

## Étude de Limiteur de Courant Supraconducteur dans un système électro- énergétique

L .Sabah<sup>1</sup>, S and Belkhiat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ferhat Abbas University Setif Algeria,

<sup>2</sup>Ferhat Abbas University Setif Algeria

Electrotechnic department, DAC Laboratory

L\_sabah2006@yahoo.fr belsa\_set@yahoo.fr

**Abstract :** Le limiteur supraconducteur de courant de défaut (SFCL) est un organe de protection, permettant de réduire le courant de défaut. Cette caractéristique est utilisée pour dimensionner le réseau électrique en conséquence au lieu de se référer au courant de court circuit. L'utilisation d'un limiteur de courant supraconducteur, jouant le rôle de fusible permanent et de capteur de défaut automatique, engendrerait une amélioration de la qualité de distribution de l'énergie électrique et une réduction du coût du système électro-énergétique. Le principe de cet appareil consiste à introduire une impédance de ligne supplémentaire ; par transition du matériau de l'état supraconducteur à l'état normal ; au moment du défaut. Dans cet article, l'efficacité de limiteur de courant supraconducteur placé dans un circuit électrique simple présentant un court-circuit a été étudié. Les résultats de simulation, obtenus sous environnement MATLAB, sont présentés et validés à partir des résultats de la bibliographie.

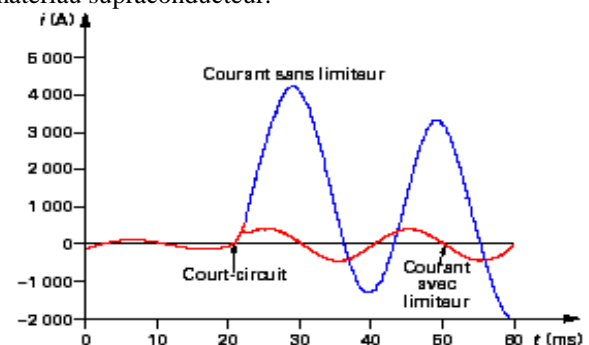
**MOT CLES:** La supraconductivité, le limiteur de courant supraconducteur,

### I. Introduction

Un supraconducteur est le matériau a priori idéal, puisqu'il transporte des densités de courant élevées sans être dissipatif du tout, dans les applications électrotechnique (câble, moteur, transformateur, limiteur de courant,...) qui doit être bénéfique en terme de poids, de volume et de rendement. Les limiteurs supraconducteurs de courant de défaut (SFCL) exploitent la propriété spécifique des matériaux supraconducteurs transiter ultra- rapidement et naturellement de l'état supraconducteur à un état dissipatif par dépassement de leur courant critique [1]. Application des plus innovantes de la supraconductivité, le limiteur supraconducteur est d'autant plus intéressant pour les réseaux électriques que les autres techniques classiques ne sont pas satisfaisantes. Il interdit tout courant au- dessus d'une certaine valeur et fonctionne de manière autonome et naturelle, intégrant la détection du courant de défaut, le donner d'ordre et l'élément limitant, une meilleur qualité de fourniture d'électricité [2]. Il permet en effet une plus grande interconnexion du réseau électrique.

### II. Principe de fonctionnement du limiteur du courant supraconducteur

Le fonctionnement d'un limiteur supraconducteur de courant de défaut (SFCL) se divise en deux séquences distinctes. En régime de fonctionnement normal du réseau, un courant inférieur à la valeur nominal (assigné)  $I_n$  circule dans le circuit électrique et le SFCL est dans son état supraconducteur. Lorsqu'un défaut (tel q'un court-circuit) apparaît sur ce réseau électrique, le courant dans le circuit dépasse la valeur critique  $I_C$  du SFCL qui transite alors vers son état résistif normal [3,4]. Ce passage restaure une impédance dans le réseau électrique et permet une limitation du courant de défaut à une valeur maximale  $I_{lim}$  quelque soient les conditions externes il doit limiter le courant à  $5 I_n$ , un exemple de courbe de limitation montré en Fig.1 et résume ce concept. Un limiteur de courant s'assimile donc, en quelque sorte, à un superfusible permanent qui s'appuie sur la transition S/N (Supraconducteur/Normal) pour limiter un courant de défaut sans s'outo- détruire. La transition de l'état passante (supraconducteur) à l'état bloquant (normal) a lieu lorsque le courant transporté est supérieur à la valeur du courant critique du matériau supraconducteur.



