

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie électrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Matériaux électrotechnique

Présenté par :

DEBBA Mounib BELHANI Hakima

Thème:

*Étude des caractéristiques temporelles
d'un limiteur de courant à base de
supraconducteur durant les défauts*

Soutenu publiquement

Le :06/06/2017

Devant le jury :

M^{lle} BELKEBIR Amel

MA (A)

Président

UKM Ouargla

M^r BENALIA Khaled

MC (B)

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^{me} NACEUR Sonia

MC (B)

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2016/2017

الله أكبر

Dédicace

Avec un grand plaisir, je dédie

Ce modeste travail à mes chers parents, que Dieu le Tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail

A mon très cher père, l'homme le plus parfait dans le monde, mon grand exemple et

Mon directeur et mon éducateur

Ma mère, RIP

Ma belle-mère, source de compassion et de tendresse, l'exemple de patience et sacrifice, la raison de mon existence et le support de ma vie.

Mes très chères sœurs : Dalila et ça dyade et leur fille Salsabil, Wafa, Fatima,

Ahlem

Mes très chers frères : Noureddine et ça gonzesse Mariam et leur fils Md Anesse, les jumeaux lahsenne et hossine.

A toute ma famille Belhani et Souta et Ben Mariem

A me binôme Mounib

A tous mes enseignants d'université de KASDI Merbah

HAKIMA

Dédicace

Dédié à ce travail modeste:

Pour ma mère et mon cher père, qui étaient la cause de toutes les étapes de ma vie, et qui m'a soutenu financièrement et moralement et cognitivement, et aussi mes frères, et ne pas oublier de soutenir mes amis leur rappeler (Ibrahim et Badr Eddine et Faysal et Anwar et Saïf et Isame et Salim...) et enfin pour me binôme Hakima qui a partagé mon chaque moment de ma carrière, et tous les enseignants et les enseignants qui conduit mon drapeau de la science de la roue que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, je voudrais apporter un bien connu simple qui leur est offert.

..... Merci beaucoup.

Mounib

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science.

A *Mr. BEN ALAI KHALED*, Maître de conférence à l'université de Ouargla, d'avoir proposé et dirigé ce travail

Nos remerciements vont aussi *Melle BELEKBIER AMEL* comme un président, et *M^{me} NACEUR SONIA* comme un examinateur

Nous réitérons également nos remerciements à tous les enseignants et les étudiants de la spécialité matériaux électrotechnique

Doivent être également remerciés toutes les personnes ayant participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail

*DEBBA MOUNIB
BELHANI HAKIMA*

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	III
Liste des abréviations et des symboles.....	VI
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur les matériaux supraconducteurs	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Historique de la supraconductivité.....	03
I.3 Propriétés physiques des supraconducteurs.....	05
I.3.1 Résistivité nulle.....	05
I.3.2 Diamagnétisme parfait.....	05
I.3.3 Les grandeurs critiques (Surface critique).....	06
I.3.3.a Température critique	07
I.3.3.b Densité de courant critique	08
I.3.3.c Champ magnétique critique	08
I.4 Classification des supraconducteurs.....	09
I.4.1 Supraconducteurs LTS et HTS.....	09
I.4.2 Supraconducteurs de type I et II.....	09
I.4.1.a Supraconducteur de type I.....	09
I.4.2.b Supraconducteur de type II	10
I.5 Modèle des matériaux supraconducteurs	11
I.5.1 Le modèle de l'état critique de Bean.....	11
I.5.2 Modèle de loi de puissance	12
I.5.3 Modèle de KIM.....	12
I.5.4 Modèle de Flux Flow et Flux-Creep.....	12
I.6 Principales applications des supraconducteurs	14
I.6.1 Physique fondamentale.....	14
I.6.1.a Composants HF (couches minces)	14
I.6.2 Applications en électrotechnique	15

I.6.2.a	Machines tournantes.....	15
I.6.2.b	Câbles de transport d'énergie.....	15
I.6.2.c	Stockage de l'énergie électrique.....	16
I.6.2.d	Limitation de courant.....	17
I.7	Conclusion.....	17

Chapitre II : Limiteurs de courant

II.1	Introduction.....	18
II.2	Les limiteurs de courant traditionnel.....	18
II. 2.1	Défauts.....	18
II.2.2	Elimination des défauts.....	19
II.2.2.a	Fusible	19
II.2.2.b	Disjoncteur.....	19
II.2.3	Le courant de défaut.....	20
II.3	Fonctionnement d'un limiteur de courant.....	20
II.3.1	principe général	20
II.3.2	Limiteurs de courant classique	21
II.3.2.a	Arc électrique	21
II.3.2.b	Réactance série	21
II.3.2.c	Limiteur commandé.....	21
II.3.2.d	Condensateur.....	22
II.3.2.e	Inductance.....	23
II.3.2.f	stance	23
II.3.2.g	stance variable.....	23
II.4	Limiteur de courant à base de supraconducteur.....	24
II.4.1	Différents types de limiteur de courant supraconducteur	25

II.4.1.a	Limiteur résistif.....	25
II.4.1.b	Limiteur inductif.....	26
II.4.1.c	Limiteur de type pont redresseur.....	27
II.4.1.d	SFCL de type contrôleur de courant de défaut.....	28
II.4.1.e	SFCL de type noyaux magnétiques saturés	29
II.4.2	Comparaison des différents SCFCL.....	29
II.4.3	Positionnement du limiteur de courant dans le réseau électrique.....	30
II.5	Conclusion.....	32

Chapitre. III : résultats et discussions

III.1	Introduction.....	33
III.2	Etude réseaux de distribution.....	33
III.2.1	Les allures de courant et de tension pendant le fonctionnement normal.....	34
III.2.2	Les allures de courant et de tension pendant un défaut	35
III.2.3	Les allures de courant et de tension avec le SFCL et un défaut de court-circuit.....	36
III.2.3.a	SFCL Exigences du modèle.....	38
III.2.3.b	Implémentation du modèle de SFCL.....	38
III.2.3.c	Analyse les caractéristiques temporelles du SFCL.....	41
III.3	Conclusion.....	43
	Conclusion général.....	44

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les matériaux supraconducteurs

Figure I.1	Heike KamerlinghOnnes première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la supraconductivité (1911).
Figure I.2	évolution de la résistivité électrique en fonction de la température.
Figure. I.3	Effet Meissner dans une sphère supraconductrice.
Figure I.4	Surface critique des matériaux supraconducteurs.
Figure I.5	La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur.
Figure. I.6	caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type I.
Figure. I.7	Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II.
Figure .I.8	Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur, modèle de l'état critique.
Figure. I.9	La caractéristique du champ électrique E en fonction de la densité de courant J .
Figure I.10	Boîtier contenant 8 filtres $YBaCuO$, et intégration dans un châssis intégrant le Cryo générateur 30 K.
Figure. I.11	Machines électrique Sumitomo.
Figure. I.12	Exemples de câble supraconducteur.
Figure. I.13	Stockage de l'énergie électrique.
Figure. I.14	Limiteur de courant (SFCL).

Chapitre II : Limiteurs de courant

Figure II.1	Limitation de courant par transformateur court-circuité.
Figure II.2	Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant.
Figure II.3	courant de court-circuit avec et sans limiteur.
Figure II.4	principe du limiteur de courant résistif.
Figure II.5	Principe du limiteur de courant inductif.
Figure II.6	Principe du limiteur de courant de type pont redresseur.

Figure II.7	Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut.
Figure II.8	Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés.
Figure II.9	Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau.
Chapitre. III : résultats et discussions	
Figure.III.1	le réseau d'étude sans dans le cas normal.
Figure III.2	variation de courant en fonction de temps dans le cas normal.
Figure III.3	variation de tension en fonction de temps dans le cas normal.
Figure III.4	le réseau d'étude dans le cas de défaut.
Figure III.5	variation de courant en fonction de temps dans le cas de défaut.
Figure III.6	variation de tension en fonction de temps dans le cas de défaut.
Figure III.7	le réseau d'étude dans le cas de défaut avec SFCL.
Figure III.8	Caractéristiques du supraconducteur E-J, montrant les trois états.
Figure III.9	variation de température en fonction de temps dans le cas de défaut avec SFCL.
Figure III.10	variation de résistance en fonction de temps dans le cas de défaut avec SFCL.
Figure III.11	variation de courant en fonction de temps dans le cas de défaut avec SFCL.
Figure III.12	variation de tension en fonction de temps dans le cas de défaut avec SFCL.
Figure III.13	variation de temps de transition en fonction de courant de défaut.

Liste des tableaux

Tableau. I.1	Comparaison entre le comportement magnétique d'un conducteur parfait et celui d'un supraconducteur idéal.
Le Tableau II.1	compare les caractéristiques des différents types de SCFCL.
Tableau.III.1	les caractéristiques des éléments du réseau étudié.
Tableau .III.2	Résumé des paramètres modèles SFCL.

Liste Des Abréviations Et Des Symboles

I : Symboles	
S_n [VA]	Puissance nominale ou puissance assignée.
P_{cc} [W]	La puissance de court-circuit
U_{cc} [V]	La tension de court-circuit
I_{cc} [A]	Le courant de court-circuit
J_c [A/m ²]	La densité de courant critique
H_c [A/m]	Le champ magnétique
T_c [K]	La température critique
E_c [V/m]	Le champ électrique critique
T_a [K]	La température ambiante
ρ [Ω /m]	La résistivité électrique
P_{ch} [W]	La puissance active de la charge
Q_{ch} [Var]	La puissance réactive de la charge
L_s [H]	L'inductance de la source
R_s [Ω]	La résistance de la source
E [V/m]	Le champ électrique
E_0 [V/m]	Champ électrique à la transition de l'état de flux-creep à l'état de flux-flow
C_{sc} [J/K]	Capacité thermique du supraconducteur
K [W/K.m ²]	Coefficient de transfert de chaleur au réservoir de refroidissement
Q_{sc} [J]	La chaleur a dissipé dans le supraconducteur
$Q_{\text{évacuées}}$ [J]	Chaleur enlevée par le système de refroidissement
θ_{sc} [K/W]	Résistance thermique du supraconducteur au réservoir de refroidissement
L_{sc} [m]	Longueur du fil supraconducteur
a_{sc} [m ²]	Zone transversale du fil supraconducteur
β [s.u]	Expotif de la région de Flux-flow
n_{77k} [s.u]	Expotif de la région de fluage-fluage (à T=77K)
J_{c77K} [A/m ²]	Densité de courant critique (à T= 77K), c'est-à-dire densité de courant où $E = 1 \mu\text{V} / \text{cm}$

II. Les Abréviations

RL	Le circuit avec résistance et L'inductance
HT	Haut tension
MT	Moyen tension
BT	Basse tension
DC	Courant continu
AC.	Courant alternatif
LC	Basse courant
HTC	Haut température critique
CTP	Coefficient Thermique Positif
SFCL	Limiteur de courant à base du supraconducteur
RMS	La valeur moyenne
Hg	Le mercure
In	L'indium
Sn	L'étain
BSC	Théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer
TAFC	Le flux-creep activé thermiquement
TAFF	Le flux-flow activé thermiquement
LHC	le Large Hadron Collider
ITER	Internationale Thermonucléaire Experimental Réacteur
SMES	Supraconduction Magnétique Energie Stockage
BSCCO	Composé de Bismuth-Strontium-calcium-cuivre-oxygène
YBaCuO	Supraconducteur à base d'yttrium, de baryum et d'oxydes de cuivre

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Depuis le moyen âge l'homme, fasciné par les phénomènes extraordinaires de la nature, essaie d'expliquer par la physique les propriétés fondamentales de la matière. Cette science explique les phénomènes qui apparaissent parfois dans des conditions extrêmes de température et de pression. Jusqu'en 1911, 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 mercure devient nulle en dessous de 4,2K ; ainsi ils ont découvert le phénomène de la supraconductivité. Cette dernière se traduit par deux effets remarquables [1] :

- Le supraconducteur conduit le courant électrique de façon parfaite.
- Il expulse les champs magnétiques et fait léviter les aimants.

Malgré cette découverte de la supraconductivité qui occupe une place importante dans la science, certaines caractéristiques de ce phénomène physique restent inexplicables et constituent une grande énigme technologique et scientifique.

A la fin des années 80 les chercheurs ont réussi à obtenir des matériaux supraconducteurs à haute température critique. Ce qui a eu la conséquence accrue pour ces matériaux. Cette nouvelle classe de supraconducteurs plus faciles et moins coûteux à utiliser que celles de leurs prédécesseurs.[1]

Actuellement, les supraconducteurs sont 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.

Nous présentons dans ce travail une étude approfondie sur les supraconducteurs à haute température critique, ainsi qu'à modéliser les caractéristiques temporelles d'un limiteur de courant à base de supraconducteur durant le défaut. Le modèle développé doit décrire le comportement réel du limiteur supraconducteur SFCL.[1] Il doit être simple à intégrer dans n'importe quel type de réseau électrique. L'étude est basée sur la modélisation et la simulation. La validation de ces résultats sera réalisée au moyen du logiciel MATLAB.

Vous trouverez dans cette étude l'organisation suivante:

Dans le premier chapitre, on donne un aperçu historique sur la supraconductivité. Ensuite nous décrivons les propriétés physiques intéressantes. Après cela nous verrons les différents types ainsi que les modèles de supraconducteurs. Puis, nous donnerons les différentes applications industrielles des supraconducteurs dans différents domaines.[1]

Le deuxième chapitre présente les limiteurs du courant traditionnel ; suivi par le fonctionnement d'un limiteur de courant ; après ceci le limiteur à base de supraconducteur avec ses différents types.

Au niveau du troisième chapitre, on distingue l'analyse des réseaux de distributions se basant sur le modèle de **Steven M. Blair** dans le cas normal, dans le cas de défaut, puis en cas d'utilisation du SFCL avec tous les résultats qui sont également présentés ainsi que les procédures d'implémentation, sous l'environnement MATLAB, et enfin la discussion des résultats de simulation de SFCL.[1]

Finalement, une conclusion générale résume l'essentiel de notre travail.

Chapitre I :

GENERALITE SUR LES MATERIAUX SUPRACODUCTEURS

- ❖ INTRODUCTION
- ❖ HISTORIQUE DE LA SUPRACONDUCTIVITE
- ❖ PROPRIETES PHYSIQUES DES SUPRACONDUCTEURS
- ❖ CLASSIFICATION DES SUPRACONDUCTEURS
- ❖ MODELES DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS
- ❖ PRINCIPALES APPLICATIONS DES SUPRACONDUCTEURS
- ❖ CONCLUSION

I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de généralités sur les matériaux supraconducteurs et les propriétés physiques de la supraconductivité. Après un rappel de son historique, nous présentons les types de supraconducteurs, ainsi que les modèles de ces matériaux. A la fin de ce chapitre nous procédons au traitement de certaines de ces applications principales de supraconductivité en physique fondamentale et en électrotechnique.

