

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : électrotechnique industrielle

Présenté par :

HAMADA Mohammed Fouzi GHETTAS Mohammed Laid

Thème:

**Analyse de l'énergie dissipative dans les limiteurs
de courant pour les systèmes à puissance**

Soutenu publiquement

Le: 05/06/ 2017

Devant le jury :

M^{me} BOUALI Khadîdja

MC (A)

Président

UKM Ouargla

M^r BEN ALIA Khaled

MC (B)

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^{me} NACEUR Sonia

MC (A)

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2016/2017

Dédicace

Je dédie ce modeste effort a l'esprit pour de mon père, et je souhaite de mon Allah de l'introduite le paradis.

Et je dédie ce modeste travail

À ma mère

À mon frère et ma sœur

À toute la famille et la famille universitaire

À mes amis

Ghettas Mohammed Laid

Dédicace

Je dédie ce mémoire

À mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements

À mes frères

À mes sœurs

À mes amies et mes camarades

Sans oublier tous les professeurs et toute la famille universitaire.

Hamada Mohammed Fouzi

REMERCIEMENT

*Nous tenons tout d'abord à remercier « Dieu » le tout puissant. Nous remercions vivement notre encadreur: **Dr. Khaled BEN ALIA** qui a Un rôle important dans le déroulement de cette étude. Pour son aide, ainsi que pour la confiance qu'il nous a prodiguée durant la réalisation de ce travail. Nos plus vifs remerciements s'adressent également aux membres de jury qui nous ont honorés en acceptant d'évaluer ce travail :*

1-M^{me}BOUALI Khadîdja

2-M^rBEN ALIA Khaleds

3-M^{me}NACEUR Sonia

Que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation reçoivent notre gratitude et en particulier ceux du département de génie électrique de l'université d'Ouargla.

Nous aimerons à présent remercier nos proches et en premier lieu nos parents de nous avoir soutenus et d'avoir cru en nous. Nous remercions aussi nos frères et nos sœurs.

Sans oublier d'exprimer nos remerciements à tous nos amis et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

- ✓ *GHETTAS MOHAMMED LAID*
- ✓ *HAMADA MOHAMMED FOUZI*

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I: Généralités sur les supraconducteurs

I.1.Introduction.....	03
I.2.Historique du supraconducteur.....	03
I.3 .Propriétés générales des supraconducteurs.....	04
I.5. Les grandeurs critiques.....	05
I.5.1Température critique.....	06
I.5.1.1.Supraconducteur à basse température critique SB Tc.....	06
I.5.1.2.Supraconducteur à haute température critique SHTc.....	07
I.5.2.Champ magnétique critique Hc.....	07
I.5.2.1.Supraconducteur de type I.....	08
I.5.2.2.Supraconducteur de type II.....	08
I.5.3.Densité de courant critique JC.....	09
I.6.Modèle de supraconducteur.....	10
I.6.1.Modèle de Bean.....	10
I.6.2 .Modèle de Flux Flow et Flux Creep.....	11
I.6.3.Modèle de la loi en puissance E – J.....	12
I.6.4. Le modèle de Kim.....	12
I.7.Applications des supraconducteurs.....	12
I.7.1 .Application médicale.....	12
I.7.2. Conservation de l'énergie.....	13
I.7.3 Les câbles supraconducteurs.....	13
I.7.4.Les filtre.....	14
I.7.5 .Moyens de transports.....	14
I.7.6.Machines tournantes.....	15
I.7.7.Transformateur et limiteur de courant.....	16
I.7.7.1.Limiteur de courant de défaut.....	16
I.7.7.2. Limiteurs supraconducteurs de courant.....	16
I.7.7.2.1.Limiteur supraconducteur type résistif.....	17
I.8. Conclusion.....	18

Chapitre II: Limiteur de courant

II.1.Introduction.....	19
II.2.Limitation de courant dans les réseaux électriques.....	19
II.2.1. Intérêts des limiteurs de courant.....	19
II.3.Fonctionnement des limiteurs de courant.....	19
II.3.1.Principe général de la limitation de courant.....	19
II.4.Limiteur de courant classiques.....	20
II.4.1.Réactances série.....	20
II.4.2.Limiteur commandé.....	20
II.4.3.Résistance variable.....	21
II.5.Limiteurs de courant a base de supraconducteurs.....	21
II.5.1.SFCL résistif.....	22
II.5.1.1. Fonctionnement des SFCL résistifs.....	22
II.5.2 Etat de l'art des SFCL résistifs.....	23
II.5.3.SFCL de type noyau magnétique écrané.....	25
II.5.3.1Fonctionnement des SFCL de type noyau magnétique écrané.....	25
II.5.4SFCL de type Pont redresseur.....	26
II.5.4.1Fonctionnement des SFCL de type pont redresseur.....	26
II.5.5SFCL de type contrôleur du courant de défaut.....	27
II.5.5.1Fonctionnement des SFCL de type contrôleur du courant de défaut.....	27
II.5.6 SFCL de type noyaux magnétiques saturés.....	28
II.5.6.1Fonctionnement d'un SFCL de type noyaux magnétiques saturés.....	28
II.6.Comparisons des différents types de SFCL.....	29
II.7. Conclusion.....	30

Chapitre III: Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	31
III.2.Etude réseaux de distribution sans SFCL.....	31
III.2.1 Description du réseau de distribution étudié.....	31
III.3 Les allures de courant et de tension pendant le fonctionnement normal.....	32
III.4. Les allures de courant et de tension pendant un défaut.....	33
III.5Etude de réseaux de distribution avec un SFCL pendant un défaut de court-circuit.....	34
III.5.1. Modèle de SFCL.....	34
III.6 Les allures de courant et de tension pendant un défaut avec SFCL.....	38
III.7 Énergie dissipation dans les SFCL.....	40
III.8Conclusion.....	42

Conclusion Générale.....	43
Référence	45

Liste Des Figure

Chapitre I:Généralités sur les supraconducteurs

Figure I.1:	Heike Kamerlingh Onnes première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la supraconductivité (1911).	04
Figure I.2:	La résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température	04
Figure I.3:	Diamagnétisme parfait des supraconducteurs	05
Figure I.4:	Allure des résistivités d'un supraconducteur et d'un conducteur normal en fonction de la température	06
Figure I.5:	Caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type I.	08
Figure I.6:	Caractéristique B(H) d'un supraconducteur de type II.	09
Figure I.7:	Caractéristique de champ électrique en fonction de densité de courant	10
Figure I.8:	Surface critique délimitant l'état	10
Figure I.9:	Modèle de Flux Flow et Creep.	11
Figure I.10.	Montage d'un système IRM.	13
Figure I.11:	Câble supraconducteur 110kg de câbles supraconducteurs remplacent 8200kg de cuivre.	14
Figure I.12:	Effet d'un filtre supraconducteur sur la netteté de l'image d'une zone	14
Figure I.13:	Train	15
Figure I.14:	Comparaison entre le moteur conventionnelle et le moteur	15
Figure I.15:	Limiteur de courant.	16
Figure I.16:	Evolution de courant de court-circuit avec et sans limiteur de courant	17
Figure I.17:	Schéma de principe d'un limiteur résistif.	17

Chapitre II:Limiteur de courant

Figure II.1:	Limitation de courant par transformateur court-circuité.	20
Figure II.2:	Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant	20
Figure II.3:	Courant de court-circuit avec et sans limiteur	21
Figure II.4:	SFCL Résistif	22
Figure II.5:	SFCL Résistif assisté magnétiquement	23
Figure II.6:	Démonstrateur CURL	23
Figure II.7:	SFCL de type noyau magnétique écrané	26
Figure II.8:	SFCL de type pont Redresseur	27
Figure II.9:	SFCL de type contrôleur de courant de défaut	27

Figure II.10: SFCL de type noyaux magnétique saturés	28
---	----

Chapitre III:Résultats et discussions

Figure III.01: Schéma de simulation sans SFCL et sans défaut (état normale)	31
Figure III.02: Allure de courant dans l'état normale	32
Figure III.03: Allure de tension dans l'état normale	32
Figure III.04: Schéma de simulation avec SFCL	33
Figure III.05: Allure de tension pendant le défaut	33
Figure III.06: Allure de courant pendant le défaut sans SFCL	34
Figure III.07 : Schéma de simulation avec SFCL	34
Figure III. 08 : Caractéristique E(J) réel d'un SFCL	35
Figure III.09 : Courants de lignes en fonction de temps.	38
Figure III.10 : Variation des résistances de SFCL en fonction de temps	39
Figure III.11 : Variation des températures de SFCL en fonction de temps	39
Figure III.12 : Variation des états de fonctionnement de SFCL en fonction de temps	40
Figure III.13 : Énergie dissipé et courant de défaut pour diverses valeurs de résistance pendant la limitation Influence de temps	41
Figure III.14 : allure dissipation d'énergie pour ($t_f = 0.1s$ et $t_f = 0.05s$)	42

Liste Des Tableaux

Chapitre I:Généralités sur les supraconducteurs

Tableau I.1: Comparaison entre le comportement magnétique d'un conducteur parfait et celui d'un supraconducteur idéal.	05
---	----

Chapitre II:Limiteur de courant

Tableau II.1 : Comparaison des différents types de SFCL	29
--	----

Chapitre III:Résultats et discussions

Tableau III.01: Paramètre de réseau étudié	31
Tableau III.02: Résumé des paramètres de modèles SFCL.	37

Liste Des Symboles

IC [A] :	Courant de court-circuit.
JC [A / m²] :	Densité du courant critique.
Un [V] :	Tension nominale composée.
Vn [V] :	Tension nominal simple.
I(t) [A] :	Courant de court-circuit instantané.
B [T] :	Induction magnétique.
E [V/m] :	Champ électrique.
Ec [V/m] :	Champ électrique critique.
H [A/m] :	Champ magnétique.
H₀ [A/m] :	Champ magnétique à la surface du supraconducteur.
θ :	Température.
H_C [A/m] :	Champ magnétique critique.
H_{C1} [A/m] :	Premier champ magnétique critique.
H_{C2} [A/m] :	Second champ magnétique critique.
P_c	Résistivité de flux creep.
K :	Constant de Boltzmann.
H_{c1} :	Champ critique 1.
H_{c2} :	Champ critique supérieur.
I_c [A] :	Courant critique.
J [A/m²] :	Densité de courant.
J_C [A/m²] :	Densité de courant critique.
P_f :	Résistivité de flux flow.
U₀ :	Potentille profondeur.
I [A/m] :	Aimantation développée dans le matériau.
P_V [W/m³] :	Puissance des pertes par unité de volume.
T [K°] :	Température.
T_C [K°] :	Température critique.
X_m :	Susceptibilité magnétique.
μ_r [H/m] :	Perméabilité magnétique.
μ₀ [H/m] :	Perméabilité magnétique du vide.

Liste Des Abréviations

- SHTc:** Supraconducteur à haute température critique.
- SBTc:** Supraconducteur à basse température critique.
- SMES :** Stockage d'énergie magnétique supraconducteur.
- CTP :** Composants à Coefficient Thermique Positif.
- SFCL :** Limiteur de courant de défaut supraconducteur.
- PIT :** Poudre dans le tube.
- LTS:** Température basse température supraconducteur.
- MVF :** Méthode des Volumes fin.
- BSC:** Théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer.
- SHTC :** Supraconducteur à haute température critique.
- DC:** Courant Directe.
- AC:** Courant alternative.
- YBCO:** Supraconducteur à base d'yttrium, de baryum et d'oxydes de cuivre.
- BSCCO .Bi-2212, Bi-2223 :** Supraconducteur a base de bismuth, de strontium, de calcium et d'oxydes de cuivre.
-

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale :

le physicien Heike Kamerlingh Onnes et son équipe au cours d'une étude sur les propriétés de la matière à très basse température, découvrent que la résistance électrique du devient nulle en dessous de 4,2 K, en 1911, c'est la phénomène de la supraconductivite Cette dernière se traduit par deux effets remarquables Non seulement un supraconducteur conduit le courant électrique de façon parfaite, mais en plus, il expulse les champs magnétiques.

En 1986, les chercheurs ont réussi à obtenir des matériaux supraconducteurs à haute température critique. Cela a relancé l'intérêt pour ces matériaux. Ce nouveau type de supraconducteurs plus faciles et moins coûteux à utiliser que celles de leurs prédécesseurs.

Actuellement, les supraconducteurs sont déjà utilisés en recherche, pour des applications dans de nombreux domaines, notamment pour le stockage de l'énergie électrique, de l'imagerie médicale, dans les transports (les trains à lévitation magnétique) et des limiteurs de courant.

La coupure des courants de défaut reste un problème mal résolu dans les réseaux électriques. Cependant, l'application la plus prometteuse semble être la protection des réseaux par l'utilisation des limiteurs supraconducteurs de courant. La caractéristique intrinsèque fortement non linéaire du champ électrique en fonction du courant dans un supraconducteur ouvre une nouvelle voie particulièrement intéressante et innovante pour la limitation des courants de défaut dans les réseaux électriques ; [1]. Ces matériaux possèdent une résistance nulle dans une certaine plage de courant, peuvent également développer une résistance importante en cas de dépassement du courant critique du matériau. Ces limiteurs sont utilisés pour la protection les réseaux électriques, ils sont considérés comme des nouveaux systèmes complémentaires aux appareils des protections classiques (disjoncteurs, sectionneurs, interrupteurs) à cause de sa rapidité et absence des problèmes liés au déclenchement.

L'objectif de ce mémoire est de présentés les différentes caractéristiques des SH Tc, ainsi de modélisé le comportement électrique et thermique de limiteur de courant conçu à partir d'un supraconducteur à haute température critique durant le processus de la limitation du courant de défaut Ce mémoire de master s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique sur les matériaux supraconducteurs, en particulier les supraconducteurs à haute température critique ainsi que les différentes modèles et leurs applications dans le domaine du génie électrique.

Le deuxième chapitre présente les limiteurs de courant classique ; en suite le fonctionnement d'un limiteur de courant ; après ceci le limiteur à base de supraconducteur a haute température critique avec ses différents types.

Le troisième chapitre est consacré au modèle numérique adopté pour la résolution des équations thermique et électrique caractéristiques aux phénomènes électrothermique à traiter. Les procédures sont implémentées sous SIMULINK/MATLAB, et à l'aide de modèle de Blair Steven les résultats des simulations des comportements d'un limiteur de courant supraconducteur Ces résultats concernant le calcul et la visualisation des différentes grandeurs tel que la résistance, la température, l'énergie dissipée Nous terminerons par une conclusion et les perspectives envisagées ; [1].

Chapitre I:

Généralités sur les supraconducteurs

- ❖ Introduction
- ❖ Historique du Supraconducteur
- ❖ La Supraconducteur
- ❖ Propriétés générales des Supraconducteurs
- ❖ Les Grandeurs Critiques
- ❖ Modèle de supraconducteur
- ❖ Application de supraconducteur
- ❖ Conclusion

I.1 Introduction

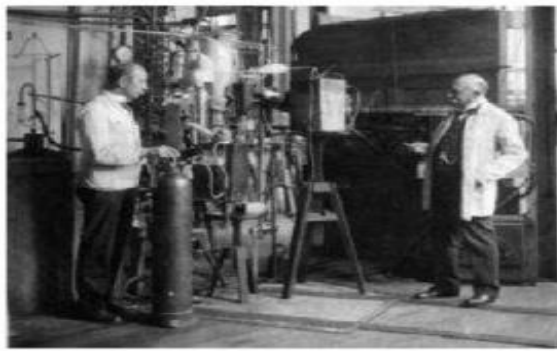
Les supraconducteurs sont des matériaux spécifiques, ils permettent d'envisager le transport de l'énergie électrique avec des pertes négligeables, ils sont donc très prometteurs pour les applications en électrotechnique. Ce chapitre commence par un bref rappel sur les supraconducteurs (historique et définition) avec leurs propriétés fondamentales. Puis, les différents types des supraconducteurs (type I et type II) seront considérés. Ensuite, quelques modèles des supraconducteurs. Enfin, nous présenterons les principales applications des supraconducteurs en électrotechnique et donnerons une notion de limitation de courant dans les réseaux électriques; [1].

