées sur divers indicateurs existent déjà et permettent d'évaluer l'état de santé d'une machine :

- mesure de la résistance d'isolement et/ou de l'indice de polarisation [7] ;
- monitoring des décharges partielles [8], [9], [10] ;
- Surveillance du comportement haute fréquence des bobinages [11], [12];

C'est cette dernière méthode qui nous intéresse dans le cadre de cette étude. En effet, elle permet de détecter les signes du vieillissement dans la variation des fréquences de résonances du bobinage. C'est une méthode facile à implémenter, même "online", mais qui requiert une bonne connaissance des bandes de fréquence qu'il est judicieux de surveiller. C'est ici que l'apport d'un modèle HF du bobinage peut se révéler le plus pertinent. Ce dernier amène une dimension supplémentaire à la compréhension des phénomènes intervenant au coeur d'une bobine et qui sont, par nature, difficilement observables ou mesurables.

Cette méthode de surveillance de l'état de santé de l'isolation des bobinages a été développée et présentée dans plusieurs publications [12], [2] et repose sur une mesure indirecte de la capacité inter-spire du bobinage. La valeur de la capacité parasite résultante de la proximité de deux spires adjacentes est fortement dépendante du matériaux isolant et de la géométrie du bobinage. Il est donc aisé de déduire l'état de santé de ce matériaux d'une mesure de la capacité en postulant que la géométrie du bobinage n'évolue pas avec le temps. Cette hypothèse est parfaitement justifiée pour les machines imprégnées, qui constituent la grande majorité des machines électriques et pour lesquelles le vernis d'imprégnation prévient tous mouvements des spires les unes par rapports aux autres.

B. Indicateurs de vieillissement

Des essais de vieillissement accéléré sous contraintes thermiques menés au LSEE [11], [12] ont confirmé que le processus de vieillissement de l'isolation inter-spires influence fortement les valeurs des capacités inter-spires. En effet, le vieillissement de l'isolation provoque une augmentation significative de la capacité inter-spires et donc une variation au niveau de la fréquence de résonance de la bobine. Ceci a permis d'établir une corrélation empirique entre le vieillissement de l'isolation inter-spires et la variation

des valeurs des capacités inter-spires comme le montre la figure 6. Un indicateur fiable permettant la surveillance du vieillissement de SIE a donc pu être élaboré en le corrélant avec d'autres indicateurs plus classiques. Il repose sur la variation de la capacité inter-spire et est noté ΔC . Pour les SIE organiques où la présence de DP accélère fortement le mécanisme de vieillissement, la variation critique de l'indicateur ΔC a été définie en fonction des variations naturelles du SADP au cours du vieillissement du SIE. La corrélation claire obtenue entre l'augmentation significative de la capacité inter-spires et la réduction du SADP ainsi qu'avec la probabilité de rupture de l'isolation a confirmé que la capacité inter-spires peut être utilisée comme indicateur de vieillissement de l'isolation.

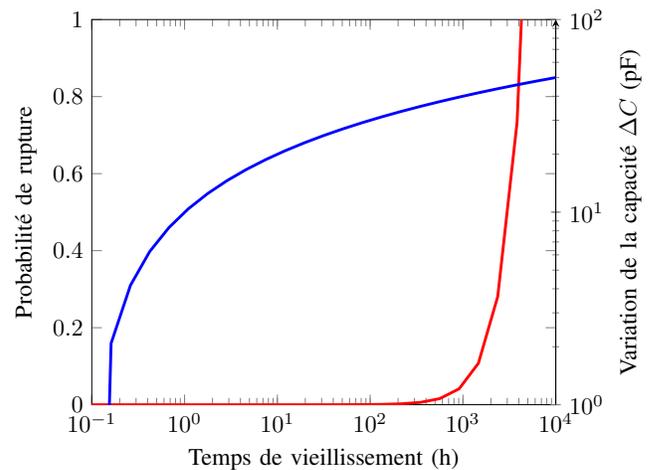


Fig. 6. Corrélation entre la probabilité de rupture d'une éprouvette torsadée (en rouge) et les variations de sa capacité parasite (en bleu) en fonction du temps de vieillissement

