






Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/28148>

To cite this version:

Amirdehi, Saba  and Vidal, Paul-Etienne  and Trajin, Baptiste 
and Vally, Johana and Colin, Didier *Identification des paramètres d'un transformateur d'un banc de test ferroviaire à échelle réelle.*
(2021) In: Symposium de Génie Electrique (SGE'21), 6 July 2021 - 8 July 2021 (Nantes, France).

Any correspondence concerning this service should be sent
to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Identification des paramètres d'un transformateur d'un banc de test ferroviaire à échelle réelle

Saba AMIRDEHI^{1,2}, Paul-Etienne VIDAL¹, Baptiste TRAJIN¹, Johana VALLY², Didier COLIN²

¹Laboratoire Génie de Production (LGP), Université de Toulouse, INP-ENIT, Tarbes, France

²ALSTOM, Tarbes, France

RESUME – Cette étude aborde le problème de l'identification in situ des paramètres d'un modèle de transformateur mis en œuvre dans une chaîne de traction ferroviaire. Le modèle considéré permet de rendre compte du comportement non linéaire de l'inductance magnétisante du transformateur. L'identification se base sur des données expérimentales où le cycle $B(H)$ n'est pas considéré dans son intégralité. Des résultats expérimentaux et des simulations sont comparés afin de valider la démarche et le modèle.

Mots-clés—Identification, Transformateur, Modélisation non linéaire, Expérimentation.

1. INTRODUCTION

Le cycle de conception d'une chaîne de traction nécessite des étapes de validation et de vérification qui sont coûteuses pour l'entreprise. Ces étapes peuvent également révéler des points critiques en termes de risques pour le système. Dans le cas d'une chaîne de traction ferroviaire, le transformateur d'entrée est un organe essentiel qui représente le coût le plus élevé de l'ensemble des composants. Afin de réduire les coûts, un lot du programme Européen Shift 2 Rail propose de renforcer l'effort mis sur la vérification et la validation numérique. A cette fin, les modèles des sous-systèmes de la chaîne de traction doivent être optimisés pour rendre compte de leur comportement sur une large bande de fréquence et de fonctionnement. Le transformateur, notamment, a un comportement non linéaire, qui ne peut être négligé sous faible charge. L'état de l'art propose des modèles non idéaux de transformateurs, [1] [2], mais qui ne tiennent pas compte des effets électromagnétiques internes au transformateur. Sans aller jusqu'à l'utilisation de modèles éléments finis [3], nous proposons de modéliser le comportement non linéaire du noyau du transformateur par un modèle de type Jiles-Atherton [4], [5]. L'identification des paramètres du modèle de transformateur est faite à partir des mesures obtenues sur un banc de test à échelle réelle. L'intérêt de cette méthode est de vérifier que les paramètres du modèle initial pourront être mis à jour au cours de la vie de la chaîne de traction par l'utilisation des capteurs déjà présents pour la surveillance et le contrôle de celle-ci. Ce travail décrit un modèle de comportement du transformateur pour le régime permanent sans charge du transformateur, qui est un cas d'utilisation rencontré au cours de la mise en fonctionnement de la chaîne de traction.

2. MODELE DU TRANSFORMATEUR

Le modèle de transformateur considéré est illustré

Fig. 1, où le transformateur est à vide. $U_{src}(t)$ est la tension d'entrée. Le courant primaire qui dans ce cas de modélisation est le courant de magnétisation $I_m(t)$. R_p et L_m sont respectivement, la résistance d'enroulement et l'inductance propre du primaire. Cette dernière inclut les effets de magnétisation. Le contacteur SW est activé lors de la mise sous tension lorsqu'une tension nominale est détectée.

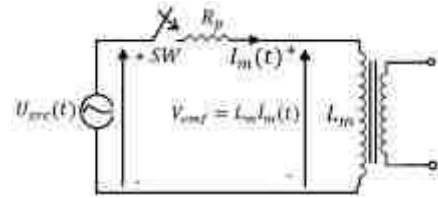


Fig. 1 : Modèle du transformateur sans charge

Le modèle comportemental de $I_m(t)$ est une équation différentielle telle que :

$$\dot{I}_m(t) = \frac{U_{src}(t)}{L_m} - \frac{R_p I_m(t)}{L_m} \quad (1)$$

où L_m est un paramètre non linéaire dépendant du cycle de magnétisation du noyau magnétique tel que :