I.2 Historique du supraconducteur

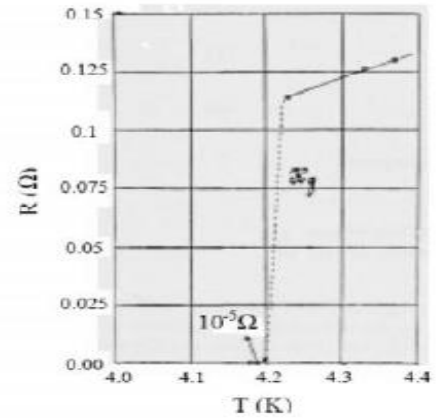
Le phénomène de la supraconductivité a été découvert en 1911 par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes; [2], lors de la liquéfaction de l'hélium, il constate que la résistivité chute brutalement à zéro. Ainsi un courant électrique continu peut circuler quasi indéfiniment sans dissipation d'énergie. On dit qu'il y a transition de l'état normal de conducteur vers l'état supraconducteur. Cette transition intervient à une température appelée température critique. En 1933, W.Meissner et R.Ochsenfeld, observent qu'hormis les qualités exceptionnelles de conduction de ces métaux, ils possèdent la propriété d'exclure toute pénétration d'un champ magnétique extérieur grâce à la circulation de super-courants dans le supraconducteur. Cet effet de non-pénétration du champ magnétique est nommé effet Meissner. Une théorie microscopique (BCS) portant les noms des auteurs, a été émise en 1957 par John Bardeen, Léon Cooper et John Schrieffer (tous trois prix Nobel de physique en 1972) pour expliquer la supraconductivité.

Avec cette théorie, le mécanisme de la supraconductivité ne permettait pas d'obtenir des températures critiques supérieures à une trentaine de Kelvins (au-delà, l'agitation thermique casse les paires). Pour cette raison la découverte en 1986 par Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller de la supraconductivité dans un oxyde synthétique de cuivre, lanthane et baryum à une température critique de 35K, plus élevée que toutes celles connues jusqu'alors, a eu un retentissement considérable.

Cette découverte relance alors la recherche dans ce domaine, et permet la mise en évidence de ce phénomène jusqu'à 164K, en 1998; [2].



-a-



-b-

Figure I.1: Heike Kamerlingh Onnes première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la supraconductivité (1911).

I.3 Propriétés générales des supraconducteurs

Un supraconducteur est un matériau qui ses caractéristiques magnéto-électriques se modifier lorsque la température devient inférieure à une certaine valeur appelée température critique (T_c) et que le champ magnétique extérieur est inférieur à une valeur appelée champ critique (H_c) [3].

Une supraconductivité est la propriété spécifique de certains matériaux à présenter une absence de résistivité électrique mesurable au dessous d'une certaine température critique (T_c). Ceci permet donc d'envisager le transport de l'énergie électrique sans perte; [1].

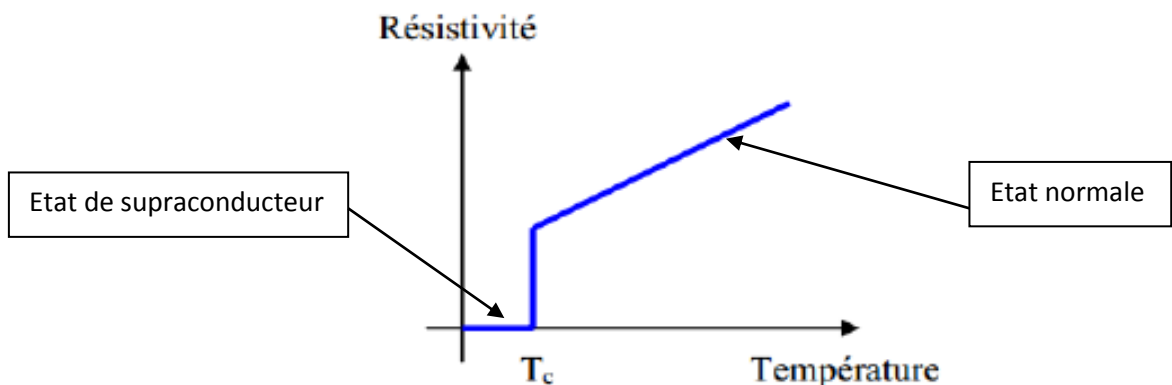


Figure I.2: La résistivité d'un supraconducteur en fonction de la température

D'autre part, cette disparition de résistivité à lieu en même temps avec l'apparition d'une propriété magnétique extraordinaire particulière à la supraconductivité, qui consiste en l'exclusion de tout flux magnétique à l'intérieur du matériau. La susceptibilité χ dans l'échantillon est égale à (-1) (diamagnétisme parfait), c'est l'effet missner; [4].

C'est l'apparition de courant supraconducteur de surface qui empêche le champ magnétique de pénétrer à l'intérieur des matériaux. C'est pourquoi, nous pouvons dire qu'un matériau supraconducteur est à la fois conducteur parfait et un diamagnétique parfait ;[5].

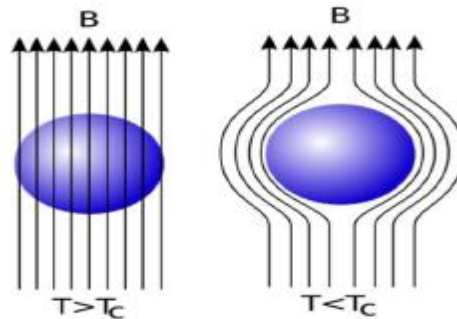


Figure I.3: Diamagnétisme parfait des supraconducteurs

Tableau I.1: Comparaison entre le comportement magnétique d'un conducteur parfait et celui d'un supraconducteur idéal.

		Refroidissement puis suppression du champ B_e		
		→		
		$T = 300\text{ K}$ $B_e \neq 0\text{ T}$	$T < T_c$ $B_e \neq 0\text{ T}$	$T < T_c$ $B_e = 0\text{ T}$
Conducteur parfait ($\rho = 0$)				
Supraconducteur idéal ($\rho = 0$ et $\chi = -1$)				

I.4 Les grandeurs critiques

La supraconductivité n'apparaît qu'en dessous de la température critique, mais celle-ci n'est pas la grandeur critique unique. Il y a trois paramètres fondamentaux qui gouvernent et influencent l'état supraconducteur :

- ❖ La température T_c .
- ❖ Le champ magnétique H_c .
- ❖ La densité de courant J_C .

I.4.1 Température critique

La température critique d'un supraconducteur est une température dépendant du matériau, de la densité de courant le parcourant et du champ magnétique externe appliqué.

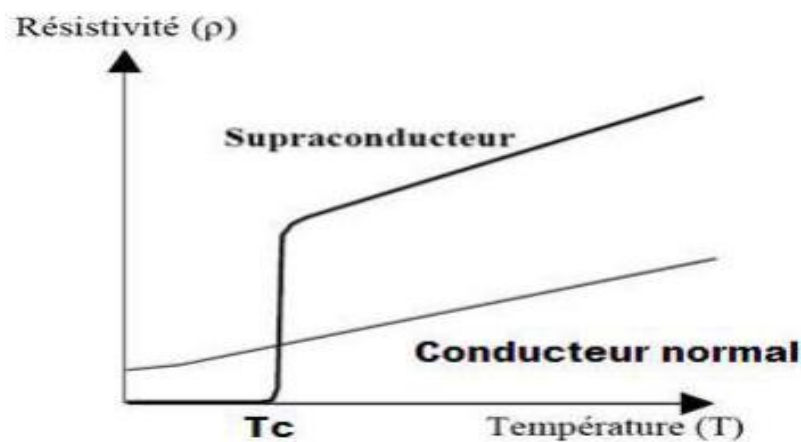


Figure I.4: Allure des résistivités d'un supraconducteur et d'un conducteur normal en fonction de la température.

Les supraconducteurs se distinguent également par leurs T_c Matériaux à basse température critique (LTS pour Low Temperature Supraconducteurs), elle peut atteindre des valeurs de 20K, les utilisera donc essentiellement à l'hélium liquide, Et matériaux à haute température critique, elle peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 120 degrés kelvin, les applications couvrent donc une large gamme de fluide (hélium liquide, hélium gaz, néon liquide, néon gaz, hydrogène, azote liquide, azote gaz); [5].

I.4.1.1 Supraconducteur à basse température critique SB T_c

IL s'agit des premiers supraconducteurs utilisés pour des applications réelles.

Appartenant aux supraconducteurs de second type. Leur température critique est inférieure à 20 K et on les utilise essentiellement avec de l'hélium liquide. Des matériaux tels que le **NbTi** ou le **Nb₃Sn** sont majoritairement utilisés, ils présentent une grande facilité de mise en

forme pour des bobines à fort champ magnétique. On les retrouve par exemple dans les appareils d'imagerie médicale; [5].

I.4.1.2 Supraconducteur à haute température critique SH_{Tc}

Découverts en 1986, les supraconducteurs à haute température critique reposent sur des matériaux céramiques comme le Barium et l'Yttrium. Deux catégories ressortent donc, les BSCCO et YBCO. Le premier cité a une structure de type PIT (Powder In Tube), ce qui en fait.

Un fil robuste pouvant facilement composer des bobines pour des application comme les moteurs électriques, une longueur maximale de câble de 1000 m est atteinte actuellement. Le second, de structure multicouche de matériaux cuits et recuits, a des caractéristiques qui permettent d'envisager une utilisation à une densité de courant et un champ magnétique plus important, il peut atteindre actuellement près de 500 m. Il trouve une utilisation avantageuse dans le domaine des lignes de transport; [5].

I.4.2 Champ magnétique critique H_c.

Il dépend également du type de supraconducteur, le champ critique relativement faible pour ceux de premier type et deux champs critiques séparés d'une zone d'état mixte pour ceux de second type.

De manière générale, le champ magnétique critique correspond à la valeur du champ externe, il s'agit de la somme du champ propre du supraconducteur et du champ extérieur, qui fait transiter ce matériau à l'état normal, pour une densité de courant nulle et une température minimale; [5].

L'induction magnétique à l'intérieur du matériau est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{I}) \quad \mathbf{I.1}$$

Avec: $\mathbf{I} = \chi \mathbf{H}$

Où :

B: Induction magnétique [T]

H: Champ magnétique [A.m-1]

I : L'aimantation développée dans le matériau [A.m-1]

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [H.m-1]

μ_r : Perméabilité magnétique du matériau [H.m-1]

Pour une valeur donnée du champ appliqué H₀, l'aimantation chute brutalement à zéro, et le champ magnétique pénètre dans le matériau.

On peut définir le champ magnétique critique H_c qui dépend de la température T par la formule suivante :

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad \text{I.2}$$

H_0 :

Il existe deux types de supraconducteurs : les supraconducteurs de type I, et les supraconducteurs de type II.

I.4.2.1 Supraconducteur de type I

Ils ne possèdent qu'un seul champ critique H_c . Le champ magnétique pénètre dans une épaisseur appelée longueur de pénétration de London dans laquelle se développent des supers courants.

Le comportement de ce type de supraconducteurs est simple car il n'existe que deux états. L'état normal correspond à une valeur élevée de la résistance du matériau et l'état supraconducteur correspond à un diamagnétisme presque parfait dans la figure, la caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur du type I est présentée. Les supraconducteurs de type I n'ont aucune application industrielle à l'heure actuelle.

En réalité, la faible valeur du champ magnétique critique de ce type de supraconducteur rend leur utilisation en électrotechnique difficile; [5].

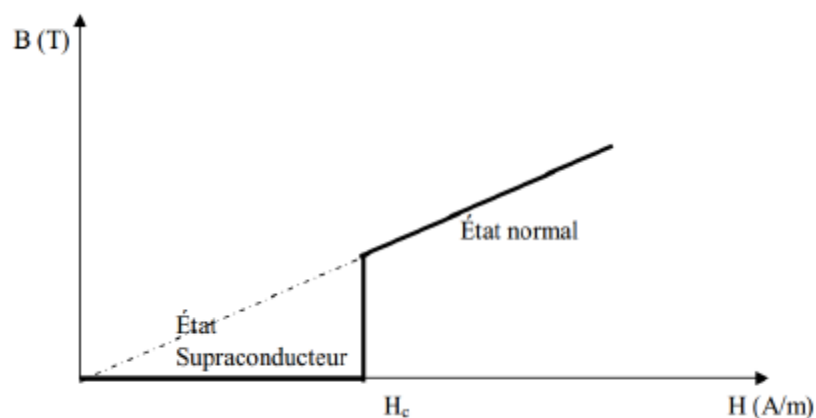


Figure I.5: Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type I.

I.4.2.2-Supraconducteur de type II

Ces supraconducteurs possèdent deux champs critiques, le deuxième nettement plus grand que le premier (il peut atteindre des dizaines de teslas) En outre, ceux-ci présentent des

valeurs plus élevées de champ, de température et de courant critiques par rapport aux supraconducteurs du type II, ce qui les rend très attractifs pour l'électrotechnique ; [5].

- **Zone 1:** état supraconducteur, diamagnétisme parfait, pour des valeurs du champ inférieur à H_c (en général petit).
- **Zone 2:** état mixte, diamagnétique partiel, pour des valeurs du champ entre H_{c1} et H_{c2} , bien que supraconducteur, le matériau est pénétré par le champ extérieur.
- **Zone 3:** état normal avec une forte résistance électrique, pour des valeurs de champ supérieurs à H_{c2} .

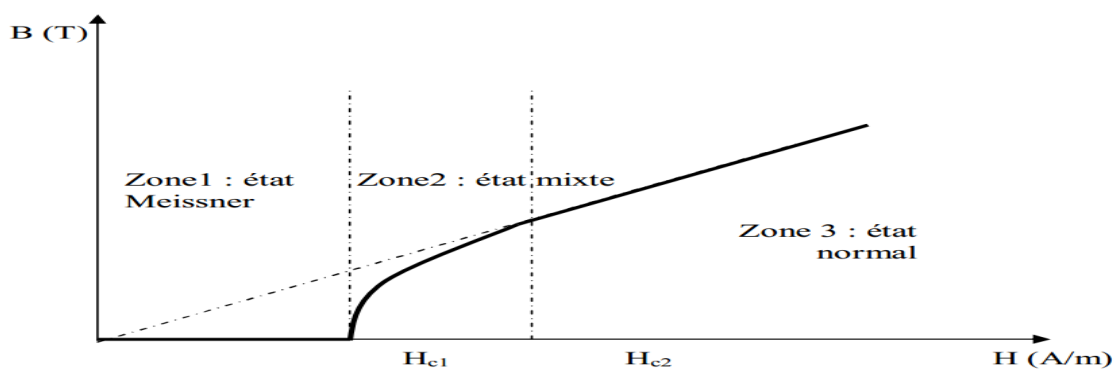


Figure I.6: Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II.

I.4.3-Densité de courant critique J_C

Elle s'interprète en fonction du type de supraconducteur. Pour les supraconducteurs de type I, il existe une densité de courant critique, au-delà de cette valeur le supraconducteur transite vers l'état normal.