I.2 Historique de la supraconductivité

Le phénomène de la supraconductivité a été découvert en 1911 par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes, 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, Leon N. Cooper et John Schrieffer (tous trois prix Nobel de physique en 1972) pour expliquer la supraconductivité. Cette théorie explique qu'à très basse température, les électrons s'apparient, c'est-à-dire se mettent en couple. On dit qu'ils forment des paires de Cooper. Cet état ordonné résulte de l'existence d'une attraction entre électrons par l'intermédiaire des vibrations du réseau atomique qu'on peut schématiser ainsi : un électron de conduction se déplaçant dans le métal provoque sur son passage une déformation locale et momentanée du réseau par l'attraction qu'il exerce sur les ions positifs. Ces ions se déplaçant créent un excédent de charge positive.

Un deuxième électron sera soumis à cet excédent de charge positive qui a fait écran à la charge négative du premier électron. Comme les électrons circulent beaucoup plus vite que les ions (qui sont nettement plus lourds), le deuxième électron subit l'effet prolongé de la charge positive quand le premier électron est loin de lui. L'interaction entre les deux électrons a donc une grande portée. Les paires d'électrons ainsi formées se déplacent sans dissipation d'énergie

dans le réseau cristallin. Les électrons sont des fermions, c'est-à-dire des particules qui ne peuvent se trouver au même endroit dans le même état physique. Mais la véritable explication théorique de la supraconductivité à très basse température repose sur le fait que les paires de Cooper, constituées de deux électrons, forment en définitive des bosons qui, eux, peuvent se trouver en grand nombre dans le même état physique, en l'occurrence dans un état de plus basse énergie. Elles ne peuvent alors pas perdre d'énergie par dissipation, et se propagent donc sans résistance. Tout se passe comme si, pour elles, tous les mécanismes de perte avaient disparu. Cette agglomération d'un grand nombre d'électrons appariés dans un seul et même état physique est ce que les physiciens appellent une condensation de Bose-Einstein. 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 [1] de la supraconductivité dans un oxyde synthétique de cuivre, lanthane et baryum à une température critique de 35 K, 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 164 K, en 1998.

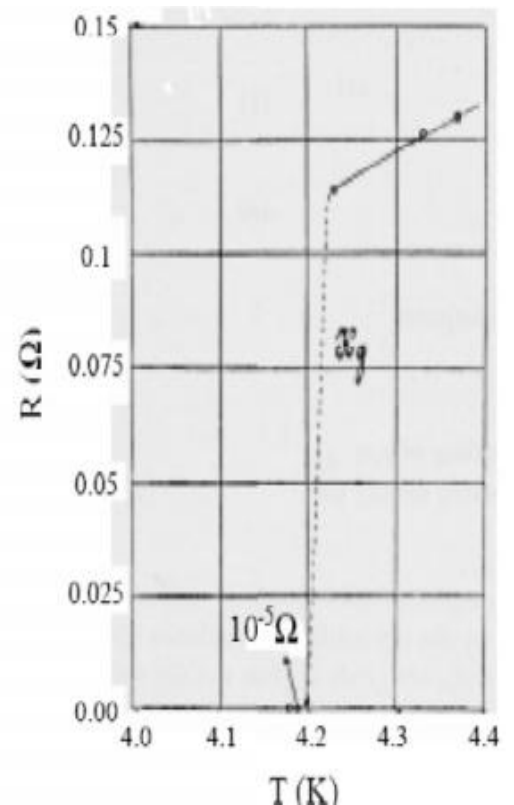
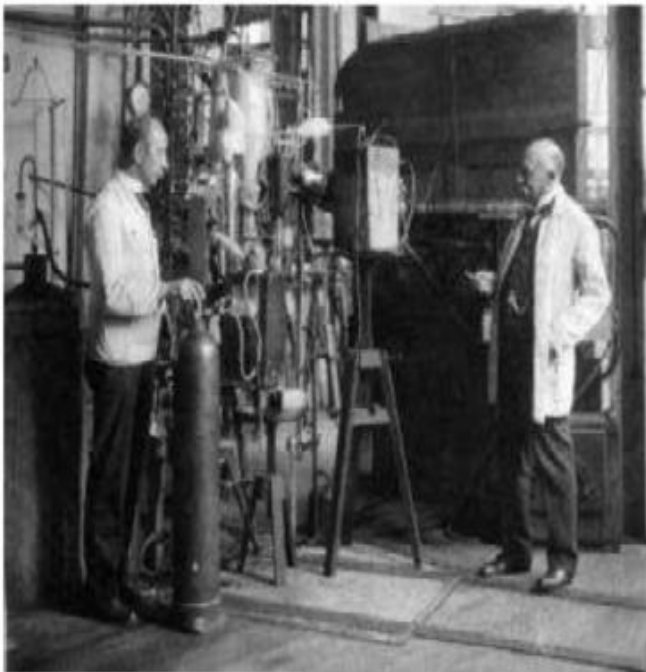


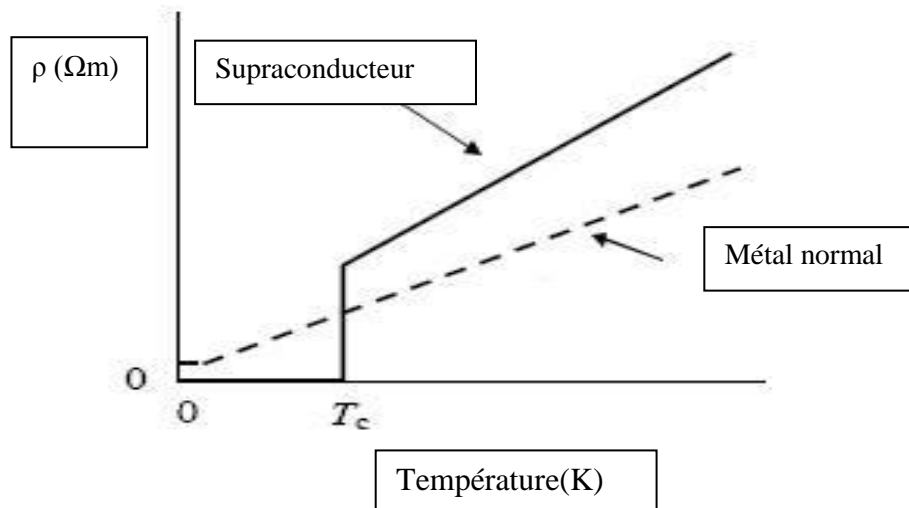
Figure I.1: Heike Kamerlingh Onnes première liquéfaction de l'hélium (1908) et découverte de la supraconductivité (1911).

I.3 Propriétés physiques des supraconducteurs

Les principales propriétés de la physique des supraconducteurs dans cette étude, sont les suivantes :

I.3.1 Résistivité nulle

La « première signature » du supraconducteur se caractérise à un matériau dont la résistivité est nulle (Fig. I.2) en dessous d'une certaine température appelée température critique T_c qui se traduit par une transition verticale, et sépare ainsi le comportement de l'état normal du matériau de celui de son état supraconducteur. L'intervalle de température dans lequel la résistivité change brusquement est très étroit et il est inférieur à $10^{-5}K$ dans le gallium très pur [2]. On peut donc conclure que l'état supraconducteur est un nouvel état de la matière. Ce qui se traduit par un arrangement particulier du système des électrons. On peut donc dire que le franchissement de la température critique correspond à une transition de phase.



.Figure I.2 : évolution de la résistivité électrique en fonction de la température.

I.3.2 Diamagnétisme parfait ou Effet Meissner

La « deuxième signature » des matériaux supraconducteurs est leur capacité d'expulser un champ magnétique extérieur appliqué B_e (de faible amplitude), quand ils sont refroidis en dessous de leur T_c . De la même façon, si l'on refroidit un supraconducteur, puis qu'on l'expose à un champ magnétique faible, les lignes de flux ne pénètrent pas dans le matériau. Un champ magnétique extérieur induit la circulation des courants dans le supraconducteur en créant à leur tour un champ magnétique opposé. Le champ magnétique B à l'intérieur du matériau est donc nul. Cette caractéristique appelée « effet Meissner » n'est pas

une propriété d'un conducteur parfait, ceci est seulement caractérisé par sa résistance nulle (Fig. I.3).

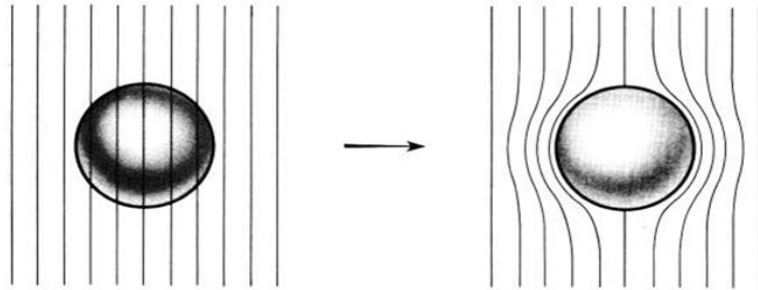


Figure. I.3: Effet Meissner dans une sphère supraconductrice.

Le tableau I.1 ci-après illustre la différence entre conducteur parfait et supraconducteur lors d'un refroidissement sous champ magnétique externe.

		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 $\chi = -1$)				

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

I.3.3 Les grandeurs critiques (Surface critique)

La supraconductivité ne se manifeste que dans les températures inférieures à la valeur de la température critique T_c . Cette valeur, n'est pas la seule grandeur critique de la supraconductivité. Cette dernière comporte d'autres grandeurs critiques, tels que, le champ magnétique critique H_c et la densité de courant critique J_c . On peut rassembler ces grandeurs critiques dans une seule compréhension qui est la surface critique, on appelle surface critique la surface qui délimite l'état non dissipatif la surface dans le plan $[T, H, J]$. Figure(I.4)

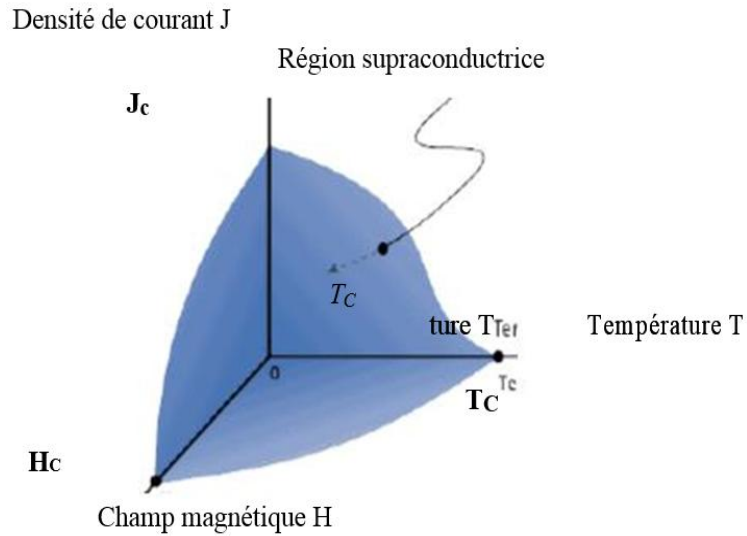


Figure I.4 : Surface critique des matériaux supraconducteurs.

L'utilisation d'un supraconducteur avec un minimum de pertes nécessite que celui-ci soit placé dans des conditions où son état soit non dissipatif [4]. Il est donc nécessaire de connaître les limites à ne pas dépasser afin de ne pas sortir de cette zone d'utilisation optimale en termes de pertes. Nous allons trouver l'explication de tous les critères précédents dans ce qui suit :

I.3.3.a Température critique

La température critique est celle en dessous de laquelle la supraconductivité apparaît. Cette température est différente pour chaque matériau et relative à la densité du courant et du champ magnétique appliqué. A partir de la valeur de la température critique T_c , on distingue deux types de matériau supraconducteur :

- les supraconducteurs à basse température critique, qui nécessitent des températures très basses, généralement inférieures à 23 K.
- les supraconducteurs à haute température critique [3], pour ces types, l'utilisation de l'hélium liquide est nécessaire et caractérisée par une température de 4 K, comme milieu cryogénique. L'inconvénient majeur de ce type de matériau, est dû au coût élevé de l'hélium. Ce type de matériau, est utilisé pour la réalisation des enroulements supraconducteurs, comme il est très utilisé pour la réalisation des machines supraconductrices ou bien des transformateurs supraconducteurs.

I.3.3.b Densité de courant critique

C'est la deuxième grandeur qui limite l'état supraconducteur. La densité de courant critique est J_c la valeur maximale correspondante à partir de laquelle une résistivité apparaît. Des fils relativement fins de matériaux supraconducteurs peuvent être employés pour transporter de forts courants puisqu'il n'y a aucune perte d'énergie thermique. Au-dessus de ce courant critique ils ne sont plus supraconducteurs et passent à l'état normal même s'ils sont au-dessous de la température critique. Ce courant critique représenté par sa densité du courant J est utilisé dans les limiteurs de courant supraconducteurs. [1]

La densité de courant critique J_c est une fonction non linéaire de la température et du champ magnétique. Plus le supraconducteur est refroidi, plus le courant à transporter sans transition est élevé. La figure (I.5) représente la tension en fonction du courant circulant à travers un fil supraconducteur.

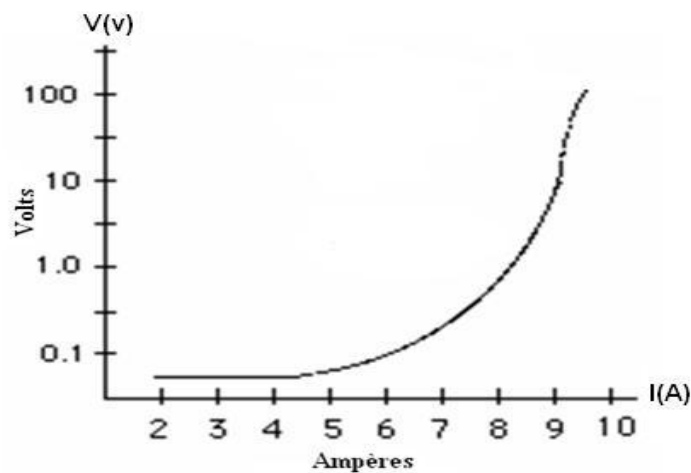


Figure I.5 : La caractéristique tension courant pour un fil supraconducteur.

I.3.3.c Champ magnétique critique

La valeur du champ magnétique critique H_c est la 3ème grandeur critique des matériaux supraconducteurs. L'état supraconducteur du matériau est relatif à la valeur du champ magnétique extérieur appliqué. La supraconductivité disparaît, dès que la valeur de ce champ dépasse une valeur critique. Ce comportement est lié à la pénétration du champ dans un supraconducteur (Effet Meissner) [3]. L'induction magnétique B à l'intérieur du matériau est donnée par la relation suivante :

$$B = \mu_0 (H + M) \tag{I.1}$$

Avec :

μ_0 : est la perméabilité magnétique de vide,

H : est le champ magnétique à l'intérieur du matériau,

M : est l'aimantation.

