

Implantation d'un modèle d'hystérésis statique dans un simulateur circuit pour l'étude des composants passifs en électronique de puissance

Fabien Sixdenier*, Riccardo Scorretti*[†], Antonio Faba[‡]

*Université Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

[†]Centre for Electric and Magnetic Applied Research, Perugia, Italy

[‡]Polo Didattico Scientifico di Terni, Strada Pentima Bassa n. 4, 05100 Terni, Italy

Email : fabien.sixdenier@univ-lyon1.fr

Résumé—Les simulateurs circuit sont aujourd'hui indispensables dans la conception des convertisseurs statiques en électronique de puissance. Les composants magnétiques sont, le plus souvent, considérés comme idéaux (linéaires et sans pertes). Cet article propose une implémentation du modèle d'hystérésis "Energetic Based" dans le simulateur circuit LTspice afin de prendre en compte les non-linéarités et les pertes pour des applications en électronique de puissance. Certains résultats seront comparés à des mesures expérimentales sur un hacheur "buck".

I. INTRODUCTION

La phase de conception des convertisseurs statiques (hacheurs, onduleurs, flyback,...) passe nécessairement par plusieurs simulations de type circuit pour étudier le comportement du convertisseur en fonction de paramètres très variés (fréquence, rapport cyclique, niveaux de tension/charge,...). Pour prendre en compte les imperfections des composants actifs, la bibliothèque des composants actifs est assez fournie dans les logiciels eux-mêmes et il existe, en plus, sur les sites de fabricants de composants des modèles "SPICE" de composants qu'on peut télécharger et utiliser si besoin. Pour les composants passifs magnétiques, comme les inductances, la bibliothèque est naturellement plus restreinte, pour plusieurs raisons. La première est que bien souvent ces composants sont fabriqués sur mesure en changeant le nombre de spires et l'entrefer principalement. Ce qui conduit à un nombre de possibilités quasi infini. Qui plus est les phénomènes magnétiques, comme l'hystérésis, sont souvent très complexes à prendre en compte. Il existe, malgré tout, un certain nombre de références dans la littérature où des modèles d'hystérésis ont été implémentés dans des simulateurs circuit. Par exemple, le modèle de Jiles-Atherton (JA) [1] a été implémenté dans PSPICE®[2] et le modèle de Preisach (PM) [3] a été implémenté dans SABER®. Le modèle d'hystérésis "Energy Based" [4] a, lui été implémenté dans [5] et les résultats comparés à des simulations éléments finis (Onelab) où l'EB modèle est aussi implémenté. Dans cet article, nous présentons le principe du modèle d'hystérésis (EB), quelques détails de son implémentation dans LTspice® et les résultats de son implémentation comparés à des mesures expérimentales sur un hacheur de type buck.

II. MÉTHODES

A. Le modèle d'hystérésis "Energy based"

Le modèle d'hystérésis EB [4] sépare le champ \mathbf{h} en une partie réversible \mathbf{h}_{re} et une partie irréversible \mathbf{h}_{ir} :

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_{re} + \mathbf{h}_{ir} \quad (1)$$

Pour une meilleure précision, on décompose \mathbf{h}_{re} comme une somme pondérée de \mathbf{h}_{re_k} d'un certain nombre de cellules N :

$$\mathbf{h}_{re} = \sum_{k=1}^N \omega_k \mathbf{h}_{re_k} \quad (2)$$

Avec $\omega_k \geq 0$ le poids associé à la cellule k . Les poids doivent vérifier la relation $\sum_{k=1}^N \omega_k = 1$. Le terme \mathbf{h}_{re_k} peut être vu comme l'état interne de la cellule k . A mesure que \mathbf{h} varie dans le temps, \mathbf{h}_{re_k} est modifiée avec la mise à jour :

$$\mathbf{h}_{re_k} = \begin{cases} \mathbf{h}_{re0_k} & \text{if } \|\mathbf{h} - \mathbf{h}_{re0_k}\| < \kappa_k \\ \mathbf{h} - \kappa_k \cdot \frac{\mathbf{h} - \mathbf{h}_{re0_k}}{\|\mathbf{h} - \mathbf{h}_{re0_k}\|} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

