

ETUDE NUMERIQUE D'UN LIMITEUR DE COURANT DE DEFAUT SUPRACONDUCTEUR INDUCTIF

Florian ȘTEFĂNESCU

*Département d'Electrotechnique Théorique, Faculté d'Electrotechnique
Université de Craiova, Decebal 107, 200440 – Craiova, Roumanie
Tel.: 40-251 435 724 / 144; e-mail: florian@elth.ucv.ro*

Résumé – L'étude est orientée vers le limiteur inductif à base de massifs YBCO.

L'objectif de cet article est d'établir un modèle numérique pour évaluer l'inductance totale d'un limiteur de courant de défaut inductif monophasé. On réalise, dans ce but, le modèle du conducteur HTS massif en utilisant le logiciel FEMM 3.4.2.

Mots - clés : limiteur, supraconducteur, modélisation

1. INTRODUCTION

La limitation rapidement des courants de défaut (sous 5ms) reste un problème mal résolu dans les réseaux électriques et les dommages mécaniques sont encore inévitables.

Le limiteur de courant est basé sur la transition rapide de l'état supraconducteur à l'état normal par dépassement du courant critique d'un élément supraconducteur.

Le développement des supraconducteurs à haute température critique permet maintenant d'envisager leur utilisation pour la limitation du courant de défaut. Mais, comparés au développement des autres éléments supraconducteurs, les progrès réalisés dans le domaine des commutateurs sont limités en dépendant de la disponibilité de matériaux supraconducteurs adaptés liée des phénomènes thermo-magnétiques lors de la transition de l'état supraconducteur à l'état conducteur normale.

2. SCHEMA DE PRINCIPE

Le limiteur inductif le plus simple est constitué d'un noyau magnétique, d'un bobinage primaire classique placé en série sur la ligne à protéger et un élément supraconducteur en court-circuit (cylindre) (Figure 1). Du point de vue du primaire, en régime normal, le limiteur est équivalent à l'inductance du transformateur en court-circuit. En régime normal, le courant secondaire traverse l'élément supraconducteur avec de pertes minimales.

Lorsqu'un défaut surgit, le courant secondaire dépasse le courant critique du supraconducteur et le matériau transite ce qui provoque une nette augmentation de l'impédance ramenée au primaire.

Le principal avantage de cette solution réside dans l'absence de traversées de courant, coûteuses du point de vue cryogénique.

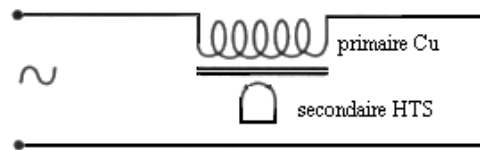


Figure 1: Schéma du limiteur inductif

3. MODELISATION DU CIRCUIT MAGNETIQUE

Le circuit magnétique, en deux variantes, doté de deux et de trois colonnes, est constitué d'un empilage de tôles en acier à cristaux orientés de type M19 (de la bibliothèque de matériaux du logiciel FEMM) avec les caractéristiques :

- induction à saturation : $B_s = 2.08$ T
- conductivité électrique $\sigma_{Fe} = 2$ MS/m

La caractéristique magnétique $B(H)$, est présentée dans la Figure 2.

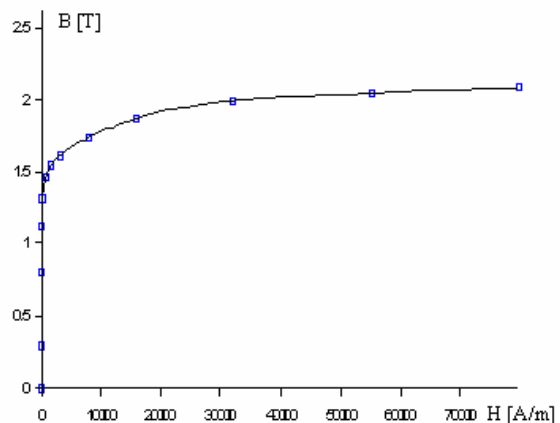


Figure 2 : Caractéristique magnétique du noyau

La première variante de noyau (avec deux colonnes) a les dimensions :