$$L_m = \frac{N^2 S \mu_0 \left(1 + \frac{dM}{dH}\right)}{l} \quad (2)$$

N est le nombre de spires au primaire, S la surface du noyau magnétique traversé par le champ magnétique, l la longueur moyenne du flux magnétique dans le noyau, μ_0 la perméabilité magnétique du vide. $\frac{dM}{dH}$ représente la variation non linéaire du moment magnétique M en fonction de l'excitation magnétique H . Dans cet article, la représentation de ce paramètre non linéaire reprend une modélisation dite de Jiles Atherton [6] [7]. Dans [8] un détail des jeux d'équations permettant d'obtenir l'expression (2) sera trouvé. Cette référence détaille notamment les expressions de M_{an} (magnétisation anhystérétique) et H_e (excitation effective, liant le champ excitation H au moment M) qui sont des variables intermédiaires. Afin d'évaluer L_m , $\frac{dM}{dH}$ est exprimé :

$$\frac{dM}{dH} = \frac{c \cdot \frac{dM_{an}}{dH_e} + \frac{\delta_m(M_{an}-M)}{\delta k - \frac{\alpha(M_{an}-M)}{1-c}}}{1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e}} \quad (3)$$

Dans cette expression, k , c , a et α sont les paramètres à identifier par des données expérimentales. δ_m et δ sont des symboles de signe. L'expression de $\frac{dM_{an}}{dH_e}$ fait intervenir un dernier paramètre M_{sat} qui doit également être connu :

$$\frac{dM_{an}}{dH_e} = \frac{M_{sat}}{a \left(1 - \coth^2 \left(\frac{H_e}{a} \right) - \left(\frac{a}{H_e} \right)^2 \right)} \quad (4)$$

La validation de l'implémentation de ce modèle a été faite par reproduction des résultats issus de [9]. Cette validation de modèle, qui constitue une étape préliminaire est explicitée dans le paragraphe suivant.

3. VALIDATION DE LA METHODE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE

3.1. Contexte

Compte tenu de l'application visée, les paramètres initiaux du modèle de transformateur ferroviaire ne peuvent être connus que par réalisation d'une série de tests in situ, suivis d'un processus d'identification. L'identification des paramètres sera donc fortement tributaire des conditions de mesures et notamment le fait que seule une fraction des données expérimentales puisse être exploitable. Afin d'explorer le comportement de la méthode d'identification et son adaptation à pareille configuration, dans une première étape, nous validerons cette approche en retrouvant, après avoir appliqué une méthode d'identification, des valeurs de paramètres déjà connues. Dans cette étape, la vérification du modèle et de l'identification de ces paramètres sera faite au préalable sur des données issues de simulations numériques. Nous étudierons dans une seconde étape comment adapter notre méthode d'identification lorsqu'une partie seulement du cycle d'hystérésis est disponible. Ensuite, dans la section 4, l'identification des paramètres sera utilisée à partir de données expérimentales obtenues sur banc de test d'une chaîne de traction.

3.2. Paramètres d'un modèle de test

Les paramètres initiaux [9] sont exprimés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs des paramètres du modèle

Symbole	Valeurs initiales [9]	Valeurs obtenues par identification
M_{sat}	1497000	1497000
k	125	127
c	0.32	0.32
a	0.00089	0.00089
α	458	461

Les données des grandeurs temporelles pour l'identification sont obtenues par simulation d'un cycle d'hystérésis $B(H)$, en utilisant les expressions précédentes (1)-(4). Un algorithme évolutionnaire (évolution différentielle) est utilisé pour déterminer les paramètres du modèle. Le paramétrage de l'algorithme d'identification est : 500 pour la population initiale, 100 pour le nombre d'évaluation. Par conséquent 50 000 itérations sont effectuées. L'algorithme tend à minimiser une fonction cout exprimée comme la racine carrée de l'erreur quadratique ε commise sur le courant d'excitation $I_m(t)$.

$$\varepsilon = \sum_{loop} \sqrt{\left((I_m)_{j,M} - (I_m)_{j,S} \right)^2} \quad (5)$$

Avec $(I_m)_{j,M}$ la valeur au point j du cycle d'hystérésis désiré, et $(I_m)_{j,S}$ la valeur au point j du cycle d'hystérésis simulé à des fins d'identification. Lorsque la valeur de la fonction de cout est inférieure à 1% sur un cycle complet, les valeurs des paramètres sont alors obtenues et comparées aux valeurs initiales, Tableau 1. Ces valeurs sont très proches de celles qui ont permis de générer les données d'entrée de la méthode d'identification. Afin d'y parvenir dans un temps acceptable il est cependant nécessaire de déterminer les bornes initiales pour les populations des paramètres de la méthode d'identification.

