



HAL
open science

Modeling random conductor distribution in stator winding slots: impact on common and differential-mode impedances

Arthur Piat, S Hlioui, Pierre-Etienne Lévy, François Costa

► **To cite this version:**

Arthur Piat, S Hlioui, Pierre-Etienne Lévy, François Costa. Modeling random conductor distribution in stator winding slots: impact on common and differential-mode impedances. Colloque international et l'exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique 2023, Jun 2023, Toulouse, France. hal-04429124

HAL Id: hal-04429124

<https://hal.science/hal-04429124>

Submitted on 31 Jan 2024

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.

MODÉLISATION DE LA DISTRIBUTION ALÉATOIRE DES CONDUCTEURS DANS LES ENCOCHES D'UN BOBINAGE STATORIQUE : IMPACT SUR LES IMPÉDANCES DE MODE COMMUN ET DIFFÉRENTIEL

A. Piat¹, S. Hlioui², P.-E. Lévy³, F. Costa⁴

¹IRT Saint Exupéry, 31400 Toulouse, arthur.piat@irt-saintexupery.com

²CY Cergy Paris Université, Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE, 91190, Gif-sur-Yvette, France,

sami.hlioui@ens-paris-saclay.fr

³ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, CNRS, SATIE, 91190, Gif-sur-Yvette, France,

pierre-etienne.levy@ens-paris-saclay.fr

⁴Université Paris Est Créteil, Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE, 91190, Gif-sur-Yvette, France,

francois.costa@ens-paris-saclay.fr

Résumé. Ce papier présente une méthodologie unifiée pour la modélisation des impédances de Mode Commun (CM) et de Mode Différentiel (MD) d'un moteur synchrone à aimants permanents. Cette dernière combine des méthodologies de modélisation par éléments finis (EF) à des simulations circuits à paramètres discrets de type Spice. Ces outils sont ensuite utilisés pour étudier un ensemble de bobinages avec un brassage aléatoire des conducteurs pour déterminer l'impact de la maîtrise de fabrication sur les performances CEM du système. Enfin, plusieurs représentations sont proposées et discutées pour aboutir à l'optimisation des performances CEM de ces composants.

I. INTRODUCTION

Ces dernières années, d'importants gains de performances dans l'avionique ont été réalisés via la substitution de systèmes utilisant des vecteurs d'énergies traditionnels (pneumatique, hydraulique...) par des systèmes électriques [1]. En parallèle, l'émergence de composants à large bande tel que les HEMT GaN et les MOSFET SiC promettent de réduire les pertes tout en augmentant la puissance des charges commandées en atteignant des fréquences de découpage plus élevées [2]. En revanche, leur fonctionnement à vitesse de commutation élevée augmentent significativement le spectre d'Interférence Electromagnétique (IEM) généré [3]. Ces dernières génèrent un ensemble de courants parasites pouvant perturber les systèmes adjacents [4] et doivent être restreintes, et ce pour respecter des normes différentes en fonction du domaine d'application [5]. Les outils pouvant dimensionner des systèmes de filtrage se basent soit sur des approches empiriques à base de mesures [6], [7], soit sur des modèles physiques se voulant prédictifs. Des approches utilisant des méthodes par éléments finis ont été utilisées pour des câbles [3] et des machines électriques [8], [9] permettant de cette façon de prédire entre quelques kHz et jusqu'à 10 MHz le comportement MC et MD, mais aussi dans certains cas les surtensions au sein des bobinages [10]. Enfin un modèle d'encoche pour prédire

la capacité de MC utilisant des fonctions de probabilité pour le placement aléatoire des conducteurs a exploré la question de la variabilité du bobinage [11]. Cependant l'association de conducteurs en parallèle ainsi que la position relative des spires entre elles demeure non explorée. Ce papier présente une méthodologie combinant des simulations par Éléments Finis (EF) à des simulations circuits Spice pour prédire le comportement des impédances de MC et MD entre 1 kHz et 10 MHz. En l'utilisant pour des répartitions plus ou moins aléatoires des conducteurs au sein des encoches, ces études mettent en lumière le besoin de maîtriser leur placement pour limiter les courants parasites induits par les convertisseurs.

II. MODELISATION ET HYPOTHESES

Pour étudier l'impact d'un brassage aléatoire, des paramètres ont été définis. Ces derniers sont intégrés à un processus de simulation automatisé pour être capable d'extraire les impédances de MC et MD en modifiant uniquement ces derniers. Pour cette étude, seuls les paramètres du bobinage ont été modifiés.

