

Extension vectorielle du modèle Loss Surface pour la modélisation de l'hystérésis statique et dynamique

L. Mikula^{1,2}, B. Ramdane¹, A. Kedous-Lebouc¹, and G. Meunier¹, C. Valdivieso²

¹Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab. F-38000, Grenoble, France

²Altair Engineering France. F-38240 Meylan, France

E-mail: brahim.ramdane@g2elab.grenoble-inp.fr

Résumé — Cet article propose une extension vectorielle du modèle Loss Surface pour modéliser numériquement les phénomènes hystériques statique et dynamique dans les simulations de dispositifs électromagnétiques contenant des matériaux ferromagnétiques doux supposés isotropes. La stratégie de vectorisation est basée sur l'approche de Mayergoyz. Le modèle développé a été implémenté dans le code de calcul éléments finis 2D. Le problème non linéaire est résolu en utilisant l'algorithme de Newton-Raphson avec une approximation exacte du tenseur de reluctivité magnétique. Plusieurs cas tests du problème TEAM 32 ont été étudiés à des fins de validation. Les résultats sont en accord avec les mesures combinant une bonne précision et un gain en temps de calcul.

I. INTRODUCTION

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique des dispositifs électromagnétiques, il est indispensable d'avoir une estimation précise des pertes. Par exemple, avec la généralisation de l'utilisation des moteurs électriques dans les applications de transport, les pertes fer dans le circuit magnétique de ces dispositifs sont devenues une part importante des pertes et leur réduction, même marginale, peut entraîner d'importantes économies globales.

Ces pertes sont calculées généralement par une analyse de ces dispositifs par la méthode des éléments finis (FEM). Dans ce contexte, le comportement non linéaire des matériaux ferromagnétiques est généralement représenté par une courbe d'aimantation scalaire et univoque. Les pertes dans ces matériaux sont ensuite calculées en post-traitement à partir des variations spatiales et temporelles de l'induction magnétique calculée avec des approches a posteriori telles que le modèle de Bertotti [1].

Cependant, même si l'estimation des pertes peut être précise avec ces méthodes, elles excluent les phénomènes d'hystérésis du calcul du champ magnétique. Dans le passé, plusieurs travaux ont abordé le problème de l'incorporation des modèles d'hystérésis dans les formulations FEM. Les modèles de Jiles-Atherthon et de Preisach sont les plus couramment utilisés [2].

Ces modèles scalaires ne peuvent décrire que le comportement hystérique des champs magnétiques unidirectionnels. Pour tenir compte des champs magnétiques rotationnels, tels que ceux qui apparaissent dans les dispositifs électromécaniques, une extension du modèle scalaire à une version vectorielle est nécessaire.

Par ailleurs, un modèle d'hystérésis appelé Loss Surface (LS) a été développé au G2Elab au cours des vingt dernières années et a fait ses preuves dans la prédiction des pertes dans les machines électriques [3]. Ce modèle est utilisé a posteriori dans les simulations FEM. Récemment, sa précision a été largement améliorée et étendue à la saturation et aux hautes fréquences [4], augmentant ainsi sa robustesse.

En outre, ce modèle scalaire est par définition un modèle $H(B)$ et est donc un bon candidat pour la vectorisation et l'implémentation dans une formulation FEM 2D.

Dans cet article, nous présentons une extension vectorielle du modèle LS en utilisant la méthode de vectorisation basée sur l'approche Mayergoyz [5]. Ce modèle est ensuite incorporé dans les formulations FEM2D afin d'inclure le comportement des matériaux pendant la résolution. Cette approche sera validée par comparaison avec des résultats de mesure.

II. MODELE LOSS SURFACE (LS) SCALAIRE

Le modèle LS utilisé dans ces travaux est un modèle scalaire d'hystérésis statique et dynamique, qui permet de reproduire le comportement magnétique d'un matériau en fonction de la forme d'onde et de la fréquence de l'excitation. Il s'agit d'un modèle $H(B)$ basé sur la connaissance de l'induction magnétique $B(t)$ et de sa variation temporelle dB/dt . Ce modèle s'appuie sur une superposition des deux parties statique H_{stat} et dynamique H_{dyn} :

$$H\left(B, \frac{dB}{dt}\right) = H_{stat}(B) + H_{dyn}\left(B, \frac{dB}{dt}\right) \quad (1)$$

Le champ magnétique statique H_{stat} est exprimée comme la somme de deux contributions réversible et irréversible :

$$H_{stat}(B) = H_{anhy} + H_{comp} \quad (2)$$

où H_{anhy} représente le champ magnétique anhystérique, que l'on suppose indépendant de l'histoire. Cette composante correspond à la courbe médiane d'une boucle d'hystérésis quasi-statique du matériau saturé. La dépendance à l'histoire est prise en compte par l'intermédiaire de H_{comp} , qui décrit la proportion du champ lié aux mécanismes irréversibles de déformation et de déplacement de parois des domaines.

