

Validation d'un modèle de bobinage par analyse fréquentielle

Loucif BENMAMAS^{1,2}, Philippe TESTE¹, Franck VANGRAEFSCHPEPE², Guillaume KREBS¹, Emmanuel ODIC¹, Tahar HAMIT², Eric BERTHELOT¹

¹ GeePs | Group of electrical engineering - Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06
3 & 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette CEDEX, France

² Institut VEDECOM | Véhicule Décarboné Communicant et sa Mobilité
77 rue des chantiers 78000 Versailles

RESUME – Les convertisseurs statiques de type MLI sont de plus en plus utilisés pour l'alimentation des bobinages statoriques des machines électriques. Ce type d'alimentation génère des fronts de tension raides après chaque commutation des IGBT. À haute fréquence, un bobinage n'a pas uniquement un comportement résistif et inductif : des capacités existent entre spires et entre spires et carcasse. Les effets de ces capacités deviennent non négligeables si bien que la répartition de la tension dans les spires peut être complexe. Dans le but de prédire le comportement électrique transitoire du bobinage, un modèle est élaboré. Ce modèle est ici validé par confrontation des résultats d'analyses fréquentielles obtenus sur un bobinage réel. Un bon accord entre ces résultats est trouvé sur une large gamme de fréquence, constituant la première étape d'une modélisation de la distribution des tensions dans les spires de la bobine ainsi alimentée.

Mots-clés—Bobinage – Machine électrique – MLI – Modélisation numérique – Éléments Finis – Circuit électrique équivalent – Analyse fréquentielle.

1. INTRODUCTION

Le travail présenté ici s'inscrit dans une étude plus vaste qui concerne l'étude des contraintes électriques et les phénomènes de dégradation de l'isolation électrique des machines basse tension alimentées en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Dans ces machines la répartition des tensions dans le bobinage se fait de manière non linéaire du fait des fronts de tension raides imposés par les convertisseurs statiques rapides [1]. Plusieurs travaux se sont intéressés au développement d'un modèle numérique capable de prédire l'évolution de la tension sur une phase d'un enroulement statorique [2][3][4]. L'approche la plus souvent utilisée consiste à assimiler l'ensemble bobine et câble d'alimentation à une ligne de transmission modélisée par un modèle RLC à éléments discrets par spire ou groupes de spires [5]. Dans cet article nous présentons un modèle visant à reproduire le comportement d'un bobinage dans une large gamme de fréquence tout en permettant une description des phénomènes électriques à l'échelle de la spire. L'objectif à long terme sera de reproduire au mieux le comportement de la bobine soumise à une excitation de type MLI.

La démarche adoptée pour effectuer ce travail est résumée en figure 1.

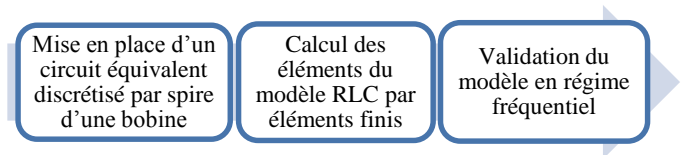


Fig.1 Démarche de travail adoptée

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le composant que nous avons modélisé est une bobine de 31 spires rangées en une seule couche. Deux cas ont été pris en compte : celui d'une bobine dans l'air et celui d'une bobine sur un noyau magnétique cylindrique en ferrite. Les caractéristiques de la bobine et du noyau sont présentées en figure 3.

3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

3.1. Circuit électrique équivalent

Le modèle équivalent que nous avons mis en œuvre consiste à considérer une discrétisation spire par spire de la bobine. Chaque spire est représentée par sa résistance propre R_i , son inductance propre L_i et sa capacité par rapport au noyau magnétique C_{i-0} (lorsqu'il est présente). L'ensemble des couplages capacitifs et inductifs entre spires sont également pris en compte par des capacités spire-spire C_{i-j} et des inductances mutuelles M_{i-j} (cf. schéma de la figure 2).