L'analyse de l'état de l'art, notamment [10], nous a permis de synthétiser les plages de variation admissibles pour les paramètres d'entrée telles que :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{sat} \in \langle M_{max}, 1.2M_{max} \rangle \\ a \in \langle 0.5H_c, 5H_c \rangle \\ k \in \langle 0.2H_c, 5H_c \rangle \\ \alpha \in \langle 10^{-10}, \frac{H_{max}}{M_{max}} \rangle \\ c \in \langle 0,1 \rangle \end{array} \right. \quad (6)$$

Afin d'accélérer le temps de convergence de l'algorithme d'identification, il est intéressant de savoir prédéterminer ces plages de variations. Ainsi, les valeurs maximales des champs, coercitifs H_c , magnétique H_{max} et du moment magnétique M_{max} sont recherchées. Les valeurs obtenues Tableau 1 sont incluses dans ces marges. Effectivement pour cet exemple, $H_c = 85.39 \text{ A/m}$, $H_{max} = 340 \text{ A/m}$, $M_{max} = \frac{B_{max}}{\mu_0} - H_{max} = 3.43 \cdot 10^5$.

Paramètres obtenus en cas de données incomplètes

Au cours d'un processus de test sur un banc de test de chaîne de traction, les données obtenues à des fins de traitement peuvent ne pas être pleinement satisfaisantes (bruit de mesure, dynamique ou non linéarité des capteurs...). Cela est notamment le cas lorsque sur l'ensemble de la plage de données obtenues certaines sont des points dont on présuppose qu'ils ne soient pas représentatifs du comportement réel. Dans la partie suivante, l'identification des paramètres du modèle a été effectuée en considérant une partie seulement du cycle d'hystérésis.

Dans un premier temps le processus d'identification est effectué en ne prenant en compte qu'un pourcentage des données du cycle d'hystérésis. La méthode d'identification et son paramétrage, sont identiques à ceux explicités à la section précédente. L'étude est menée pour des données consécutives représentant 10% à 100% du cycle d'hystérésis avec un pas de 10%. La figure Fig. 2 illustre quatre exemples de jeux de données 80%, 60%, 40% et 20% utilisés.

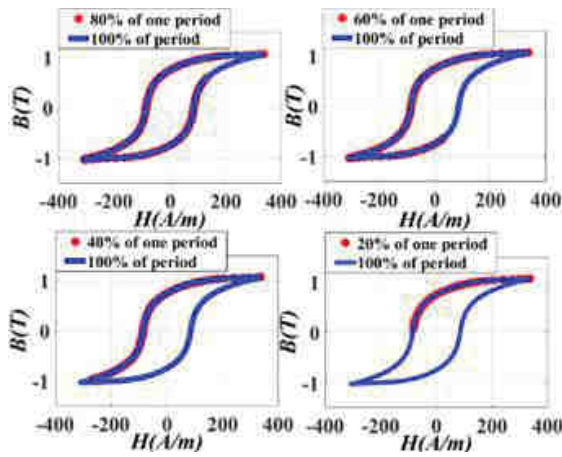


Fig. 2 : Illustration du pourcentage des données du cycle d'hystérésis utilisées pour l'identification - 10%,40%, 60%, 80%

Pour chaque jeu de données, les 5 paramètres du modèle identifié : M_{sat} , k , c , a et α sont comparés aux valeurs initiales. Peu importe le nombre de données considérées les erreurs produites sont faibles ($< 2\%$). Puis, sur la base de ces différentes valeurs de paramètres du modèle, les variations des points caractéristiques du cycle sont analysées, il s'agit des erreurs commises sur le champ coercitif H_c , le champ rémanent B_r et l'aire du cycle. Ces résultats sont présentés Fig. 3.