La partie dynamique de ce modèle H_{dyn} est construite à partir d'une série de mesures ce qui permet de prendre en compte les courants induits macroscopiques ainsi que les pertes par excès. Plus de détails sur les expressions analytiques de chaque quantité du modèle scalaire présenté ci-dessus sont donnés dans [4].

I. MODÈLE LOSS SURFACE VECTORIEL

Dans cette section, nous présenterons l'approche de l'extension vectorielle du modèle LS développée. Elle est basée sur la méthode de Mayergoyz. L'idée principale de cette méthode est de combiner la contribution de modèles scalaires continuellement distribués dans l'espace. L'induction magnétique \mathbf{B} est projetée dans toutes les

directions et peut-être exprimée en 2D comme dans l'équation (3), où \mathbf{e}_ϕ est un vecteur unitaire le long de la direction définie par un angle ϕ .

$$\mathbf{B} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_\phi d\phi \text{ avec } \mathbf{e}_\phi = [\cos(\phi), \sin(\phi)] \quad (3)$$

Ensuite, chaque valeur projetée de \mathbf{B} sur une direction ϕ est considérée comme une entrée du modèle scalaire. Donc, chaque direction a sa propre histoire. Enfin, \mathbf{H} est obtenu par la somme vectorielle de chaque sortie des modèles scalaires.

$$\mathbf{H}(\mathbf{B}, \frac{d\mathbf{B}}{dt}) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \mathbf{e}_\phi \cdot \left(H_{Stat}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_\phi) + H_{Dyn}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_\phi, \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot \mathbf{e}_\phi) \right) d\mathbf{e}_\phi \quad (4)$$

Pour la partie statique, nous choisissons de ne projeter que la partie irréversible \mathbf{H}_{comp} , alors que la partie réversible \mathbf{H}_{anhy} , reste colinéaire à \mathbf{B} comme indiqué dans (5) :

$$\mathbf{H}_{Stat}(\mathbf{B}) = H_{anhy}(\|\mathbf{B}\|) \frac{\mathbf{B}}{\|\mathbf{B}\|} + \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \mathbf{e}_\phi \cdot \left(H_{Comp}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_\phi) \right) d\mathbf{e}_\phi \quad (5)$$

Ceci est physiquement cohérent car le déphasage entre \mathbf{H} et \mathbf{B} dans le cas d'un champ tournant est dû à l'irréversibilité du processus d'aimantation qui est estimé par \mathbf{H}_{comp} dans le modèle. Pour assurer l'équivalence entre les modèles scalaires et vectoriels, certaines quantités de \mathbf{H}_{comp} doivent être exprimées en considérant $\|\mathbf{B}\|$:

$$\mathbf{H}_{Comp}(\mathbf{B}) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \mathbf{e}_\phi \cdot \text{sign}(\Delta(\mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_\phi)) \left(H_{Comp}^{env}(\|\mathbf{B}\|) - \Delta H(\|\mathbf{B}\|, \mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_\phi) \right) d\mathbf{e}_\phi \quad (6)$$

Enfin, l'intégrale présente dans (4) est réalisée numériquement à l'aide de la quadrature de Gauss-Legendre.

I. INTEGRATION DANS UN CODE FEM2D

Cette section décrit la procédure de l'intégration du modèle dans un code de calcul éléments finis basée sur la formulation électromagnétique non linéaires transitoire en potentiel vectoriel magnétique \mathbf{A} en 2D.

Le problème transitoire est résolu à l'aide d'un schéma d'Euler implicite conventionnel. A chaque pas de temps, le problème non linéaire est résolu à l'aide de l'algorithme Newton-Raphson (NR). Pour assurer une bonne convergence, une approximation précise du tenseur de reluctivité incrémentale présentée ci-dessous (7) est nécessaire :

$$\left[\frac{d\mathbf{H}_{LS}(\mathbf{B}, \frac{d\mathbf{B}}{dt})}{d\mathbf{B}^t} \right] = \left[\frac{d\mathbf{H}_{Anhy}}{d\mathbf{B}^t} \right] + \left[\frac{d\mathbf{H}_{Comp}}{d\mathbf{B}^t} \right] + \left[\frac{d\mathbf{H}_{dyn}}{d\mathbf{B}^t} \right] \quad (7)$$

Comme décrit dans la section II, toutes les quantités constitutives du modèle Loss Surface sont exprimées par des fonctions analytiques. Ainsi, un calcul exact du tenseur est possible. Cela permet une meilleure convergence du problème non linéaire et un gain de temps de calcul. Le calcul détaillé de (7) sera présenté dans l'article étendu.

