

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

**DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA ELETTRONICA**

ciclo XXIII

ING-IND/31 Elettrotecnica

Titolo Tesi

**Un Concetto Innovativo di Limitatore
di Corrente di Guasto Superconduttivo**

ing Salvatore Imparato

**Coordinatore Dottorato:
Ch.mo Prof.
Domenico Casadei**

**Relatori:
Ch.mo Prof. F. Negrini
ing. A. Morandi**

Esame finale anno 2011

Alle mie amate: Carmela e Maria Francesca

Ringraziamenti

Ringrazio l'ing. Morandi il cui sostegno è stato fondamentale per il conseguimento dei risultati del dottorato. Altrettanto preziose le dissertazioni e lo scambio culturale sulle tecniche di pesca marina e sulle tecniche di cucina del pesce avute durante i viaggi delle missioni fuori regione. A riguardo, memorabili rimarranno i tuffi presso Portofino con la tipica divisa balneare da "scugnizzo napoletano".

Doveroso ringraziare il dott. G Grasso della Columbus Superconductors Spa per la proficua collaborazione, e l'ing L. Martini e ing. M. Bocchi di Erse Spa per aver concesso in prestito la bobina SC per effettuare gli esperimenti. Un ringraziamento particolare all'ing Andrea Albertini per avermi operativamente sostenuto e assistito nella fase di progettazione e realizzazione dei dispositivi elettronici da utilizzare nelle attività sperimentali. Ringraziamenti vanno anche al Prof. Pasini per avermi indirizzato nelle procedure di misura e per la sua scheda NI.

Grazie al Prof. F. Negrini per avermi sostenuto e incoraggiato nei momenti di difficoltà dandomi indicazioni preziose per uscirne. Grazie al Prof. Pier Luigi Ribani che, con la sua arcinota cordialità e signorilità, mi ha introdotto ai fondamenti della teoria della superconduttività. Grazie al Prof. M. Fabbri che ha saputo dare lustro e valorizzare, non solo il lavoro del sottoscritto, ma quello di tutto il corso di dottorato.

Infine grazie a G. Mariani per avermi introdotto durante la lunga permanenza in laboratorio al mondo dell'OS (linux).

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Scenario Energetico	2
1.2	Contributi e Contenuti	3
1.3	Risultati	6
2	Tecnologie FCL	9
2.1	Generalità	9
2.2	Caratterizzazione comportamento FCL	10
2.3	Requisiti di un dispositivo FCL	12
2.4	Classificazione delle tecnologie FCL	13
2.5	Aumento Permanente dell'impedenza di Rete	14
2.6	Aumento di Impedenza Condizionato	18
2.7	Tecnologie Emergenti	18
2.7.1	Semiconduttori allo Stato Solido	19
2.7.2	Superconduttiva	22
2.7.3	Ibrida	26
3	Tipologie di SFCL	29
3.1	Resistivo	29
3.2	Ponte	37
3.3	Nucleo Schermato	44
3.4	SFCL Trasformatore	46
3.5	Nucleo Saturato	48
3.6	Flusso Bloccato	52
4	DC resistive SFCL	55
4.1	Principio di funzionamento	55
4.2	Modello Matematico	62

4.3	Case Study	64
5	Attività Sperimentale	71
5.1	Valutazione AC losses	71
5.1.1	Prototipo SFCL	72
5.1.2	Configurazione DC	73
5.1.3	Configurazione AC	74
5.1.4	Procedura di misura	75
5.1.5	Discussione	77
5.2	Short Test	79
5.2.1	Configurazione DC Resistive SFCL	79
5.2.2	Configurazione Boening	80
5.2.3	Sistema Acquisizione Dati	80
5.2.4	Procedura di prova	81
5.2.5	Discussione	82
6	Dimensionamento di massima	89
6.1	Shunt Resistor	90
6.2	Avvolgimento Superconduttivo	93
6.3	Ponte Diodi	99
7	Conclusioni	103
	bibliografia	105