**Figure 1:** Evolution de courant de court-circuit avec limiteur de courant supraconducteur.

Le choix du matériau supraconducteur utilisé dans un limiteur supraconducteur est fortement dépendant des délais fixés, et du type de structure choisi.

Les limiteurs de courant à base température critique (BTc) et à haute température critique (HTc) diffèrent principalement par leur cryogénie. Le coût de la cryogénie à 4 K limite le développement des applications électrotechnique des BTc. La température de fonctionnement moins basse des HTc permet envisager une cryogénie à plus de 30K.

Les fluides industriels, capables d'assurer le refroidissement sont l'hélium (4K) liquide pour les supraconducteurs BTc et l'azote liquide pour les supraconducteurs HTc (77K).

### III. Les types de limiteur du courant supraconducteur de défaut

Deux configurations de limiteur de courant supraconducteur résistif et inductif.

#### A. Limiteur supraconducteur type résistif

Le plus simple des concepts (Fig.2) est montré en série sur la ligne à protéger un bobinage non inductif supraconducteur pour limiter les chutes de tension à l'état passant. Après la transition, la forte résistance insérée naturellement dans la ligne limite le courant. L'énergie magnétique stockée dans l'enroulement supraconducteur au moment de la transition est négligeable [5].

Un disjoncteur en série, rapide, mais de faible pouvoir de coupure, permet d'isoler le défaut et protège le limiteur contre une excursion en température excessive. La fonction de

limitation étant assurée dès que  $R \frac{I_n}{V_n} > \frac{I_n}{I_{lim}} = 0.2 \text{ à } 0.3$ .

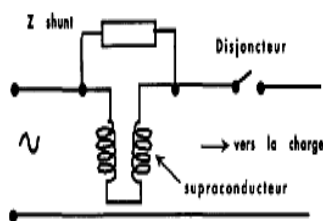


Figure 2: Schéma de principe d'un limiteur résistif.

#### a. Dimensionnement

Le limiteur résistif nécessite des supraconducteurs capables de supporter des forts courants. Il faut donc spécifier les dimensions (section, longueur, et le volume des conducteurs supraconducteur utilisée) La section totale du conducteur est déterminée par le courant de seuil  $I_b$  et la densité de courant

critique  $J_c$ , selon :

$$S = \frac{I_b}{J_c} \tag{1}$$

Afin d'assurer la limitation du courant sous un seuil spécifique  $I_{lim} < I_{max}$ , La longueur L du conducteur doit, quant à elle, dépassée :

$$L_{min} = \frac{V_n \cdot S}{\rho \cdot I_{max}} = \frac{V_n}{\rho J_c} \cdot \frac{I_b}{I_{max}} \tag{2}$$

Avec  $V_n$  : la tension de réseau.

Le volume de conducteur nécessaire est ainsi supérieur ou égal à :

$$v_{min} = S \cdot L_{min} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{V_n \cdot I_b^2}{I_{max}} \tag{3}$$

Ce type de limiteur se trouvant en série avec la ligne, il nécessite des conducteurs capables de supporter de forts courant.

#### B. Limiteur supraconducteur type inductif

Le limiteur inductif est constitué par chaque phase d'un noyau magnétique, d'un bobinage primaire placé en série sur la ligne à protéger et d'un élément supraconducteur Fig.3. Du point de vue du primaire et en régime normal, cet ensemble est équivalent à l'inductance magnétisante du transformateur court-circuitée par l'impédance très faible de l'élément supraconducteur [6]. Lorsqu'un défaut surgit, le matériau supraconducteur transite ce qui provoque une nette augmentation de l'impédance ramenée au primaire. L'impédance équivalente de l'ensemble devient quasiment à seule inductance magnétisante du transformateur.

Le principe avantage de cette solution réside dans l'absence d'amenées de courant, toujours très coûteuse au niveau cryogénique. L'inconvénient de cette solution est son volume et son poids.

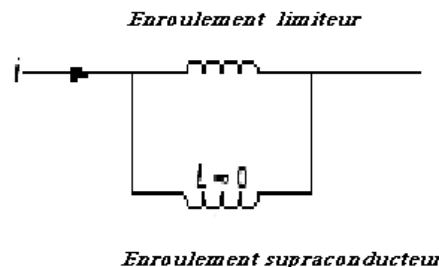


Figure 3: Schéma de principe de limiteur de courant supraconducteur inductif.

Le limiteur inductif nécessite de grande longueur de conducteur qui entraîne des pertes importantes en régime normale, la longueur du conducteur supraconducteur (le déclencheur) est du même ordre de grandeur d'un bobinage de limiteur supraconducteur type résistif.