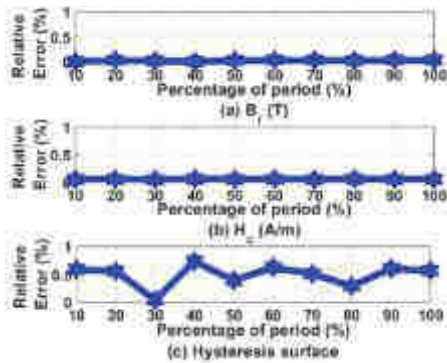


Fig. 3 : Erreur commise sur les points caractéristiques du cycle d'hystérésis

La figure précédente illustre que l'erreur produite par un modèle de Jiles-Atherton paramétrée par une connaissance partielle du cycle d'hystérésis n'est pas important pour 2 points caractéristiques de ce cycle, à savoir le champ coercitif H_c , le champ rémanent B_r , ainsi que pour l'aire du cycle. Cependant chaque jeu de données a inclus la valeur positive extrême du cycle d'hystérésis.

Dans un deuxième temps, une analyse est menée afin de vérifier l'importance du point initial du jeu de données utilisé pour l'identification. 3 points de départ sont utilisés. Ces différents points de départ dans la description du cycle d'hystérésis sont complétés avec 20% de données consécutives du cycle, Fig. 4.

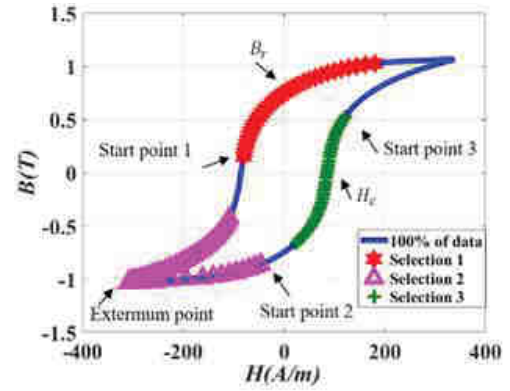


Fig. 4 : Illustration de 3 jeux de données, chacun ayant 20% de données et trois points de départ différents

La première comprend le champ rémanent B_r , la seconde sélection comprend la valeur extrême du cycle (ici négative) et la troisième sélection comprend le champ coercitif H_c . La procédure d'identification étant menée de manière identique aux paragraphes précédents, les valeurs des paramètres obtenus après identification pour chaque sélection sont comparées aux valeurs initiales des paramètres du Tableau 1. Les résultats sont présentés au Tableau 2.

Tableau 2 : Erreurs commises sur les valeurs des paramètres du modèle pour les différentes sélections

Para.	Sélection 1	Sélection 2	Sélection 3
a	1.4%	0.051%	0.64%
k	19%	0.1%	40%
α	1.7%	0.078%	0.6%
c	25%	0.19%	45.5%

Seule la sélection 2, c'est-à-dire celle contenant l'extremum du cycle donne satisfaction. Cette étude est complétée par l'analyse de l'écart commis sur l'aire du cycle d'hystérésis. Partant des trois jeux de paramètres obtenus pour chacune des sélections, les aires des cycles d'hystérésis sont comparées à l'aire du cycle initial, Tableau 3.

Tableau 3 : Erreur commise sur l'aire du cycle

	Sélection 1	Sélection 2	Sélection 3
Erreur	1.9%	0.0029%	6.37%

Effectivement, les résultats du Tableau 2 avaient mis en évidence la sensibilité plus importante de l'aire, aux jeux de paramètres identifiés du modèle. Cette analyse illustre que l'identification doit être faite à partir d'un jeu de données qui inclut le point extremum.

Cette analyse menée sur une partie du cycle ainsi que sur ses caractéristiques, est d'une grande importance compte tenu du contexte applicatif de l'étude et des données expérimentales exploitables comme cela sera détaillé dans la section suivante. Cette analyse a permis de constater que la plage de donnée minimale d'un cycle d'hystérésis pouvait aller jusqu'à ne contenir que 10% des données du cycle. De plus, cette plage de donnée doit inclure les points d'induction et d'excitation maximum. Idéalement elle doit également inclure la valeur de champ coercitif. Effectivement, ces données sont indispensables à l'obtention des plages de variations des paramètres du modèle discutées section 3.2.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX – TRANSFORMATEUR EN REGIME PERMANENT SANS CHARGE

La méthode d'identification est appliquée pour l'obtention des paramètres du modèle d'un transformateur d'une chaîne de traction ferroviaire, de puissance 3MVA et alimentée par un réseau 25kV/60Hz. Les grandeurs accessibles durant les test sont uniquement la tension et le courant du primaire du transformateur. Il est à noter que les contraintes industrielles nous imposent de ne pas rajouter de capteurs. Les mesures sont donc obtenues par le biais des capteurs et de leurs chaines d'acquisition déjà implémentés. Les paramètres du transformateur illustré par le schéma équivalent de la Fig. 5 sont connus au préalable et sont reportés Tableau 4.