C. "Simuler" le vieillissement

Le vieillissement des bobinages se manifestant par une variation de la capacité inter-spire, il est aisé de faire varier ce paramètre dans le modèle HF présenté précédemment afin d'observer les modifications des fréquences de résonances obtenues en retour. En s'appuyant sur les variations des capacités inter-spires mesurées dans des conditions de vieillissement fixées, il est alors possible d'extrapoler le vieillissement d'un bobinage complet comme le montre le schéma de la figure 7.

En se basant sur les réponses fréquentielles ainsi obtenues, nous pouvons déterminer non seulement l'état de santé de la machine électrique mais il est également envisageable de déterminer dans une bobine, la couche de spires concernée par le vieillissement prématuré. En effet, à l'aide du modèle HF présenté, il est possible de remonter à la position et/ou à la sévérité du vieillissement.

Cet aspect représente le point fort de cet outil d'aide au diagnostic car les corrélations expérimentales restent globalisées et empiriques. L'analyse, à l'aide d'un modèle du bobinage, permet de mieux comprendre ces corrélations et d'éventuellement localiser les phénomènes dans l'encoche. Il

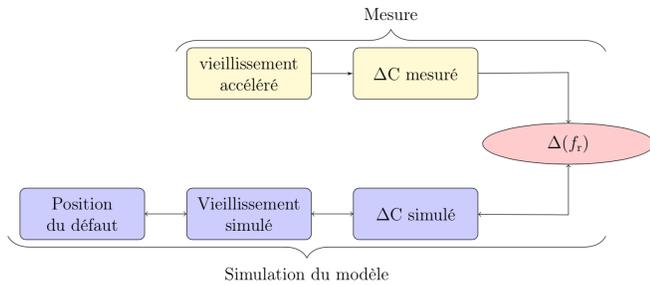


Fig. 7. Outil d'aide au diagnostic.

est alors possible de réaliser des simulations de vieillissement, de la totalité de la bobine, ou d'une portion très limitée afin d'observer le comportement des fréquences de résonance.

IV. RÉSULTATS

A. Bobine étudiée et méthodologie proposée

Pour analyser l'impact du vieillissement sur les fréquences de résonances, le modèle d'une bobine simple a été utilisé pour réaliser une simulation de vieillissement. Il s'agit d'une bobine de 34 spires composée de conducteurs méplats. La largeur des conducteurs est de 5 mm et leur épaisseur est de 2 mm (Figure 8).

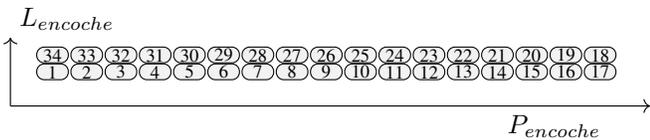


Fig. 8. Bobine étudiée

Pour cela, les valeurs de certaines capacités vont être modifiées de manière à prendre en compte la dégradation de la couche isolante.

Les variations des capacités ont été obtenues par interpolation des résultats expérimentaux obtenus dans [2]. Ces mesures ont été réalisées selon la norme CEI 60034-18-41 [13] qui stipule que des éprouvettes torsadées peuvent être utilisées pour tester le comportement de l'isolation inter-spires d'un bobinage. Les éprouvettes torsadées ont été fabriquées en respectant la norme NF EN 60172 [14]. Le protocole utilisé par l'auteur inclut trois groupes d'essais qui correspondent à trois températures différentes : 240 °C, 260 °C et 280 °C.