Elenco delle tabelle

1.1	Valori efficaci delle correnti nominali di corto circuito trifase . . .	1
4.1	<i>Valori del THD di tensione sul bus B in funzione di R_q</i> . . .	68
5.1	<i>Caratteristiche tecniche della bobina antinduttiva BiSCCO₂₂₂₃</i>	72
6.1	<i>Caratteristiche nominali di un dispositivo DC Resistive SFCL</i>	89
6.2	<i>Caratteristiche tecniche del nastro MgB₂</i>	96
6.3	<i>Caratteristiche tecniche avvolgimento</i>	99
6.4	<i>Diodo Semikron SKNa 402</i>	100

Elenco delle figure

2.1	classificazione tecnologie FCL	11
2.2	<i>classificazione tecnologie FCL</i>	13
2.3	<i>schema esemplificativo di tecnologia FCL ad innesco sequenziale</i>	15
2.4	<i>Particolari costruttivi Is-Limiter ABB</i>	19
2.5	<i>Schema architettura di base di un SSFCL</i>	20
2.6	<i>SSFCL:configurazione serie [1]</i>	21
2.7	<i>SSFCL:configurazione parallelo [1]</i>	22
2.8	<i>Diagramma di fase H-T per i materiali SC commercialmente disponibili[2]</i>	23
2.9	<i>Diagramma di fase tipico di un materiale superconduttore di tipo II</i>	24
2.10	<i>Caratteristica tipica di un materiale SC per applicazioni SFCL</i>	24
2.11	<i>Schema elettrico di principio di un SFCL</i>	25
2.12	<i>Funzionamento ideale della Z_{SC} non lineare in funzione della corrente</i>	25
2.13	<i>Test di laboratorio su SFCL ibrido del tipo non limitante nel primo semiperiodo [3]</i>	28
3.1	<i>Schema di principio di un Resistive SFCL</i>	30
3.2	<i>Percorso a meandri di YBCO melt textured polycrystalline $l=1.1$ m [4]</i>	31
3.3	<i>MCP BiSCCO₂₂₁₂ bobina bifilare con particolare dei contatti ed isolamento</i>	32
3.4	<i>Sezione di un nastro BiSCCO₂₂₂₃ 1G HTS</i>	34
3.5	<i>Nastro YBCOCC 2G HTS AMSC</i>	35
3.6	<i>Proiezione stima dei costi dei nastri HTS[5]</i>	36

3.7	<i>Schema Prototipo SFCL AMSC [6]</i>	36
3.8	<i>Schema elettrico monofase di principio[7]</i>	37
3.9	<i>Flussi delle correnti nei diodi in condizioni di normale funzionamento</i>	38
3.10	<i>Flussi delle correnti nei diodi in condizioni di guasto</i>	39
3.11	<i>Schema di principio del HTS FCC General Atomics</i>	40
3.12	<i>Andamenti delle onde di tensione e di corrente [8]</i>	41
3.13	<i>Schema di principio del Saturated DC Reactor type SFCL[9]</i> . .	42
3.14	<i>Schema di principio del DC Shield Reactor type SFCL[10]</i> . .	43
3.15	<i>Configurazione a doppio ponte del Rectifier Type SFCL with Non-Inductive Reactor[11]</i>	43
3.16	<i>Grafico struttura di principio di un SFCL a nucleo schermato [12]</i>	45
3.17	<i>Schema elettrico di principio di un SFCL a nucleo schermato[12]</i>	45
3.18	<i>Schema grafico di un trasformatore limitatore di corrente di guasto[13]</i>	47
3.19	<i>Schema grafico di struttura monofase di SFCL a nucleo satu- rato [14]</i>	48
3.20	<i>Andamento tipico di una curva $B-H$ di un nucleo ferroma- gnetico</i>	49
3.21	<i>Particolare del limitatore SFCL 35kV/90MVA [ref xin09]</i> . .	50
3.22	<i>Particolare del sistema di controllo di alimentazione della bobina DC HTS [15]</i>	51
3.23	<i>Limitatore SFCL 35kV/90MVA installato nella utility CNC [15]</i>	52
3.24	<i>Configurazione di base del SFCL a flusso bloccato [16]</i>	53
4.1	<i>Schema elettrico di principio del DC Restitive SFCL</i>	56
4.2	<i>Particolare ripple di corrente</i>	57
4.3	<i>Schema circuito equivalente: (a) fase carica</i>	58
4.4	<i>Schema circuito equivalente: (b) fase scarica</i>	58
4.5	<i>Connessione ramo diodi in antiparallelo all'avvolgimento SC</i>	62
4.6	<i>Schema elettrico del sistema di distribuzione a 20 kV</i>	65
4.7	<i>Transitorio di tensione al sistema di sbarre A</i>	66
4.8	<i>Transitorio di tensione al sistema di sbarre A</i>	67
4.9	<i>Andamento della tensione al sistema di sbarre B in seguito ad un guasto al sistema di sbarre A</i>	68