Où κ^k est le champ d'accrochage (pinning field) de la cellule k . L'aimantation \mathbf{M} est donnée par :

$$\mathbf{M} = M_{an}(\|\mathbf{h}_{re}\|) \cdot \frac{\mathbf{h}_{re}}{\|\mathbf{h}_{re}\|} \quad (4)$$

Où $M_{an}(\|\mathbf{h}_{re}\|)$ est une fonction anhistérique scalaire. Ici, nous utilisons la fonction de Langevin (5).

$$M_{an}(h) = M_s \left[\coth\left(\frac{h}{h_0}\right) - \frac{h_0}{h} \right]. \quad (5)$$

Enfin \mathbf{b} est simplement donné par (6)

$$\mathbf{b} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{h}) \quad (6)$$

Les paramètres à identifier sont $M_s, h_0, (\omega_k, \kappa_k), k = 1, \dots, N$. Ceci peut se faire avec uniquement des mesures unidirectionnelles [9], and le tableau I résume les paramètres identifiés pour un matériau ferrite N30 du fabricant TDK.

TABLE I
VALEURS DES PARAMÈTRES IDENTIFIÉS POUR UN FERRITE N30

$M_s(A/m)$	3.10983e5		$h_0(A/m)$	10.89	
ω_k	0.4235	0.372	0.142	0.063	0.00522
$\kappa_k(A/m)$	0	8.92	23.3	40.6	188

B. Simulation SPICE

Le tore magnétique a été modélisé comme un tube de flux magnétique dans lequel est implémenté le modèle d'hystérésis EB [5]. Des composants spéciaux pour le tore ainsi que pour les bobinages ont été créés. La figure 1 montre le tore bobiné avec un bobinage d'excitation pour réaliser la fonction d'inductance. Un second bobinage est présent uniquement destiné à la mesure et de la diode sont les mêmes que sur le montage expérimental.

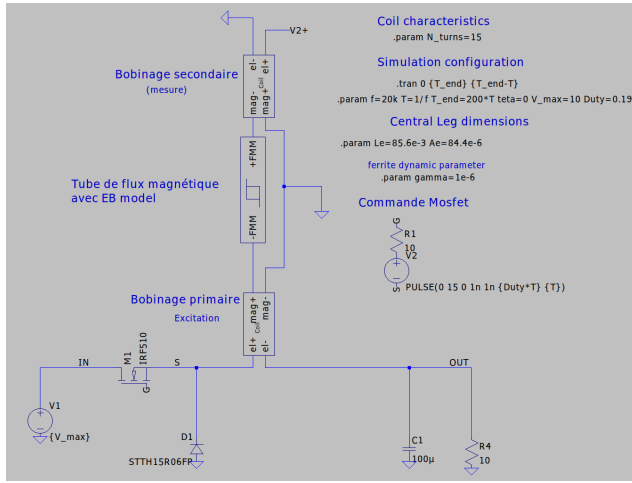


FIGURE 1. Simulation d'un hacheur buck avec un composant magnétique composé de 15 spires et d'un tore en ferrite N30 de longueur moyenne $\ell_m = 85.6$ mm et de section droite $A_e = 84.4\text{mm}^2$

III. RESULTS

Les figures 2 et 3 présentent les formes d'onde (courant et tension) du composant magnétique mesurées et simulées par notre modèle pour deux valeurs de rapport cyclique. Le rapport cyclique de 19% correspond à une situation où le composant magnétique travaille dans sa zone linéaire tandis que le rapport cyclique de 50% correspond à un fonctionnement où l'inductance sature en partie. On voit bien le pic de courant provoqué par cette dernière situation et celui-ci est bien retrouvé par notre simulation.