B. Étude d'un vieillissement général du bobinage

Pour cette simulation, une variation de la capacité inter-spires sous une contrainte de 240 °C est introduite dans le schéma électrique équivalent et appliquée à toutes les capacités inter-spires de la bobine. Ceci permet de simuler l'impact d'un vieillissement global d'une bobine complète et d'analyser l'impact de ce dernier sur l'évolution des fréquences de résonances, parallèle ou série.

La figure 9 présente les réponses fréquentielles obtenues avant le vieillissement ainsi que pour 10, 35 et 70 jours de vieillissement dans les conditions définies.

Cette simulation montre clairement l'influence du vieillissement sur les valeurs des fréquences de résonances parallèle et série. Cette influence peut s'observer dès les premiers jours sur la fréquence de résonance parallèle et à partir du 10^{ème} jour sur la fréquence de résonance série. Cette dernière se voit moins influencée par le vieillissement que la fréquence de résonance parallèle. A partir de ces résultats, les variations des fréquences de résonances, parallèle et série, ont également été tracées en fonction du stade de vieillissement des capacités inter-spires (10 et 11). Cette première observation de l'existence d'une corrélation entre le vieillissement des capacités inter-spires et les valeurs des fréquences de résonances, parallèle et série, peut être approfondie à l'aide d'autres séries de simulation de vieillissement visant à analyser le résultat obtenu lorsque les conditions d'essai diffèrent.

C. Étude d'un vieillissement localisé

Il est possible de faire vieillir une portion plus réduite du bobinage pour observer l'effet d'un défaut local. Pour ce cas, particulier, nous avons utilisé les données obtenues pour une contrainte plus sévère (280 °C) et nous avons réalisé une série de simulations donnant un vieillissement sur 8 jours. Une seule capacité inter-spire ($C_{t,2}$) est impactée par le vieillissement. Nous pouvons alors tracer, sur 8 jours, la variation de la première fréquence de résonance parallèle en fonction du vieillissement. La variation de cette fréquence au fil des jours par rapport à sa valeur initiale a aussi été tracée : $\Delta(fr_{para}) = fr_{para_0} - fr_{para_i}$ (Figure 12). De même, la variation de la première fréquence de résonance série est tracée ainsi que sa variation en fonction de sa valeur initiale (Figure 13).

Nous pouvons constater que l'amplitude des variations de fréquence est bien moins importante que lorsque la totalité du bobinage est impacté, cependant la tendance reste inchangée par rapport aux premières simulations. En se basant sur la même approche, il est possible d'observer le même comportement, lorsque le défaut apparaît entre d'autres spires, ou lorsqu'il touche un groupe de spires plus important.

Ces résultats de simulation montrent que la variation de la capacité inter-spires au fil du vieillissement influence la réponse fréquentielle de la bobine et donc les valeurs des fréquences de résonances de manière suffisamment importante pour être mesurées.

D. Localisation du défaut

Il est tentant d'observer les variations de fréquences obtenues en modifiant la position d'un défaut localisé afin d'essayer d'en tirer une corrélation. Dans cet essai, le défaut est déplacé à différents niveaux de profondeurs dans l'encoche dans ce but. La simulation est réalisée pour une contrainte de 280 °C comme précédemment. La Figure 14 montre les variations de fréquences de résonance obtenue après 8 jours en fonction de la position du défaut.