Pour les supraconducteurs de type II, il existe une densité de courant critique qui est celle qui développe des forces de Laplace supérieure à celle d'ancrage des vortex. Ce phénomène appelé flux flow, apporte des échauffements thermiques dans le matériau et caractérise ainsi sa transition vers l'état normal. Cette valeur est généralement déterminée par le champ électrique. Suite à plusieurs retours sur expérience un seuil arbitraire de $1\mu\text{V}/\text{cm}$ a été choisi pour les matériaux à haute température critique ($0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ pour les LTS), ce seuil définit la densité de courant critique sur une courbe exprimant la tension en fonction de la densité de courant aux bornes d'un échantillon supraconducteur ; [5].

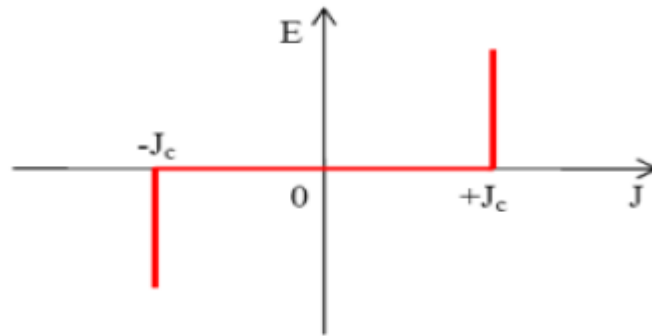


Figure I.7: Caractéristique de champ électrique en fonction de densité de courant à

A travers des notions ci-dessus, nous trouvons que la supraconductivité ne se manifeste que lorsque $T < T_c$, $H < H_c$, et $J < J_c$. D'autre part, chaque valeur critique de T_c , H_c et J_c , dépend des deux autres paramètres. C'est pourquoi nous définissons donc une surface critique en dessous de laquelle le matériau est à l'état supraconducteur et au contraire au dessus, il est à l'état normal; [5].

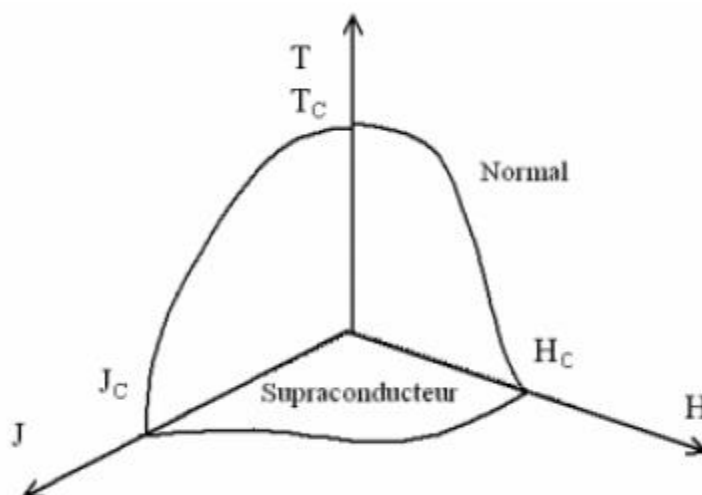


Figure I.8: Surface critique délimitant l'état des matériaux

I.5 Modèle de supraconducteur

I.5.1 Modèle de Bean

Le modèle de Bean, suppose, en plus que la densité de courant critique est indépendante de la valeur de l'induction magnétique B . Ce modèle a l'avantage d'être assez simple mathématiquement et permet pour des géométries simples, d'avoir des expressions analytiques et d'étudier les grandeurs importantes pour les pertes AC par exemple. Cependant, la discontinuité de ce modèle le rend peu utilisable pour des développements numériques, de

plus, il ne reflète pas toujours de façon satisfaisante le comportement des supraconducteurs (Figure .I.7) [5].

I.5.2 Modèle de Flux Flow et Flux Creep

Nous pouvons définir deux modes de fonctionnement pour le supraconducteur, selon la valeur de la densité de courant critique J_C :

- Si $|\mathbf{J}| \leq J_C$, le réseau de vortex est ancré, néanmoins, des vortex passent d'un site d'ancrage à un autre sous l'action de l'agitation thermique. Ce phénomène dissipatif est appelé régime de « flux Creep »

$$E = 2\rho_c J_C \sinh\left(\frac{U_0 J}{K\theta J_C}\right) e^{-\frac{U_0}{K\theta}} \quad \text{I.3}$$

K : Constant de Boltzmann.

θ : Température.

ρ_c : Résistivité de Flux Creep.

U_0 : Potentiel de profondeur.

- Si $|\mathbf{J}| > J_C$, le réseau de vortex se déplace et génère des pertes faisant apparaître une résistance électrique dans le matériau supraconducteur. Ce phénomène est appelé régime de « flux flow ».

$$E = \pm \left(E_c + \rho_F J_C \left(\frac{|J|}{J_C} \right) - 1 \right) \quad \text{I.4}$$

ρ_F : Résistivité de flux flow.

La densité de courant critique peut alors être définie comme étant la limite entre le régime de flux creep et le régime de flux flow. Cette limite étant très floue, la densité critique de courant est souvent déterminée par la valeur d'un champ électrique critique E_c ; [5].

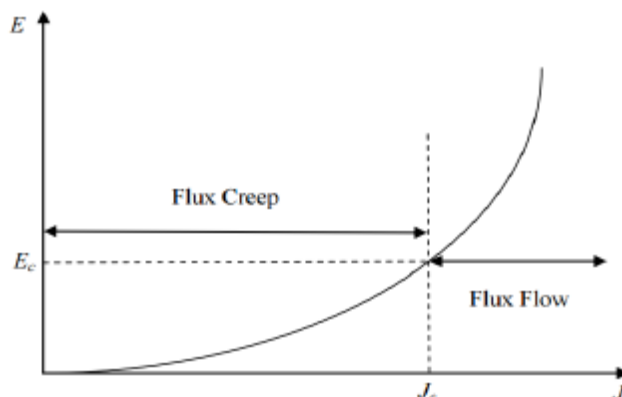


Figure I.9: modèle de Flux Flow et Creep.

I.5.3 Modèle de la loi en puissance E – J

C'est un modèle qui modélise bien le comportement des supraconducteurs à haute température critique (HTC) autour de J_c .

$$\vec{E}(J) = \frac{E_c}{J_c} \left[\frac{J}{J_c} \right]^{n-1} J \quad \text{I.5}$$

Les paramètres de variation de cette loi sont la densité de courant critique, J_c et l'exposant « n ». Avec ce modèle on peut faire varier les courbes $E(J)$ de sorte qu'on peut modéliser un conducteur normal pour $n = 1$ (loi de comportement linéaire) jusqu'à l'obtention d'une courbe dans le cas du modèle de l'état critique pour un $n > 100$; [5].

I.5.4- Le modèle de Kim

Le modèle de Kim ainsi que la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur isotrope et isotherme. Ils ne tiennent pas compte de l'échauffement éventuel du conducteur sous l'effet des pertes qui entraînerait une diminution du courant critique. Dans le modèle de Kim, la densité de courant critique est supposée constante quel que soit le champ magnétique extérieur. Dans la réalité la densité de courant dépend fortement de son orientation par rapport au champ et de l'induction magnétique, B . Une expression de $J_c(B)$ dans le cas isotrope a été donnée par Kim.

$$J_c(|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad \text{I.6}$$

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique [5].

I.6 Applications des supraconducteurs

De plus de leur intérêt scientifique, la recherche pour les applications a été toujours une force motrice pour la science des matériaux supraconducteurs [5] La supraconductivité est utilisée dans de nombreux domaines, l'électronique, l'électrotechnique, le médical...etc.

I.6.1 Application médicale

Aujourd'hui l'IRM est le marché le plus important pour les supraconducteur, les supraconducteurs sont utilisés en médecine avec l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique). Qui repose sur le principe que les atomes d'hydrogène du corps réémettent l'énergie accumulée par l'induction d'un fort champ magnétique à une fréquence vibratoire pouvant être détectée. Les supraconducteurs apparaissent en deux points : tout d'abord dans l'électroaimant qui induit le fort champ magnétique nécessaire à l'accumulation d'énergie par

les atomes, ensuite dans le détecteur d'ondes électromagnétiques, qui fournit l'image magnétique du cerveau; [5].



Figure I.10. Montage d'un système IRM.

I.6.2 Conservation de l'énergie

Le système de conservation le plus utilisé est le SMES (Magnétique Supraconducteur Stockage Energie) qui est constitué d'un anneau supraconducteur refroidi sous sa température critique et dans lequel on injecte le courant. Son point faible est le comportement du cryostat : celui-ci doit en effet compenser les variations de température de la bobine correspondant aux cycles de charge et de décharge en courant. Dans les SMES l'énergie peut être libérée très rapidement ; [5].

I.6.3 Les câbles supraconducteurs

L'une des applications la plus prometteuse des matériaux supraconducteurs est la fabrication des câbles supraconducteurs pour le transport d'énergie. Ils sont aussi appelés câbles de forte puissance à diélectrique froid. Avec les progrès réalisés avec cryogénie le développement de ce système de câble est un enjeu à la fois technique et économique. Les premiers résultats techniques et les perspectives économiques sont encourageants. Ces câbles d'énergie constituent, avec les limiteurs de courant et les moteurs, une des utilisations des supraconducteurs à haute température critique les plus susceptibles de déboucher à court terme ou moyen terme sur une application industrielle ; [5].

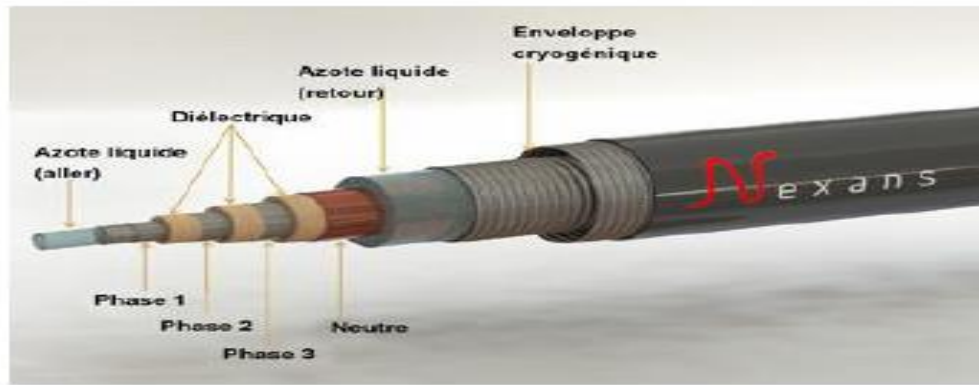


Figure I.11: Câble supraconducteur 110kg de câbles supraconducteurs remplacent 8200kg de cuivre.

I.6.4 Les filtre

Les filtres sont utilisés souvent dans la télécommunication ou dans les radars. Leur conception utilise la très haute fréquence à bande réduite, au-delà de 100MHz, ils sont fabriqués dans un alliage en Niobium ou YBaCuO, ils ont une taille d'environ 2 cm alors que des filtres identiques avec composantes classiques seraient beaucoup plus volumineux, Ces filtres possèdent une bande passante comprise entre 4,1 GHz et 4,3 GHz. On peut les ajuster en faisant varier la température, dont dépend la profondeur de pénétration. La figure I.15 donne les images d'une région rurale de longueur de 28 Méprises avec un filtre conventionnel (image du haut) et un filtre supraconducteur (image du bas) ; [5].

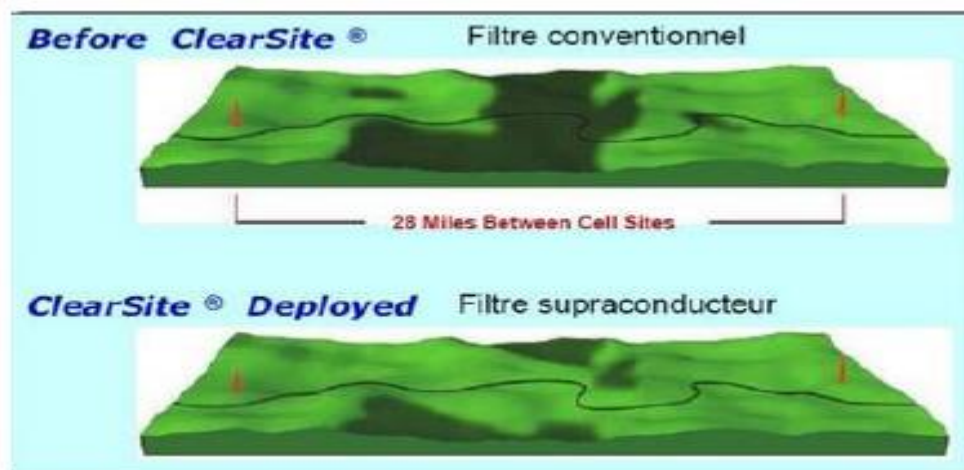


Figure I.12: Effet d'un filtre supraconducteur sur la netteté de l'image d'une zone

I.6.5 Moyens de transports

Le premier train à lévitation magnétique commercial se trouve à Shanghai, en République Populaire de Chine. Ces trains sont construits de telle sorte qu'il n'y a aucun

contact entre la voie et le train (lévitation de 10 cm au dessus de la voie dans le meilleurs cas), ce qui supprime toute trace de friction. La voie est constituée d'aimants permanents qui repoussent le champ magnétique émis par de forts aimants supraconducteurs placés sous le train. C'est un train écologique; [5].



Figure I.13: Train

I.6.6 Machines tournantes

L'utilisation des supraconducteurs dans les cryoalternateurs est à l'origine de nombreux prototypes. Le remplacement des bobinages en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet un gain de masse grâce aux grandes densités de courant du fil et à la disparition du circuit magnétique. Le fort couple massique de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués.

Des moteurs d'une puissance nominale de 5 MW ont été testés avec succès. En projet aux Etats Unis (pour 2006) construction d'un moteur de 36 MW, 120 pm, 70 Tonnes. L'intérêt principal est la réduction en volume et en poids, leur stabilité et leur efficacité (coût réduit de fonctionnement) pour une valeur d'investissement comparable; [5].

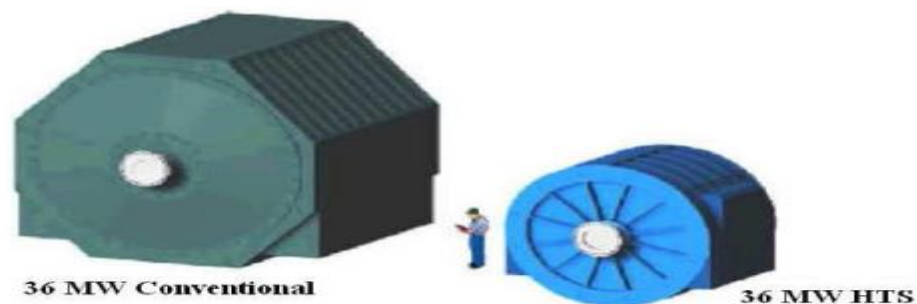


Figure I.14: Comparaison entre le moteur conventionnelle et le moteur

I.6.7 Transformateur et limiteur de courant

Nous allons aborder ici brièvement le cas des transformateurs et des limiteurs de court-circuit (souvent appelés simplement limiteurs de courants).

Les transformateurs supraconducteurs, par rapport à leurs homologues classiques en cuivre, présentent de plus faibles pertes, un volume moindre et un poids généralement plus faible. L'utilisation de supraconducteurs permet, grâce aux propriétés intrinsèques du matériau, de proposer une fonction de limitation de courant de court-circuit qui peut se révéler très intéressante d'un point de vue réseau électrique.

Les supraconducteurs sont d'excellents candidats pour la limitation du courant. En effet, on peut utiliser la transition naturelle du matériau de l'état supraconducteur vers l'état résistif pour réaliser cette fonction; [5].