Le supraconducteur se définit par la propriété nommée effet Meissner Ochsenfeld, qui consiste à ce que les lignes de champ magnétique sont expulsées du matériau. Ainsi pour **T** supérieurs à **T_c** le matériau est non magnétique (aimantation nulle), par contre pour **T** inférieur à **T_c** il est parfaitement diamagnétique (aimantation négative) si le champ magnétique extérieur n'est pas très élevé (**H**<**H_c**). Le champ critique varie avec la température suivant la loi approximative :

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

H_0 : est la valeur du champ magnétique à la température 0 K.

I.4 Classification des supraconducteurs

I.4.1 Supraconducteurs LTS et HTS

Les supraconducteurs se distinguent par leurs valeurs **T_c**. En dessous de 30 K ce sont les basses températures critiques (LTS pour Low Temperature Superconductors) alors qu'au-delà ce sont les hautes températures critiques (HTS pour High Temperature Superconductors) [5].

I.4.2 Supraconducteurs de type I et II

Les supraconducteurs dont le diamagnétisme est parfait en dessous d'un certain champ magnétique appelé champ critique **H_c** sont de type I.

Les supraconducteurs de type II, caractérisés par deux champs critiques **H_{c1}** et **H_{c2}**, entre lesquels l'apparition de zones normales (résistives) est énergétiquement favorable. Les supraconducteurs se trouvent alors dans un état mixte dans lequel coexistent des zones supraconductrices et normales.

I.4.1.a Supraconducteur de type I

Pour les supraconducteurs type I, il n'existe qu'un seul champ magnétique critique **H_{c1}**, avec un état supraconducteur et un état normal.

Les supraconducteurs de ce type sont essentiellement des corps purs, comme le mercure (Hg), l'indium (In), l'étain (Sn) et le plomb (Pb). Dans la Figure. (I.6), la caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur du type I est présentée. Comme le champ critique est relativement faible puisqu'il ne dépasse pas 0.2 Tesla, cela explique que les supraconducteurs de type I sont sans intérêt pratique en électrotechnique.

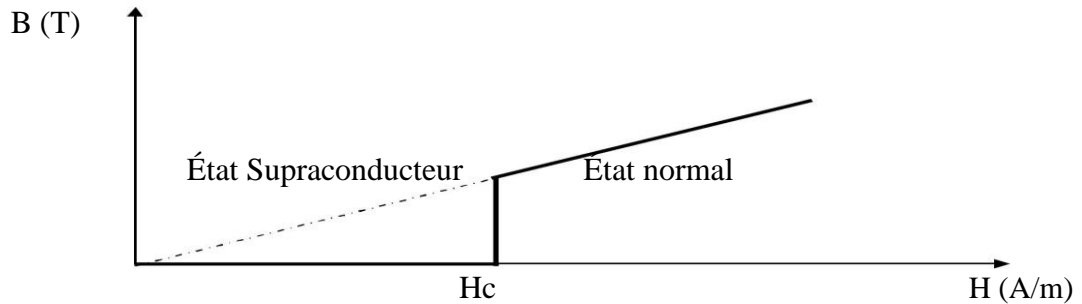


Figure. I.6 : caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type I.

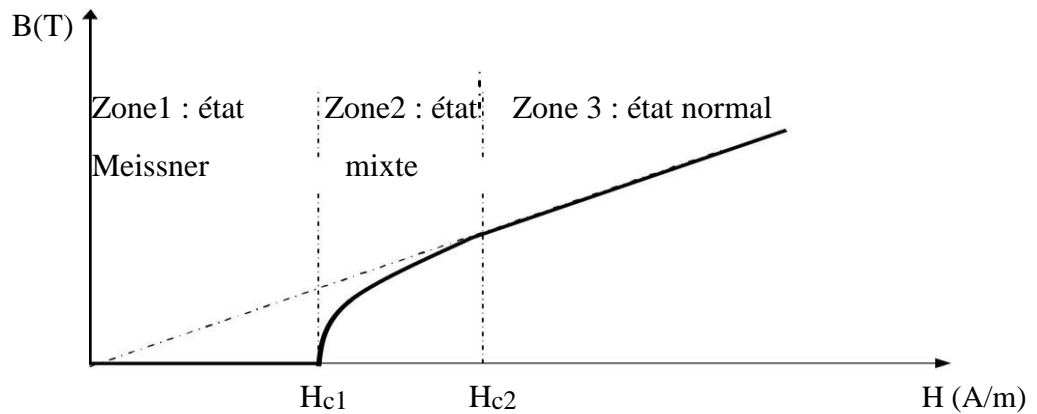
I.4.2.b Supraconducteur de type II

Les supraconducteurs type II possèdent deux champs critiques, le deuxième nettement plus grand que le premier ($H_{c2} \gg H_{c1}$), puisqu'il peut atteindre plusieurs dizaines de Tesla [6]. En plus de cela la densité de courant critique peut atteindre des valeurs élevées. Ces deux caractéristiques favorisent l'utilisation de ces matériaux dans le domaine de l'électrotechnique.

Le comportement d'un supraconducteur type II en présence d'un champ magnétique est décrit sur la Figure I.7. On distingue trois zones différentes :

- Zone 1 : L'état supraconducteur, l'état Meissner se caractérise par un diamagnétisme parfait.
- Zone 2 : L'état mixte se caractérise par une pénétration partielle du champ magnétique sous forme de vortex, et donc d'un diamagnétisme partiel.
- Zone 3 : Etat normal avec une forte résistance électrique, pour des valeurs de champ supérieures à H_{c2} .

Les supraconducteurs de ce type sont principalement des alliages ou des métaux ayant une forte résistivité à l'état normal et des champs critiques H_{c2} élevés. Ces deux propriétés les favorisent dans les utilisations pratiques, en particulier dans le domaine du génie électrique.



.Figure. I.7: Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II.

I.5 Modèles des matériaux supraconducteurs

I.5.1 Le modèle de l'état critique de Bean

Il existe plusieurs modèles pour calculer les distributions de courant et de champ et évaluer les pertes AC des supraconducteurs sous différentes conditions. Le plus connu est certainement celui de l'état critique de Bean [7], appelé modèle de Bean. C'est au début des années 60 que C.Bean introduit ce nouveau modèle basé sur l'existence d'une densité de courant macroscopique limite J_e indépendante du champ magnétique, que le supraconducteur peut transporter.

Dans le modèle de Bean, il existe seulement deux états possibles du supraconducteur :

- une densité de courant nulle pour les régions où le champ magnétique ne varie pas.
- une densité de courant $\pm J_c$ dans les régions qui s'opposent aux variations du champ magnétique.

Comme indiqué sur la Figure .I.8 ci-dessous :

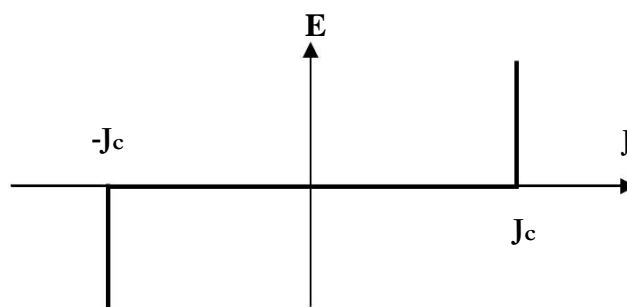


Figure I.8: Caractéristique $E(j)$ d'un supraconducteur, modèle de l'état critique.

I.5.2 Modèle de loi de puissance

C'est un modèle qui traduit bien le comportement des supraconducteurs à haute température critique HTC autour de J_c [19].

$$\vec{E}(\vec{J}) = \frac{E_c}{J_c} \left[\frac{J}{J_c} \right]^{n-1} \vec{J} \quad (I.3)$$

$$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0 \vec{H} \quad (I.4)$$

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 raide comme dans le cas du modèle de l'état critique pour un (n > 100)[1].

I.5.3 Modèle de KIM

Compte tenu que le modèle de Bean ainsi que la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur isotrope et isotherme, de même que l'échauffement éventuel du conducteur sous l'effet des pertes qui entraînerait une diminution du courant critique, n'est pas pris en compte. Dans le modèle de Bean, la densité de courant critique est supposée constante quel que soit le champ magnétique extérieur. Mais 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.

$$J_c(|B|) = \frac{J_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (I.5)$$

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique [1].

I.5.4 Modèle de Flux Flow et Flux-Creep

La caractéristique du champ électrique E en fonction de la densité de courant J , est présentée sur la Figure (I.9).

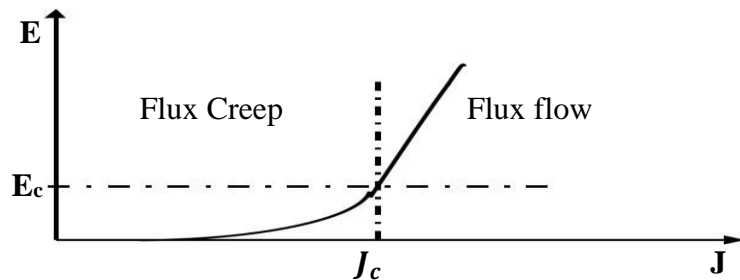


Figure. I.9: La caractéristique du champ électrique E en fonction de la densité de courant J.

Nous pouvons définir deux modèles de fonctionnement pour le supraconducteur, selon la valeur de la densité de courant critique \mathbf{J}_c :

- ❖ Pour les faibles valeurs de \mathbf{E} avec $\mathbf{J} \leq \mathbf{J}_c$ la courbe $\mathbf{E}(\mathbf{J})$ est de forme exponentielle, c'est la zone de « Thermally Activated Flux-Creep ''TAFC'' » correspondant aux déplacements des vortex, bloqués par les défauts du matériau (impuretés,...), dus à l'activation thermique. Dans cette région, le champ électrique est défini par [6] :

$$E = 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0}{k\theta} \cdot \frac{J}{J_c}\right) e^{-\frac{U_0}{k\theta}} \quad (I.6)$$

Avec:

ρ_c : Résistivité de régime flux-creep [$\Omega \cdot m$],

θ : Température [K]

U_0 : Potentiel de pénétration [ev],

K : Constante de Boltzmann [$J \cdot K^{-1}$]

J_c : Densité de courant critique [$A \cdot m^{-2}$]

- ❖ Pour des valeurs élevées de \mathbf{E} avec $\mathbf{J} > \mathbf{J}_c$, c'est la zone de « Thermally Activated Flux-Flow ''TAFF'' » correspondant aux déplacements libres des vortex. La densité de courant critique est donc celle qui va arracher les vortex des défauts provoquant un passage à l'état de «flux-flow». Dans cette région, le champ électrique est défini par :

$$E = \rho_c J_c + \rho_c J_c \left(\frac{|J|}{J_c} - 1\right) \quad (I.7)$$

Avec :

ρ_c : Résistivité de régime flux flow [$\Omega \cdot m$].

Pris en considération que la densité de courant critique est définie comme limite entre le régime de flux-creep et le régime de flux-flow. Cette limite étant très floue, la densité critique de courant est généralement déterminée par la valeur d'un champ électrique critique \mathbf{E}_c .

I.6 Principales applications des supraconducteurs

Hormis leur intérêt scientifique, la recherche pour les applications a été toujours fondamentale pour la science des matériaux supraconducteurs. La supraconductivité est utilisée dans de nombreux domaines, l'électronique, l'électrotechnique, Physique fondamentale, médical...etc.

I.6.1 Physique fondamentale

L'exploitation des systèmes nécessitant la création de champs magnétiques intenses en utilisant les supraconducteurs est très répandue. Comme les grands instruments pour la recherche, «le Large Hadron Collider (LHC) » de Genève ou le projet « Internationale Thermonucléaire Expérimental Réacteur (ITER) » de Cadarache, en utilisant les supraconducteurs comme aimants d'accélération, de guidage et de confinement du plasma.

I.6.1.a Composants HF (couches minces)

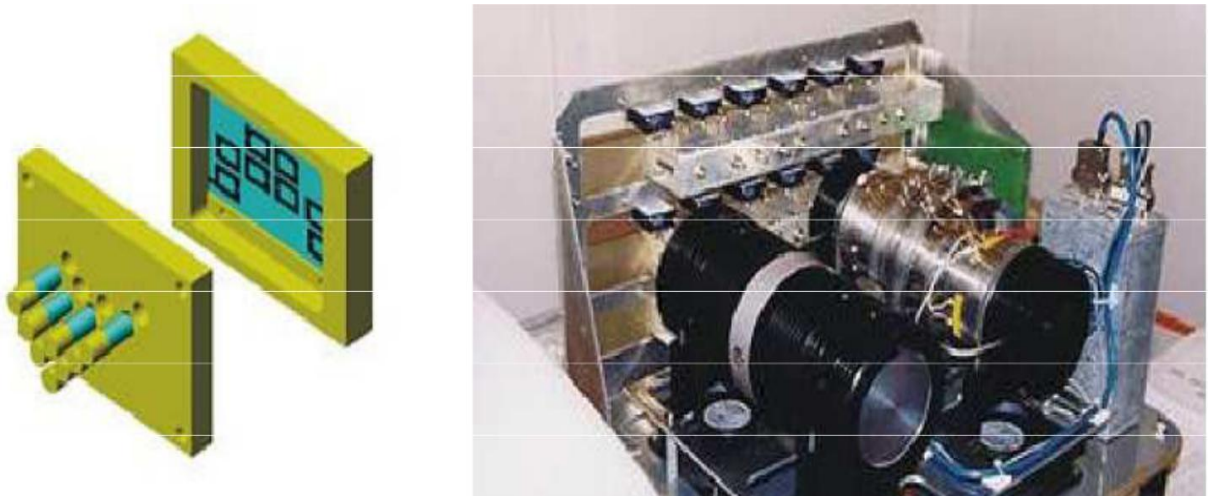


Figure I.10 : Boîtier contenant 8 filtres YBaCuO, et intégration dans un châssis intégrant le Cryo-générateur 30 K.

Récemment, la maîtrise des procédés de fabrication des couches minces supraconductrices à base des supraconducteurs haute température HTC, a permis la commercialisation rapide de nombreux composants dans le domaine des communications. L'utilisation de ces couches dans la gamme de température comprise entre 30 et 60 K (compatible avec des Cryo-générateurs compacts et performants), permet de gagner un facteur

supérieur à 103 sur la résistance de surface du cuivre. La conception de dispositifs divers a vu le jour comme : oscillateurs, lignes à retard, filtres, etc. offrant des performances largement supérieures aux composants classiques. Ci-dessous une réalisation de circuit de filtrage ultra sélectif pour les communications dans la bande de 2GHz [1].