4.10	<i>Corrente di guasto al sistema di sbarre A</i>	69
5.1	<i>Schema del circuito allestito per la prova di misura nella configurazione DC Resistive SFCL</i>	73
5.2	<i>Schema del circuito allestito per la prova di misura nella configurazione AC Resistive SFCL</i>	74
5.3	<i>Onda di tensione e corrente nella configurazione AC Resistive SFCL</i>	76
5.4	<i>Onda di tensione e corrente nella configurazione DC Resistive SFCL</i>	77
5.5	<i>Potenza dissipata nel criostato in funzione della corrente critica</i>	78
5.6	<i>Circuito di prova: configurazione DC Resistive SFCL</i>	80
5.7	<i>Circuito di prova: configurazione Boening</i>	81
5.8	<i>Ciclo di apertura e chiusura dei triac</i>	82
5.9	<i>Circuito di prova per il test di corto circuito</i>	83
5.10	<i>Particolare test corto circuito</i>	84
5.11	<i>Andamento della resistenza del nastro BISCCO₂₂₂₃</i>	84
5.12	<i>Modello elettro-termico semplificato del nastro BISCCO₂₂₂₃[17]</i>	85
5.13	<i>Andamento nel tempo durante il guasto delle singole resistenze</i>	86
5.14	<i>Andamento della energia dissipata per effetto joule</i>	86
5.15	<i>Andamento della temperatura sulla superficie del nastro - hp regime adiabatico</i>	87
5.16	<i>Andamento della temperatura del materiale HTS</i>	88
6.1	<i>Configurazione a) shunt resistor DC Resistive SFCL</i>	91
6.2	<i>Configurazione b) shunt resistor DC Resistive SFCL</i>	92
6.3	<i>Micrografie nastri multifilamentari MgB₂ progetto LIMSAT</i>	94
6.4	<i>Curva di isteresi del flusso magnetico in funzione della corrente</i>	95
6.5	<i>Sezione nastro MgB₂ Columbus Superconductor</i>	96
6.6	<i>Corrente critica del nastro MgB₂ Columbus Superconductors</i>	96
6.7	<i>Configurazione pancakes e distribuzione del campo induzione \vec{B}</i>	98
6.8	<i>Schema elettrico di connessione di diodi per ogni ramo del ponte</i>	100

Capitolo 1

Introduzione

Uno degli obiettivi principali di una società fornitrice di energia elettrica è di garantire elevati standards di sicurezza e di qualità.

Questi possono essere messi a dura prova dai guasti di corto circuito, che sono purtroppo inevitabili. Il rischio di danno ai dispositivi attraversati dalle correnti di corto circuito, e agli apparati di porzioni di rete coinvolti, può tradursi nella migliore delle ipotesi in una riduzione della durata di vita del componente.

Il guasto di corto circuito inoltre può essere uno dei fattori di innesco o di concomitanza, nella perdita di stabilità del sistema elettrico di potenza conseguente alla disconnessione di una o più linee di trasporto, o a quella incontrollata di una o più unità generatrici [18].

Infatti, le reti di trasmissione e di distribuzione dell'energia elettrica sono progettate e costruite per resistere a specifici valori di corrente di corto circuito oltre i quali non è assicurato il ripristino.

Per esempio, per il sistema elettrico di potenza italiano, valgono i seguenti parametri standard[19]:

Tabella 1.1: Valori efficaci delle correnti nominali di corto circuito trifase

12.5 kA	per il sistema a 20 kV
20 kA or 31.5 kA	per il sistema a 132 kV- 150 kV
31.5 kA, 40 kA or 50 kA	per il sistema a 220 kV
50 kA or 63 kA	per il sistema a 380 kV

La strategia del sistema di protezione è basata fundamentalmente su due elementi:

1. un azione preventiva volta a tenere il valore delle correnti di corto circuito entro i limiti sopra riportati e una configurazione della rete che soddisfa il criterio $N - 1$ di valutazione della sicurezza [20]
2. un azione correttiva che tende a interrompere il circuito in modo tempestivo e compatibile con gli stress termici ed elettrodinamici ammessi, isolando quando più selettivamente possibile la porzione di rete o il nodo interessato dal guasto.