#### IV. Localisation possible SFCL dans le réseau électrique

Un limiteur du courant peut être placé dans le réseau électrique :

a. En sorte de tranche ou de sous-station :

On peut protéger ainsi un générateur et le transformateur qui peuvent être mentionnés en fonction du courant de limitation et non plus en fonction du courant de court-circuit, ce qui permet un gain en coût des équipements installés.

b. Dans les sections d'entrée dessous – stations

Pour des réseaux existants, cela permet de maintenir l'interconnexion des sections en aval.

c. Dans une branche d'interconnexion

Ce qui permet, d'une part, d'isoler la portion en défaut tout en assurant la continuité d'exploitation avec les autres sources et d'autre part d'améliorer les marges de stabilité et la qualité des systèmes.

Par ailleurs, le limiteur peut être utilisé comme régulateur sélectif permettant d'équilibrer la charge dans des branches en parallèle.

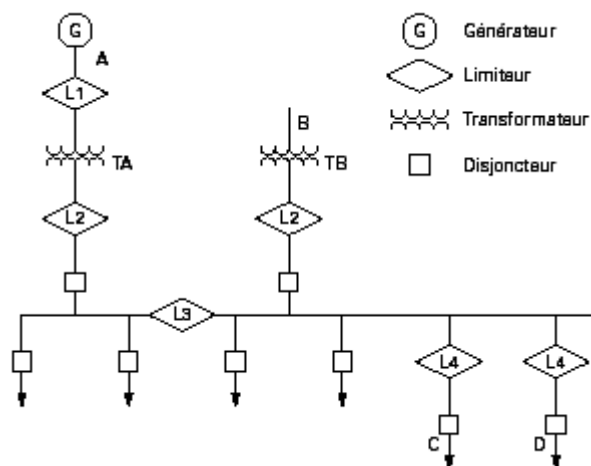


Figure 4: Insertion de limiteurs de courant de défaut dans réseau électrique.

- Le limiteur L1 protège le générateur et améliore sa stabilité.
- Les limiteurs L2, L3 permettent de maintenir la liaison en cas de défaut sur B.

- Le limiteur L3 permet de déconnecter les deux sections A et B et d'éviter que A ou B ne débitent sur même cour- circuit (l'interconnexion s'aggrave pas les courants de défaut).
- Les limiteurs L4 permettent de protéger sélectivement les départs C et D.

#### V. Simulation et interprétation

La protection de défaut devrait limiter le courant de court-circuit imposé par le défaut. On s'attend à ce que le courant de défaut soit limité par les caractéristiques supraconductrices du circuit, en faisant transiter le matériau de son état supraconducteur à son état normal. La Fig.5 montre le circuit proposé pour la simulation u défaut dans lequel est introduit un limiteur de courant supraconducteur type inductive emprunté au logiciel MATLAB/SIMULINK [7,8].

a) Exemple de conception

On considère un transformateur placé comme la figure suivante Fig .5

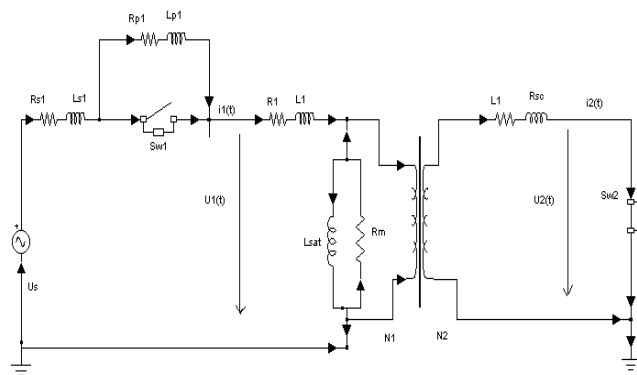


Figure 5: Circuit du principe de fonctionnement du limiteur de courant supraconducteur.

D'après les lois de Kirchhoff :

$$R_{10} I_1 + \frac{d\Phi_1(I_1)}{dt} + \frac{d\Phi_{12}(I_2)}{dt} = U_0 \sin \omega t \quad (4)$$

$$R_2 (I_2, B, T) = \frac{d\Phi_2(I_2)}{dt} + \frac{d\Phi_{21}(I_1)}{dt} = 0 \quad (5)$$

$I_1, I_2$  : Le courant du primaire et de secondaire respectivement.

$R_1$  : La résistance du primaire.