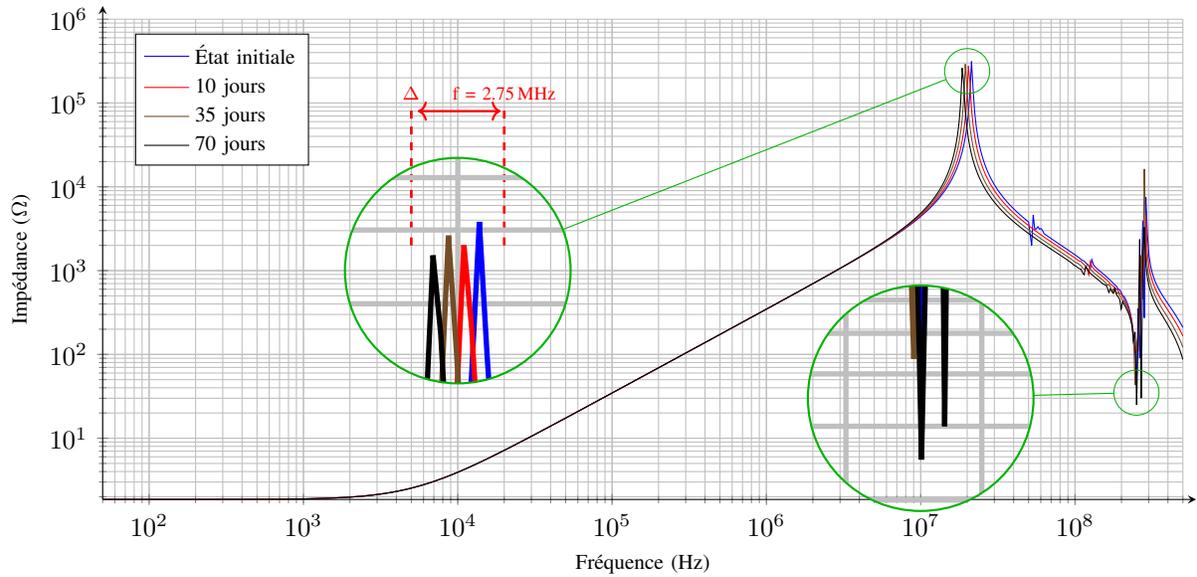


Fig. 9. Variation de la réponse fréquentielle de la bobine en fonction du vieillissement des capacités inter-spires.

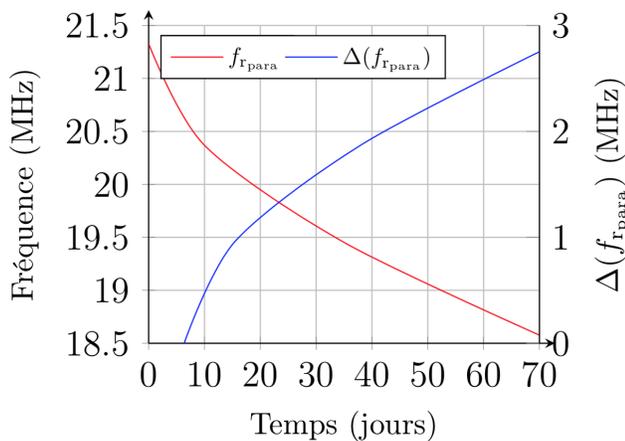


Fig. 10. Fréquences de résonance parallèle en fonction du vieillissement de la bobine.

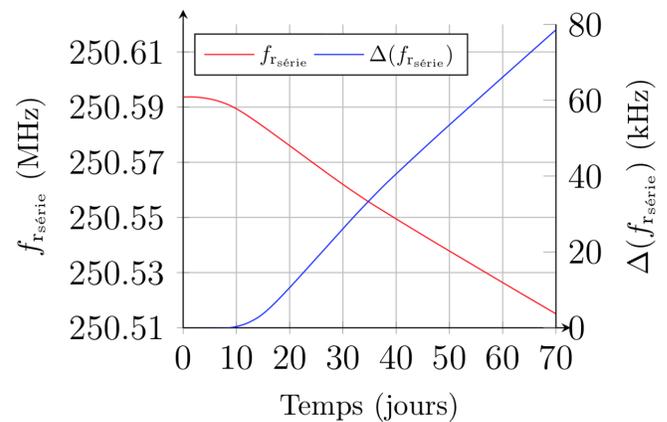


Fig. 11. Fréquences de résonance série en fonction du vieillissement de la bobine.