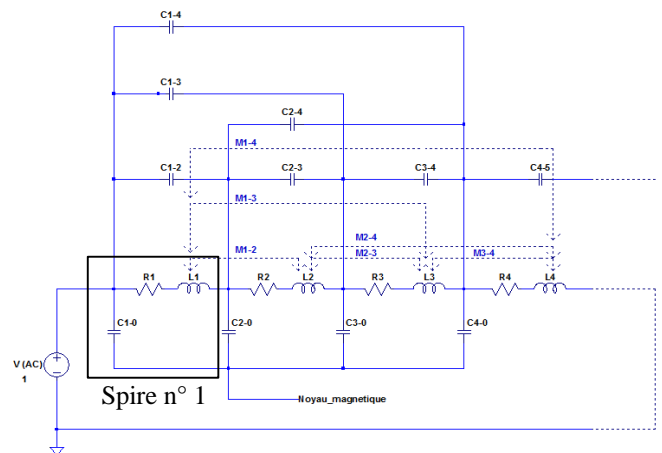
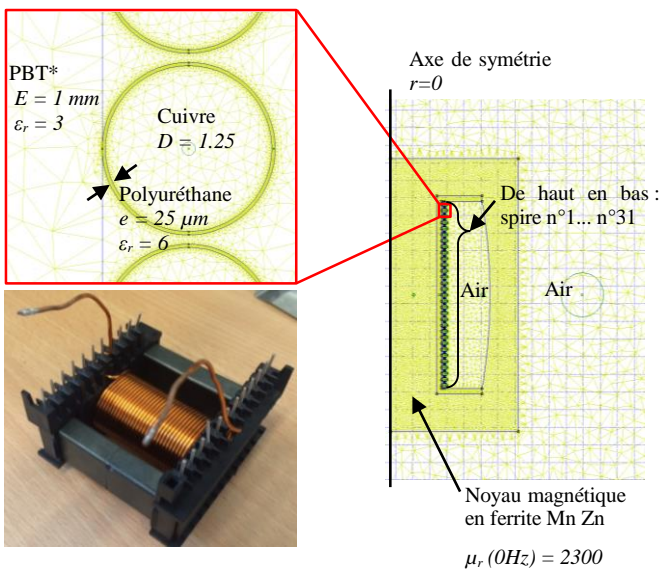


Fig.2 Circuit électrique équivalent d'une portion de 4 spires de la bobine autour du noyau magnétique.

3.2. Calcul des éléments du circuit équivalent

Une fois le modèle de la bobine et ses éléments RLC constitutifs définis, les paramètres sont calculés par éléments finis (EF) avec le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) [6]. Deux modules du logiciel sont utilisés pour le calcul des paramètres de la bobine : un module magnétostatique/magnéto-harmonique permettant le calcul des éléments inductifs et résistifs du circuit équivalent, et un module électrostatique pour le calcul des éléments capacitifs.

Dans le cas d'une bobine dans l'air, une description 2D axisymétrique de la bobine est adaptée. Par contre, le noyau magnétique en ferrite utilisé pour la seconde bobine n'a pas une géométrie axisymétrique (cf. figure 3), si bien qu'une modélisation 3D deviendrait nécessaire. Cependant, dans les deux cas nous avons opté, pour des raisons de temps de calcul, pour la modélisation 2D d'une géométrie axisymétrique équivalente en terme de circuit magnétique.



* PBT : Polybutylène téréphtalate

Fig.3 Géométrie maillée (sous FEMM) de la bobine étudiée

Le calcul magnétostatique/magnéto-harmonique a ainsi permis d'obtenir en fonction de la fréquence d'excitation (en veillant à adapter le maillage à chaque fréquence) :

- Les inductances propres de chaque spire,
- les inductances mutuelles spire/spire,
- les résistances de chaque spire (en prenant en compte l'effet de peau et l'effet de proximité).

Le calcul électrostatique a permis de calculer les valeurs des capacités spire-noyau C_{i-0} (dans le cas de sa présence) et les capacités spire-spire C_{i-j} .