IV. CONCLUSION

Le modèle d'hystérésis EB a été implémenté dans un logiciel de simulation circuit afin de modéliser une inductance composé d'un tore magnétique en ferrite N30. Plus de détails sur l'implémentation et des résultats seront présentés dans la version étendue.

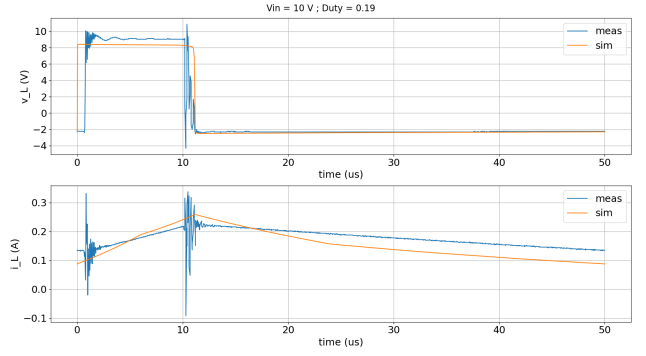


FIGURE 2. Tension aux bornes et courant mesurés (bleu) et simulés (orange) traversant l'inductance pour un rapport cyclique $\alpha = 0.19$

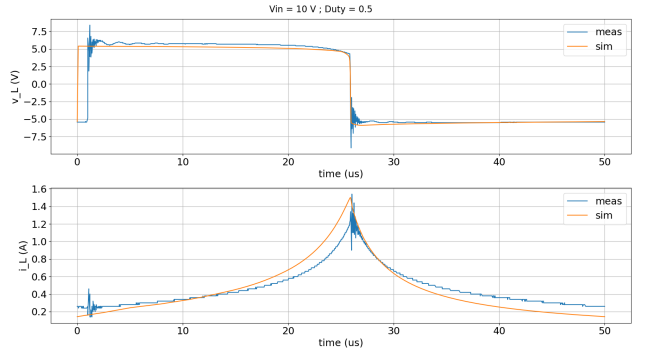


FIGURE 3. Tension aux bornes et courant traversant l'inductance pour un rapport cyclique $\alpha = 0.5$

RÉFÉRENCES

- [1] D. Jiles and D. Atherton, "Ferromagnetic hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 19, no. 5, pp. 2183–2185, 1983.
- [2] K. Ngo, "Subcircuit modeling of magnetic cores with hysteresis in ps-pice," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 1425 – 1434, 11 2002.
- [3] F. Preisach, "Über die magnetische nachwirkung," *Zeitschrift für Physik*, vol. 94, no. 1, pp. 277–302, 1935.
- [4] F. Henrotte, A. Nicolet, and K. Hameyer, "An energy-based vector hysteresis model for ferromagnetic materials," *COMPEL*, vol. 25, no. 1, pp. 71–80, 2006.
- [5] F. Sixdenier, R. Scorretti, N. Davister, C. Geuzaine, and F. Henrotte, "Energetic based hysteresis model implementation in LTspice," in *Compumag 2022*, Cancun, Mexico, Jan. 2022. [Online]. Available : <https://hal.science/hal-03540757>
- [6] F. Sixdenier and R. Scorretti, "Numerical model of static hysteresis taking into account temperature," *International Journal of Numerical Modelling : Electronic Networks, Devices and Fields*, pp. e2221–n/a, 2017, e2221 jnm.2221. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1002/jnm.2221>
- [7] K. Jacques, S. Steentjes, F. Henrotte, C. Geuzaine, and K. Hameyer, "Representation of microstructural features and magnetic anisotropy of electrical steels in an energy-based vector hysteresis model," *AIP Advances*, vol. 8, no. 4, p. 047602, 2018.
- [8] R. Scorretti and F. Sixdenier, "An analytical formula to identify the parameters of the energy-based hysteresis model," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, p. 168748, 2021.
- [9] M.-R. Longhitano, F. Sixdenier, R. Scorretti, C. Geuzaine, F. Henrotte, and L. Krähenbühl, "Comparison of identification protocols of a static hysteresis model," in *2019 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG)*, 2019, pp. 1–4.