II.1. Nombre de conducteurs en main

Pour un point de fonctionnement donné, une machine peut être bobinée de multiples façons. Plus le nombre de conducteurs en parallèle sera important, plus on peut diminuer les pertes [12] et un ensemble de conducteurs de diamètre inférieur permettra de plus facilement bobiner une machine qu'un seul conducteur plus rigide. Chaque conducteur en parallèle est considéré comme ayant la même impédance et à la même surface de cuivre totale, l'échauffement est similaire pour les conducteurs.

II.2. Dispersion des conducteurs en parallèle

En fonction de la réalisation de la machine (processus manuel, industriel), les conducteurs en parallèle ne restent pas forcément groupés, certains peuvent s'être déplacés et mêlés à d'autres groupes. Ces différentes positions induisent un niveau d'interaction différent entre les spires dont l'impact sur le MC et MD n'a pas été quantifié.

II.3. Ordre et position des spires dans l'encoche

Dans une machine donnée, les spires ne sont pas forcément ordonnées les unes après les autres, mais probablement plus ou moins mélangées. Il a été démontré que cette position a un impact significatif sur les tensions interspires et les décharges partielles [10]. L'impact sur le MC et MD peut exister et ces travaux visent à les quantifier.

II.4. Placement des conducteurs dans l'encoche

Les conducteurs, placés dans les encoches, ne forment pas forcément un assemblage rangé. Un remplissage en vrac génère des espaces de haute densité et d'autre de faible densité [11] alors que d'autres machines à bobinage rangé rendent la position de chaque conducteur déterministe, non susceptible à des incertitudes. Ce problème n'est que partiellement traité dans ce papier. Pour traiter l'intégralité de ces points, un processus de remplissage des encoches en fonction du degré d'aléa de répartition et du nombre de conducteurs a été développé. Ce modèle calcule les positions géométriques nécessaires à la modélisation EF. L'algorithme mis en place permet de prendre en compte l'ensemble des configurations possible et sera détaillé dans la version complète de ce papier. Quatre configurations différentes générées par cet algorithme seront utilisées.

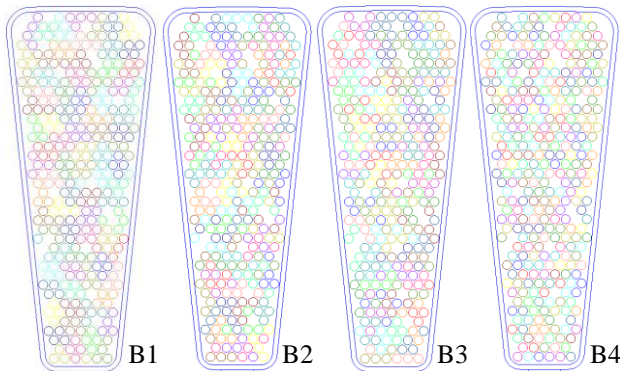


Fig.1. Illustration des quatre bobinages de l'étude, représentée sans émail classés par numéro de spire

Ces bobinages, notés B1, B2, B3 et B4 sont ordonnés selon l'ordre d'aléa appliqué dans ces derniers. Le placement des conducteurs a été gardé le même pour être conservatif entre les simulations et ne pas voir apparaître de différence dans le comportement MC à basse fréquence (BF), tel qu'illustré dans la référence [11]. Seule leur appartenance à une spire a été modifiée (80 spires, 4 fils en parallèle Fig.1) De ces arrangements découlent quatre modèles EF.

III. MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Quatre modèles sont générés par encoche, deux magnétiques pour extraire les matrices d'impédances complexe (phénomènes résistifs et inductifs) et deux électrostatiques pour calculer les matrices de capacité pour l'ensemble des conducteurs, dans l'air et dans les encoches.

III.1. Modélisation de l'encoche

Pour l'encoche, le problème est considéré plan. Les conducteurs d'une même spire sont mis à 1A ou 1V en fonction de la physique simulée. L'outil utilisé est FEMM [13] et va permettre d'extraire respectivement des matrices d'impédances complexes (regroupant inductances propres, mutuelles et résistances) dépendante de la fréquence ainsi qu'une matrice de capacité (supposée indépendante en fréquence). Dans le cas spécifique des simulations électrostatiques, le fond de l'encoche est au potentiel de référence.

III.2. Modélisation des têtes de bobines

Le même procédé que les encoches est répliqué pour les têtes de bobine, non plus sur un modèle plan, mais sur un modèle axisymétrique. Il est supposé que les bobines forment un demi-cercle parfait entre deux encoches et que l'interaction entre les différentes bobines comme avec le carter ou l'empilement de tôles est négligeable.