$R_2$  : La résistance du secondaire.

$U_0 \sin \omega t$  : La tension délivré par le générateur.

$$R_{10} = R_1 + R_i + R_L \quad (6)$$

$R_L$  : La charge.

$\phi_1(I_1)$  : Flux magnétique dans l'enroulement primaire due au passage du courant  $I_1$ .

$\phi_2(I_2)$  : Flux magnétique dans l'enroulement secondaire due au passage du courant  $I_2$ .

$\phi_{12}(I_2)$  : Flux magnétique dans l'enroulement primaire due au courant secondaire  $I_2$ .

$\phi_{21}(I_1)$  : Flux magnétique dans l'enroulement secondaire due au courant primaire  $I_1$ .

On peut écrire (4) et (5) comme suit :

$$\begin{aligned} R_{10}I_1 + L_1(I_1)\frac{dI_1}{dt} + M_{12}(I_2)\frac{dI_2}{dt} &= U_0 \sin \omega t \quad (7) \\ R_2I_2(I_2, B, T) + L_2(I_2)\frac{dI_2}{dt} + M_{21}(I_1)\frac{dI_1}{dt} &= 0 \quad (8) \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned} L_1(I_1) &= \frac{d\Phi_1(I_1)}{dI_1}, L_2(I_2) = \frac{d\Phi_2(I_2)}{dI_2}, \\ M_{12}(I_2) &= \frac{d\Phi_{12}(I_2)}{dI_2}, M_{21}(I_1) = \frac{d\Phi_{21}(I_1)}{dI_1}. \quad (9) \end{aligned}$$

Les équations (4), (5), (6), (7) contiennent des termes non linéaires  $\Phi_i, \Phi_{ij}, L_i, M_{ij}, (i, j = 1,2)$  qui dépendent de la caractéristique  $B(H)$ .

$R_2(I_2, B, T)$  : Résistance supraconductrice non linéaire qui dépend de la température  $T$ , de l'induction magnétique  $B$ , et du courant  $I$ .

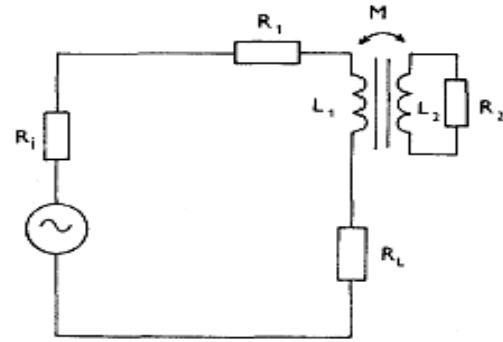
D'après les calculs On peut donc écrire :

$$R_2(I_2) = R_{2n} \left( \exp \left[ \frac{I_{2c} - |I_2|}{\Delta I_2} \right] + 1 \right)^{-1} \quad (10)$$

On peut modéliser un limiteur de courant supraconducteur par un transformateur saturable et une résistance non linéaire  $R_{SC}$  avec :

$$I_2 < I_c(T), T < T_c \quad R_{SC}(I_2, T) = 0 \quad (11)$$

$$I_2 > I_c(T) \quad R_{SC}(I_2, T) = R_{nc} \left( \exp \left[ \frac{I_c(T) - |I_2|}{\Delta I_2} \right] + 1 \right)^{-1}$$



**Figure 6:**Modèle du circuit équivalent avec limiteur de courant supraconducteur.

Avec :

$U_s$  : La tension du source.

$R_{s1}, L_{S1}$  : La résistance et l'inductance du générateur.

$R_1, R_{nc}$  : La résistance de l'enroulement primaire et du secondaire du transformateur saturable.

$L_1, L_2$  : L'inductance de l'enroulement primaire et de secondaire du transformateur saturable.

$R_{SC}$  : Résistance non linéaire définit par (10).

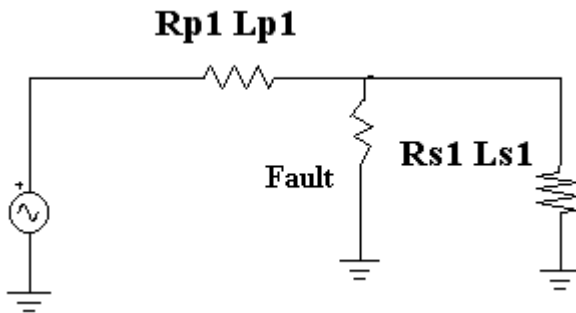
$R_m, L_{sat}$  : Résistance et l'inductance équivalent de la saturation du noyau.