Il tema fondamentale è che, a seguito della espansione dei sistemi elettrici di potenza conseguente all'aumento di richiesta di energia, le tecnologie convenzionali utilizzate per limitare le correnti di guasto potrebbero risultare non più adeguate e sostenibili.

In particolare a preoccupare sono i costi, che potrebbero essere davvero ingenti, associati all'operazione di sostituzione delle apparecchiature obsolete o di adeguamento di porzioni di rete. Inoltre esiste un limite tecnico superiore delle apparecchiature di protezione in AT che allo stato dell'arte è di 63 kA.

1.1 Lo Scenario Energetico

Negli ultimi decenni, si è cominciato a valutare l'ipotesi in cui l'innalzamento dei valori delle correnti di corto circuito potesse essere uno scenario tutt'altro che improbabile. In effetti l'espansione dei sistemi elettrici di potenza in risposta all'aumento della domanda di energia elettrica ha registrato una tendenza in crescita.

Esso comporta l'aumento del numero di interconnessioni e del numero delle unità di generazione: due fenomeni che contribuiscono ad aumentare i valori delle correnti di corto circuito. Sebbene tale fenomeno abbia avuto una battuta di arresto a seguito della imponente, nonché globale, crisi economico finanziaria (2008 – 2011) è tuttavia ragionevole ipotizzare che la domanda di energia elettrica cresca sostanzialmente nei prossimi decenni

Nei documenti ufficiali di pianificazione annuale di Terna Spa sono stati in effetti individuate situazioni di criticità ed esigenze di adeguamento di porzioni di rete ai crescenti valori di corrente di corto circuito [21], così

come sono individuate le esigenze di ampliamento del sistema su tutto il territorio nazionale[22].

A livello europeo nel documento di sintesi di pianificazione energetico decennale, Pilot Ten Year Network Development Plan (PTYNDP) [23], sono abbozzati alcuni scenari in cui sono previsti tassi di crescita dei carichi elettrici di circa 1.5 % all'anno; ciò nell'ipotesi di poter contare entro il 2020 sul fatto che circa il 25.5 % della potenza totale generata sarà fornita da fonti rinnovabili (Renawable Energy Source). L'aumento moderato della crescita dei consumi tiene conto dell'aumento degli standards di vita e del passaggio di consegna all'energia elettrica di parte di carichi tradizionalmente alimentati con energia chimica (trasporto pubblico e privato, riscaldamento, ecc.). Questa stima per difetto è basata e giustificata sulla assunzione che gli obiettivi prestabiliti dalle politiche di risparmio energetico ed efficienza vengano tutti perseguiti entro il 2020.

In ogni caso, a parte la rosea e ottimistica previsione dell'organo politico amministrativo internazionale e senza entrare nei meriti tecnici delle previsioni, ciò testimonia che la Comunità Europea ha ipotizzato nell'utilizzo massiccio dell'energia elettrica e nel gestire questa con efficienza ed efficacia, una delle risposte valide per ridurre le emissioni di CO₂ e soddisfare alcuni obiettivi della politica ambientale fondata sul concetto di sostenibilità.

1.2 Contributi e Contenuti

L'argomento di tesi riguarda i limitatori di corrente di guasto superconduttivi ad alta temperatura (HTS), riportati in letteratura scientifica con l'acronimo HTSFCL (High Temperature Superconducting Fault Current Limiter) o più comunemente con SFCL.

Questi dispositivi sono oggetti che, almeno nel loro concetto ideale, intervengono limitando la corrente di corto circuito solo quando si verifica l'evento di guasto, mentre sono trasparenti alla rete durante le normali condizioni di funzionamento.

Quindi, rispetto alle tecnologie convenzionali, che invece impongono condizionamenti più o meno significativi in termini di efficienza del sistema e sulla qualità dell'energia fornita durante le condizioni di normale funzionamento, i dispositivi SFCL hanno una serie di indubbi vantaggi ([24],cap 9).