I.6.2 Applications en électrotechnique

I.6.2.a Machines tournantes

Les supraconducteurs dans les cryoalternateurs sont à l'origine de nombreux prototypes [1]. L'utilisation des enroulements supraconducteurs en remplacement des bobinages en cuivre 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 Tr/m, 70 Tonnes. L'intérêt principal est la réduction en volume et en poids, leur stabilité leur efficacité (coût réduit de fonctionnement) pour une valeur d'investissement comparable.



Figure. I.11: Machines électrique Sumitomo

I.6.2.b Câbles de transport d'énergie

La capacité de transport d'énergie électrique dans les câbles supraconducteurs est trois à cinq fois plus que dans les câbles classiques en cuivre de même diamètre. Pour le transport à longue distance, l'utilisation des câbles supraconducteurs peut être avantageuse. Cependant le problème de la cryogénie à longue distance peut s'avérer difficile à résoudre. Pour solutionner à

ce problème, il s'avère à faire circuler un fluide cryogénique dans un tube au centre du câble et à enrouler le fil supraconducteur autour [6].



Figure. I.12 : Exemples de câble supraconducteur.

I.6.2.c Stockage de l'énergie électrique

L'absence de résistivité des supraconducteurs permet de stocker de l'énergie électrique sous forme magnétique dans une bobine, mais avec l'inconvénient que l'énergie électrique est difficilement stockable. Avec le procédé Supraconduction Magnétique Energie Stockage (SMES) [1] le stockage de l'énergie électrique sous forme magnétique est possible. Cette dernière pouvant être restituée avec un très bon rendement. Son fonctionnement consiste à court-circuiter une bobine supraconductrice, permettant ainsi au courant de ce reboucler indéfiniment. Par conséquent le SMES peut servir comme réservoir d'énergie pour réguler les réseaux électriques, ainsi qu'il peut également être utilisé comme une source d'énergie impulsionnelle pour les lanceurs électromagnétiques ou le formage magnétique.



Figure. I.13 : Stockage de l'énergie électrique.

I.6.2.d Limitation de courant

Le limiteur de courant à base de supraconducteur permet de protéger le réseau électrique des courants de court-circuit en agissant comme un régulateur naturel de courant. C'est le sujet de notre étude, son fonctionnement est détaillé dans le prochain chapitre.



Figure. I.14 :.Limiteur de courant (SFCL).

I.7 Conclusion

Nous avons présenté une étude sur les matériaux supraconducteurs : type I et type II. Ces derniers sont limités par des grandeurs magnétiques et thermiques appelés grandeurs critiques désignées par: température critique **T_c**, champ magnétique critique **H_c** et enfin densité de courant critique **J_c**. Nous avons aussi présenté les propriétés remarquables qui rendent leur utilisation envisageable dans divers domaine d'application industrielle.

Chapitre II :

LIMITEURS DE COURANT

- ❖ INTRODUCTION
- ❖ LIMITEURS DE COURANT TRADITIONNEL
- ❖ FONCTIONNEMENT D'UN LIMITEUR DE COURANT
- ❖ LIMITEUR DE COURANT A BASE DE SUPRACONDUCTEUR
- ❖ CONCLUSION

II.1 Introduction

Lors d'une installation d'un réseau électrique, il est impératif de prendre en considération que celui-ci doit être conçu pour supporter non seulement son régime nominal (courant nominal I_n et tension nominale U_n), mais aussi, en cas de défaut, un régime de court-circuit (courant de court-circuit I_{cc} et tension nominale U_n) ; étant donné que I_{cc} peut atteindre vingt à quarante fois le courant nominal de la ligne. De même tout le réseau (disjoncteurs, câbles, transformateurs, jeux de barres..) doit être surdimensionné en dimension et mécaniquement afin de supporter de tels courants et de tels efforts électromécaniques (la puissance de court-circuit étant supérieure de vingt à quarante fois la puissance nominale). Il est donc nécessaire d'introduire sur le réseau des appareils capables de réduire I_{cc} sans pour autant modifier le courant nominal ; ce sont des limiteurs de courant. Selon la spécificité de la ligne sur laquelle ils sont installés et les performances recherchées, on dégage plusieurs types de limiteurs existents. [1]

Nous présentons dans ce chapitre les différents types des limiteurs de courants de défaut traditionnels et aussi les différents types des limiteurs de courant à base des matériaux supraconducteurs SFCL.

II.2 Les limiteurs de courant traditionnel

Après une rapide présentation des réseaux et de leurs défauts, les solutions utilisées actuellement sont énumérées ci-après :

II. 2.1 Défauts

On dénombre plusieurs types de défauts dans le réseau de distribution (ligne aérienne ou câble souterrain) :

- Selon le lieu du défaut (sur la boucle de distribution, sur le tableau de distribution)
- Selon les phases touchées (défaut monophasé entre une phase et la terre, défaut biphasé ou triphasé entre deux ou trois phases, défaut évolutif passant par exemple de monophasé à triphasé),
- Selon la durée du défaut (fugitif lorsqu'il est inférieur à 0,3 secondes, semi-permanent pour des défauts inférieurs à 15 secondes ou permanents).

Comme beaucoup d'autres facteurs pouvant intervenir sur le type de défaut, le mode d'exploitation, le régime de neutre ou les performances des protections.

Les courants de court-circuit sont nuisibles pour le réseau, pour les raisons thermiques (fusion des conducteurs, dégradation des isolants), [1] les raisons mécaniques à cause des déformations provoquées par les forces électromagnétiques, les raisons de coût car ils contribuent aux vieillissements prématurés des matériaux. Il est donc nécessaire d'éliminer le défaut en permettant l'auto-extinction (en général en ouvrant le circuit) ; si le défaut persiste procéder à une réparation. De plus, il est nécessaire de limiter la valeur crête du courant de défaut (en particulier la première demi onde qui peut être très importante si le court-circuit est en pleine asymétrie) avant son élimination.

II.2.2 Elimination des défauts

II.2.2.a Fusible

Les fusibles permettent d'interrompre automatiquement un circuit parcouru par une surintensité pendant un intervalle de temps donné. L'interruption du courant est obtenue par la fusion d'un conducteur métallique calibré. Ils sont surtout efficaces pour la protection contre les courts circuits, vis-à-vis desquels ils agissent, le plus souvent, en limiteurs de la valeur crête du courant de défaut. Le fusible est ainsi un excellent dispositif pour l'élimination des défauts, cependant il présente un certain nombre d'inconvénients qui limitent son utilisation :

- Il doit être remplacés après chaque fonctionnement.
- En régime triphasé, il n'élimine que les phases parcourues par un courant de défaut, ce qui peut présenter un danger pour le matériel et le personnel.
- Son calibre doit être bien adapté pour éviter un fonctionnement intempestif en cas de surcharge momentanée.

Les fusibles peuvent être associés à des interrupteurs ou à des contacteurs avec lesquels ils constituent des combinés capables d'assurer automatiquement la coupure des phases saines lors du fonctionnement de l'un d'eux de façon à éviter la marche monophasée dangereuse [8].

II.2.2.b Disjoncteur

Un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants dans les conditions normales et anormales du réseau. Il est très généralement associé à un système de protection (relais), qui détecte le défaut et envoi des ordres au disjoncteur pour éliminer

automatiquement le défaut ou pour remettre en service un circuit lorsque le défaut a été éliminé. Lorsqu'un flux de courant est détecté le disjoncteur rentre en fonction. Ce qui est la base de tous les disjoncteurs en détectant le passage du courant par la valeur zéro et d'interrompre le flux de courant à ce moment. On constate que le disjoncteur n'interrompt pas le courant durant la première tentative ; plusieurs cycles de la fréquence fondamentale du courant sont nécessaires pour une interruption complète du flux de courant, ce qui affecte la vitesse du disjoncteur. Les disjoncteurs rapides utilisés dans la HT sont d'un cycle, par contre ceux utilisés dans la BT prennent 20 à 50 cycles pour ouvrir. De plus pour distinguer entre un défaut permanent et un défaut temporaire le concept d'auto-enclenchement est utilisé. Quand le disjoncteur déclenche le relais essaye de détecter le défaut, si le défaut persiste le disjoncteur déclenche à nouveau ; si le défaut disparaît le relais ne fonctionne pas et la ligne va rester en service.

II.2.3 Le courant de défaut

Le courant nominal I_n (ou courant assigné) est le courant maximal autorisé en régime permanent dans la ligne électrique alors que le courant de ligne I_l est le courant circulant réellement dans celle-ci. En revanche, le courant d'utilisation de la ligne est la valeur moyenne du courant de ligne. [8] La puissance nominale S_n (ou puissance assignée) d'un réseau de niveau de tension entre phase U_n (et de niveau de tension phase- neutre V_n) est égale à

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \quad (\text{II.1})$$

Lors d'un court-circuit, le courant en régime de défaut établi est appelé courant de court-circuit I_{cc} . La puissance de court-circuit P_{cc} de la ligne pour un réseau de niveau de tension U_n est alors égale à

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{cc} \quad (\text{II.2})$$

II.3 fonctionnement d'un limiteur de courant

II.3.1 principe général

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 (< 1 ms) pour limiter le premier pic de courant à une valeur seuil, nettement inférieure à la valeur théorique de court-

circuit. Lors d'un défaut le limiteur est pratiquement soumis à tension maximale du réseau, la puissance dissipée est donc très importante [5].

II.3.2 limiteurs de courant classique

Il existe peu de solutions classiques permettant la limitation naturelle des courants de défaut. Le fusible présente la solution la plus adaptée dans la basse et moyenne tension. Cependant il présente les inconvénients majeurs indiqués précédemment.

D'autres solutions utilisent des systèmes permettant l'augmentation de leur impédance lors d'une montée de courant :

II.3.2.a Arc électrique

Cette solution s'adapte aux disjoncteurs lorsqu'ils s'ouvrent sur courant de défaut pour isoler une ligne. La résistance électrique d'un arc est fortement non linéaire avec le courant: les faibles courants mènent à une forte résistance qui diminue d'autant plus le courant. Il est possible d'augmenter la puissance perdue par l'arc en favorisant les processus de convection et de rayonnement qui augmentent encore la résistance de l'arc (en imposant un certain cheminement)[8].

II.3.2.b Réactance 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 reconnections des disjoncteurs. Cette solution n'est pas utilisée pour tous les réseaux parce que, les chutes de tensions en régime nominal et l'encombrement n'étant pas négligeable. [5]

II.3.2.c Limiteur commandé

Pour parer aux inconvénients ci-dessus, il a été opté pour 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.[5] Cependant lorsque les thyristors sont bloqués, le transformateur est en circuit ouvert et son impédance augmente fortement.

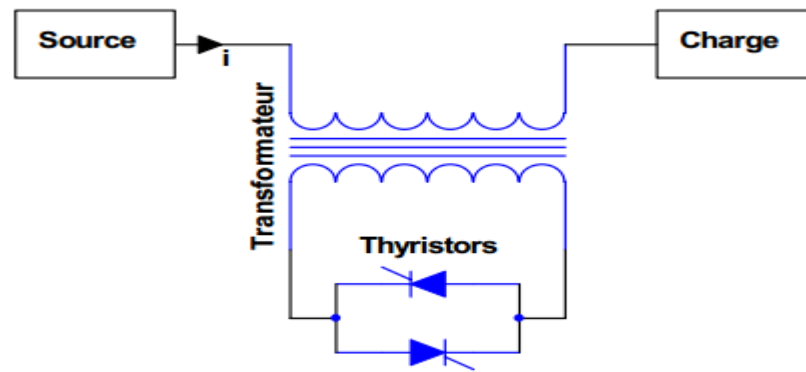


Figure II.1 : Limitation de courant par transformateur court-circuit.

Il est également possible d'utiliser des dispositifs à résonance [5] 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.

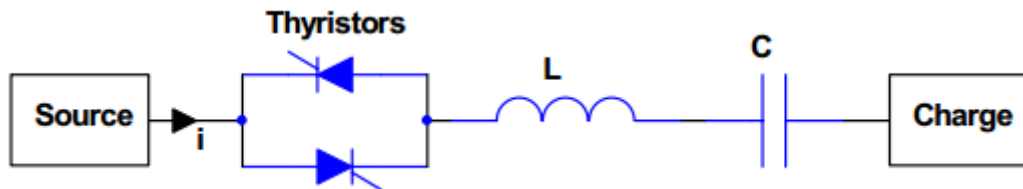


Figure II.2: Limitation de courant par thyristors contrôlant un circuit raisonnant.

Il existe également d'autres dispositifs commandés comme les disjoncteurs statiques, permettant 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 à la haute tension et les composants de puissance présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant.

II.3.2.d Condensateur

On obtient une tension qui limite bien le courant, en commutant le courant à limiter dans un condensateur. Malheureusement on distingue que la valeur de capacité nécessaire est importante et le courant limité reste significatif. Ce procédé reste pourtant exploitable en basse tension. Un autre problème est que la commutation doit se faire en quelques micros secondes. Pour cela il est possible d'utiliser des disjoncteurs statiques [1], mais dans tous les cas la synchronisation des dispositifs semi-conducteurs de commutation est délicate.

Ces systèmes de commutation rapide sont non applicables à la haute tension et présentent des chutes de tension non négligeables à l'état passant (quand le courant est inférieur ou égal au courant nominal).

II.3.2.e Inductance

On distingue également le procédé d'une inductance insérée en série dans le réseau qui limite le courant de court-circuit mais dégrade la stabilité transitoire si l'inductance est à proximité des générateurs, et introduit des surtensions transitoires durant les séquences de reconnections des appareils de coupure. Cependant la chute de tension, les pertes en régime nominal et l'encombrement sont loin d'être négligeables sauf pour de très faibles courants nominaux. De fait, cette solution introduit une composante inductive qui peut être gênante pour certains types de réseau. [8] Les transformateurs sont en général conçus volontairement avec des tensions de court-circuit importantes afin de limiter les courants de défaut.

II.3.2.f Résistance

Il s'agit de réduire, à l'aide d'une simple résistance, le courant de court-circuit lorsque le rapport I_{cc}/I_n est très élevé. L'utilisation d'un tel système doit être en compte sur la chute de tension engendrée et sur la dissipation locale qui s'ensuit. Une autre solution est d'ajouter, comme dans le cas de l'utilisation de capacités, des disjoncteurs statiques afin de commuter le courant dans une branche plus résistive. Les inconvénients décrits ci-dessus, propres à ce système, persistent [8].