4. RÉSULTATS

Pour la bobine décrite précédemment, nous avons comparé les impédances mesurées sur la bobine réelle avec celles calculées grâce aux différentes données du modèle et à la représentation de la bobine proposée en figure 2. Les mesures d'impédance ont été réalisées dans la gamme 100 Hz – 100 MHz à l'aide d'un analyseur d'impédance (HP 4294A). La comparaison a été effectuée pour les deux types de bobine (avec et sans noyau magnétique).

La figure 4 représente les courbes simulées et mesurées de l'évolution du module de l'impédance en fonction de la

fréquence pour les deux configurations considérées. On constate que dans le cas de la bobine dans l'air, les deux courbes se superposent quasiment sur toute la plage de fréquences, tandis que lorsque le noyau magnétique est présent, une légère différence entre la courbe simulée et la courbe mesurée apparaît au-delà de 1MHz. Dans les deux cas, les fréquences de résonance sont bien retrouvées.

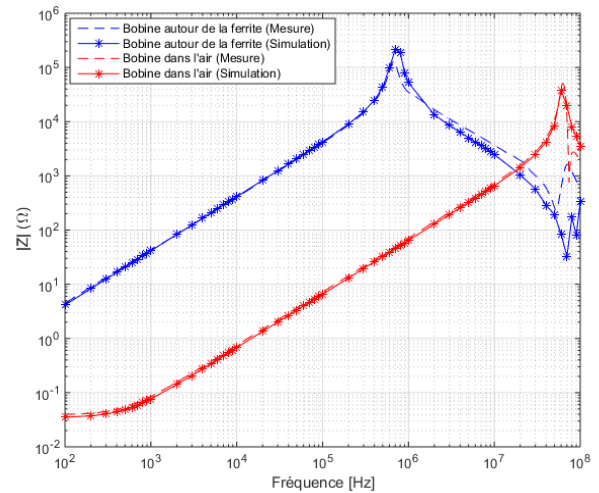


Fig.4 évolution de l'impédance en fonction de la fréquence, comparaison entre mesures et simulations

5. CONCLUSIONS

Ce travail a tout d'abord consisté en une démarche de modélisation d'un bobinage basée sur la théorie des lignes de transmission. La bobine étudiée a été discrétisée par spires et représentée par un circuit électrique équivalent RLC sous LTspice®. Le calcul de l'ensemble des éléments du circuit électrique équivalent a été conduit grâce à un logiciel EF. Deux configurations de bobine ont été simulées (bobine dans l'air et sur noyau magnétique) ; dans les deux cas, les simulations ont été validées expérimentalement dans le domaine fréquentiel. Dans la version finale de cet article, davantage de résultats seront présentés et discutés, notamment les résultats obtenus sur une bobine multicouches.

Les futurs travaux consisteront à valider ce modèle dans le domaine temporel, et plus particulièrement en régime transitoire.

6. REFERENCES

- [1] P. Bidan, T. Lebey, G. Montseny, and J. Saint-Michel, "Transient voltage distribution in inverter fed motor windings: experimental study and modeling", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 92–100, 2001.
- [2] G. Suresh, H. a. Toliyat, D. a. Rendusara, and P. N. Enjeti, "Predicting the transient effects of PWM voltage waveform on the stator windings of random wound induction motors", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 1, pp. 23–30, 1999.
- [3] A. Bohori, S. Ratadiya, N. Kumar, R. Mo, and T. Asokan, "Electro-coupling effect on the transient voltage distribution in PWM motor winding", *2007 Electr. Insul. Conf. Electr. Manuf. Expo, EEIC 2007*, pp. 150–155, 2007.
- [4] V. Mihaila, "Nouvelle Conception des bobinages statoriques des machines à courant alternatif pour réduire les effets négatifs des dV/dt ", Université d'Artois, thèse soutenue, décembre 2011.
- [5] C. Neacsu, "Contribution à l'étude des défaillances statoriques des machines asynchrones : Mise au point et réalisation d'un test non destructif de fin de fabrication", Université Paul Sabatier, thèse soutenue, février 2002.
- [6] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics 4.2", 2013.