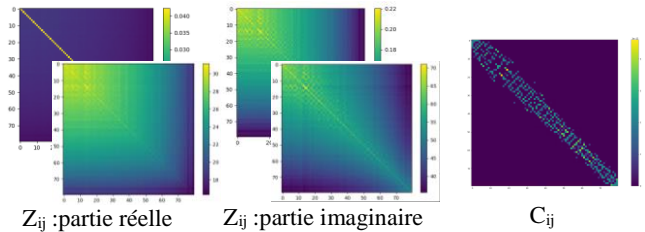


Fig.2. Matrices d'impédance magnétique et de capacité pour l'encoche B1

La Fig.2 montre à gauche un ensemble de matrices d'impédances dépendant de la fréquence et une matrice de capacités pour la configuration B1. Ces matrices sont intégrées dans une netlist Spice pour une simulation circuit. La diagonale constitue les effets propres au conducteur (inductance et résistance) pour les simulations magnétiques et la capacité par rapport au fond de l'encoche. Le reste des matrices représentent les coefficients de couplage et les capacités interspires, conformes à la représentation proposée dans [8]. Dans le cas des simulations magnétiques et pour obtenir des valeurs d'impédance représentative des effets de peau et de proximités, le maillage est affiné pour avoir des éléments deux fois plus petits que l'épaisseur de peau. Cet affinage augmente considérablement le temps de simulation. Ainsi pour cette étude, les fréquences étudiées se situent entre 1 kHz et 10 MHz.

IV. GÉNÉRATION DES FICHIERS SPICE

L'ensemble des matrices calculées sont intégrées dans un schéma circuit Spice sous forme de paramètres localisés. Le but est de répliquer une bobine, que l'on pourra ensuite associer en parallèle ou en série pour comparer à des mesures sur prototype.

IV.1. Résistances et inductances

Les résistances s'écrivent comme la partie réelle des matrices d'impédance, pour la diagonale suivant [8].

$$R_i = \text{réel}(Z_{ii}) \quad (1)$$

De façon similaire, un dipôle inductance sera utilisé pour modéliser l'inductance propre d'une spire, composé d'un ou plusieurs conducteurs en fonction de la configuration de la machine :

$$L_i = \text{imag}(Z_{ii})/\omega \quad (2)$$

IV.2. Inductances couplées et effets de proximité

Les inductances mutuelles dans les netlist Spice sont exprimées par des coefficients de couplages notés k qui peut être déduits des mutuelles et des valeurs propres :

$$k_{ij} = M_{ij}/\sqrt{L_i \cdot L_j} \quad (3)$$

Il reste à représenter la partie réelle de l'impédance mutuelle. Il n'existe pas de composant simple dans les netlist Spice pour implémenter ces valeurs. Dans [7], ces valeurs étaient ignorées, mais c'est dans [8] que leur intégration dans un modèle circuit a permis de mieux représenter les amortissements des résonances BF. Ce concept de « résistance mutuelle » a été amplement étudié pour les transformateurs [14] et représente l'impact combiné des effets de peau et de proximité entre conducteurs. Une modélisation de ces éléments pour notre bobine s'écrit :

$$V_i = \sum_j I_j \cdot R_{ij}, \forall i \neq j \quad (4)$$

Ces sources de tension utilisent des sources commandées (*Behavioral Voltage source*) et sont placées en série avec les inductances et résistances propres des conducteurs. D'autres façons d'intégrer ces éléments sont possibles [8].

IV.3. Capacités interspires et de fond d'encoche

Concernant les capacités, ces dernières sont ajoutées dans le schéma ; certaines placées entre les différentes spires d'autres entre les spires et la terre (fond de l'encoche). L'ensemble de ces dipôles sont assemblés dans un schéma visant à répliquer le bobinage de la machine comme illustré Fig.3.