I.6.7.1- Limiteur de courant de défaut

Dans les réseaux électriques, les problèmes liés aux courants de court-circuit sont récurrents. Ceci est d'autant plus vrai avec l'insertion de génération distribuée. Les courants de défaut ne sont limités que par l'impédance de court-circuit. Ils sont interrompus par un disjoncteur. Dans certain cas, il n'existe pas actuellement de disjoncteur étant capable d'ouvrir un courant suffisamment important. Un limiteur de courant pourrait être une solution technologique à ces situations; [5]. Dans ce contexte, une multitude de types de limiteurs de courant ont vu le jour



Figure I.15: Limiteur de courant.

I.6.7.2- Limiteurs supraconducteurs de courant

Les limiteurs supraconducteurs de courant de défaut (SFCL) exploitent la propriété spécifique des matériaux supraconducteurs transités ultra rapidement et naturellement de l'état supraconducteur à un état dissipatif par dépassement de leur courant critique.

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; [5].

Le principe d'un limiteur de courant supraconducteur (supraconducteur Limiter Courant de défaut), consiste à introduire une impédance supplémentaire lorsqu'un défaut apparaît.

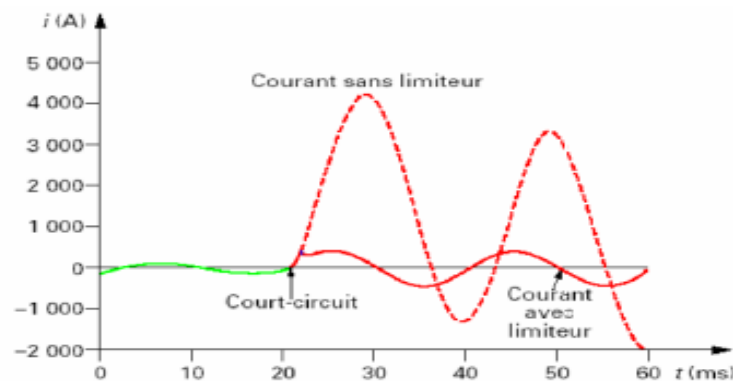


Figure I.16: Evolution de courant de court-circuit avec et sans limiteur de courant

En utilisant la transition de l'état supraconducteur vers un état résistif, on réalise une impédance variable. Par simple dépassement du courant critique d'un élément supraconducteur inséré dans la ligne électrique, le matériau va transiter naturellement lors d'un court-circuit, sans avoir besoin d'appareil de détection pour provoquer cette transition [5]. Un exemple de courbe de limitation montré en (figure I.16).

I.6.7.2.1 Limiteur supraconducteur type résistif

Le plus simple des concepts (figure I.17) 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].

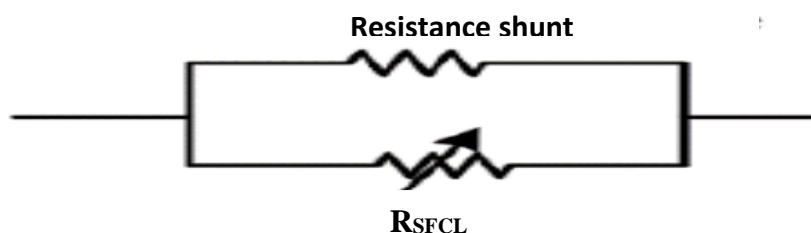


Figure I.17: Schéma de principe d'un limiteur résistif.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons revu l'histoire de la supraconductivité, ses grandeurs critiques (TC, HC, JC) et ses propriétés spécifiques. Ensuite, nous avons présenté les différents types de supraconducteur, type I et type II.

Dans la dernière partie de ce chapitre, des limiteurs de courant et de supraconducteurs ont été présentés et nous avons rappelé les différentes applications de la supraconductivité dans de nombreux domaines.

Chapitre II: Limiteur de courant

- ❖ .Introduction
- ❖ Limitation de courant dans les réseaux électriques
- ❖ Fonctionnement des limiteurs de courant
- ❖ .Limiter de courant classiques
- ❖ Limiteurs de courant a base de supraconducteurs
- ❖ Comparisons des différents types de SFCL
- ❖ Conclusion

II.1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'introduire la notion de limitation de courant dans les réseaux électriques. Dans un premier temps, nous parlerons des avantages apportés par ces systèmes puis nous présenterons leurs principes de fonctionnement en suite, nous donnerons un état de l'art des limiteurs supraconducteurs puis nous conclurons par un résumé comparatif entre les différentes solutions techniques.

II.2.Limitation de courant dans les réseaux électriques

II.2.1. Intérêts des limiteurs de courant

L'augmentation permanente des besoins en énergie électrique, tant en qualité qu'en quantité, entraîne une croissance de la puissance des équipements installés dans les réseaux et le développement de leurs interconnexions cette tendance implique une augmentation de la puissance de court-circuit qui rend plus difficile la coupure des courants de défaut.

Elle impose également une meilleure sélectivité ayant pour but d'isoler rapidement la branche en défaut tout en évitant la coupure des branches saines d'une part, la sélectivité ampérométrique repose sur des réglages de courants de déclenchement décroissants vers l'aval du réseau d'autre part, la sélectivité chronométrique agit par ouverture après une temporisation (~300 ms/étage) qui est ajouté sur les différents niveaux du réseau, permettant ainsi d'attendre une éventuelle coupure du défaut en aval avant de couper une plus grande partie du réseau enfin, la sélectivité logique requiert un échange d'informations entre les différents organes de protection, la première protection détecte un défaut et envoie un ordre de blocage aux autres protections, les empêchant ainsi de déclencher généralement un mélange des trois types de sélectivité est utilisé afin d'avoir un système de protection sûr, efficace et fiable; [6].

II.3.Fonctionnement des limiteurs de courant

II.3.1.Principe général de la limitation de courant

La limitation de courant utilise le principe d'une impédance variable en série avec le réseau celle-ci pouvant être purement résistive dans le cas des réseaux DC mais également inductive dans le cas des réseaux AC le courant est limité par une augmentation brutale de l'impédance devant être suffisamment rapide ($< \text{ms}$) pour limiter le premier pic de courant aune valeur seuil, nettement inférieure à la valeur théorique de court-circuit. Lors d'un défaut le limiteur est pratiquement soumis à la pleine tension du réseau, la puissance dissipée est donc très importante.

II.4.Limiter de courant classiques

Peu de solutions classiques permettent de limiter naturellement les courants de défaut. Le fusible est la solution la plus utilisée en basse et moyenne tension mais il présente les inconvénients majeurs de ne pas être réutilisable et de nécessiter l'intervention humaine pour la remise sous tension du système. Les autres solutions utilisent des systèmes permettant l'augmentation de leur impédance lors d'une montée de courant.

II.4.1.Réactances série

L'insertion permanente de réactances en série dans les réseaux permet de limiter les courants de défauts mais introduisent des surtensions transitoires durant les séquences de refermeture des disjoncteurs de plus, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeable, cette solution n'est pas applicable pour tous les réseaux.

II.4.2.Limiteur commandé

Pour limiter ces inconvénients, il est préférable d'introduire ces composants au moment du défaut. Un des dispositifs de référence est le transformateur série court-circuité par des thyristors (figure II.1). Lorsque les thyristors sont passants le transformateur est en court-circuit, l'impédance série est négligeable devant la charge.

Cependant lorsque les thyristors sont bloqués, le transformateur est en circuit ouvert et son impédance augmente fortement; [6].

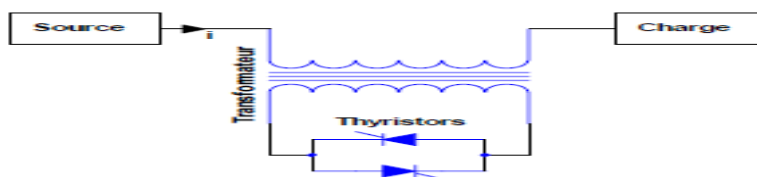


Figure II.1: Limitation de courant par transformateur court-circuité.

Il est également possible d'utiliser des dispositifs à résonance insérés en série. Avec des thyristors (figure II.2), permettant de contrôler l'impédance du circuit LC en modifiant la commande de l'angle d'amorçage.

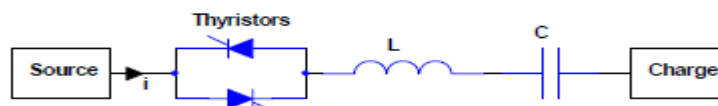


Figure II.2: Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant

En fin, d'autres dispositifs commandés comme les disjoncteurs statiques, permettent de commuter très rapidement le courant d'une branche de faible impédance à une branche d'impédance élevée. Dans tous les cas, la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate : ces systèmes restent difficiles à adapter aux fortes puissances et alla haute tension et les composants de puissance présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant.

II.4.3. Résistance variable

Une solution efficace consiste à utiliser une résistance variable en série avec le réseau, cette variation provenant d'un changement de phase ou d'état du matériau la contrainte responsable du changement est variée (thermique, mécanique, magnétique...), mais est toujours liée au courant il apparaît cependant deux Problèmes, d'une part les variations par changement de phase nécessitent une énergie qui tend à diminuer la vitesse de transition d'autre part les variations par changement d'état soulèvent le problème de l'inhomogénéité qui tend à concentrer la puissance localement et ainsi affaiblir le matériau; [6].

Les matériaux à coefficient thermique positif (CTP) ayant une résistance contrôlée thermiquement sont des candidats potentiels pour la limitation de courant Il existe deux familles de CTP, d'une part les résistances homogènes métalliques (Fer, Tungstène...) pour lesquelles la résistivité augmente d'un facteur 7 à 17 entre la température ambiante et la température du point de fusion D'autre part les polymères chargés (carbone ou céramiques conductrices) qui offrent des facteurs de résistivité supérieurs à 100.

Ces matériaux sont principalement utilisés en basse tension pour limiter les arcs électriques à l'ouverture des disjoncteurs

II.5. Limiteurs de courant a base de supraconducteurs

Par leur résistivité nulle à l'état supraconducteur et leur forte résistivité à l'état normal, les HTS sont d'excellents candidats pour la limitation de courant. Le fonctionnement répétitif et autonome confère également des atouts non négligeables aux limiteurs supraconducteurs de courant (SFCL) Cependant comme tout système supraconducteur il nécessite un environnement cryogénique composé d'un cryostat et d'un fluide cryogénique ou d'un cryogénérateur.

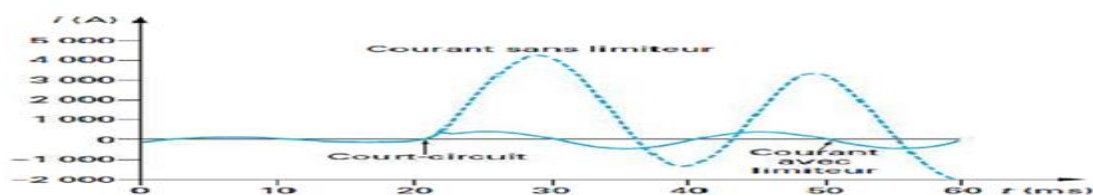


Figure II.3. Courants de court-circuit avec et sans limiteur.

II.5.1.SFCL résistif

II.5.1.1. Fonctionnement des SFCL résistifs.

Un réseau peut être modélisé par une source de tension $U_{réseau}$ parcouru par un Courant $I_{réseau}$. Il est composé d'une résistance de ligne $R_{réseau}$ et d'une inductance de ligne $L_{réseau}$, d'un disjoncteur et d'une charge. Dans le cadre de notre étude, nous intégrons un SFCL résistif en série avec ce réseau (figure II.4); [6].

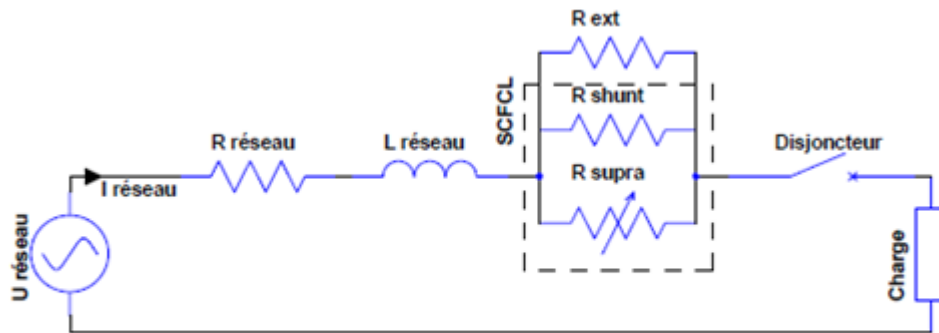


Figure II.4: SFCL résistif

La transition brutale d'un supraconducteur, couplée à son importante résistivité à l'état normal, permet d'introduire rapidement et naturellement une forte résistance en série avec le réseau, limitant ainsi le courant.

En régime assigné, la résistance du supraconducteur R_{supra} est négligeable et Court-circuit celle du shunt nommée R_{shunt} en régime de défaut, lorsque le courant $I_{réseau}$ traversant le SFCL dépasse le courant critique du supraconducteur, sa résistance augmente brutalement.

La résistance du shunt est nécessaire pour protéger le supraconducteur contre les points chauds destructifs dus à l'inhomogénéité des transitions cette résistance doit être en excellent contact électrique avec toute la longueur du supraconducteur Une résistance externe R_{ext} peut également être ajoutée pour régler le courant limité et éviter les surtensions entraînées par les rapides transitions Pour ne pas excéder la température maximale du supraconducteur, le court-circuit doit être interrompu par l'ouverture d'un disjoncteur en moins d'une centaine de millisecondes.

L'inhomogénéité est un problème important dans la limitation de courant par les supraconducteurs car elle engendre un point chaud pouvant être à l'origine de la destruction du matériau.

Le SFCL résistif avec transition assistée magnétiquement (Figure II.5) est composé d'un limiteur supraconducteur résistif couplé en parallèle avec une bobine résistive de champ magnétique nommée L_{trans} ; [6].

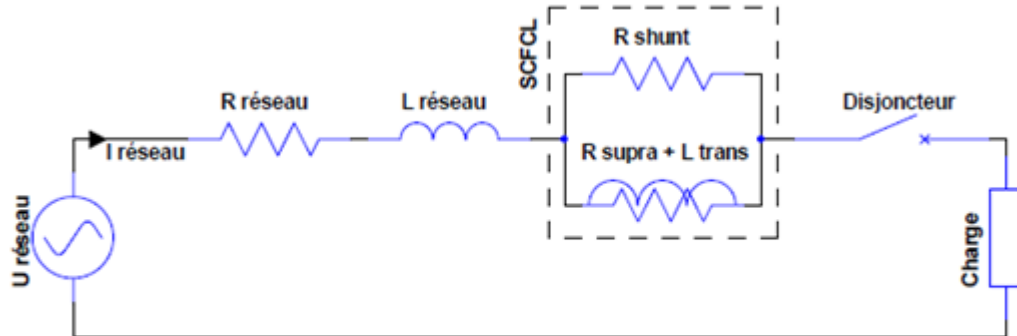


Figure II.5: SFCL résistif assisté magnétiquement

L'enroulement est bobiné de manière coaxiale autour du supraconducteur, ce Dispositif utilise la dépendance du courant critique par rapport à une induction Une limitation de courant s'amorce toujours au point le plus faible d'un supraconducteur, générant une résistance favorisant le passage du courant dans la bobine L'induction créée par celle-ci abaisse le courant critique des parties supraconductrices, accélérant ainsi la transition et diminuant les contraintes appliquées au point chaud.

II.5.2 Etat de l'art des SFCL résistifs

La plupart des projets de ces dernières années sont de type SFCL résistif, parmi eux les démonstrateurs à base de BSCCO-2212 sont les plus puissants nexans Supraconducteurs est jusqu'ici parvenu à développer le plus puissant HTS pour les limiteurs résistifs en utilisant des enroulements bifilaires de BSCCO-2212Le démonstrateur triphasé CURL 10 (figure III.6) de 10 kV / 10 MVA, a été construit en 2003 puis testé avec succès pendant une année sur le réseau de distribution RWE en Allemagne.