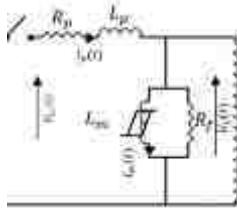


Fig. 5 : Schéma équivalent du transformateur

Tableau 4 : Paramètres connus du transformateur

Paramètre	Valeur
R_p	0.0011 $\Omega/turn$
L_p	0.535 $\mu H/turn$
R_f	0.04 $\Omega/turn$

La surface S , la longueur moyenne l des aires et chemins magnétiques et le nombre de tour pour les enroulements N sont connus également.

Le courant primaire du transformateur mesuré lors d'un essai sans charge et en régime permanent est reporté Fig. 6 : Courant primaire mesuré. La tension appliquée au primaire est également mesurée $U_{L2}(t)$.

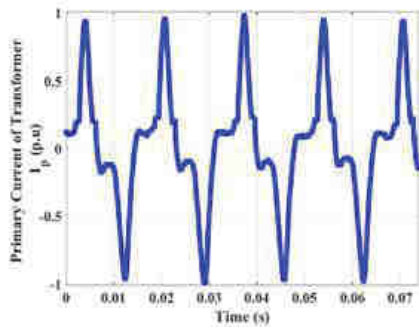


Fig. 6 : Courant primaire mesuré

Le courant mesuré présente une zone atypique due à la non linéarité du capteur pour cette plage de données. Sur la base du modèle du transformateur, le courant magnétisant puis par la suite, le cycle d'hystérésis $B(H)$ sont calculés. La variation de flux est d'abord obtenue :

$$\dot{\Phi}_m(t) = -\frac{U_L(t)}{N} \quad (7)$$

Puis le champ magnétique B ,

$$\dot{B}(t) = -\frac{U_L(t)}{NS} \quad (8)$$

est obtenu suite à l'intégration numérique de l'expression (8). Le champ d'excitation H est déduit de la loi d'Ampère :

$$I_m(t) = H(t) \cdot \frac{l}{N} \quad (9)$$

Où le courant magnétisant $I_m(t)$ est obtenue par la loi des mailles :

$$U_L(t) = R_f(I_p(t) - I_m(t)) \quad (10)$$

Le cycle d'hystérésis obtenu Fig. 7 (a), est au préalable filtré Fig. 7 (b).

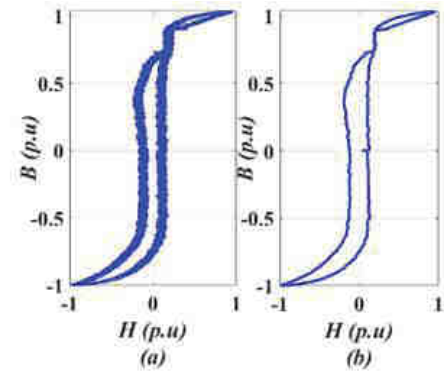


Fig. 7 : Cycle d'hystérésis obtenu

Le cycle se présente sous une forme asymétrique. Celle-ci est due à la non linéarité du capteur. Selon les préconisations obtenues aux sections précédentes, nous appliquerons la méthode d'identification à une portion des données incluant le point extréum et incluant la valeur du champ coercitif. Il s'agit de la partie négative du cycle à courant décroissant. Sur l'ensemble du cycle d'hystérésis obtenu suite à expérimentation, 40% de la plage de donnée contenant un point extréum du cycle d'hystérésis sont utilisés Fig. 8. La méthode d'identification décrite précédemment est ensuite appliquée. Les valeurs de plages de variation des paramètres sont d'abord renseignées puis l'algorithme évolutionnaire permet l'obtention de valeurs pour les paramètres du modèle Tableau 5.