II.3.2.g Résistance variable

Le processus de l'utilisation de la méthode résistance variable en série avec le réseau, s'avère plus efficace. Elle consiste à la variation provenant d'un changement de phase ou d'état du matériau. Le phénomène physique responsable du changement peut être (thermique, mécanique, magnétique...), mais il est toujours lié au courant. Cependant deux problèmes subsistent :

- Les variations par changement de phase nécessitant une énergie qui tend à diminuer la vitesse de transition.
- Les variations par changement d'état soulèvent le problème de l'inhomogénéité qui tend à concentrer la puissance localement et ainsi affaiblir le matériau. 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 :

- 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.
- 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 [5].

II.4 Limiteur de courant à base de supraconducteur SFCL

Etant donné qu'un réseau électrique doit être dimensionné pour supporter son régime assigné mais aussi en cas de défaut, un régime de court-circuit, et à savoir que, le courant de court-circuit peut atteindre 30 fois la valeur du courant nominal, il est impératif que tout le réseau (générateurs, transformateurs, jeux de barres...) doit être surdimensionné électriquement et mécaniquement ; ce qui impose un prix très coûteux. L'introduction d'appareils capables de réduire le courant de court-circuit est très conseillée, ce qui est le principe d'un limiteur de courant à base du supraconducteur (Superconducting Fault Current Limiter SFCL) [1], cela consiste à introduire une impédance supplémentaire lorsqu'un défaut apparaît. 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 (Figure II.3).

Par la simplicité de ce principe et sa performance qui n'est pas égale par les techniques conventionnelles de limitation du courant, il est très indiqué pour permettre l'amélioration de la qualité de service des réseaux actuels. De plus son fonctionnement est répétitif et autonome. Ce qui n'est pas comme l'utilisation de fusible qui nécessite son remplacement et l'intervention d'un opérateur humain. Ainsi, le courant de court-circuit deviendrait une notion théorique qui ne serait jamais atteinte.[8] Si les courants limités n'excèdent pas, par exemple, huit fois le courant nominal, la puissance dissipée lors d'un court-circuit devient alors plus de six fois inférieure à la valeur actuelle.

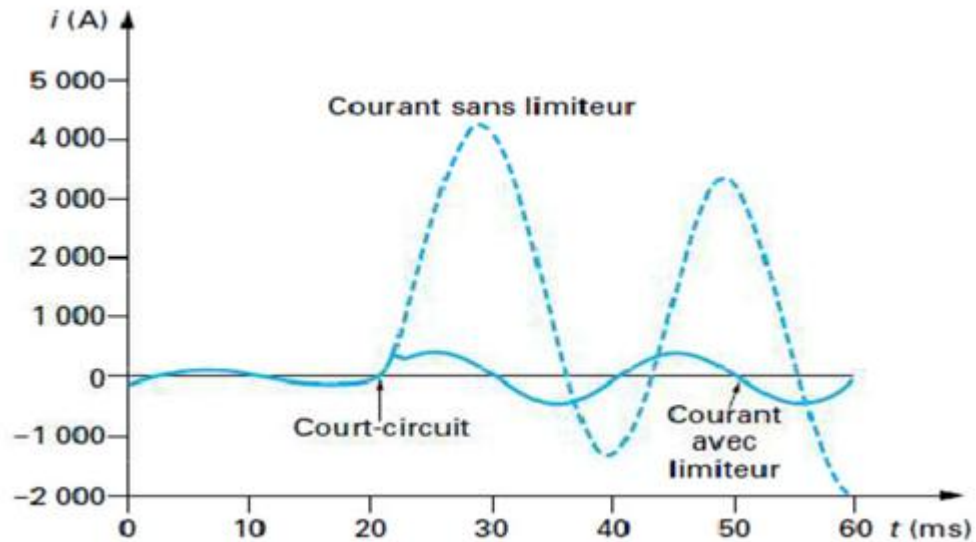


Figure II.3 : courant de court-circuit avec et sans limiteur.

Sur la base de ce principe, Il est possible de donner de nouveaux dimensionnements dans les réseaux futurs, surtout dans les pays en voie de développement où le réseau est entièrement à construire. Les lignes de HT pourraient être remplacées par des lignes supraconductrices en MT avec des courants importants grâce à l'insertion systématique de limiteurs de courant, ainsi que tous les disjoncteurs pourraient être remplacés par de simples interrupteurs.

II.4.1 Différents types de limiteur de courant supraconducteur

II.4.1.a Limiteur résistif

Le principe du limiteur de courant résistif est simple, s'agissant d'insérer dans la ligne à protéger un élément supraconducteur en série, qui transite naturellement par dépassement de son courant critique lors d'un court-circuit. Le courant est ainsi limité par la transition brutale de l'état supraconducteur à l'état normal.

Un disjoncteur en série, rapide, mais de faible pouvoir de coupure, permet d'isoler le défaut et protéger le limiteur contre une excursion en température excessive (figure II.4).

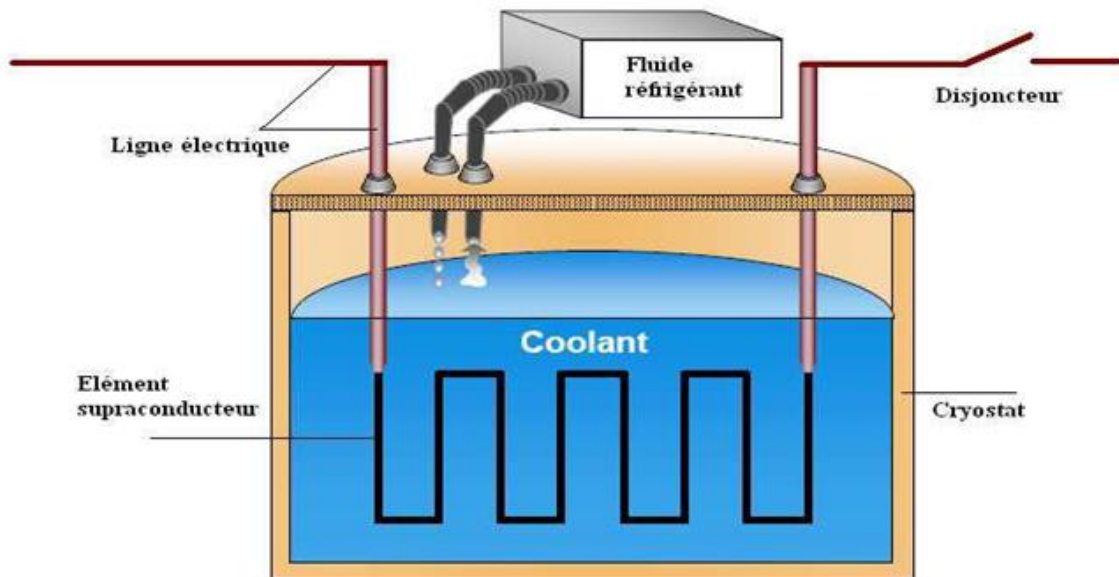


Figure II.4 : principe du limiteur de courant résistif.

Une impédance en parallèle permet d'adapter l'impédance de limitation et de réduire les éventuelles surtensions [1]. La structure non inductive a par ailleurs les avantages suivants :

- Les courants de fuite et les pertes par courant de Foucault au niveau des structures (supports et cryostat) qui peuvent être métalliques sont réduits.
- Les pertes du supraconducteur qui n'est soumis qu'à son champ propre sont réduites.
- L'énergie magnétique stockée dans l'enroulement supraconducteur au moment de la transition est négligeable.
- Le courant de court-circuit étant essentiellement ohmique, l'utilisation du disjoncteur auxiliaire de coupure est plus simple.

Par contre, le limiteur est en série avec la ligne, il nécessite des conducteurs supraconducteurs capables de porter de forts courants ($I_n / I_{lim} \approx 0,2$ à $0,3$) qui restent difficiles à réaliser sans passer par la mise en parallèle de plusieurs bobinages.

II.4.1.b Limiteur inductif

La structure inductive met en jeu un transformateur dont les enroulements secondaires sont supraconducteurs. Le limiteur est placé en série dans le circuit à protéger. La Figure (II.5) présente schématiquement le principe. En régime nominal, le secondaire étant dans son état supraconducteur, le transformateur est court-circuité, et seule l'impédance de fuite est vue par le système. En cas de court-circuit sur le réseau, le secondaire transite et le limiteur se comporte comme une forte réactance. L'avantage du limiteur inductif est de dimensionner les parties supraconductrices à des intensités ou des tensions bien inférieures aux valeurs du réseau ; les

enroulements primaires étantréalisés en cuivre. Le rapport de transformation laisse toute latitude d'adaptation. Cependant cette structure ne permet pas de limiter l'inductance de fuite à des niveaux acceptables pour le système ; le deuxième inconvénient réside dans l'encombrement et le poids de telles structures.

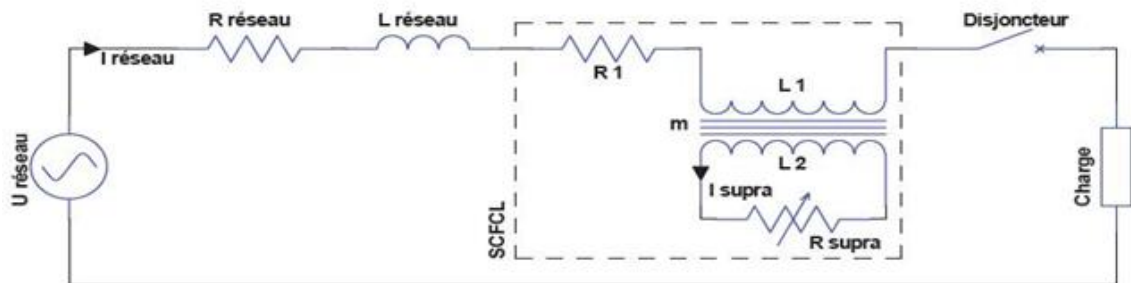


Figure II.5 : Principe du limiteur de courant inductif.

Le limiteur inductif est conseillé pour limiter efficacement les courants de court-circuit, mais son principe est plus compliqué que celui du limiteur résistif. [8] Mais du fait qu'il nécessite en général un bon couplage entre le circuit primaire et le circuit secondaire qui ne sont pas forcément à la même température, sa réalisation peut être délicate. Le limiteur résistif quant à lui ne présente pas ces inconvénients.

II.4.1.c Limiteur de type pont redresseur

Ce type de SFCL a été inventé par Boeing en 1983. Il 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.6).

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.

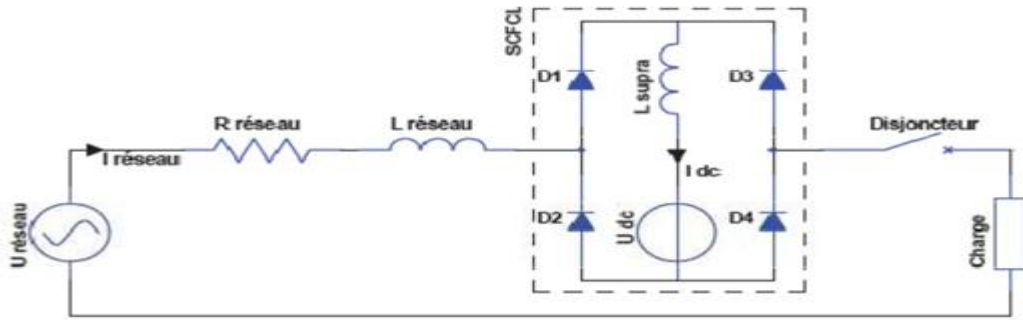


Figure II.6 :Principe du limiteur de courant de type pont redresseur.

Cependant si on remplace les diodes par des thyristors il devient possible de stopper le court-circuit au passage par zéro du courant. De plus, on distingue que le courant de déclenchement est réglable par I_a et peut facilement être adapté aux besoins du réseau. Mais malgré tous ces avantages 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.[1]

II.4.1.dSFCL de type contrôleur de courant de défaut

Ce type de SFCL a été développé par Kuperman et Juengst en 2000 [1]. 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.7).

- En régime assigné l'amplitude du courant $I_{réseau}$ étant inférieur 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 leur sont associées. Par conséquent les inductances supraconductrices L1 et L2 sont alternativement insérées sur le réseau à chaque passage par zéro du courant, cette augmentation d'impédance permet ainsi de limiter le courant.

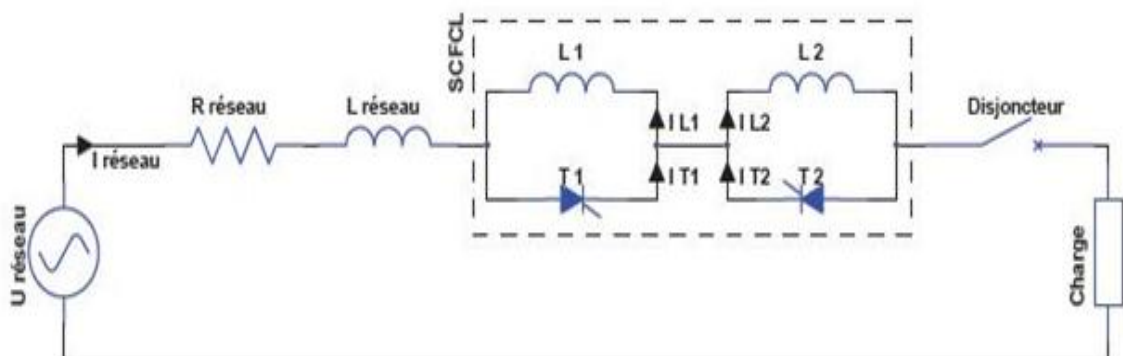


Figure II.7 :Principe du limiteur de courant de type contrôleur de courant de défaut.

Cette architecture possède la même caractéristique que le SFCL avec pont redresseur mais exige une source de tension et le circuit de commande des thyristors.

II.4.1.e SFCL de type noyaux magnétiques saturés

Pour limiter le courant de court-circuit, une impédance non-linéaire peut être obtenue en reliant les enroulements L1 et L2 de deux noyaux magnétiques saturés par des bobines supraconductrices L_{supra1} et L_{supra2} parcourues par des courants continus (Figure II.8).