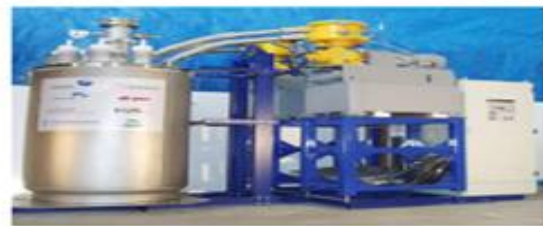


Figure II.6: Démonstrateur CURL 10 [1].

Essai en condition de fonctionnement réel fut une première mondiale, il a révélé la faisabilité technique de ce type de SFCL pour les applications de moyenne tension déplus, la comparaison entre les pertes AC avant et après l'essai n'a montré aucune dégradation matérielle.

En raison des difficultés rencontrées pour des niveaux de tensions plus élevées, Nexans se concentre maintenant sur les SFCL résistifs assistés magnétiquement. Ainsi en 2005 un projet allemand a lancé le développement du démonstrateur CULT 110 de 110 kV / 1,8 kA d'ici 2008.

Aux états-Unis en 2003, le département de l'énergie (DOE) a suivi le même concept et a développé un SFCL résistif assisté magnétiquement de 138 kV à base de supraconducteurs BSCCO 2212 massifs Malgré la réussite des essais, ce concept particulier n'a pas été poursuivi et ce projet s'oriente aujourd'hui vers un SFCL résistif à base de coated conductors d'YBaCuO.

En 2001, ABB a testé avec réussite un démonstrateur de 8 kV / 800 A monophasé ce démonstrateur compact a été réalisé à partir de 100 méandres de BSCCO-2212 massif. En 2002 dans le cadre du projet européen BYFAULT, 43 méandres d'YBaCuO massifs ont été montés en série pour établir un prototype résistif de SFCL au CNRS de Grenoble.

Le courant assigné et la température de fonctionnement étaient respectivement fixés à 100 A et 90,5 K. Lors des essais, la tension aux bornes du prototype a pu atteindre 1 kV soit 106 V/m pendant 20 ms et le courant a été limité à 730 A soit 10 % de la valeur atteint sans limitation de courant. malgré de gros travaux sur l'homogénéité de ce type de HTS, une fraction des méandres a été détruite cette solution est apparue peu industrialisable à cause du grand nombre de méandres à mettre en série Les dépôts d'YBCO sur substrat de saphir ont été étudiés dans plusieurs démonstrateurs de SFCL résistifs. Le premier essai majeur sur un prototype réalisé avec ce type de matériau a été réalisé par siemens en 2000.

Un prototype de 100 kVA puis un dispositif de 1 MVA triphasé ont ensuite été réalisés et testés en raison du coût relativement élevé du substrat de saphir, siemens a décidé de stopper le développement de prototypes plus importants Au japon, c'est autour du projet super-ACE qu'eu lieu une grande partie de la R&D sur les SFCL entre 2000 et 2004 l'objectif principal était d'établir les bases technologiques pour la fabrication des SFCL et des matériaux supraconducteurs; [6].

La SFCL résistifs utilisant des HTS en couches minces ont été développés, le premier est adapté aux hautes tensions 6,6 kV / 100 A tandis que le second est adapté aux forts courants 200 V / 1 kA. Dans le cadre d'un projet national visant à accentuer le développement des cote conductors, il est prévu d'étudier les applications d'un SFCL de 6,6 kV / 600 A jusqu'en 2007.

En coréec ' est le project Dream of Advanced Power systems by applied Supraconductivité technologie (DAPAS) qui concerne le développement des SFCL Ce programme de 10 ans a commencé en 2001 et son objectif est de commercialiser des Equipements supraconducteurs de puissance concernant les SFCL, un développement en plusieurs étapes est prévu, celui-ci devant aboutir sur un limiteur de 154 kV d'ici 2010.

Dans un premier temps un prototype de SFCL résistif de 6.6 kV / 200 A à base de couches minces d'YBCO a été construit et testé avec succès. Actuellement, la deuxième étape a pour objectif la réalisation et les essais d'un SFCL de 22.9 kV / 630 A à base de MCP BSCCO-2212 en 2007.

Les conducteurs déposés ou coated conductors sont des candidats intéressants pour la limitation de courant par SFCL résistifs les progrès de la R&D autour de ce fil sont très prometteurs et les résultats des essais montrent le bon potentiel de ce Matériau pour des applications de SFCL en 2005, une association entre american.

SuperConductors (AMSC) et Siemens a été formé pour étudier les caractéristiques fondamentales de ce fil pour la limitation de courant des premiers échantillons de petites tailles ont été réalisés et testés les premiers essais réussis sur les cote conductors d'YBCO ont été réalisés dans le projet européen Super poli trois échantillons ayant chacun un courant critique de 2 kA ont été connectés en série puis testés en limitation de courant jusqu'à des courantes crêtes de 50 kA.

En 2005 dans le cadre du projet Super flex, plusieurs échantillons de cote Conductors ont été testés au CNRS de Grenoble pour différentes températures de Fonctionnement, permettant ainsi d'étudier l'évolution de l'homogénéité des transitions, ces essais font l'objet de ce mémoire; [6].

II.5.3 SFCL de type noyau magnétique écrané

II.5.3. 1Fonctionnement des SFCL de type noyau magnétique écrané

Ce type de limiteur est souvent appelé SFCL inductif, il est composé d'un Enroulement primaire conventionnel bobiné autour d'un noyau magnétique entre lesquels ce trouve un cylindre supraconducteur (figure II.7).

Son principe de fonctionnement est semblable à un transformateur avec un rapport de

Transformateur « m » et un enroulement secondaire court-circuité (figure II.7).

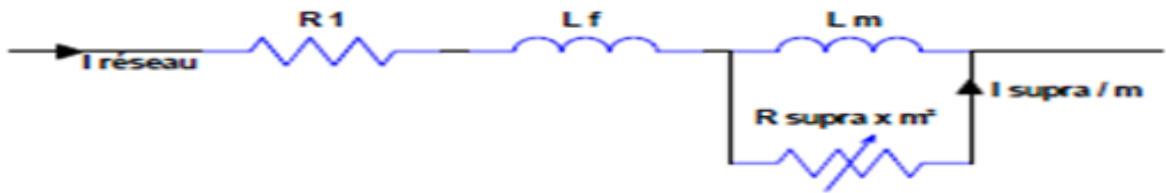


Figure II.07 :Schéma équivalent du SFCL de type noyau magnétique écrané

En régime assigné, le courant induit dans le cylindre supraconducteur est inférieur son courant critique et fonctionne comme un parfait écran magnétique pour l'enroulement primaire, ainsi le flux dans le noyau magnétique est négligeable. La faible impédance apparente du SFCL équivaut à la résistance R_1 de l'enroulement primaire et à l'inductance de fuite L_f entre l'enroulement primaire et le cylindre supraconducteur.

En régime de défaut, le courant dans le supraconducteur excède sa valeur critique étalé cylindre développe une résistance R_{supra} . Le flux pénètre alors le noyau magnétique, générant ainsi une impédance de limitation constituée par la mise en parallèle de l'inductance magnétisante L_m et de la résistance R_{supra} ramenée au primaire soit $R_{\text{supra}} \times m^2$. Ainsi la conception du dispositif détermine si l'impédance de court-circuit est principalement résistive ou inductive.

Ce type de SFCL est avantageux car le supraconducteur n'est pas directement connecté au réseau et il n'y a pas d'amenées de courant à basse température en régime de défaut le supraconducteur est soumis à une tension faible correspondant à la tension du réseau atténué par le rapport de transformation « m » les principaux inconvénients de ce type de SFCL sont le volume et le poids qui sont semblables à un transformateur de même puissance il est également nécessaire de respecter un temps de récupération avant d'utiliser de nouveau le SFCL.

II.5.4 SFCL de type Pont redresseur

II.5.4.1 Fonctionnement des SFCL de type pont redresseur

Ce type de SFCL (figure II.8) est composé d'un pont redresseur à diodes ou thyristors, d'une bobine supraconductrice L_{supra} et d'une source de tension continue U_{dc}

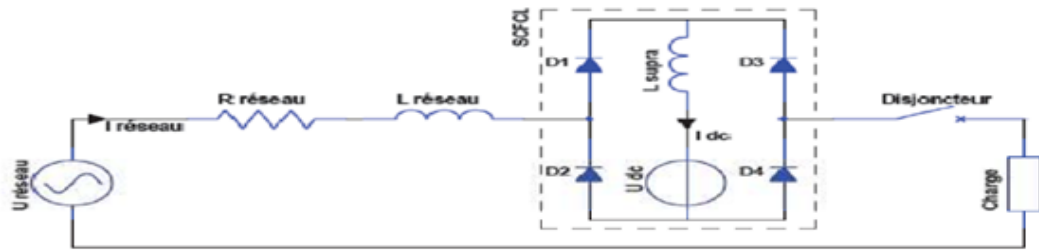


Figure II.8:SFCL de type pont redresseur

Un courant continu I_{dc} traversant une bobine supraconductrice L_{supra} est délivré par une source de tension U_{dc} en régime assigné le courant $I_{réseau}$ étant inférieur au courant I_{dc} , les diodes sont passantes et le courant $I_{réseau}$ ne traverse pas l'inductance L_{supra} . Dans ce cas l'impédance du SFCL est faible et seule l'électronique de puissance génère des pertes. Si le courant $I_{réseau}$ excède le courant I_{dc} , les diodes (D1, D4) ou (D2, D3) selon l'alternance concernée par le court-circuit, se bloquent ce quasi fonctionnement en pont redresseur fait circuler le courant $I_{réseau}$ dans la bobine L_{supra} qui limite le courant par sa forte inductance.

En principe la bobine peut être non-supraconductrice, mais ceci augmente les pertes par effet Joule et implique également un enroulement plus grand en remplaçant les diodes par des thyristors il devient possible de stopper le court-circuit au passage par zéro du courant de plus, le courant de déclenchement est réglable par I_{dc} et peut facilement être adapté aux besoins du réseau pendant le fonctionnement reste peu fiable, en effet en régime de défaut un disfonctionnement d'une diode court-circuitera la bobine, annulant ainsi le phénomène de limitation de courant.

II.5.5 SFCL de type contrôleur du courant de défaut

II.5.5.1 Fonctionnement des SFCL de type contrôleur du courant de défaut

Un composant d'électronique de puissance comme le thyristor, peut par son Ouverture aiguiller un courant dans une impédance de limitation. La possibilité d'ajuster le seuil de déclenchement de la commande fait de ce type de SFCL un contrôleur de courant de court-circuit. Il est composé de deux thyristors T1 et T2 montés en opposition-série et court-circuités respectivement par les inductances supraconductrices L1 et L2 (figure II.10).

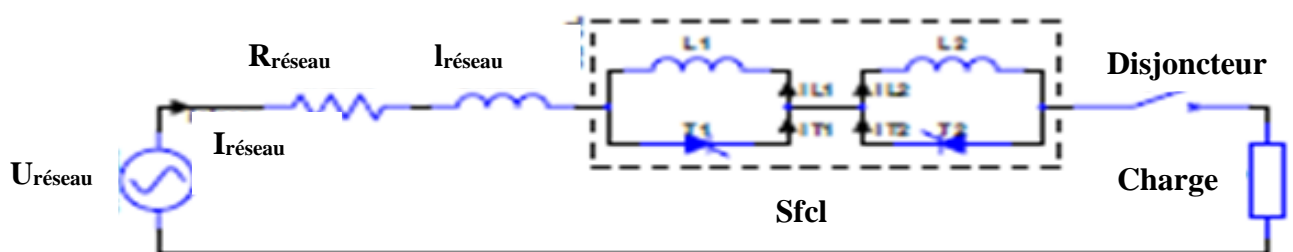


Figure II.09 :SFCL de type contrôleur du courant de défaut

Pour amorcer le fonctionnement du système, il est nécessaire de connecter une Charge au réseau puis de commander alternativement les thyristors T_1 et T_2 pour faire circuler un courant continu d'amplitude I_{dc} dans les bobines supraconductrices L_1 et L_2 en régime assigné l'amplitude du courant $I_{réseau}$ étant inférieure à I_{dc} , les thyristors conduisent en permanence et l'impédance du SFCL correspond à la chute de tension des thyristors.

En régime de défaut le courant $I_{réseau}$ dépasse I_{dc} , ceci bloque alternativement les Thyristors et aiguille ainsi le courant dans les inductances qui leurs sont associées Par Conséquent les inductances supraconductrices L_1 et L_2 sont alternativement insérées sur le réseau à chaque passage par zéro du courant, cette augmentation d'impédance permet ainsi de limiter le courant cette architecture possède les mêmes caractéristiques que le SFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et de l'électronique de puissance en moins; [7].

II .5.6 SFCL de type noyaux magnétiques saturés

II.5.6.1 Fonctionnement d'un SFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements L_1 et L_2 de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconductrices L_{supra1} et L_{supra2} parcourues par des courants continus (figure II.11).

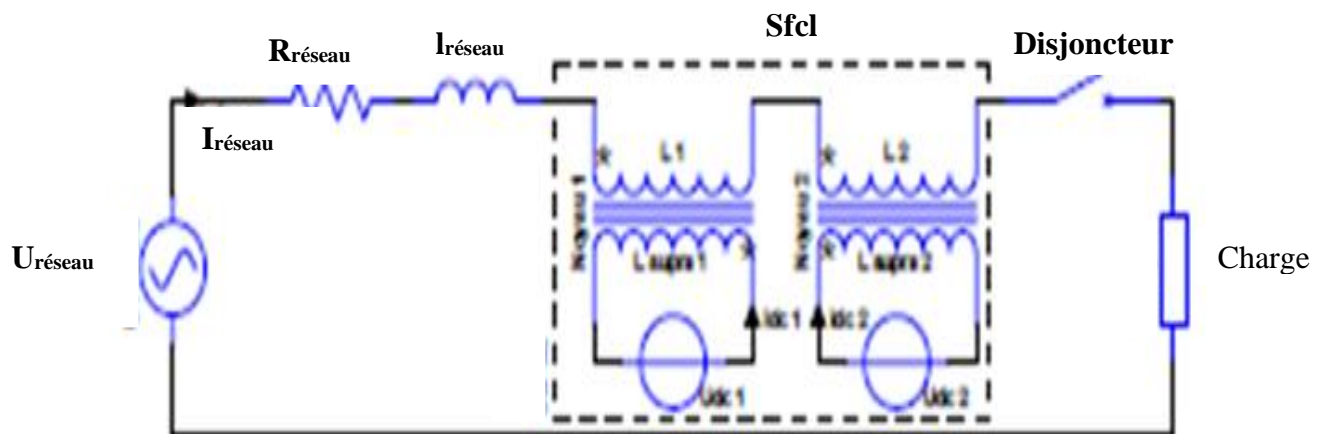


Figure II.10:SFCL de type noyaux magnétiques saturés

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SFCL est faible et Correspond à la somme des résistances et des réactances de L_1 et L_2 en régime assigné, $I_{réseau}$ est assez bas pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant Ainsi la faible impédance du SFCL dans le cas d'un défaut, l'augmentation de $I_{réseau}$ conduit alternativement les deux noyaux hors de leur saturation, dans leur zone de perméabilité élevée Ceci entraine

une importante augmentation de l'impédance apparente du SFCL, développant ainsi un champ électrique permettant de limiter le courant; [7].

L'enroulement supraconducteur n'étant que très faiblement traversé par le courant variable, les pertes à basse température sont faibles et ne nécessitent pas de système de refroidissement important. Cependant, le noyau de fer et toute l'installation restent relativement encombrants.