I. VALIDATION ET RÉSULTATS

Pour valider le modèle, nous avons comparé les résultats de mesures effectuées sur le cadre d'Epstein et ceux obtenus en utilisant le modèle classique de Preisach. Dans ce cas, le modèle est complété par une résolution de l'équation de diffusion dans la profondeur de la tôle. Les résultats sont présentés dans la figure 1 et mettent en évidence un très bon accord avec les mesures pour l'approche proposée à 400Hz.

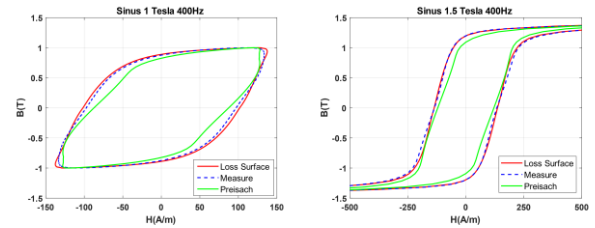


Fig. 1 Cycle d'hystérésis à 400Hz avec une excitation : (a) 1T, (b) 1.5T

Le modèle est ensuite utilisé pour l'étude du problème TEAM32 qui est un workshop international dédié à la modélisation de l'hystérésis vectoriel [6]. C'est un transformateur à trois colonnes avec deux enroulements placés sur les colonnes externes qui peuvent être connectés ensemble ou alimentés par deux sources de tension indépendantes. La géométrie du problème étudié est décrite en détail dans [6]. Plusieurs cas tests ont été expérimentés. Nous choisissons de présenter ici le cas test n° 2 avec des enroulements connectés en série et donc alimentés par le même courant sinusoïdal à 10 Hz. Le signal est déformé avec l'harmonique n°5 en phase avec le fondamental.

A titre de comparaison, le même dispositif a été modélisé dans le logiciel Altair-Flux. Dans Flux, le même maillage a été utilisé et le comportement hystérique du circuit magnétique a été décrit par le modèle vectoriel de Preisach [2]. Pour le problème FEM, la géométrie est maillée avec 3000 éléments triangulaires du premier ordre. Deux périodes avec 200 pas de temps par période ont été simulées.

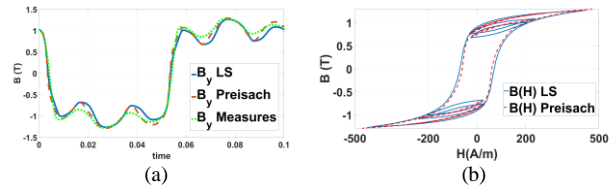


Fig. 2 : (a) Induction magnétique calculées et mesurées au niveau du capteur P1, (b) Cycle d'hystérésis

Les cycles d'hystérésis obtenus dans les deux cas sont représentés dans la figure 2, il y a une bonne concordance entre les résultats de la mesure, le modèle proposé et le celui de Preisach. Cependant, le modèle LS vectoriel permet une meilleure représentation des cycles mineurs générés par le 5^{ème} harmonique comme on peut le voir dans la figure 2.b.

Les résultats montrent la capacité du modèle à prédire les pertes par hystérésis avec précision avec de très bonnes performances numériques (au maximum, une dizaine d'itérations NR est requise pour chaque pas de temps).

REFERENCES

- [1] G. Bertotti, "Hysteresis in magnetism for physicists, materials scientists and engineers", Gulf Professional Publishing, 1998.
- [2] M. Tousignant et al., "Incorporation of a Vector Preisach-Mayergoyz Hysteresis Model in 3-D Finite Element Analysis", IEEE Trans. Magn., vol. 55, pp. 1-4, June 2019.
- [3] A. Frias et al., "Loss minimization of an electrical vehicle machine considering its control and iron losses", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no 5, p. 1-4, 2016.
- [4] A-T Vo, M. Fassenet, A. Kedous-Lebouc, "New formulation of Loss Surface Model for accurate iron loss modeling at extreme flux density and flux variation: Experimental analysis and test on a high-speed PMSM" Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol 563, 2022.
- [5] I. D. Mayergoyz, "Vector Preisach hysteresis models (invited)", Journal of Applied Physics, vol. 63, pp. 2995-3000, April. 1988.
- [6] O. Bottauscio, M. Chiampi, C. Ragusa, L. Rege, and M. Repetto, "A test case for validation of magnetic field analysis with vector hysteresis" IEEE Trans. Magn., vol. 38, n° 2, pp. 893-896, Mar. 2002.