- hauteur: 0.212 m
- largeur: 0.102 m

- profondeur: 0.016 m
- largeur des colonnes : 0.016 m

La deuxième variante de noyau, symétrique avec trois colonnes, a les dimensions :

- hauteur: 0.212 m
- largeur: 0.236 m
- profondeur: 0.016 m
- largeur des colonnes : 0.016 m

4. MODELISATION DU SECONDAIRE SUPRACONDUCTEUR

La transition rapide de l'état supraconducteur à l'état normal demandé pour la limitation du courant de défaut crée des problèmes liés au comportement en champ magnétique des conducteurs HTS. Ces matériaux possèdent deux champs critiques, H_{c1} et H_{c2} , et en général $H_{c1} \ll H_{c2}$. Ils sont considérés comme supraconducteurs tant que l'intensité du champ magnétique est inférieure à H_{c2} . Mais, entre H_{c1} et H_{c2} , il y a un état mixte caractérisé par la pénétration ponctuelle de l'induction magnétique dans le matériau (vortex) qui produit une dissipation d'énergie. Donc, en présence d'un champ magnétique supérieur à H_{c1} , les matériaux HTS présentent une résistivité électrique non nulle.

Par sa résistivité électrique plus élevée à l'état normal, les conducteurs HTSC massifs sont une solution pour assurer une limitation ferme du courant. Mais, pour protéger le matériau supraconducteur contre des excursions en températures trop élevées, il est indispensable de distribuer la transition sur l'ensemble du matériau pour éviter tout point chaud destructeur. Pour ceci, le matériau doit être très homogène et présenter une capacité thermique élevée.

Les supraconducteurs massifs frittés, réalisés partir de poudres, comme l'YBaCuO, sont moins performants du point de vue du courant critique, mais ils possèdent des caractéristiques physiques isotropes alors qu'ils sont constitués de grains anisotropes avec orientation quelconque. La forte anisotropie du grain est due à la superposition sur la direction c de plans CuO_2 supraconducteurs (plans ab) et de plans isolants [1].

Les paramètres des conducteurs HTSC peut varier de façon notable selon les procédés de fabrication. Par exemple, selon le Rosenstein [2] les valeurs critiques des champs magnétiques pour l'YBaCuO à 77 K sont approximativement :

- $H_{c1ab} = 40$ kA/m
- $H_{c2ab} = 200$ MA/m

et selon le Buzon [1] :

- $H_{c1ab} = 20$ kA/m
- $H_{c1c} = 72$ kA/m
- $H_{c2ab} = 120$ MA/m
- $H_{c2c} = 320$ MA/m

Dans notre étude portée sur un cylindre d'YBaCuO massif de fabrication THEVA (2005), on considère les suivantes grandeurs physiques :

- $H_{c1} = 60$ kA/m
- $H_{c2} = 100$ MA/m ($B_{c2} = 125$ T)

la température critique :

- $T_c = 90$ K

le courant critique :

- $J_c = 7.5$ MA/m²

et les conductivités électriques à l'état supraconducteur et à l'état normal :

- $\sigma_{sc} = 75000$ MS/m
- $\sigma_{nc} = 0.1$ MS/m

Dans le logiciel FEMM la caractéristique magnétique $B(H)$ du matériau supraconducteur est définie par les points (Figure 3).

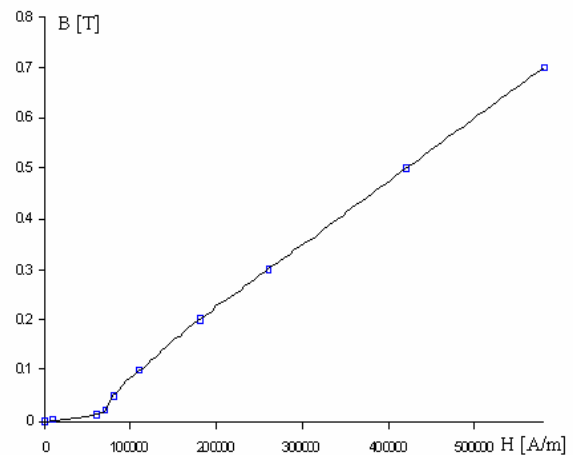


Figure 3 : Caractéristique magnétique de l'HTSC

Le cylindre supraconducteur a les suivantes dimensions :