Ces résultats montrent que les variations des fréquences de résonances en fonction de l'emplacement du point chaud sont quasi-identiques aux deux extrémités de l'encoche. En effet, lorsque le point chaud se déplace du haut de l'encoche vers le milieu de celle-ci, les fréquences de résonances augmentent jusqu'à atteindre un maximum au milieu de l'encoche. Une symétrie peut donc être définie suivant un axe en direction de la profondeur de l'encoche. Par ailleurs, on peut constater que les fréquences de résonances varient de la même manière sur les deux couches.

V. DISCUSSION

Les résultats des simulations précédentes mettent en évidence la corrélation obtenue de manière empirique entre l'état de l'isolant inter-spire et les fréquences de résonance d'un bobinage. En utilisant des courbes de variations de la capacité

inter-spire issues de mesures réalisées sur des éprouvettes normalisées, il est possible de simuler le vieillissement d'un bobinage complet. Deux cas ont été analysés pour valider la démarche. Le premier rend compte d'un vieillissement assez lent de la totalité du SIE et permet de déterminer *a priori* la bande de fréquence à surveiller dans un contexte de health-monitoring. L'étude de cas précis, validés par des mesures comparatives permettra à terme de mettre au point un outil de surveillance particulièrement performant basé sur des seuils critiques de variation des fréquences analysées. Dans le second cas, des défauts plus ponctuels ont été implémentés. Ceci a permis de valider la sensibilité de la méthode de surveillance et de mettre en évidence une corrélation plus fine pouvant être porteuse d'informations sur la position d'un défaut localisé. Cette voie repose alors sur des analyses purement quantitative et non plus qualitative qui imposent

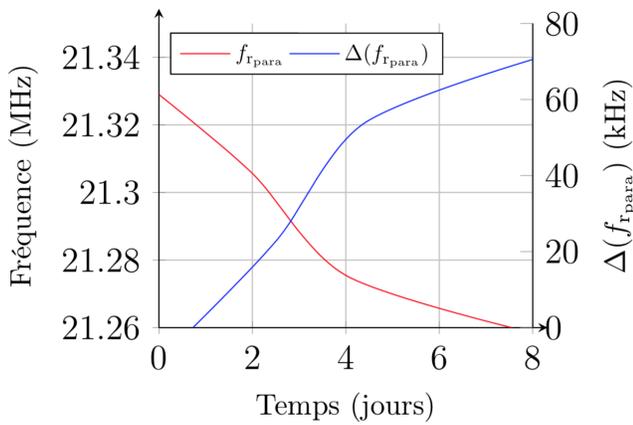


Fig. 12. Fréquences de résonance parallèle en fonction du vieillissement d'une capacité inter-spire

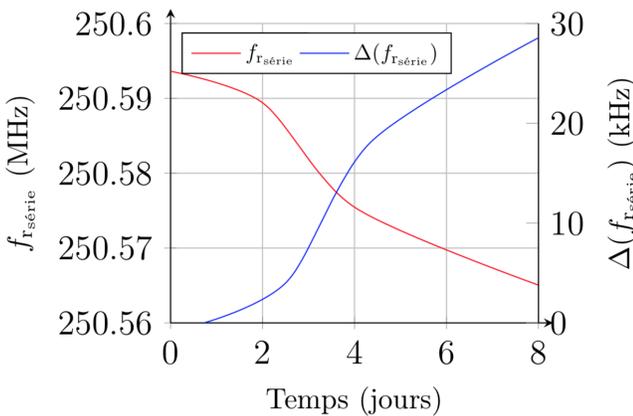


Fig. 13. Fréquences de résonance série en fonction du vieillissement d'une capacité inter-spire

d'analyser en profondeur et au cas par cas les bobinages étudiés.

Cette méthode s'avère néanmoins très prometteuse et peut être couplée avec des modélisations thermiques donnant la distribution de la température dans une encoche pour prédire la durée de vie du SIE d'une machine. Elle peut également être utilisée comme base d'une méthode inverse permettant de remonter à la nature d'un défaut depuis une mesure effectuée sur une machine présentant un problème d'isolation.