I dispositivi SFCL costituiscono quindi una valida soluzione tecnica alle problematiche di espansione della rete elettrica e all'intensificazione del suo sottosistema di produzione.

La questione relativa ai dispositivi SFCL, allo stato dell'arte, è se questi siano una valida soluzione anche dal punto di vista economico.

La tesi, quindi, è focalizzata sullo studio delle diverse tipologie di SFCL e ha come risultato la presentazione di un nuovo e originale concetto di limitatore superconduttivo, denominato "DC Resistive SFCL", concepito e brevettato all'interno del Dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università degli Studi di Bologna e che ha per inventori l'autore e l'ing. Antonio Morandi.

L'obiettivo della tesi è quindi di proporre una tipologia di SFCL che possa avere le potenzialità per essere una valida soluzione economica oltre che tecnica.

Il concetto innovativo del dispositivo DC Resistive SFCL, infatti, garantisce un regime di funzionamento DC per il materiale superconduttore (SC); ciò permette l'impiego di soluzioni impiantistiche di refrigerazione e di materiali SC che sono realtà già commercialmente esistenti e di fatto precluse nelle tipologie di SFCL che prevedono invece un funzionamento in regime AC per il materiale superconduttore utilizzato.

Nel Capitolo 2, al fine di presentare una panoramica sulle tecnologie di limitazione della corrente di guasto, viene riportata una sintesi dei lavori svolti dal gruppo di lavoro WG A3.10 del CIGRÉ (Conseil internazionale dei Reseaux Électriques di Grands), il quale rappresenta senz'altro una realtà di riferimento e di stimolo per la comunità scientifica che ha per materia di interesse i dispositivi FCL. In particolare si riporta uno schema di classificazione delle tecnologie FCL compreso una sintetica descrizione dei loro principi di funzionamento e dei rispettivi campi di applicazione. Gli aspetti salienti caratterizzanti la ricerca e sviluppo dei dispositivi FCL vengono riportati sommariamente attraverso una citazione puntuale di autorevoli fonti facilmente rintracciabili nella letteratura internazionale.

Nel Capitolo 3 il discorso viene focalizzato sulle principali tipologie di SFCL illustrandone il principio di funzionamento, i principali vantaggi e svantaggi, lo sviluppo evolutivo e lo stato dell'arte. Viene dato risalto

a due tipologie in particolare di SFCL in quanto esse sono state fonte di ispirazione del concetto DC Resistive SFCL: il dispositivo SFCL di tipo resistivo, in seguito identificato come AC Resistive SFCL, e quello di tipo a ponte, ossia Bridge Type SFCL. In effetti, il principio di funzionamento del DC Resistive SFCL coniuga sinergicamente alcune caratteristiche funzionali di queste due tipologie di limitatori di correnti di guasto superconduttivi.

Nel Capitolo 4 viene illustrato in dettaglio il principio di funzionamento del DC Resistive SFCL utilizzando a supporto una rappresentazione grafica ed un'analisi qualitativa delle equazioni che regolano il suo funzionamento sulla base di alcune ipotesi semplificative, così come viene riportato uno schema generale degli elementi essenziali che costituiscono la parte fondamentale del suo modello matematico. Al fine di meglio comprendere le potenzialità e la specificità funzionali dell'oggetto, viene inoltre illustrato uno studio che riporta una simulazione eseguita con il software EMTP di un caso applicativo in un sistema di media tensione a 20 kV. In esso vengono riportati i criteri necessari per stabilire alcuni parametri da utilizzare come dati di ingresso nella fase di progettazione.

Nel Capitolo 5 sono riportati i risultati di due attività sperimentali finalizzate a validare le prestazioni funzionali previste per il DC Resistive SFCL sia in condizione di normale funzionamento (dissipazione di potenza) che in condizione di guasto dove in particolare è stato osservato il comportamento del materiale SC nella fase di transizione. Per tale attività sono stati allestiti nel Laboratorio del dipartimento di Ingegneria di Magnetofluidodinamica e Superconduttività Applicata (LIMSA) un prototipo in scala ridotta di DC Resistive SFCL e due circuiti di prova. Dalle prove è emerso una piena rispondenza tra i risultati sperimentali di laboratorio e le aspettative riguardo le prestazioni e il comportamento attesi sia durante le condizioni di normale funzionamento che in regime di guasto. Nella prova che comprende le condizioni di normale funzionamento è stata fatta in particolare una valutazione delle dissipazioni di energia elettrica che avvengono nel criostato confrontando i dati sperimentali ottenuti nella configurazione DC Resistive SFCL e quella AC Resistive SFCL.