- hauteur: 0.1 m
- diamètre extérieur: 0.06 m
- diamètre intérieur: 0.054 m

5. BOBINAGE PRIMAIRE

L'enroulement primaire classique avec 530 spires est constitué de fil de cuivre en deux variantes :

- bobinage court avec l'hauteur $h = 0.09$ m, l'épaisseur $g = 0.0064$ m et la densité du courant $J = 1.38$ MA/m²;
- bobinage long avec l'hauteur $h = 0.134$ m, l'épaisseur $g = 0.0042$ m et la densité du courant $J = 1.41$ MA/m²;
- diamètre intérieur : 0.11 m.

6. SIMULATION DU LIMITEUR

La simulation du limiteur de courant de défaut en régime stationnaire (l'état supraconducteur du secondaire) est réalisée à l'aide du logiciel FEMM

3.4.2. Ce logiciel permet de résoudre des problèmes de magnétostatique et d'électromagnétisme par la méthode des éléments finis en 2D [3].

On envisage 4 cas :

1. primaire court et noyau asymétrique (v-ca)
2. primaire long et noyau asymétrique (v-la)
3. primaire court et noyau symétrique (v-cs)

4. primaire long et noyau symétrique (v-ls)

Les spectres de la densité de flux magnétique dans un plan contenant l'axe longitudinal du noyau sont présentés en ordre dans les figures 4, 5, 6 et 7.

On peut constater que le flux de dispersion dans le cas des noyaux asymétriques est supérieur au cas des noyaux symétriques.