II.6. Comparisons des différents types de SFCL

Le Tableau II.1 compare les caractéristiques des différents types de SFCL; [7].

Type de SFCL	Localisation des pertes	Sûreté après défaillance	Volume de supra	Taille	Temps de récup
Résistive	Supraconducteur (AC)	Oui	Moyen	Petit	Secondes ⇕ Minutes
Noyau magnétique écrané	Bobine primaire Supraconducteur (AC)	Oui	Moyen	Grand	Secondes
Pont Redresseur	Semi-conducteur	Non	Réalisable sans supra	Moyen	Immédiat
Contrôleur de courant de défaut	Semi-conducteur Bobine de limitation	Non	Réalisable sans supra	Moyen	Immédiat
Noyau magnétique saturé	Noyau magnétique Bobine primaire	Oui	Petit	Moyen ⇕ Grand	Immédiat

Tableau II.1 : Comparaison des différents types de SFCL

En général, parmi l'ensemble des SFCL c'est le résistif qui est le plus compact, cependant les SFCL n'utilisant pas la transition du supraconducteur procèdent de meilleurs temps de récupération. Les SFCL utilisant des composants d'électronique de Puissance sont généralement moins fiables car il n'y a aucune limitation intrinsèque en cas de défaillance du système; [7].

II.7. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique les limiteurs de courant à base de semi-conducteur sont peu fiables après défaillance et encombrants Le limiteur de courant supraconducteur peut constituer un élément clé pour la protection des équipements électriques, l'extension des puissances transitées sur les réseaux existant, l'accroissement du degré d'interconnexion des réseaux et de la qualité de service cette propriété peut être soit utilisée directement (limitation purement résistive) soit indirectement, l'élément supraconducteur étant alors un organe de détection et de déclenchement d'un processus auxiliaire de limitation.

Chapitre III:

Résultats et discussions

- ❖ Introduction
- ❖ Etude réseaux de distribution sans SFCL
- ❖ Les allures de courant et de tension pendant le fonctionnement normal
- ❖ Les allures de courant et de tension pendant un défaut
- ❖ Etude de réseaux de distribution avec un SFCL pendant un défaut de court circuit
- ❖ Les allures de courant et de tension pendant un défaut avec SFCL
- ❖ Énergie dissipation dans les SFCL

III.1. Introduction

Ce travail est divisé en deux parties : la première est dédiée principalement à la simulation d'un réseau de distribution sans SFCL et avec un défaut qui est un court-circuit, et dans la deuxième, nous avons simulé un réseau de distribution avec un limiteur de courant à base de supraconducteur SFCL pendant un court-circuit.

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation sous SIMULINK/MATLAB. Les caractéristiques électrique et magnétique de SFCL sont prises en considération sous forme d'une fonction, dans ce travail nous avons utilisé le modèle de Blair Steven.

III.2. Etude réseaux de distribution sans SFCL

III.2.1 Description du réseau de distribution étudié

Le réseau électrique de distribution étudié est constitué par trois parties (la production, le transport et la charge), notre outil de production est une source de tension d'une impédance interne et un transformateur pour augmenter la tension, la ligne de transport est simulée comme une impédance RL, et la charge est représentée comme une impédance inductive ($P_R + jQ_L$), les valeurs numériques de chaque élément sont données dans le tableau 1

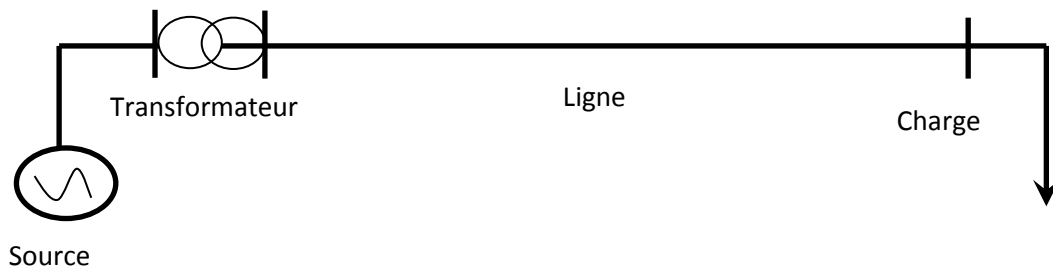


Figure III.01: schéma de simulation sans SFCL et sans défaut (état normale)

Source		transformateur		Charge	
Tension	690 V	tension	690/33kv	Pch	$10 \cdot 10^6$ W
puissance	15MW	couplage	Δ/Y	Qch	$10 \cdot 10^6$ VA
Ls	$20.73 \cdot 10^{-6}$ H	m	0.06		
Rs	$183 \cdot 10^{-6}$ Ω	Rp	$192.8 \cdot 10^{-3}$ Ω		

Tableau III.01: paramètre de réseau étudié

III.3 Les allures de courant et de tension pendant le fonctionnement normal

En premier lieu, nous avons présentés les allures de tension et le courant électriques pendant le fonctionnement normal (figures III.2, III.3), les ondes de courant et de tension sont purement sinusoïdales, ses valeurs maximales sont 260A pour le courant et 21KV pour la tension.

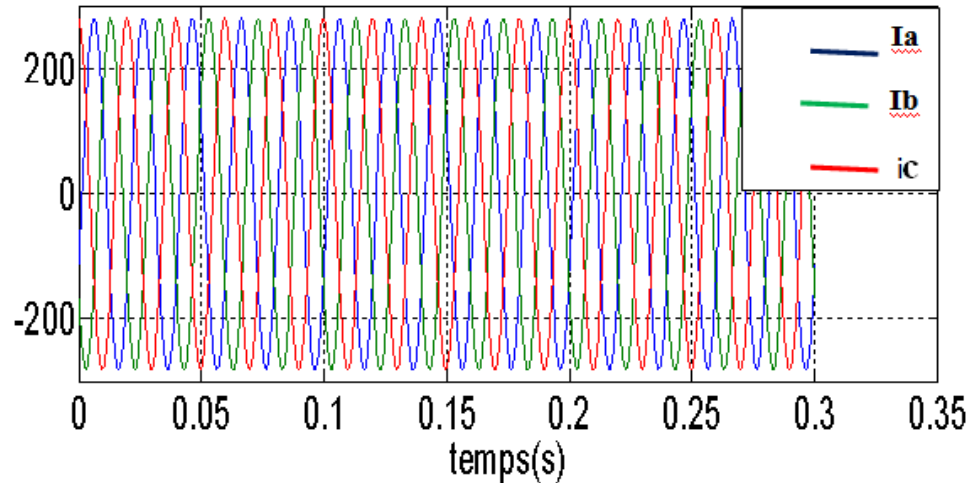


Figure III.02:Allure de courant dans l'état normal.

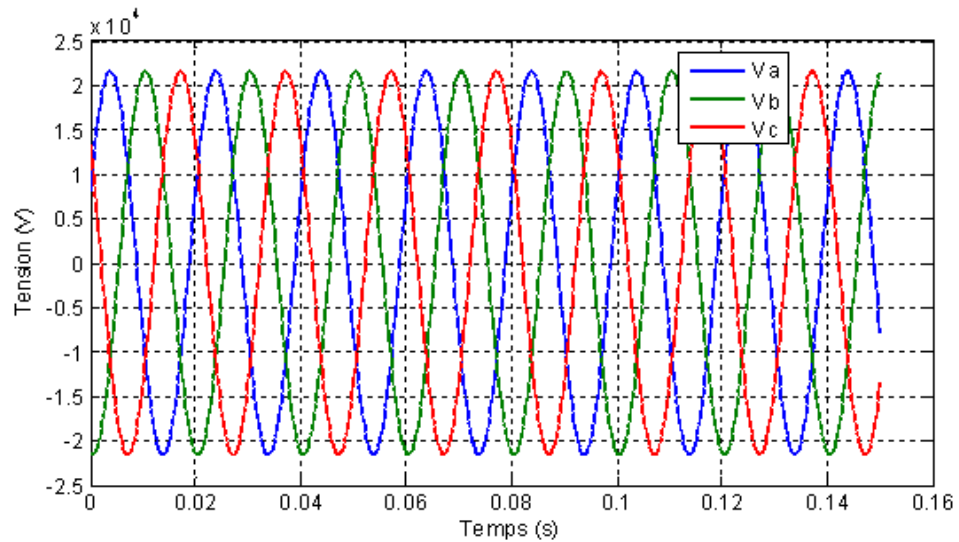


Figure III.03: Allure de tension dans l'état normal.

III.4. Les allures de courant et de tension pendant un défaut sans SFCL

Pendant un court circuit triphasé a la terre, l'impédance résultante presque nulle, les courants des trois phases augmentent jusqu'aux 1.8KA (7-8 fois) , par contre les tensions aux bornes la charge sont nulle a cause de défaut.

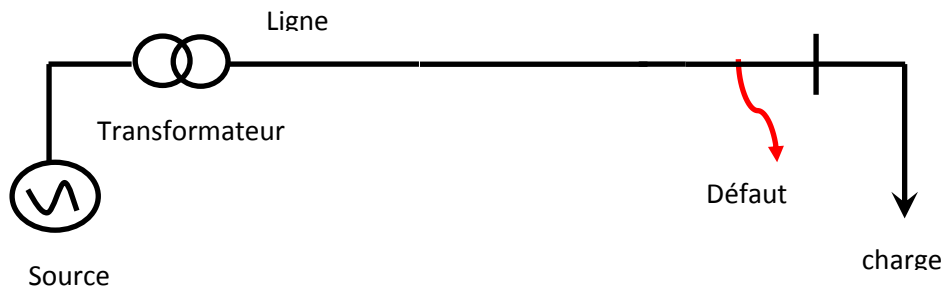


Figure III.04:Schéma de simulation sans SFCL

Et puisque l'impédance équivalente totale n'est pas nulle, l'accroissement de courant est fini.

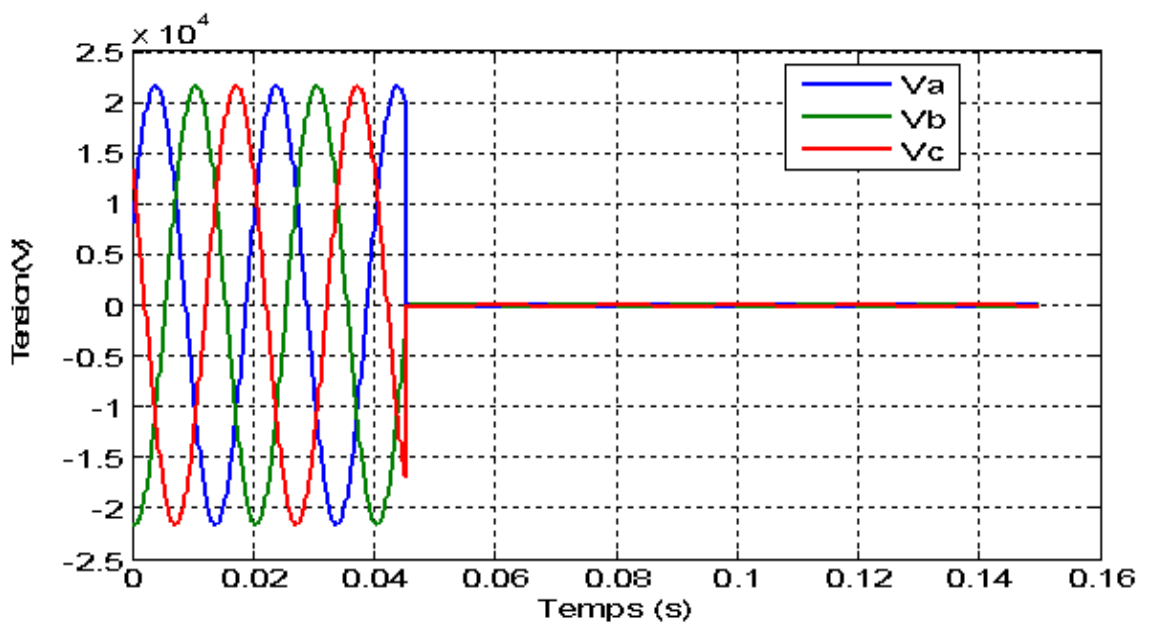


Figure III.05: Allure de tension pendant le défaut.

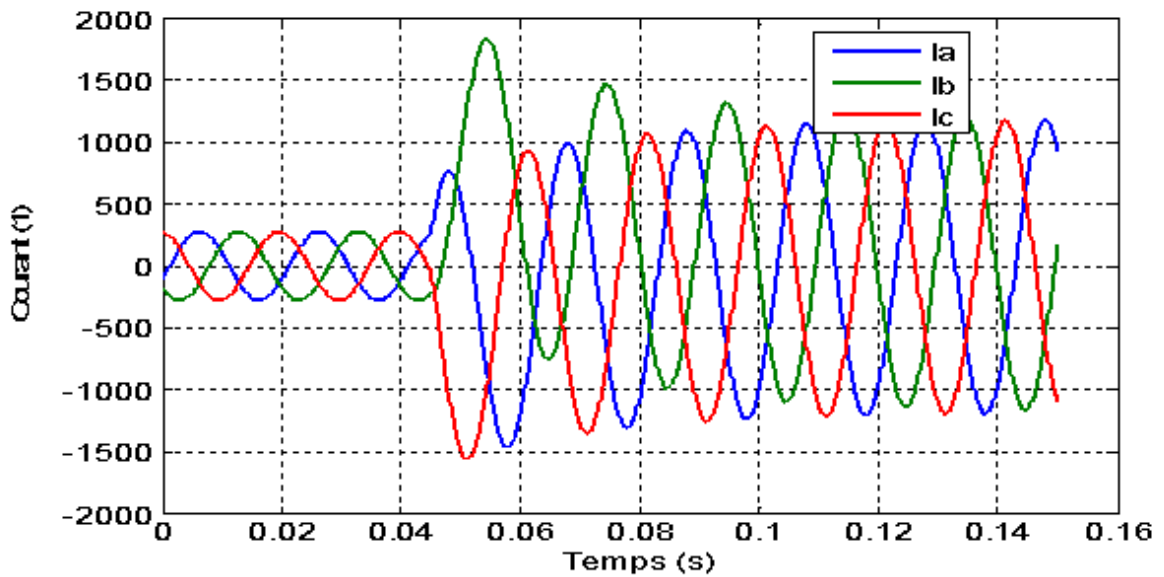


Figure III 06: Allure de courant pendant le défaut sans SFCL.

III.5. Etude de réseaux de distribution avec un SFCL pendant un défaut de court circuit

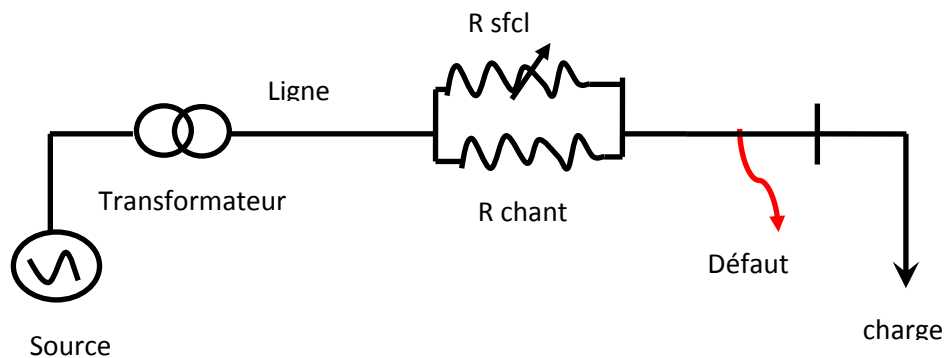


Figure III.07: Schéma de simulation avec SFCL

III.5.1. Modèle de SFCL

Un SFCL résistif est composé d'un câble supraconducteur et d'une résistance shunt, également appelée une résistance au stabilisateur, comme indiqué sur la Fig.III.04

Dans les conditions critiques, les SFCL résistifs ne montrent aucune résistance pour le courant. Pendant cette période, ils fonctionnent sous un état supraconducteur (**flux creep**). Pendant les défauts, la résistance des supraconducteurs et le courant augmente fortement en

raison de la montée de la température supraconductrice. Cette étape est communément appelée l'état **flux-flow**. Une fois que le matériau supraconducteur est complètement éteint, la résistance au shunt est insérée dans le circuit afin de réduire les surtensions. Ensuite, le SFCL fonctionne dans un état de **conduite normale**. Une fois que le défaut est passé, les SFCL résistifs peuvent avoir besoin d'un temps de récupération, pendant lequel l'élément est refroidi jusqu'à ce qu'il revienne à son état supraconducteur. Cependant, les SFCL peuvent être conçus de manière à fonctionner immédiatement après l'état de conduite normale. Deux approches ont été proposées.