Nel Capitolo 6 , sulla base delle attività di studio e di simulazione fatta nel Capitolo 4 e certi dei risultati confermati nelle attività sperimentali presentate nel Capitolo 5, viene effettuata una progettazione di massima di un dispositivo DC Resistive SFCL la cui taglia nominale è di circa 40 MVA. In esso è possibile acquisire informazioni in merito alle dimensioni e ingombro dell'oggetto, alla quantità di materiale SC necessario, alla distribuzione del campo induzione nello spazio in prossimità del nastro e all'interno della camera criostatica; infine alla consistenza del ponte raddrizzatore e alla quantità di diodi necessari. Su questo ultimo aspetto è stato tracciato il confine di convenienza economica del concetto DC Resistive SFCL rispetto al concetto AC Resistive SFCL.

1.3 Risultati

Articoli pubblicati su riviste di prestigio internazionale durante il corso di studi

Pubblicazione 1

A Morandi, S Imparato,

“A DC-operating resistive-type superconducting fault current limiter for AC applications”

Supercond. Sci. Technol. 22 (january 2009) 045002 (8pp)

Pubblicazione 2

S Imparato, A Morando, M Fabbri, F Negrini e P Ribani

“Investigation of shunt resistor's connection for a DC Resistive SFCL”

Journal of Physics: Conference Series 234 (2010) 032024, presentato tramite esposizione di poster alla conferenza internazionale sulla superconduttività applicata EUCAS 2009 tenutasi a Dresda (Germania) in settembre 2009.

Pubblicazione 3

S. Imparato, A. Morandi, L. Martini, M. Bocchi, G. Grasso, M. Fabbri, F. Negrini, and P. L. Ribani,

“Experimental Evaluation of AC Losses of a DC Resistive SFCL Prototype”

IEEE Transactions On Applied Superconductivity, VOL. 20, NO. 3, JUNE 2010

Pubblicazione 4

A. Morandi, S. Imparato, G. Grasso, S. Berta, L. Martini, M. Bocchi, M. Fabbri, F. Negrini, and P. L. Ribani,

“Design of a DC Resistive SFCL for Application to the 20 kV Distribution System”

IEEE Transactions On Applied Superconductivity, VOL. 20, NO. 3, JUNE 2010

Domanda di Brevetto

Deposito di domanda all’ufficio Brevetti Italiano No. RM2008A000547 effettuata il 14 ottobre 2008 con estensione in ambito internazionale PCT (2009) (KTO, Studio Barzanò e Zanardi)

Finanziamento PRIN

Nel 2009 il concetto DC Resistive SFCL è stato proposto con esito positivo per un finanziamento pubblico nazionale (bando PRIN) in cui si sono attivati delle collaborazioni sinergiche con l’Istituto di Fisica Nucleare (IFN) di Genova e l’Università degli studi di Salerno.

Concessione Licenza

A fine 2010 è stato siglato un accordo di concessione di licenza di brevetto da parte dell’Università di Bologna ad una nota azienda, leader europea nella produzione di nastri MgB₂.

Capitolo 2

Tecnologie FCL

In questo capitolo viene presentata una panoramica sulle tecnologie convenzionali ed emergenti di FCL. Le tecnologie FCL si differenziano per molti aspetti e non è scopo del presente lavoro elencarli in modo approfondito ed esaustivo. Ritorna utile però definirne il quadro generale per riportare adeguatamente il contesto in cui si inserisce il concetto innovativo del dispositivo DC Resistive SFCL . A riguardo, è possibile trovare riferimenti in letteratura [24, 25] a diversi metodi innovativi, non riportati nel presente lavoro di tesi non avendo questi suscitato un sufficiente interesse nel mondo della ricerca, né registrato tentativi di sviluppo di prototipi per sistemi almeno di MT (resistori PTC, metalli liquidi, circuiti risonanti, froze elettromagnetiche, etc). Vengono invece riportate le tecnologie considerate emergenti che hanno invece portato allo sviluppo e costruzione di prototipi per applicazioni in MT, come quelle basate su semiconduttori allo stato solido (SSFCL), ibride e su materiali superconduttori ad alta temperatura critica (SFCL).