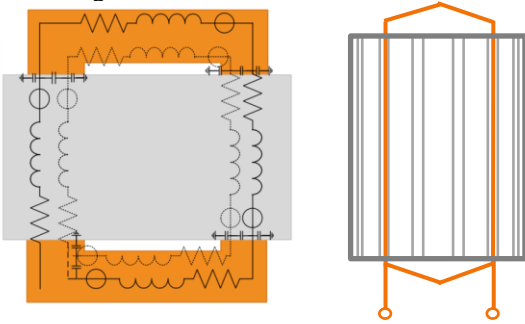


Fig.3. Illustration du circuit Spice généré avec vue en coupe simplifiée de la bobine correspondante

La dimension des têtes de bobines étant proche de celui du paquet de tôles, il a été important de modéliser ces deux parties dans le circuit. Toutes les résistances, inductances, mutuelles ainsi que les effets de proximité dépendent de la fréquence, le schéma Spice est par conséquent mis à jour pour chaque point de fréquence simulé. Deux simulations sont faites, répliquant une mesure en MC, entre l'entrée de

la bobine et la terre, puis en MD, entre l'entrée de la bobine et sa sortie. Ces simulations permettent d'obtenir des courbes d'impédance similaires aux conditions de mesures sur prototypes.

V. COURBES D'IMPÉDANCES

Les courbes d'impédances correspondant aux encoches de la Fig.1 sont montrées aux Fig.4 : la Fig.4 (a) correspond à l'impédance de MD tandis que la Fig.4 (b) correspond à l'impédance de MC. Les aspects BF sont peu impactés par le brassage des bobinages : pour l'impédance de MD, les effets de proximité et le couplage des inductances modifient légèrement la valeur d'inductance. Sur l'impédance de MC, la position des conducteurs ne changeant pas, la capacité équivalente BF est égale pour toutes les configurations, cette dernière étant exactement égale à la trace de C_{ij} (mise en parallèles des capacités conducteurs-carter).

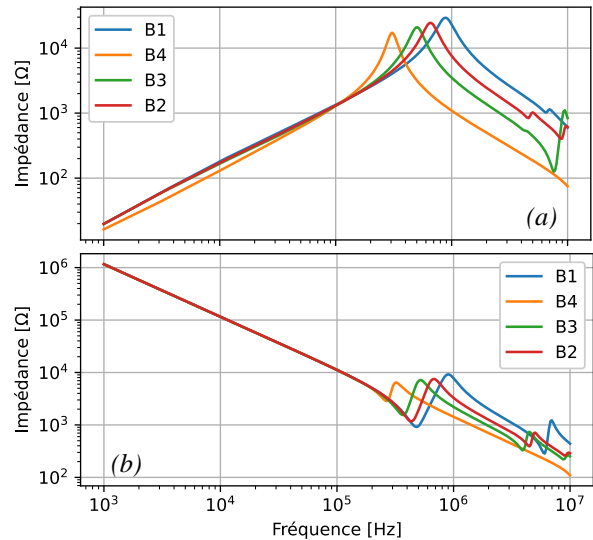


Fig.4. Impédance MD (a) et MC (b) obtenue pour les différentes configurations de bobinage

Les comportements diffèrent dès l'apparition de la première résonance ou antirésonance : plus le brassage des conducteurs et spires est important, plus les résonances apparaissent tôt sur le spectre fréquentiel. La valeur d'impédance après résonance étant une contribution de chaque élément, une analyse de l'énergie est proposée sur les différentes plages de fréquences. La Fig.5 montre une visualisation du ratio de l'énergie totale stockée dans le système pour chaque fréquence en MC. $C_{ij_encoche}$ et $C_{ij_tête}$ représente l'énergie stocké dans l'ensemble des interspires dans les encoches et tête de bobine respectivement, de même pour $C_{terre_encoche}$, $C_{terre_tête}$ qui est la somme de l'énergie stockée entre le carter et les conducteurs. Enfin, les inductances dans la partie encoche et air sont montré par les variables $L_encoche$ et $L_tête$. Ces graphes, tracés pour les bobines B1 et B3 en MC permettent de dire qu'à basse fréquence, seules les capacités par rapport à la terre impactent la valeur de l'impédance. Pour des conducteurs plus brassés, la première résonance arrive plus tôt et la contribution des

interspires sur l'impédance est plus prononcée. En revanche, pour des topologies de bobinages rangés, la contribution HF des interspires existe mais est moins importante que celle par rapport au carter (terre). Une analyse plus détaillée en MD et MC sera présentée dans l'article final.