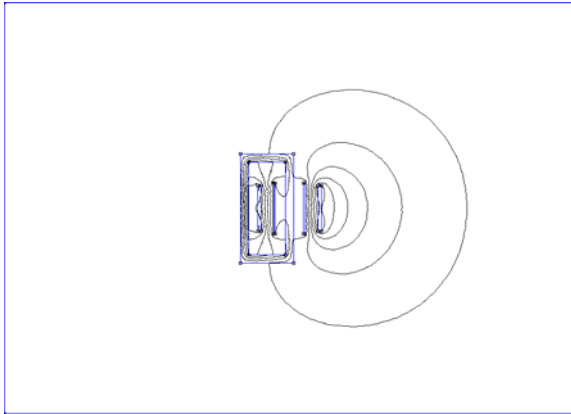


Figure 4 : v-ca

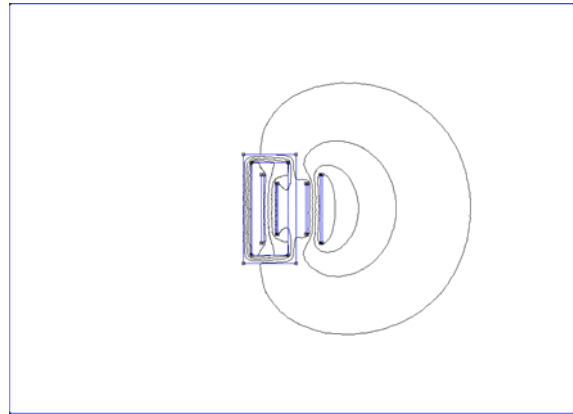


Figure 5 : v-la

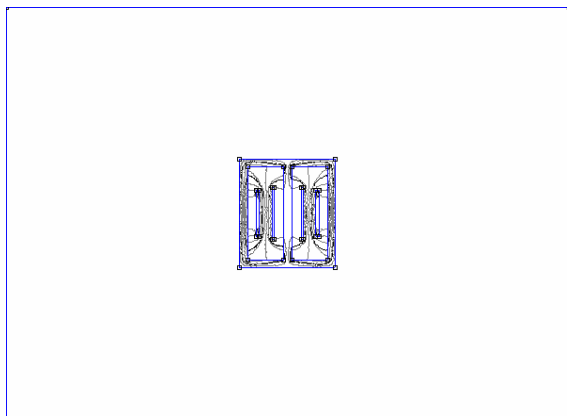


Figure 6 : v-cs

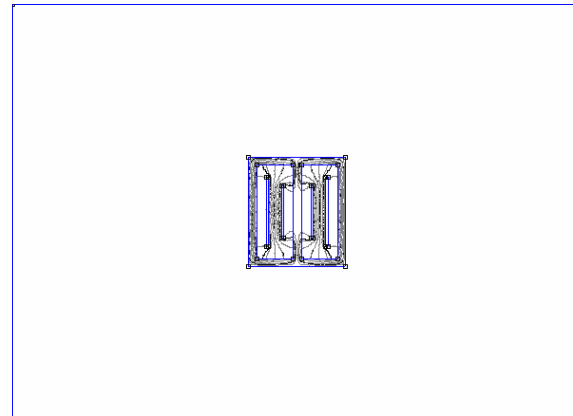


Figure 7 : v-ls

7. DETERMINATION DE L'INDUCTANCE

L'inductance totale L du limiteur ramenée au primaire s'obtient par la relation classique :

$$L = \frac{2W_{\text{tot}}}{I^2} \quad (1)$$

où W_{tot} est l'énergie magnétique du limiteur et I l'intensité du courant primaire (en valeur efficace). Il résulte immédiatement la réactance totale du limiteur :

$$X_L = 2\pi f L \quad (2)$$

f étant la fréquence du champ (50Hz).

Le logiciel FEMM a la possibilité de calculer par intégration l'énergie magnétique dans n'importe quel domaine pour une certaine épaisseur.

Donc, on peut déterminer l'énergie par l'unité de profondeur (1 mm) dans le plan parallèle aux tôles.

En multipliant par 16 (16 mm étant la profondeur du noyau) la valeur de l'énergie, on peut déterminer l'énergie magnétique W_{fem} du limiteur en approximation 2D. Mais, le limiteur n'a pas une symétrie plane.

Pour tenir compte de l'entier flux de dispersion des enroulements cylindriques dans le domaine de calcul on utilise la relation d'approximation suivante :

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{fem}} + c \cdot W_{\text{ext}} \quad (3)$$

où W_{ext} est la valeur d'énergie magnétique de l'extérieur du noyau et le facteur c a l'expression :

$$c = \pi R / 0.016 - 0,032 \quad (4)$$

$2R=1.1$ étant la dimension du domaine de calcul. La relation (3) devient :

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{fem}} + 107.9 \cdot W_{\text{ext}} \quad (5)$$

Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

variante	W_{fem} [10^{-5} J]	W_{ext} [10^{-5} J]	W_{tot} [10^{-3} J]	L [mH]	X_L [Ω]
v-ca	15.486	8.33	9.14	8.13	2.55
v-la	18.609	10.02	11.00	9.78	3.07
v-cd	14.306	0	0.14	0.13	0.04
v-ld	17.192	0	0.17	0.15	0.05

Tableau 1 : Paramètres et ses valeurs

8. ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

Les valeurs des inductances totales, même affectées d'une certaine erreur, confirment les tendances théoriques :

-l'accroissement avec la longueur de l'enroulement primaire;

-la diminution dans le cas du noyau symétrique.

9. CONCLUSIONS

La modélisation numérique en 2D à l'aide du logiciel FEMM donne la possibilité de simuler plus de variantes constructives, mais les résultats quantitatifs sont affectés par différentes approximations.

Ainsi, on peut choisir des options constructives en fonction des exigences imposées. Par exemple, dans le cas du régime stationnaire, le limiteur doit présenter une inductance réduite liée des paramètres du réseau électrique à protéger et où il est placé en série.

Ayant en vue les limites de ce modèle numérique, il est nécessaire son validation par de tests expérimentaux, pour pouvoir l'utiliser dans la conception de limiteurs de courant de défaut.

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce papier a été en partie financé par le Ministère d'Education et Recherche de Roumanie sous contrat No. 138/2004. L'auteur remercie la Société Nationale "TRANSELECTRICA" SA pour le support financier supplémentaire.

Références

- [1] D. Buzon, *Limitation de courant a partir de matériaux supraconducteurs HTc*, Thèse soutenu au sein de l'INPG/Spécialité Génie Electrique/ Grenoble, 2002.
- [2] B. Rosenstein, *Anisotropic and layered superconductors*, www.weizmann.ac.il/
- [3] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics Version 3.4, User's Manual* April 15, 2005 (dmeeker@ieee.org, <http://femm.berlios.de>)