$SW_1, SW_2$  : Interrupteurs idéals.

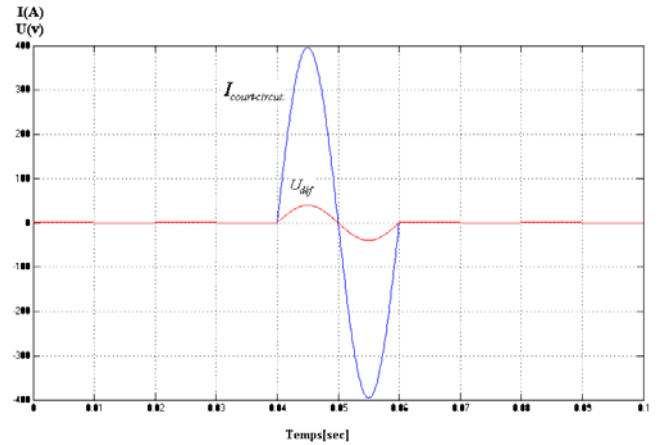
**Table 1:** Les valeurs de ce circuit

Elément	Unité	La valeur
$R_{p1}$	$\Omega$	500.0
$R_{s1}$	$\Omega$	0.1
$R_1$	$\Omega$	5.7
$R_2$	$\Omega$	0.0
$R_{nC}$	$\Omega$	0.0012
$L_{p1}$	$H$	0.0
$L_{s1}$	$H$	0.0
$L_1$	$H$	0.2223
$L_2$	$H$	$1.4e^{-6}$
$N_1$	---	343
$N_2$	---	1
$U_s$	$V$	$40/\sqrt{2}$

Dans la Fig.5 montre le circuit proposé pour la simulation du défaut sans limiteur de courant supraconducteur.



**Figure 7:** Circuit électrique lors de défaut sans limiteur de courant supraconducteur



**Figure 8:** Représentation de l’allure du courant et de tension lors de court-circuit (sans limiteur de courant).

Dans la Fig.6 La forme d’onde du courant et du tension sous forme sinusoïdal avec une valeur de tension de  $V_n = 9.39 V$  et de courant  $I_n = 21 A$  avant le défaut. Après l’apparition de défaut Le courant durant le défaut atteint la valeur  $400 A$  parce que la résistance  $500 \Omega$  a été court-circuitée.

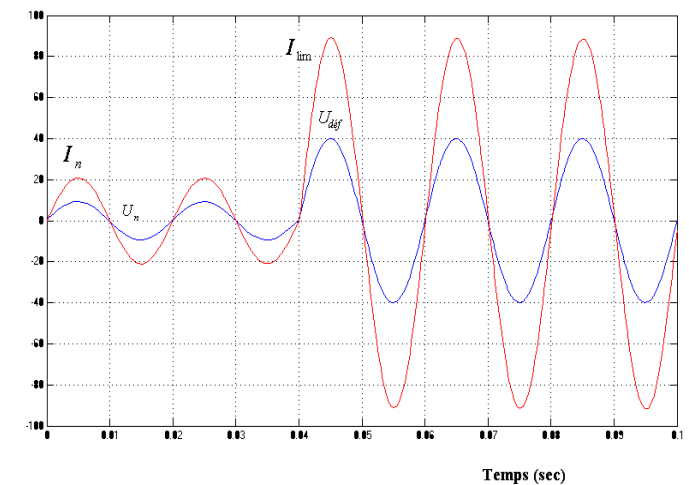
$$I_{court - circuit} = \frac{40}{0.1} = 400 A$$

La tension durant le défaut est :

$$U = U_{Rp1} + U_{Rs1}$$

Et puisque  $R_{p1}$  est court circuité on trouve:

$$U_{def} = U_{Rs1} = R_{p1} \cdot 400 = 0.1 \cdot 400 = 40 V$$



**Figure 9:** Le courant du secondaire et la tension du primaire avec un limiteur de courant lorsqu'on court-circuite la charge à 41 ms.