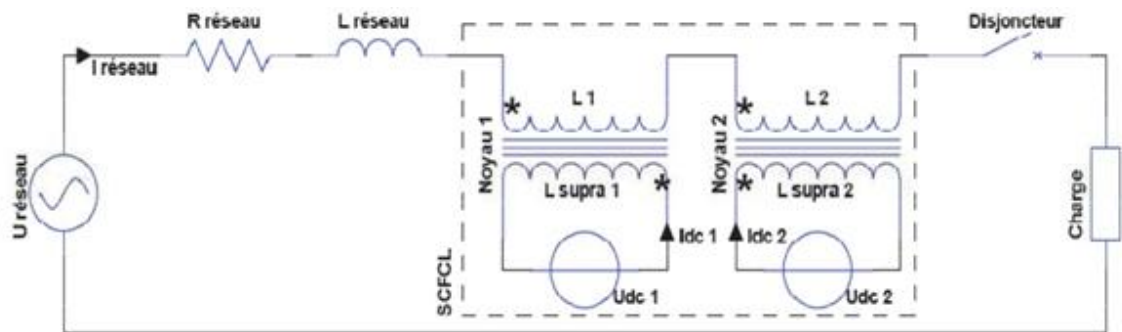


Figure II.8. Principe du limiteur de courant du type noyaux magnétiques saturés

Les deux noyaux étant saturés, l'inductance apparente du SFCL est faible et correspond à la somme des résistances et des réactances de L1 et L2. En régime assigné, $I_{réseau}$ est assez faible pour maintenir les noyaux entièrement saturés, assurant ainsi la faible impédance du SFCL. L'augmentation de $I_{réseau}$ conduit alternativement les deux noyaux hors de leur saturation, dans leur zone de perméabilité élevée, dans le cas d'un défaut. Ceci entraîne une importante augmentation de l'impédance apparente du SFCL, développant ainsi un champ électrique permettant de limiter le courant.[8] 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.4.2 Comparaison des différents SFCL

La commercialisation des SFCL n'est pas encore de jour. Comme il est encore difficile de prévoir quel type sera le plus prometteur pour l'avenir. Cependant il est possible de les distinguer en fonction de 4 principales caractéristiques :

- Le faible temps de récupération après une phase de limitation.
- La sûreté de fonctionnement du SFCL en régime défaillant.
- Les faibles pertes AC et chutes de tension en régime assigné.
- Le gain en volume et en poids.

Type de SFCL	Localisation Des pertes	Suret�apr�s défaillance	Volume De supra	Taille	Temps De récup
Résistif	Supraconducteur (AC)	Oui	Moyen	Petit	Secondes Minutes
Noyau Magnétique Ecran�	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

Le Tableau II.1 :compare les caractéristiques des différents types de SCFCL [1].

II.4.3 Insertion du limiteur de courant dans le réseau électrique

On peut envisager plusieurs endroits d'insertion d'un limiteur dans un réseau de distribution. Des caractéristiques différentes sont observées (courant nominal, courant à limiter, temps de récupération) [1] selon l'emplacement choisi. Ainsi, en fonction de son emplacement, le type de matériau supraconducteur utilisé sera diff rent.

Une des plus intéressantes configurations consiste à installer un limiteur entre deux jeux de barres (Figure II.9) afin d'augmenter le maillage du réseau (accroître la continuité de service). Actuellement, certains réseaux moyens tension ne peuvent pas être interconnectés entre eux car les courants de court-circuit engendrés seraient trop importants.[1]

L'exploitation des infrastructures existantes est à son maximum compte tenu de la sensibilité accrue de l'opinion publique et le coût engendré vis à vis de l'installation de nouvelles lignes de transport. Ainsi en haute tension, le bouclage de deux réseaux évite d'amener une autre source pour sécuriser les départs.

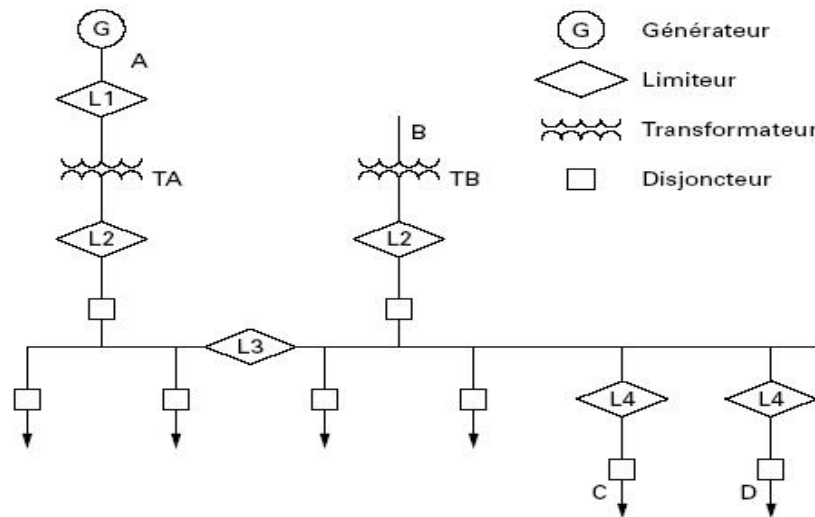


Figure II.9 : Insertion de limiteurs de courant de défaut dans un réseau.

- Le limiteur L1 protège le générateur et améliore stabilité.
- Les limiteurs L2 permettent de maintenir la liaison L3 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 un même court-circuit (l'interconnexion n'aggrave pas les courants de défaut).
- Les limiteurs L4 permettent de protéger sélectivement les départs C et D.

Toujours compte tenues des contraintes situées ci-dessus une autre possibilité intéressante dans les réseaux actuels consiste à placer le limiteur en aval du transformateur *HT/MT* avant le jeu de barre, au niveau de l'arrivée *MT*. Ainsi, sur un réseau existant, il est possible de rajouter des départs sur le jeu de barre et de conserver les mêmes protections (disjoncteurs). Sans limiteurs, les courants de court-circuit auraient été trop importants. Pour le dimensionnement d'un réseau futur, un limiteur placé en aval d'un transformateur permettrait de réduire la tension de court-circuit U_{cc} du transformateur et donc de diminuer la chute de tension à ces bornes. Actuellement les transformateurs sont dimensionnés avec des U_{cc} importants afin justement de réduire les courants de court-circuit.[1]

De nombreux emplacements sont encore possibles, comme au niveau d'un départ, après le jeu de barre afin de sécuriser une installation sensible, ou encore entre un réseau existant et un générateur isolé que l'on veut relier à celui-ci.

Lors de la conception des réseaux futurs, un limiteur de courant peut être prévu après l'arrivée MT sur les transformateurs afin de limiter les courants de court-circuit et ainsi éviter de surdimensionner le réseau.

II.5 conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de limiteurs et leurs configurations dans un réseau électrique, et aussi les limiteurs de courant à base de supraconducteur sont peu fiables après défaillance et encombrants.

En conséquence de tous ce qu'on a vu précédemment sur le limiteur de courant à base de supraconducteur, celui-ci s'impose comme élément clé pour la protection des équipements électriques, l'extension des puissances transitées sur 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 :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

❖ INTRODUCTION

❖ ETUDE DE RESEAUX DE DISTRIBUTION

❖ CONCLUSION

III.1 Introduction

Nous allons voir dans ce chapitre les résultats de simulation implémentée sous le logiciel du « MATLAB ».

On distingue dans ce chapitre trois parties principales :

- La première est consacrée principalement à modéliser un circuit électrique triphasé (source, charge, ligne), pour un courant sinusoïdale imposé d'amplitude constante.
- La deuxième nous allons implémenter dans le réseau un court-circuit.
- La troisième nous connectons dans ce circuit un limiteur de courant à base de supraconducteur SFCL, et après une période de temps nous effectuons un court-circuit.

Enfin on a discuté les résultats de simulation du SFCL.

III.2 Etude réseaux de distribution

Le réseau électrique de distribution en étude comprend trois parties distinctes (la production, le transport et la charge) comme il est montré sur la figure(III.1). Notre outil de production est une source de tension d'une impédance interne, la ligne de transport est simulé comme une impédance RL, et la charge est représentée comme une puissance apparente ($P_{ch}+Q_{ch}$), les valeurs numériques de chaque éléments sont données dans le tableau (III.1)

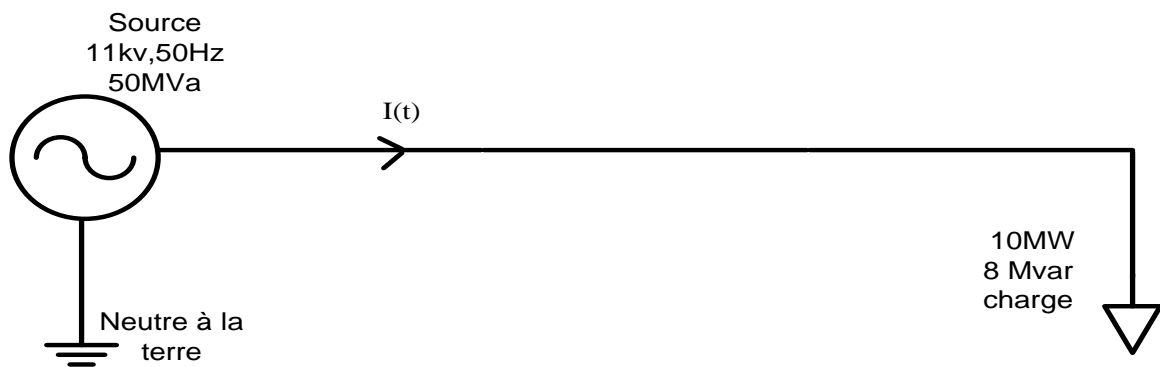


Figure.III.1 :le réseau d'étude dans le cas normal.

source		Charge	
Tension	11 KV	P_{ch}	10 MW
puissance	50MVA	Q_{ch}	8 Mvar
Ls	$20.73 \cdot 10^{-6}$ H		
Rs	$183 \cdot 10^{-6} \Omega$		

Tableau.III.1 : les caractéristiques des éléments du réseau étudié.

III.2.1 Les allures de courant et de tension pendant le fonctionnement normal

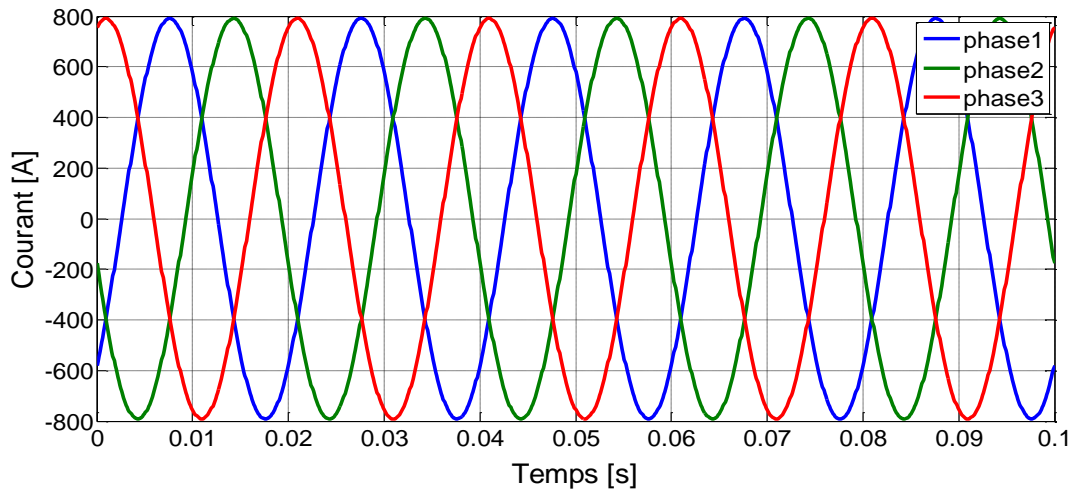


Figure III.2 : variation de courant en fonction de temps dans le cas normal.

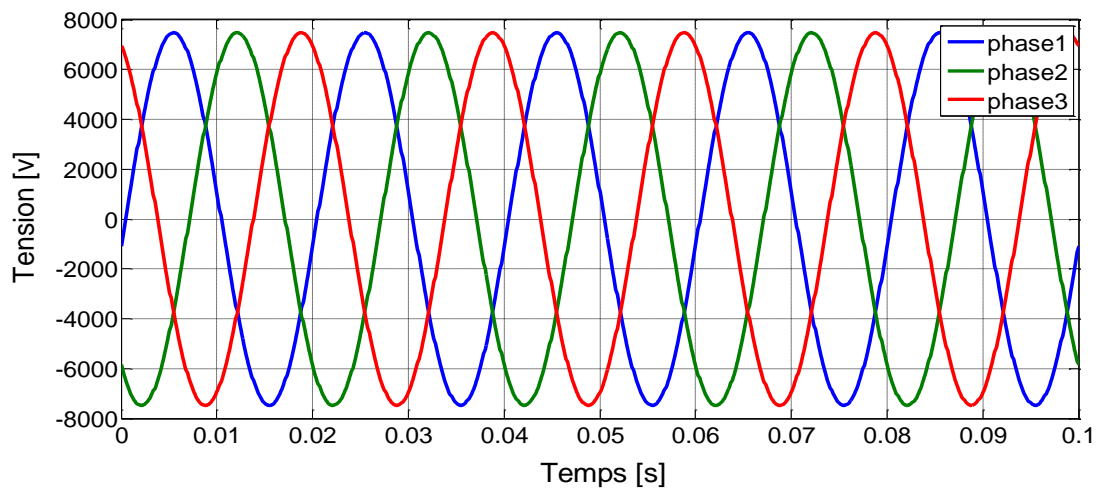


Figure III.3 : variation de tension en fonction de temps dans le cas normal.

Dans ces essais, nous avons simulés un réseau électrique simple sans faire un court-circuit, pour tracer les allures des tensions et des courants pour les trois phases, d'après les figures (III.2 III.3), l'onde du signal de tension et de courant sont des purement sinusoïdaux, et le courant prend une valeur maximal de 800A, et la tension de 7500V aux bornes la charge.

On remarque qu'il y'a une chute de tension, cette dernière est causée par l'existence une impédance interne de la source de tension.

III.2.2 Les allures de courant et de tension pendant un défaut

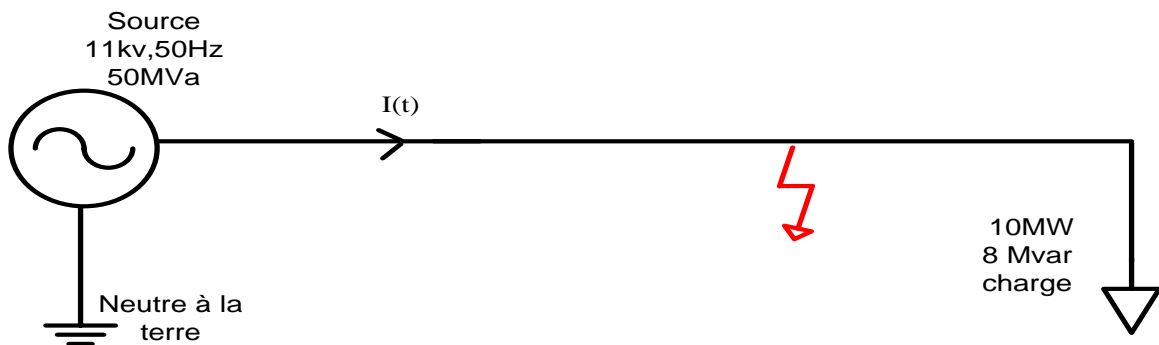


Figure III.4: le réseau d'étude dans le cas de défaut.