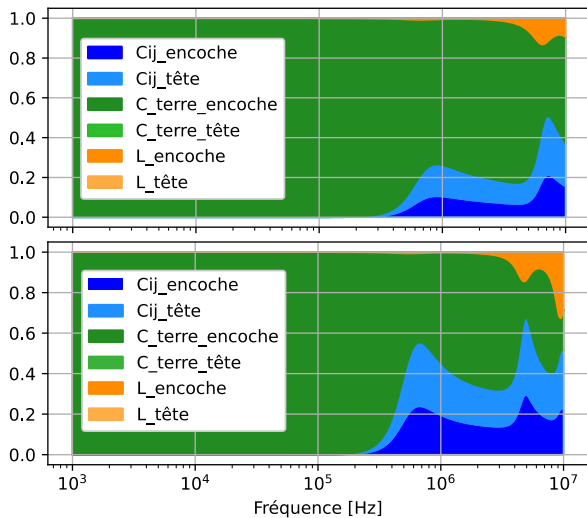


Fig.5. Proportion des stockages d'énergie en fréquence, simulation MC pour les bobines B1 et B3

VI. CONCLUSION

Cet article présente une méthode de modélisation uniformisée pour la caractérisation prédictive d'impédances de MC et de MD. L'utilisation de logiciels EF et d'un moteur Spice permet de générer des circuits dépendant des effets fréquentiels. Cette méthode est utilisée pour plusieurs bobinages avec différentes maîtrises de placement des conducteurs. Plus les conducteurs qui constituent une spire restent proches et les spires de niveau de tension similaires restent proches, plus les résonances HF se décaleront en haute fréquence. Une représentation, du stockage d'énergie pour chaque bobine lors des simulations, permet de cibler les effets prédominant sur chaque plage de fréquence et de faire des choix de design en conséquence. L'article final abordera aussi les perspectives sur les études d'incertitudes prévues dans le cadre de ce travail.

REFERENCES

- [1] R. Berger, M. Nazukin, N. Sachdeva and N. Martinez, "Think: Act Aircraft Electrical Propulsion - The Next Chapter of Aviation ?" Roland Berger LTD, 2017
- [2] H. H. Sathler, "Optimization of GaN-based Series-Parallel Multilevel Three-Phase Inverter for Aircraft applications". Diss. Université Paris-Saclay, 2021
- [3] V. Dos Santos, "Modélisation des émissions conduites de mode commun d'une chaîne électromécanique: Optimisation paramétrique de l'ensemble convertisseur filtres sous contraintes CEM". Diss. Toulouse, INPT, 2019.
- [4] Morgan, D., and B. Mulhall. "A Handbook for EMC Testing and Measurement." Measurement Science and Technology 6.5 (1995): 600.
- [5] Mariscotti, Andrea, and Leonardo Sandrolini. "Review of models and measurement methods for compliance of electromagnetic emissions of electric machines and drives." ACTA IMEKO (2021).
- [6] D. Zhao, K. Shen, W. Liu, L. Lang and P. Liang, "A Measurement-Based Wide-Frequency Model for Aircraft Wound-Rotor Synchronous Machine," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 7, pp. 1-8, July 2019, Art no. 8105408, doi: 10.1109/TMAG.2019.2900616.
- [7] Kohji Maki, Hiroki Funato and Liang Shao, "Motor modeling for EMC simulation by 3-D electromagnetic field analysis," 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009, pp. 103-108, doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075190.
- [8] Ruiz-Sarrio, Jose E., et al. "Impedance Modelling Oriented Towards the Early Prediction of High-Frequency Response for Permanent Magnet Synchronous Machines." IEEE Transactions on Industrial Electronics (2022).
- [9] N. Boucenna, F. Costa, S. Hlioui and B. Revol, "Strategy for Predictive Modeling of the Common-Mode Impedance of the Stator Coils in AC Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 12, pp. 7360-7371, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2594052
- [10] V. Mihaila, "Nouvelle Conception des bobinages statoriques des machines à courant alternatif pour réduire les effets négatifs des dV/dt ". Diss. Artois, 2011.
- [11] A. Hoffmann, B. Knebusch, J. O. Stockbrügger, J. Dittmann and B. Ponick, "High-Frequency Analysis of Electrical Machines Using Probability Density Functions for an Automated Conductor Placement of Random-Wound Windings," 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEMDC47953.2021.9449557.
- [12] M. S. C. Pechlivanidou and A. G. Kladas, "Litz Wire Strand Shape Impact Analysis on AC Losses of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motors," 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2021, pp. 95-100, doi: 10.1109/WEMDCD51469.2021.9425656.
- [13] D. Meeker, "Finite element method magnetics," FEMM, vol. 4, p. 161, 2020.
- [14] M. D'Antonio, S. Chakraborty and A. Khaligh, "Planar Transformer With Asymmetric Integrated Leakage Inductance Using Horizontal Air Gap," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 12, pp. 14014-14028, Dec. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3089606.