Durant défaut avec le limiteur supraconducteur proposé (Après 41ms) Fig.9 :

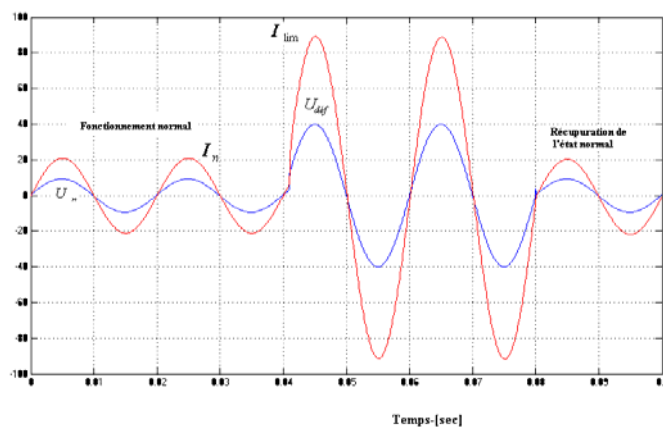
Le limiteur est dans l'état de fonctionnement on observe que ce dernier limite la surintensité qui apparaît durant le défaut et la valeur du courant est réduite à  $I_{lim} = 89.2 A$ .

D'après les résultats obtenus on peut dire que Le limiteur de courant proposée est efficace. La valeur du courant de court

circuit,  $K = \frac{400}{89,2} = 4,48$  Presque quatre fois la valeur du

courant de court circuit donc

$$I_{court - circuit} = 4,48 I_{lim}$$



**Figure 10:** Récupération de l'état.

La Fig.10 montre que d'après l'élimination de défaut le limiteur de courant récupère son état initial il passe de l'état normal vers son état supraconducteur.

Ces résultats montrent qu'il est possible de limiter le courant de court-circuit au courant critique du supraconducteur utilisé, on peut placés ce dernier en différent points de réseau, pour que sécuriseraient et réduiraient les contraintes lors des défaut.

#### IV. Conclusion

Le limiteur du courant supraconducteur de défaut apparaît comme un dispositif particulièrement intéressant pour les réseaux électriques. Outre les nombreux avantages qu'il apporterait aux réseaux, il permettrait d'améliorer la qualité de distribution de l'énergie électrique.

L'introduire d'un limiteur du courant supraconducteur capable de limiter les courants de court circuit à 4 fois le courant nominal, augmente la marge de sécurité de fonctionnement des réseaux et devrait permettre de ne plus dimensionner les équipements en fonction des courants de

court-circuit.

La présence donc d'un SFCL reste néanmoins nécessaire pour éliminer et isoler les zones de défaut, ils doivent être très rapide, et agir en moins de 20ms pour limiter l'énergie dissipée par effet joule dans les composants traversés par le courant de défaut, en particulier dans limiteur et éviter sa destruction par fusion, puisque peuvent atteindre plusieurs centaines de K.

La capacité des matériaux supraconducteur à limiter le courant et prometteuse et varie beaucoup de l'un de l'autre, ce qui offre de vastes champs de recherches à explorer avec l'émergence d'un produit économiquement valable. Ils ont encore tous besoin de progresser, en densité de courant, en homogénéité, en résistivité, et en densité de courant.

L'élément supraconducteur étant alors un organe de détection et de déclenchement d'un processus auxiliaire de limitation.

#### REFERENCES

- [1] M.Majoros, L.Jansak, "Transient Analysis of HTc Inductive Fault Current Limiter".IEEE, Vol.7, NO.2, JUNE 1997.
- [2] M.Victor, S.Vladimir "High -Tc superconducting inductive current limiter for 1Kv /25A performance" IEEE. Vol 5, PP 1044-1046, june1995.
- [3] Chanjoo C.Tan and peter D.Evans. "A variation of impedance of high-Tc Superconducting fault current limiter with open core". IEEE transactions on Applied Superconductivity. Vol 12, No 1,Mrch2 002.
- [4] J. Langston, M. Steurer, S. Woodruff, T. Baldwin, and J. tang." Generic Real-timer computer Simulation model for superconducting fault current limiters and its application in system protection studies". IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol, 15.No 2, June 2005.
- [5] G. Karady "Concept of a combined short circuit limiter and series compensators". IEEE Transactions on Power Delivery .Vol6. No3 July 1991.
- [6] S.Vladimir, M. Victor "Study of the quench conditions in superconducting current limiters" .IEEE. Vol 1, PP 2110-2113, Mars 2001.
- [7] Yew C. Tan and Peter D. Evan "Quenching behaviours of superconductors in an inductive fault current limiter". IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol, 11.No 2, March 2001.
- [8] G. Zhang, Z. Wang "The improved Magnetic Shield Type High Tc Superconducting Fault Current Limiter and Transient Characteristic Simulation".IEEE, Vol.13, NO.2, JUNE 2003.