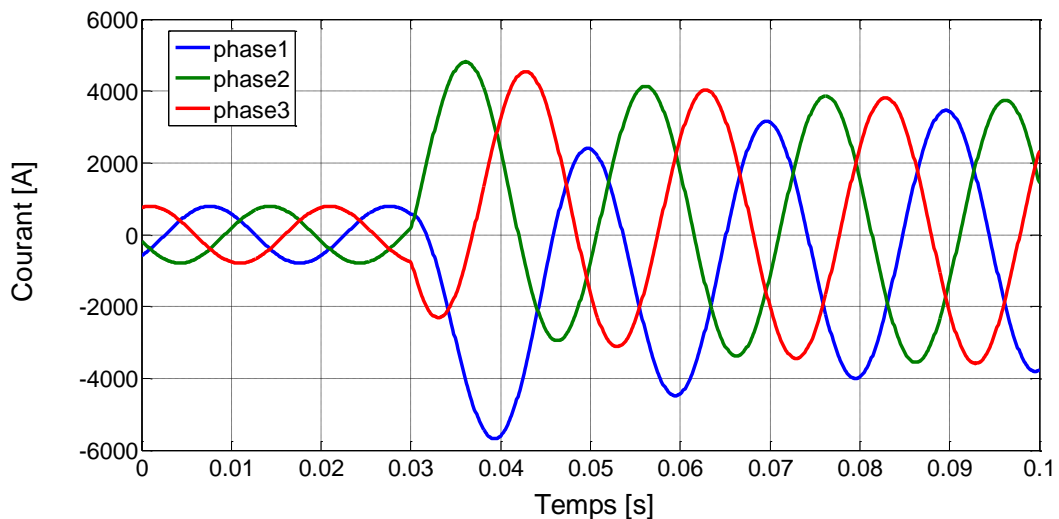


Figure III.5 : variation de courant en fonction de temps dans le cas de défaut.

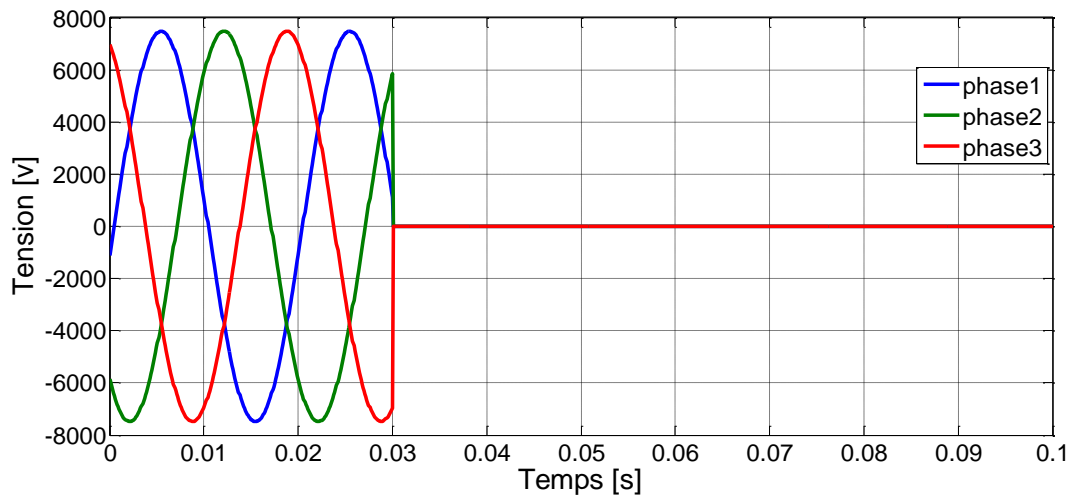


Figure III.6 : variation de tension en fonction de temps dans le cas de défaut.

En se basant sur le schéma électrique précédent (figure III.4), nous créons un court-circuit triphasé à l'instant de 0.03s. Les figures(III.5 III.6) représentent les allures des tensions et des courants pour les différentes phases ; on remarque que le courant augmente 5 fois plus par-rapport à la valeur dans le cas sans défaut (>4000A), et puisque le défaut est un court-circuit triphasé les valeurs de les tenions sont égales à zéro.

III.2.3 Les allures de courant et de tension avec le SFCL et un défaut de court-circuit

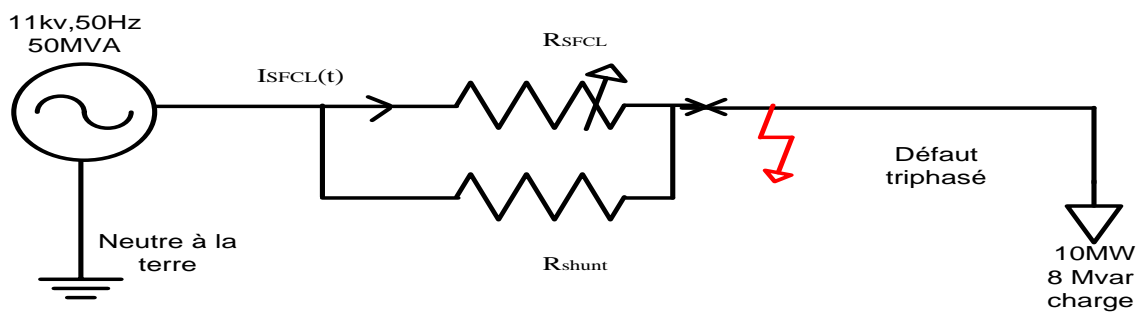


Figure III.7:le réseau d'étude dans le cas de défaut avec SFCL.

La Figure (III.7) présente un circuit d'un SFCL raccordé à un réseau électrique. Le circuit de simulation est alimenté par une source de tension alternative triphasée de 11 kV, les paramètres de simulations du SFCL proposé sont indiqués sur les tableaux ci-dessous.

A l'aide de l'outil de SIMULIN/MATLAB, nous avons simulé le circuit et tracé les grandeurs électriques et thermiques pour les trois phases.

Description des paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Longueur du fil supraconducteur	L_{SC}	50	M
Diamètre du fil supraconducteur	d_{sc}	4.0×10^{-6}	M
Section du fil supraconducteur	a_{sc}	$\pi\left(\frac{d_{sc}}{2}\right)^2$	m^2
Température de supraconducteur	$T(t)$	—	K
Courant de supraconducteur	$i_{sc}(t)$	—	A
Température ambiante du supraconducteur et réservoir de refroidissement	T_a	77	K
Température critique du supraconducteur	T_C	95	K
Expositif de la région de fluage-fluage (à 77K)	n_{77k}	6	—
Expositif de la région de Flux-flow	β	3	—
La densité 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_C	1.5×10^7	A/m^2
Champ électrique à la transition de l'état de flux-flow 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/K
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}	$\frac{1}{kl_{sc}\pi d_{sc}}$	K/W
La chaleur a dissipé dans le supraconducteur	$Q_{SC}(t)$	$Q = \int i_{sc}(t)^2 R_{sc}(t) dt$	J
Chaleur enlevée par le système de refroidissement	$Q_{\text{évacuées}}(t)$	$\int \frac{T(t) - T_a}{\theta_{sc}} dt$	J
Résistance instantanée des supraconducteurs	$R_{SC}(t)$	$\frac{E(t, T) l_{sc}}{J(t) a_{sc}}$	Ω

Tableau .III.2 : Résumé des paramètres modèles SFCL.

III.2.3.a SFCL Exigences du modèle

Pour cette étude, nous avons utilisé le modèle de **Steven M. Blair**, qui modélise les caractéristiques thermique et électrique d'une SFCL BSCCO, (Composé de Bismuth-Strontium-calcium-cuivre-oxygène).

Cela consiste à un système d'alimentation à trois phases. Chaque phase de le SFCL doit être modélisée indépendamment. Chaque phase aura un fil supraconducteur isolé. Cela signifie que chaque phase de la SFCL développera une résistance différente, ce qui crée un déséquilibre momentané.

III.2.3.b Implémentation du modèle de SFCL

Le modèle est basé sur les trois états possibles d'un supraconducteur : flux-creep, flux-flow et l'état (résistif) normal. La Fig.III.8 illustre la relation typique entre le champ électrique **E** et densité de courant **J**, pour ces trois états d'après le modèle de puissance, le tableau (III.2) définit les valeurs électriques et thermiques utilisés.

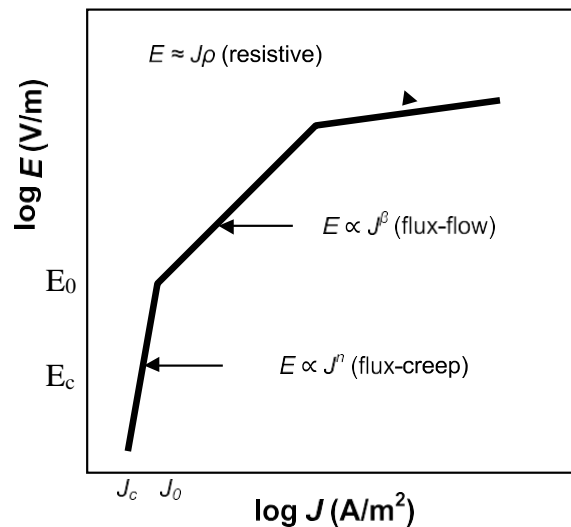


Figure III.8 :Caractéristiques du supraconducteur E-J, montrant les trois états.

Notez que la résistance est augmenté si on déplacer d'un état vers l'autre. Le phénomène thermique dans un limiteur a été modélisé comme suit:

$$T(t) = Ta + \frac{1}{C_{SC}} \int_0^t [Q_{SC}(t) - Q_{\text{évacuées}}(t)] dt \quad (\text{III.1})$$

Ta : Température ambiante

Q évacuées : Chaleur évacuée par le système de refroidissement

Q_{sc} : La chaleur a dissipé dans le supraconducteur

On suppose que la résistivité varie linéairement avec la température, lorsque $T(t) \geq T_c$, La variation de J_c avec la température est également supposée linéaire, comme indiqué dans (III.3). C'est cette variation de J_c et J_0 avec une température qui permet de régler le courant de fonctionnement d'un SFCL.

$$E(t,T) \approx \rho \left(\frac{T}{T_c} \right) J(t), \quad T(t) \geq T_c \quad (III.2)$$

$$J_c(T) \approx J_c \left(\frac{T_c - T}{T_c - 77} \right) \quad (III.3)$$

La résistivité ρ à la température T_c , a été choisi comme $1 \mu\Omega m$ et la longueur L_{sc} , a été modifiée pour limiter le courant de défaut à environ la même valeur moyenne(RMS) la charge actuelle. Cela se traduit par une résistance de phase du SFCL d'environ $4,0 \Omega$ à $95 K$ et $12,6 \Omega$ à $300 K$. Le diamètre d_{sc} , a été choisi tel que le supraconducteur ne peut pas entrer dans l'état de flux-flow durant le courant de charge normal, mais que chaque SFCL entrera dans l'état de flux-flow au cours du premier cycle de courant de défaut. En réalité, le diamètre du fil peut être fixe, mais plusieurs fils peuvent être branchés en parallèle pour obtenir une intensité particulière.

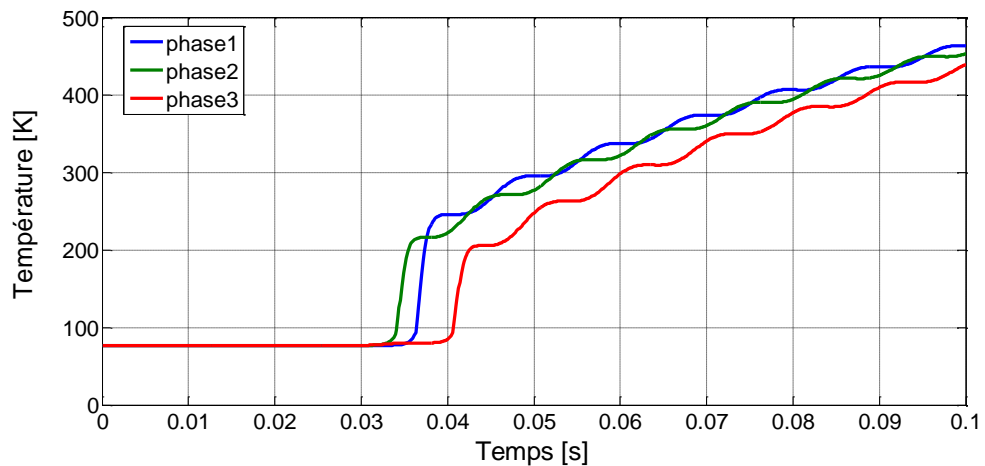


Figure III.9 : variation de température en fonction de temps dans le cas défaut avec SFCL.

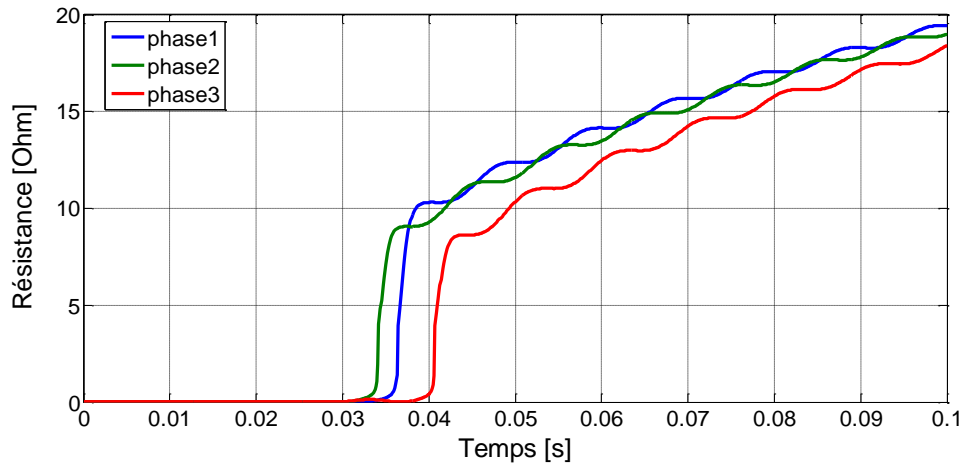


Figure III.10 : variation de résistance en fonction de temps le cas défaut avec SFCL.