Tableau 5 : Paramètres identifiés

Para.	Values
M_{sat}	11305398.6
k	69.55
a	102.4
α	0.00026786
c	0.2296

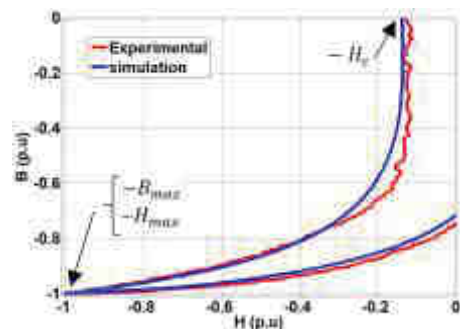


Fig. 8 : Comparaison des données expérimentales et simulées

Afin de s'assurer de la représentativité du modèle ainsi obtenu, une simulation permet l'obtention d'un cycle

d'hystérésis $B(H)$ qui est comparé au cycle obtenu préalablement par l'expérience (Fig.2). Le modèle peut maintenant être exploité dans une simulation. Ainsi, le courant primaire simulé est comparé au courant primaire mesuré. Cette dernière figure, Fig. 9 illustre la bonne concordance entre les deux courbes.

theory of ferromagnetic hysteresis," IEEE Trans. Magn., vol. 28, no. 1, p. 27–35, 1992

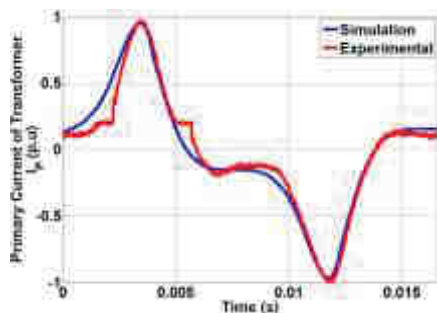


Fig. 9 : Comparaison des courants mesurés et simulés

5. CONCLUSIONS

Ce papier présente une méthode utilisée pour l'identification des paramètres non linéaires d'un modèle de transformateur. Les paramètres du modèle de Jiles-Atherton considéré sont obtenus sur une période temporelle incomplète des signaux. L'application de la méthode à un banc de test d'une chaîne de traction ferroviaire a permis la validation de la procédure d'identification et des résultats produits par le modèle simulé avec les paramètres identifiés par comparaison des simulations avec des résultats expérimentaux.

6. REMERCIEMENTS

Financement par le projet Européen Shift2Rail N°826054.

7. REFERENCES

- [1] M. A. Rahman and A. Gangopadhyay, "Digital simulation of magnetizing inrush currents in three phase transformers," IEEE Trans. Power Del., vol. PWRD-1, no. 4, pp. 235–242, Oct. 1986.
- [2] T. Noda, H. Nakamoto, and S. Yokoyama, "Accurate modeling of core-type distribution transformers for electromagnetic transient studies," IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 4, pp. 969–976, Oct. 2002.
- [3] V. Oiring de Castro Cezar, P. Lombard, A. Charnacé, O. Chadebec, L-L. Rouve, J-L. Coulomb, F-X. Zgainski and B. CaillaultS. "Numerical simulation of inrush currents in single-phase transformers using the Jiles-Atherton model and the finite element method" IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), Miami, FL, USA, 2016
- [4] Jiles, D.C.; Atherton, D.L. "Theory of ferromagnetic hysteresis". J. Magn. Magn. Mater., 61, 48–60, 1986
- [5] Jiles, D.C., Thaelke, J., Devine, M.: "Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis", IEEE Trans. Magn., 28, (1), pp. 27–35, 1992
- [6] Leandro dos Santos Coelho, Juliano Pierezan, Nelson Jhoé Batistela, Jean Viane Leite, Sotirios K. Goudos, "Multiobjective lightning search applied to Jiles-Atherton hysteresis model parameter estimation," in 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAS), Thessaloniki, Greece, 2018.
- [7] D.C. Karnopp, R. Rosenberg, A.S. Perelson, "System dynamics: a unified approach," Transactions on Systems, Man and Cybernetics, pp. 724-724, 1976
- [8] S. Amirdehi, B. Trajin, P.-E. Vidal, J. Vally and D. Colin, "Power transformer model in railway applications based on bond graph and parameter identification", Transactions on Transportation Electrification, Print ISSN : 2332-7782, Online ISSN : 2332-7782, Digital Object Identifier : 10.1109/TTE.2020.2979598
- [9] Wang, X., Thomas, D.W.P., Sumner, M., et al.: "Characteristics of Jiles–Atherton model parameters and their application to transformer inrush current simulation", IEEE Trans. Magn., 44, (3), pp. 340–345, 2008.
- [10] Jiles, D.C., Thaelke, J., Devine, M., "Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the