VI. CONCLUSION

Cette étude a montré la possibilité de s'appuyer sur un modèle HF pour déterminer les fréquences de résonances les plus pertinentes pour la surveillance de l'état de santé de l'isolation d'un bobinage. Les variations des fréquences parallèles et série ont été corrélées à la modification de l'état de l'isolation des conducteurs émaillés en fonction du temps de vieillissement à l'aide de simulation basées sur des mesures de la variation de la capacité inter-spire. Ces résultats de

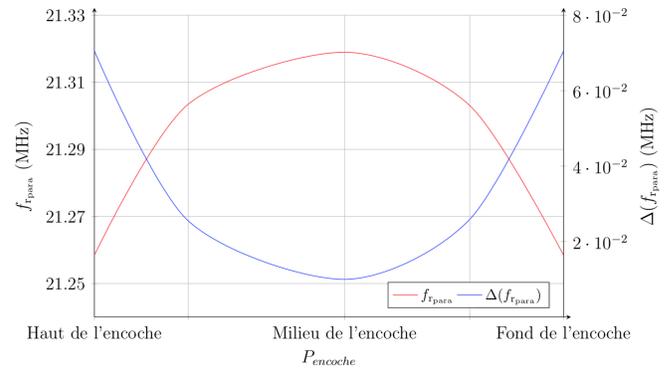


Fig. 14. Variation de la fréquence de résonance parallèle en fonction de la position d'un défaut localisé

simulation permettent d'espérer développer un outil d'aide au diagnostic qui permettra de détecter et de localiser la position de défauts ainsi que de zones critiques, grâce à l'analyse des fréquences de résonances parallèle et série.

REFERENCES

- [1] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001.
- [2] S. Savin, *Nouvel indicateur de vieillissement de l'isolation inter-spires des machines électriques utilisées en aéronautique*. PhD thesis, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement - Université d'Artois, 2013.
- [3] P. Werynski, D. Roger, F. Perisse, J. Brundny, and P. Schlupp, "Vieillessement des diélectriques et surveillance in situ des machines électriques," *Revue de l'électricité et de l'électronique*, vol. 11, p. 37, 2006.
- [4] M. Toudji, G. Parent, S. Duchesne, and P. Dular, "Determination of winding lumped parameter equivalent circuit by means of finite element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, pp. 1–4, June 2017.
- [5] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, vol. 9. IET, 1992.
- [6] NF-EN-60505, "Evaluation and qualification of electrical insulation systems," standard, AFNOR, Dec. 2011.
- [7] IEEE, "Ieee recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery," *ANSI IEEE Std 43-1974*, 1974.
- [8] R. Bartnikas, "Partial discharges. their mechanism, detection and measurement," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, pp. 763–808, Oct 2002.
- [9] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, and G. C. Montanari, "Advanced pd inference in on-field measurements. ii. identification of defects in solid insulation systems," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, pp. 528–538, June 2003.
- [10] A. Cavallini, A. Contin, G. C. Montanari, and F. Puletti, "Advanced pd inference in on-field measurements. i. noise rejection," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, pp. 216–224, April 2003.
- [11] F. Perisse, P. Werynski, and D. Roger, "A New Method for AC Machine Turn Insulation Diagnostic Based on High Frequency Resonances," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, pp. 1308–1315, Oct 2007.
- [12] P. Werynski, D. Roger, R. Corton, and J. F. Brudny, "On-line monitoring of insulation aging in ac motors fed by pwm inverters," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, pp. 1942–1948, May 2005.
- [13] C. 60034-18-41, "Méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinage émaillés," standard, AFNOR, June 1995.
- [14] NF-EN-60172, "Machines électriques tournantes - partie 18-41 : systèmes d'isolation électrique sans décharge partielle de type 1 utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par convertisseurs de tension - essais de qualification et de contrôle qualité.," standard, AFNOR, Mar. 2014.