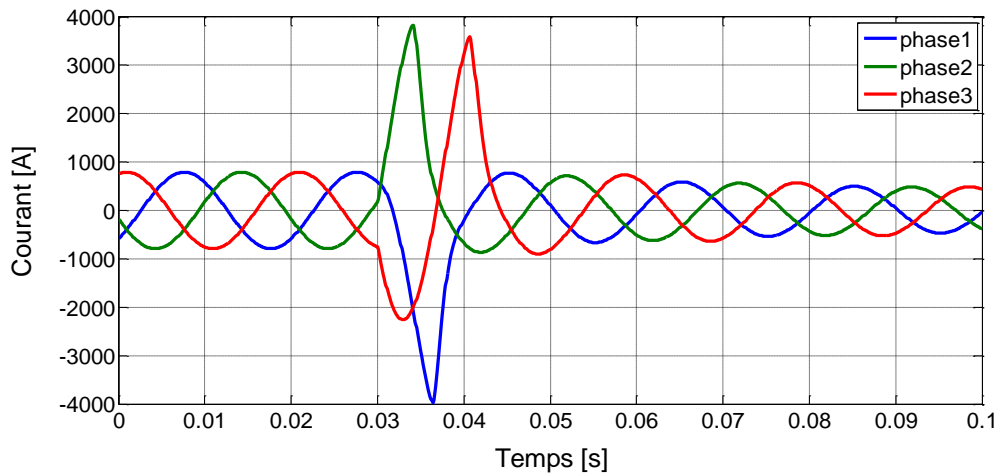


Figure III.11 : variation de courant en fonction de temps le cas défaut avec SFCL.

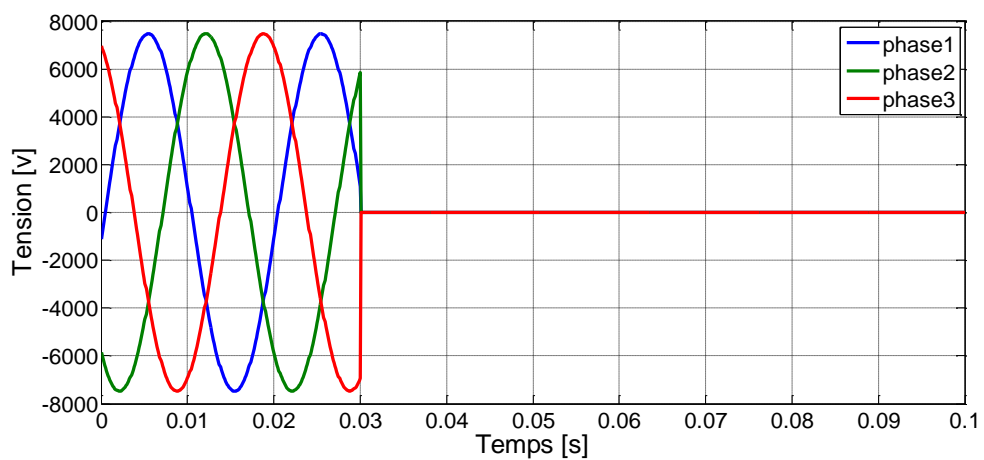


Figure III.12 : variation de tension en fonction de temps le cas défaut avec SFCL.

D'après les résultats obtenus dans les figures ci-dessus, nous avons remarqué que :

- Pour $t < 0.03s$ donc avons le défaut, les résistances des SFCL sont nuls car le courant de la ligne est faible, aussi la valeur de la température est de 77K (la température ambiante).
- Pour $0.03 < t < 0.045$ pendant le court-circuit, dans ce régime il y'a une transition de résistance et la température, ces changement est due à le régime transitoire de défaut qui augmente le courant.

On note que il y'a une relation bidirectionnelle entre le courant, la résistance et la température.

Et pour $t > 0.045$, le courant diminue jusqu'à une valeur inférieure de courant nominale à cause de la croissance de résistance, on conclure que la résistance de SFCL est inférieure de résistance de la charge pendant le fonctionnement normale, mais la température et résistance continue l'augmentation.

III.2.3.c Analyse les caractéristiques temporelle du SFCL

Les équations de modèle de SFCL peuvent être analysées pour se rapprocher des travaux de nivellement, c'est-à-dire l'instant, le temps pris pour éteindre pour un courant de défaut donné. La température de la supraconducteur est calculée à l'aide de (III.1), dans la région de flux-flow (où $E(t, T) \geq E_0$ et $T(t) < T_c$). Quand $T(t) \geq T_c$, il est supposé que le supraconducteur éteint. L'équation (1) peut être différencié et manipulé comme suit :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} [Q_{sc}(t) - Q_{transition}(t)] \quad (III.4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} \left[i(t)E(t, T)l_{sc} - \frac{T(t)-T_a}{\theta_{sc}} \right] \quad (III.5)$$

$$dt = \frac{dT}{\frac{1}{C_{sc}} \left[i(t)E(t, T)l_{sc} - \frac{T(t)-T_a}{\theta_{sc}} \right]} \quad (III.6)$$

$$T = T^{t-1} + \frac{dt}{C_{sc}} \left[i(t)E(t, T)l_{sc} - \frac{T^{t-1}-T_a}{\theta_{sc}} \right] \quad (III.7)$$

Pour simplifier l'analyse, une constante de courant de défaut I , est supposé. Par conséquent, E peut être simplifié pour être seulement une fonction de la température :

$$\int dt = \int \frac{dT}{\frac{1}{C_{sc}} \left[IE(T)l_{sc} - \frac{T(t)-T_a}{\theta_{sc}} \right]} \quad (III.8)$$

Ou $E(T)$ c'est [9] :

Pour $T < T_c$ et $J < J_c$

$$E(T) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^{\alpha(T)} \quad (\text{III.9})$$

Pour $T < T_c$ et $J > J_c$

$$E(T) = E_0 \left(\frac{E_c}{E_0} \right)^{\frac{\beta}{n_{77k}}} \left(\frac{J_c}{J_c(T)} \right) \left(\frac{J}{J_c} \right)^{\beta} \quad (\text{III.10})$$

Pour $T > T_c$

$$E(T) = \rho(T_c) \left(\frac{T}{T_c} \right) J \quad (\text{III.11})$$

On pose

$$IE(T) l_{sc} = k \frac{T_c - 77}{T_c - T} \quad (\text{III.12})$$

$$\text{Avec: } k = IE_0 \left(\frac{E_c}{E_0} \right)^{\frac{\beta}{n_{77K}}} \left(\frac{I}{J_c a_{sc}} \right)^{\beta} l_{sc} \quad (\text{III.13})$$

Cela fournit une expression pour t, le temps pour le supraconducteur d'atteindre une température particulière T, comme suit:

$$t = c_{sc} \int \frac{dT}{\left[k \frac{T_c - 77}{T_c - T} - \frac{T - T_a}{\theta_{sc}} \right]} \quad (\text{III.14})$$

Dans le cas où $T_a = 77$ K, $T_c = 95$ K et $T = 95$ K, le temps nécessaire pour atteindre une température T_c est donné par l'équation suivant [9]:

$$t = 6c_{sc} \theta_{sc} \frac{\arctan\left(\frac{3}{\sqrt{2\theta_{sc}k-9}}\right)}{\sqrt{2\theta_{sc}k-9}} \quad (\text{III.15})$$

La figure(III.13) illustre les caractéristiques des temps de transition en fonction de courant de défaut pour trois différentes valeurs de la température initiale T_a (77, 80,85) K.

Par exemple, pour $T_a = 77$ K, un courant inférieur de 1,9 kA n'influe pas le SFCL, c.-à-d. la température reste inférieur de T_c , par contre pour $T_a=85$ K, le courant nécessaire pour augmenter la température au de la valeur critique est 1.4kA.

On peut conclure d'après cette simulation que l'augmentation de la température ambiante diminue le courant de transition de SFCL de l'état supra vers l'état normale.

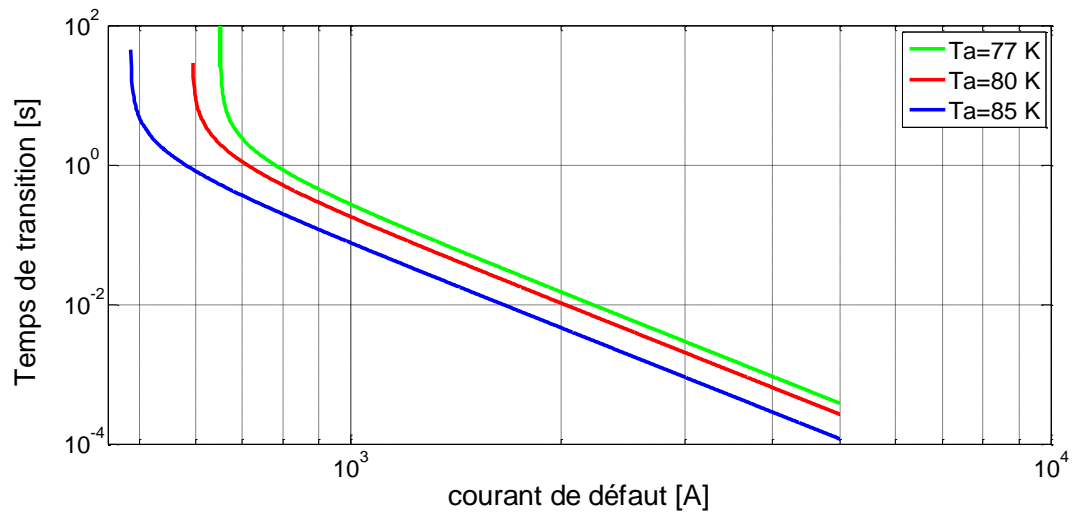


Figure III.13 : variation de temps de transition en fonction de courant de défaut.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé un réseau électrique 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 afin de trouver la valeur de le temps de transition, nous avons calculé ce dernier pour différents valeurs de courants et de températures, d'après les résultats on constat que les limiteurs sont des systèmes de protection efficaces, et pour assurer le fonctionnement de limiteur il faut éviter le refroidissement sous des températures très basses.

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion générale

Le but principal de ce mémoire est l'étude des caractéristiques temporelles d'un limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique durant le défaut d'un court-circuit.

Pour modéliser le comportement électrothermique de ce limiteur, nous avons utilisé le modèle en puissance (Steven Blair) où les caractéristiques spécifiques (La densité de courant, la non linéarité de la résistance, la zone de flux-flow) des supraconducteurs à haute température critique sont tenus en compte.

Le présent travail met l'accent sur la résolution de l'équation différentielle caractéristique d'un réseau électrique à l'aide de MATLAB, où afin d'assurer le couplage électrique-thermique, la résistance de limiteur est considérée 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 normal, et pendant d'un défaut. Dans cette partie, les tensions et les courants des lignes sont présentés 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 sont représentés. Ainsi que nous avons illustrés le temps de transition en fonction ; du courant de court-circuit et de la température ambiante.

A la lumière des résultats obtenus, il s'est avéré que le SFCL est le meilleur processus de limitation de courant pour la protection de réseau électrique. De plus, nous avons conclu qu'il y avait une relation inversement proportionnelle entre le temps de transition et le courant et une relation proportionnelle entre le temps de transition et la température ambiante.

A la fin de ce travail, nous voyons qu'il est et se rait très intéressant d'étudier l'influence de l'angle de l'apparition de défaut sur le temps de refroidissement de limiteur de courant.

Bibliographie

Bibliographique

- [1] **NEMDILI Saad** ; «Modélisation et Simulation du Limiteur de Courant Supraconducteur. », Thèse de Doctorat de L'université Ferhat Abbas, Sétif 2013.
- [2] **MAHTALI Mohamed** Thèse de Doctorat d'état en Physique Spécialité: Sciences des Matériaux Université Mentouri – Constantine Etude et Caractérisation de Structures Supraconductrices.
- [3] **BEN ALIA Khaled**. Etude des Systèmes de Guidage Magnétique à Base de Supraconducteur HTC.
- [4] **DURO Joseph** Modélisation de Matériaux Supraconducteurs -Application à un Limiteur de Courant Joseph Duron Thèse No3469 (2006).
- [5] **COINTE Yannick** ;(Limiter Supraconducteur de Courant Continu) Thèse de Doctorat de L'Institut National Polytechnique de Grenoble, Néel2007.
- [6] **KHENE Mohamed Lotfi**; «Etude de l'Aimantation dans Les Supraconducteurs.», Thèse de Doctorat de l'Université M.Khider,Biskra 2015.
- [7] **BERGER Kévin** ;(Etude des Phénomènes Couplés Magnétothermiques Dans les Supraconducteurs à Haute Température) Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 ,2006.
- [8] **BELMOUT Olivier**; « Limitation de Courant à Base d'Oxydes Supraconducteurs et Réalisation d'un Appareil 100 a _1 kv. », Thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Grenoble, France 1999.
- [9] **M. BLAIR Steven**, Student Member, IEEE, Campbell D. Booth, and Graeme M. Burt, Member, IEEE

Résumé

L'objectif principal de cette mémoire est l'étude des caractéristiques de les limiteurs de courant à base de supraconducteur SFCL et leur mécanisme de fonctionnement à des températures différentes dans la statue d'un défaut dans le réseau électrique, tels que le court-circuit, pour réduisent l'augmentation soudaine et importante de l'intensité du courant à risque. Nous avons modélisé une grille électrique qui contient un limiteur de courant. En utilisant des simulations et des équations de modèle **Steven M. Blair** avec Matlab, et nous obtenons des résultats positifs qui confirment la possibilité d'utiliser ce paramètre dans le développement de la fabrication des déterminants électriques au lieu d'utiliser des modèles anciens et coûteux.

Mots clés : MATLAB, SFCL, simulation.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه المذكرة هو دراسة خصائص المحددات التيار الكهربائي المصنوعة من النواقل الممتازة و آلية عملها في درجات حرارة مختلفة في حالة حدوث خلل في الشبكة الكهربائية خاصة الشبكات ذات الجهد العالي مثل الدارات القصيرة، حيث تعمل هذه المحددات على خفض الزيادة المفاجئة و الكبيرة في شدة التيار الكهربائي عند الخطر. فقمنا بنمذجة شبكة كهربائية تحتوي على محدد كهربائي مصنوع من السبيرراكندكتور. و باستعمال المحاكاة وبعض المعادلات من نموذج ستيفن بليير بواسطة برنامج الماتلاب، و حصلنا على نتائج ايجابية تؤكد إمكانية استخدام هذا المحدد في تطوير تصنيع المحددات بدلا من استخدام نماذج قديمة و مكلفة.

الكلمات المفتاحية: المحاكاة , المحدد الكهربائي المكون من النواقل الممتازة , الماتلاب

Abstract

The main objective of this graduate memory is the study of the characteristics of the Superconducting Fault Current Limiters SFCL and their mechanism of operation at different temperatures in the statue of a fault in the electrical network, especially high voltage networks such as short circuits, where these limiters reduce the increase in sudden and large in intensity Power supply at risk. We have modeled an electrical grid that contains an SFCL. Using simulations and some equations from **Steven M. Blair** model using MATLAB program, and we get positive results that confirm the possibility of using this parameter in the development of the manufacture of electrical determinants instead of using old and expensive models.

Keywords: MATLAB, SFCL, simulation.