Le changement rapide de la résistance des supraconducteurs R_{SC} est principalement des propriétés électriques du matériau supraconducteur qui peut être macroscopiquement simplifié dans les lois de puissance $E(J)$, où le champ électrique dépend de la densité de courant et les deux paramètres dépendent de la température. La plupart des références sont basées sur le modèle de **W. Paul et al** pour la caractéristique $E(J)$ du supraconducteur. Comme le montre la (Fig.III.07), la caractéristique $E(J)$ peut être divisée en trois régions limitées par les courbes E1, E2 et E3.

La courbe E1 en rouge représente la courbe de la région supraconductrice, E2 en vert, la courbe de la zone de flux-flow et E3 en bleu, la courbe de la région de conduite normale. L'intersection des trois courbes constitue la courbe caractéristique réelle, représentée en gris selon la densité actuelle de chaque instant.

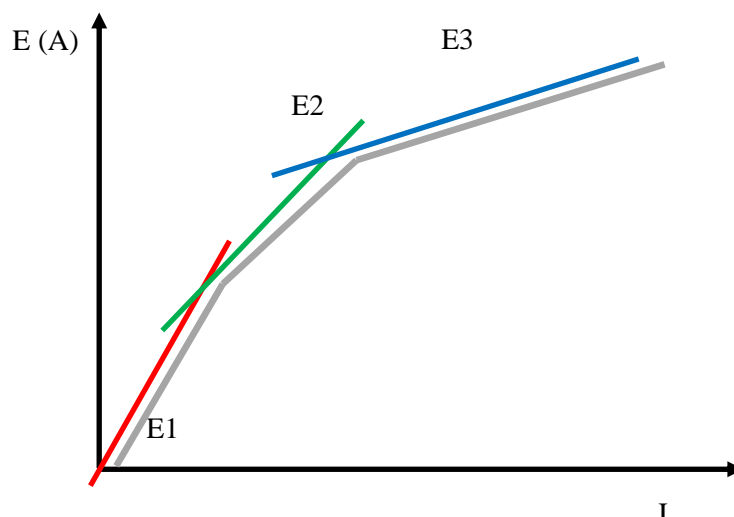


Figure III.8 : Caractéristique $E(J)$ réel d'un SFCL

Par conséquent, quand le courant augmente pendant un défaut le limiteur passera par ces trois états. Chaque état est caractérisé par une loi de puissance (Equations (1) à (3)).

$$E_1 = E_c \cdot \left(\frac{J}{J_c(T)} \right)^{\alpha(T)} \quad \text{III.1}$$

$$E_2 = \left(\frac{E_c}{E_0} \right)^{\beta/\alpha} \cdot \left(\frac{J_c(77K)}{J_c(T)} \right) \left(\frac{J}{J_c(77K)} \right)^{\beta} \quad \text{III.2}$$

$$E_2 = \rho(T_c) \frac{T}{T_c} \cdot J \quad \text{III.3}$$

Où J_c est le courant critique qui doit être adapté aux données expérimentales; α et β dépendent des conditions de traitement des matériaux, ρ la résistivité normale et T_c la température critique. $J_c(T)$ et $\rho(T)$ peuvent être approximés en tant que fonctions linéaires de la température par les équations (4) et (5).

$$J_c(T) \approx J_c(77T) \cdot \left(\frac{T_c - T}{T_c - 77} \right) \quad \text{III.4}$$

$$\rho(T) \approx \rho_c(T_c) \cdot \left(\frac{T}{T_c} \right) \quad \text{III.5}$$

Afin d'inclure l'effet du champ magnétique et en fonction des données expérimentales, $\alpha = 10$ et $\beta = 3$ sont considérés dans la littérature.

Pendant les états de flux flow et normal, la puissance est dissipée, et l'augmentation de la température par rapport au temps peut être calculée par (6) [5], où C_{sc} est la capacité calorifique par volume.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} E \cdot J \quad \text{III.6}$$

La forme intégrale de cette dernière équation est :

$$T(t) = T_a + \int_0^t (Q_{sc} - Q_{\text{évacuée}}) \cdot dt \quad \text{III.7}$$

où T_a est la température ambiante, Q_{sc} la chaleur dissipée dans le supraconducteur et $Q_{\text{évacuée}}$ la chaleur évacuée par le liquide de refroidissement.

$$Q_{sc} = \int_{t_0}^{t_f} i_{sfcl}(t)^2 \cdot R_{sfcl} \cdot dt \quad \text{III.8}$$

Pour expérimenter les propriétés de limitation du courant de défaut du ce modèle, Le circuit de la figure02 a été simulé figure03 illustre le Réponse du modèle pour un défaut triphasé à la terre, avec une résistance de défaut négligeable le SFCL se refroidi dans chaque phase pendant le premier pic de courant de défaut après ce chauffe cause l'augmentation de courant.

Si le défaut s'annule après 0.1s de l'apparition, chaque phase du SFCL prend entre 2S et 4 s pour descendre sous T_c .

Les propriétés géométriques, électriques et thermiques sont répertoriées dans le tableau 2.

Description des Paramètres	Symbole	Valeur	Unités
Longueur du fil supraconducteur	L_{SC}	50	m
Diamètre du fil supraconducteur	d_{sc}	4.0×10^{-3}	m
section de supraconducteur	a_{sc}	$\pi\left(\frac{d_{sc}}{2}\right)^2$	m^2
température supraconducteur	$T(t)$	—	K
Courant supraconducteur	$i_{sc}(t)$	—	A
Température ambiante (de démarrage) du supraconducteur et réservoir de refroidissement	T_a	77	K
Température critique du supraconducteur	T_c	95	K
Exposant de la région de fluage-glisement (à 77K)	n_{77k}	6	—
Explosif de la région de flux	β	3	—
La densité actuelle de courant	$J(t)$	$\frac{i_{sc}(t)}{a_{sc}}$	A/m^2
Densité de courant critique (à 77K), c'est-à-dire densité de courant où $E = 1mV / cm$	J_{c77K}	1.5×10^7	A/m^2
Champ électrique à la transition de l'état de flux-fluage à l'état de flux-flux	E_0	0.1	V/m
Résistance de l'état de conduite normale (à T_c)	ρ	1.0×10^{-6}	Ωm
Coefficient de transfert de chaleur au réservoir de refroidissement	K	1.5×10^3	w / km^2
Chauffage spécifique volumétrique supraconducteur	CV	1.0×10^6	J/km^3
Capacité thermique du supraconducteur	C_{SC}	$L_{SC} a_{sc} c_v$	J/K
Résistance thermique du supraconducteur au réservoir de refroidissement	θ_{sc}	$Q = \int i_{sc}(t)^2 R_{sc}(t) dt$	K/W
La chaleur a dissipé dans le supraconducteur	$Q_{sc}(t)$	$\frac{1}{kl_{sc}\pi d_{sc}}$	J
Chaleur enlevée par le système de refroidissement	$Q_{remova}(t)$	$\int \frac{T(t) - T_a}{\theta_{sc}} dt$	J
Chaleur enlevée par le système de rétablissement	$R_{SC}(t)$	$\frac{E(t, T) l_{sc}}{J(t) a_{sc}}$	Ω

Tableau III.02: Résumé des paramètres de modèles SFCL.

III.6 Les allures de courant et de tension pendant un défaut avec SFCL

Dans cette étude, nous avons utilisé le même schéma électrique mais avec insertion de SFCL dans chaque phase sous forme de fonction liée au fichier de SIMULINK/MATLAB, les entrées de la fonction sont le courant et la température dans chaque instant, et les sorties sont la résistance, la nouvelle température, la densité de courant, le champ électrique et l'état de SFCL, on note que chaque SFCL fonctionne indépendamment de l'autre.

On applique un court-circuit à l'instant 0.04s, et à l'aide de l'outil graphique de MATLAB ; les allures de courant, la température de supraconducteur et leur résistance sont présentés en fonction de temps, aussi nous avons présentés l'état de fonctionnement de SFCL pendant le court-circuit.

À l'instant de défaut, la charge équivalente est presque nulle, le courant augmente jusqu'à une valeur 1700A, pendant cette augmentation, les pertes joules influent sur la valeur de résistance de limiteur à partir de la température.

La résistance croît jusqu'à une valeur supérieure de 90 Ohm, cette dernière sera une charge qui diminue progressivement le courant (à partir de 0.3s). Concernant la température, les pertes joules dans les supraconducteurs libèrent une chaleur qui chauffe la pastille de limiteur malgré la température du milieu cryogénique (le milieu de refroidissement) est très bas 80K.

On note que la température et la résistance n'augmentent pas brusquement mais progressivement à cause de l'effet de refroidissement et l'effet inductif du réseau électrique.

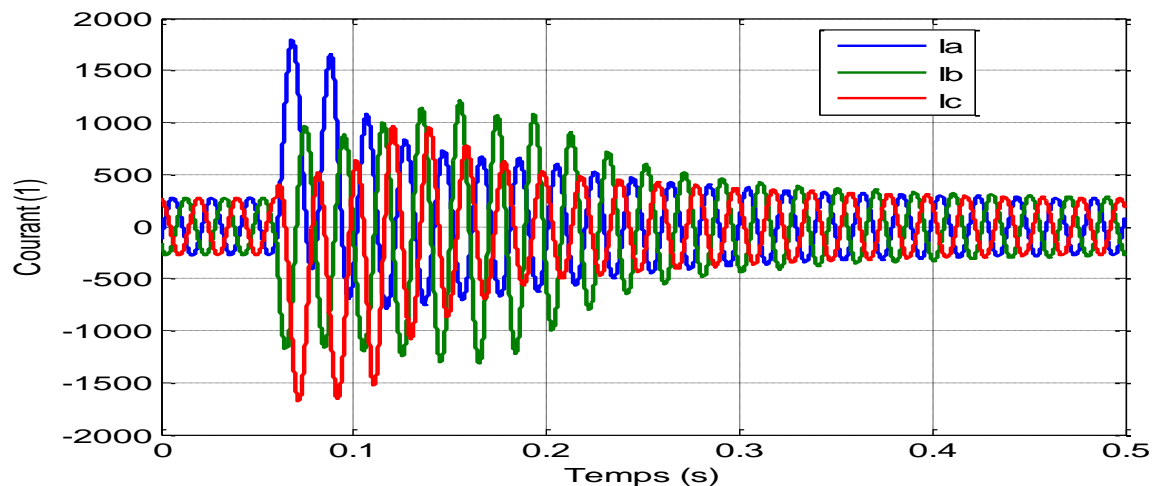


Figure III.09 : Courants de lignes en fonction de temps.

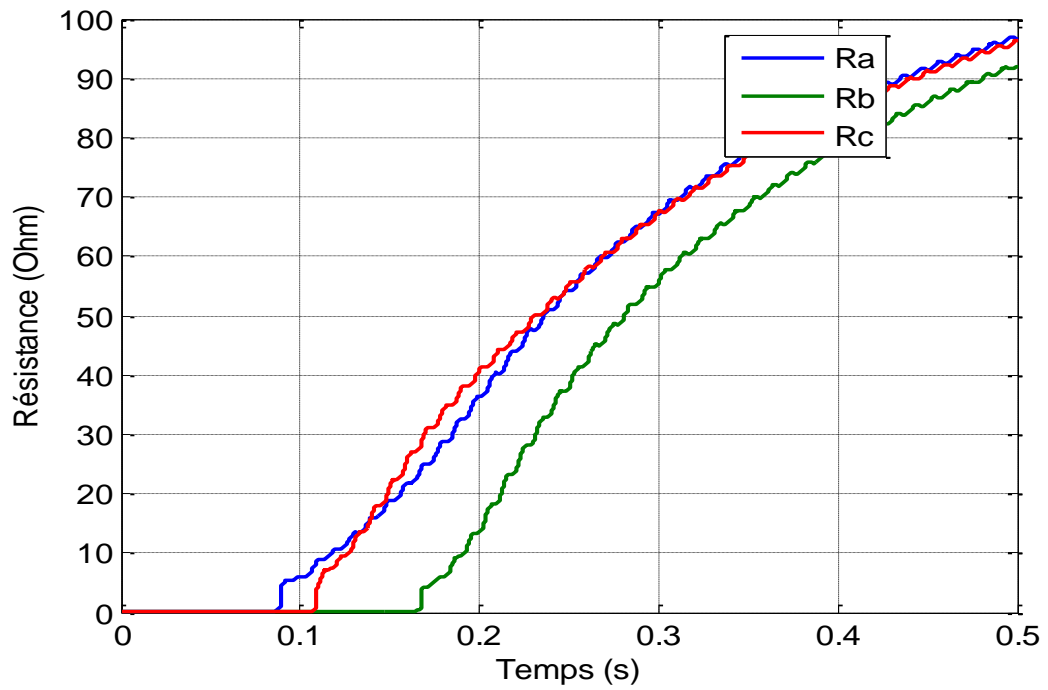


Figure III.10 : Variation des résistances de SFCL en fonction de temps.

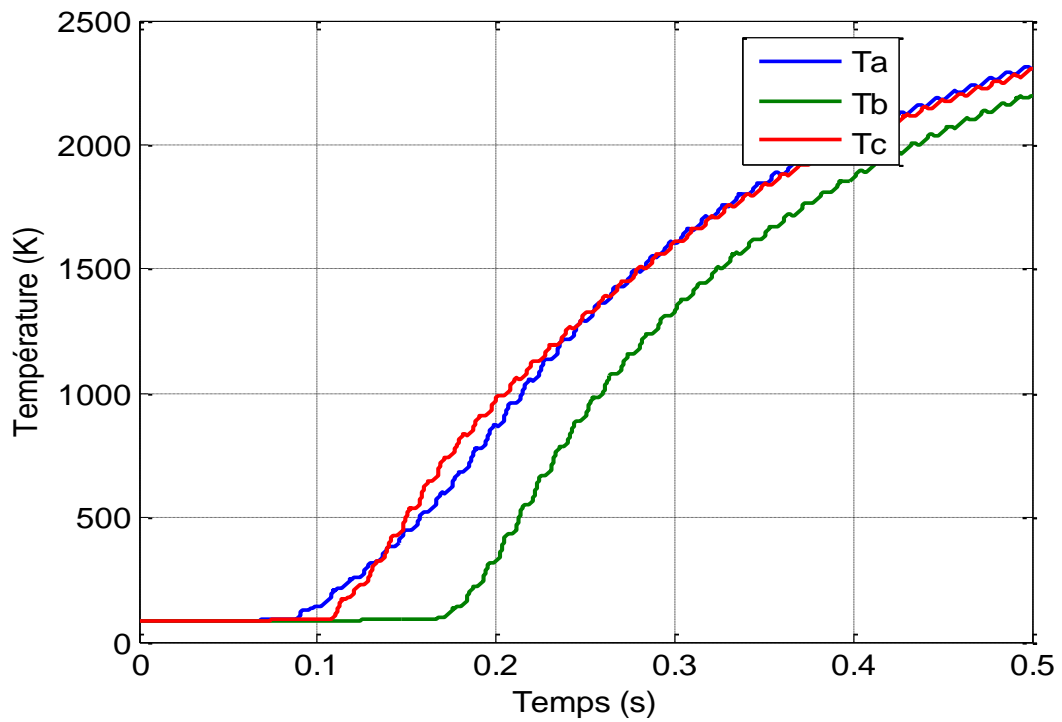


Figure III.11 : Variation des températures de SFCL en fonction de temps

A partir de les figures de la résistance et la température, on remarque un temps de réponse c.-à-d. il y'a un temps entre l'instant de défaut et l'instant de transition de SFCL (l'état supra vers l'état de conduction normal).

La figure III-11 montre la variation l'état de fonctionnement (l'état 0 pour flux creep, l'état 1 pour flux flow et l'état 2 pour la conduction normal).

On remarque aussi, pour le régime normale de réseau électrique, les SFCL sont dans l'état de flux creep cette caractériser par une résistance presque nulle (la résistivité inférieur de 10^{-12}) ; pendant le défaut, les états de SFCL transiter vers l'état de flux flow (la résistivité inférieur de 10^{-7}) ; et a partir de 0.04s, les supraconducteurs sont considéré comme des matériaux résistives (la résistance supérieur de 5 Ohm).

Il faut noter que quelque soit instant de défaut, il toujours deux limiteurs qui transite avant le troisième, cette remarque influe pas sue le fonctionnement globale de SFCL.

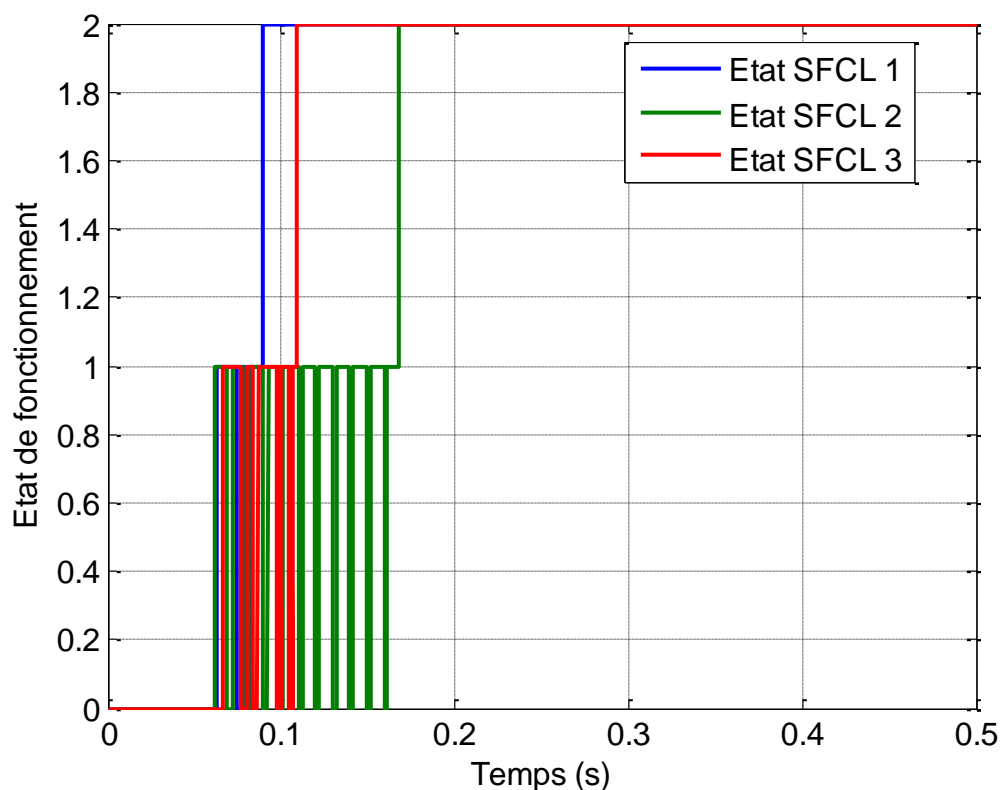


Figure III.12 : Variation des états de fonctionnement de SFCL en fonction de temps

III.07 Énergie dissipation dans les SFCL

La figure III.11 illustre le niveau de diminution du courant de défaut et la dissipation d'énergie

totale correspondante dans une phase du SFCL pour le défaut indiqué dans la figure III.4

.Pour les paramètres utilisés dans la simulation, les régions suivantes ont été identifiées:

$R_{SFCL} < 18$ le courant de défaut à l'état stationnaire est légèrement réduit, atteignant une valeur d'environ 3a4 fois le courant de charge, et concernant la dissipation d'énergie correspondante reste augmente fortement comme le montre la figure III.13.

$18 < R_{SFCL} < 35$: le courant de défaut diminue avec l'augmentation de la résistance SFCL, mais la résistance croissante provoque une dissipation d'énergie pour atteindre son maximum dans cette région. Cette grande dissipation d'énergie allongerait le temps de récupération et cette gamme de résistances SFCL devrait être évitée.

$R_{SFCL} > 35$: le courant de ligne continue de diminuer avec l'accroissement de la résistance SFCL (presque linéairement avec la résistance), mais la dissipation d'énergie diminue. C'est la région la plus souhaitable: Faible courant de défaut associé à une faible dissipation d'énergie. On peut observer à partir de la figure III.13 qu'une valeur SFCL d'environ 80 Ohm réduit le courant de défaut à la même valeur que le courant de charge 250A.

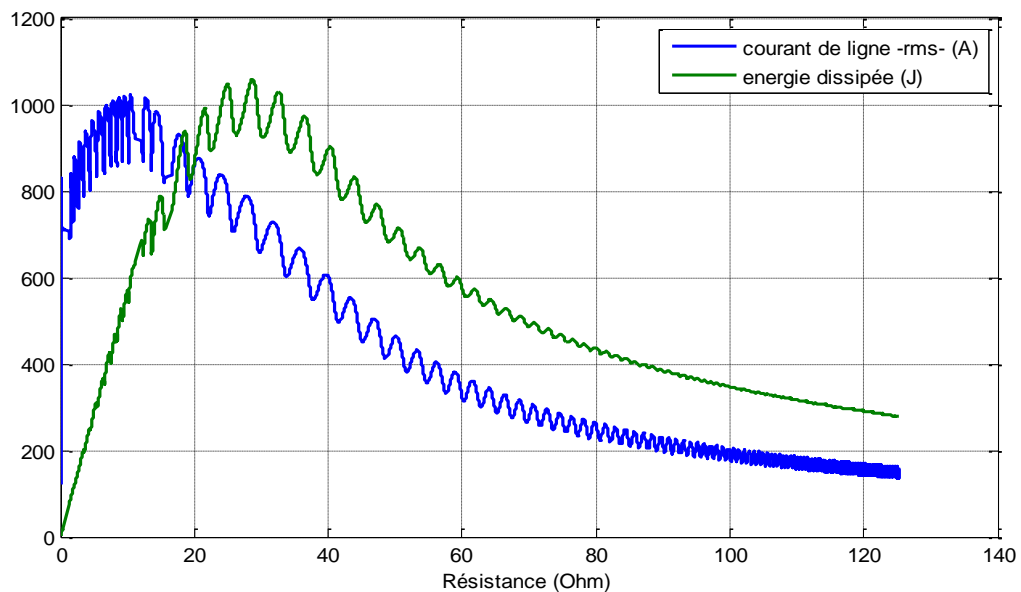


Figure III.13 : Énergie dissipé et courant de défaut pour diverses valeurs de résistance pendant la limitation Influence de temps

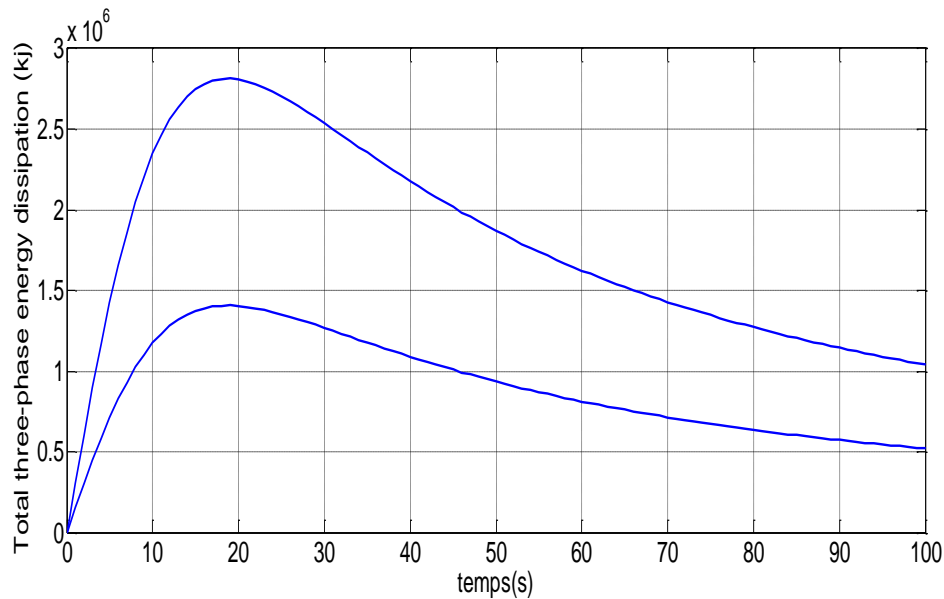


Figure III.14 : allure dissipation d'énergie pour ($t_f = 0.1s$ et $t_f = 0.05s$)

Illustre qu'il n'y a qu'une petite différence dans la dissipation totale de l'énergie l'approximation fournit une représentation précise de la dissipation moyenne d'énergie par phase. En outre, la (figure III.12) montre que la dissipation d'énergie Varie approximativement linéairement avec la durée de la faute, ce qui implique qu'une protection plus rapide est souhaitable pour minimiser l'énergie dissipation dans le SFCL, cette exigence peut être nécessaire compte tenu de l'intégration des SFCL avec le temps classé systèmes de protection dans les systèmes de distribution, qui peuvent avoir temps de trajet relativement long, en excès d'une seconde

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé un réseau électriques de distribution avec l'intégration des limiteurs de courant, dont l'objectif de calculer les différentes grandeurs électriques et thermiques couplé dans les matériaux supraconducteurs, et a fin de minimiser les pertes joules dans les SFCL, nous avons calculé la puissance dissipé dans les limiteurs pendant les défauts pour différents valeurs de résistance, d'après les résultats on constat que les limiteurs sont des systèmes de protection efficaces , et pour éviter l'énergie de dissipation maximale il faut toujours vérifier que leurs résistances sont inférieurs de l'impédances de source d'après l'étude de Steven Blair durées.

Conclusion Générale

Conclusion Générale:

Le but de ce travail de mémoire a consisté en l'étude théorique d'un limiteur de courant base de supraconducteur à haute température critique et de calculer les énergies dissipée.

Plusieurs études utilisent le modèle de Bean pour trouver les énergies dans les supraconducteurs HTC. Ces formules, connues depuis plusieurs dizaines d'années, ont été utilisées avec succès pour les supraconducteurs à basse température critique (BTC). Cependant les caractéristiques spécifiques des SHTC nous ont amenés à réfléchir sur la validité de ces formules pour ces supraconducteurs.

L'emploi, dans l'avenir, de ces limiteurs pour la protection des réseaux électriques, nous a incités étudié plus particulièrement les énergies dissipées à l'aide du modèle de puissance.

Le présent travail met l'accent sur la résolution de l'équation différentielle caractéristiques d'un réseau électrique a l'aide de MATLAB, où a fin d'assurer le couplage électrique-thermique, la résistance de limiteur est considéré comme une résistance variable en fonction du courant de ligne (phase) et de la température.

Notre travail est divisé en deux parties :

La première est basée sur l'étude d'un réseau électrique durant le fonctionnement normale, et pendant défaut Dans cette partie, les tensions et les courants des lignes sont représentées graphiquement à l'aide de la simulation.

La deuxième est basée sur l'étude d'un réseau électrique durant un court circuit avec l'insertion d'un limiteur de courant. La résistance, la température, le courant et les états de fonctionnement sont représentées.

Aussi, l'énergie dissipée en fonction de la durée défaut est étudiée.

D'après les résultats obtenus, on conclure que le limiteur est un bon moyen de protection des réseaux électriques mais il y'a un problème de l'énergie dissipé, c.-à-d. durant la limitation, et pendant l'accroissement de la valeur de la résistance, l'énergie dissipée augmente, cette croisement influe sur le matériau supraconducteur et donc il faut protéger le matériau par des moyens supplémentaires ; dans littératures, le moyen de protection est une résistance shunt aux bornes le limiteur.

En perspective, nous proposons la modélisation du comportement d'un réseau électrique de plusieurs mailles contenant un limiteur de courant à base d'un supraconducteur à haute température critique lié avec une résistance shunt.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CHARLES-HENRI BONNARD, ‘Transformateur Limiteur De Courant Supraconducteur à Haute Température Critique : Design, Construction Et Test’ mémoire
- [2]. Ben Mebarek Fethi Modélisation des matériaux supraconducteurs, application à un limiteur du courant
- [3] William D. Callister, Science et génie des matériaux, Modulo Éditeur, 2001, p.620 (traduit en français)
- [4] Mohamed MAHTALI THESE De DOCTORAT D’ETAT En Physique Spécialité: Sciences des Matériaux Université MENTOURI – Constantine Etude et caractérisation de structures supraconductrices
- [5] Joseph DURON Modélisation de Matériaux supraconducteurs -application à un limiteur de courant Joseph.0 DURON THÈSE NO3469 (2006)
- [6] Khaled BEN ALIA. ETUDE DES SYSTEMES DE GUIDAGE MAGNETIQUE A BASE DE SUPRACONDUCTEUR HTc.
- [7] BELKHIRI Yamina UNIVERSITE DE BATNA MEMOIRE DE MAGISTER (Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques Couplés par la Méthode des Volumes Finis (CVM))

Abstract:

In this work, we present an analysis of the dissipative energy in current limiters for power systems using a modeling of electro-thermal phenomena in superconducting materials with a high critical temperature applied to limit the fault current. The characteristic equations for energy dissipation are established in terms of fault duration, SFCL resistance. The various electrical and thermal results have been widely presented from a SIMLINK / MATLAB simulation.

Key words: superconductor, current limiter, energy dissipate

Résumé:

Nous avons présenté dans ce travail une analyse de l'énergie dissipative dans les limiteurs de courant pour les systèmes à puissance a partir une modélisation des phénomènes électrothermiques dans les matériaux supraconducteurs à haute température critique appliquée pour limiter le courant de défaut. Les équations caractéristiques pour la dissipation d'énergie sont établies en termes de durée de défaut, de résistance SFCL. Les différents résultats électriques et thermiques ont été largement présentés a partir une simulation sous SIMLINK/MATLAB.

Mots clés: supraconducteur, limiteur de courant, énergie dissipé

ملخص:

قدمنا في هذا العمل تحليلاً للطاقة الضائعة في محددات التيار للخطأ لأنظمة الطاقة من خلال نمذجة الظواهر الكهروحرارية في المعادن فائقة الناقلية ذات درجة الحرارة العالية. المعادلات المميزة للطاقة الضائعة عرضت من خلال علاقتها مع مدة الخطأ أيضاً من خلال علاقتها مع قيمة المقاومة لمحددات التيار. مختلف النتائج ذات الطابع الكهربائي و الحراري عرضت في هذا العمل بإسهاب من خلال محاكاة في برنامج ماتلاب.

الكلمات المفتاحية المعدن فائقة الناقلية، محددات التيار، الطاقة الضائعة.