2.1 Generalità

Nell'ultimo decennio l'esigenza di ricercare valide soluzioni al problema dei crescenti valori delle correnti di corto circuito ha indirizzato la comunità scientifica verso lo studio, la ricerca e lo sviluppo, di soluzioni innovative e alternative a quelle convenzionali.

Queste ultime, infatti, hanno delle contraindicazioni riguardo all'efficienza dell'esercizio della rete e alla qualità con cui viene erogata l'energia elettrica. Sotto questo aspetto è stato fondamentale la costituzione ad hoc nel 1996 di

un gruppo di lavoro WG 13.10 da parte del CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems) che ha effettuato un ampio e approfondito studio sulle tecnologie FCL i cui primi risultati sono stati sintetizzati nel rapporto [26].

Oltre allo studio sopra citato, diversi sono i contributi in letteratura dove è possibile evidenziare non solo i fattori principali che possono influenzare la validità o meno di una soluzione, ma anche quelli utili a determinare e a favorire l'ingresso nel mercato di una determinata tecnologia FCL piuttosto che un'altra; tra questi si citano a titolo di esempio:

- la necessità di definire uno standard delle specifiche funzionali in cui in sintesi è possibile caratterizzare il comportamento di un FCL(vedi paragrafo 2.2)
- analisi di possibili applicazioni [27, 28, 29]
- analisi delle problematiche relative all'interazione tra il sistema elettrico di potenza e il dispositivo FCL [30]
- indagini di mercato: requisiti, specifiche e stima di massima del suo valore commerciale (EPRI report [31])
- benefici tecnici ed economici [32]
- individuazione e definizione delle prove e dei collaudi [33]
- criticità nell'effettuare le prove e i collaudi per i prototipi, in particolare, per quelli di classe AT [34]

Tuttavia, in riferimento alle tecnologie FCL, a giudizio dell'autore rappresenta un presupposto imprescindibile riportare nel presente capitolo alcuni elementi propedeutici alla discussione quali la caratterizzazione del comportamento proposta dal CIGRÉ, una classificazione di massima, una definizione dei requisiti e una descrizione sommaria delle principali tecnologie FCL.

2.2 Caratterizzazione del comportamento di un FCL

Nell'affrontare lo studio delle tecnologie FCL il CIGRE WG [35] ha definito una caratterizzazione grafica, riportata in figura 2.1, delle modalità di funzionamento delle tecniche di limitazione della corrente .

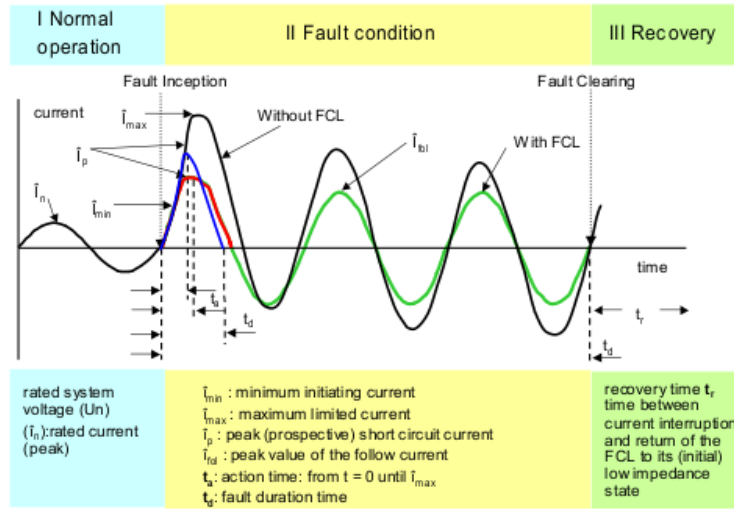


Figura 2.1: classificazione tecnologie FCL

Sono individuate tre fasi di regime di funzionamento:

- **(I)** Condizione di normale funzionamento
- **(II)** Limitazione della corrente durante il guasto
- **(III)** Ripristino del limitatore alla condizione **I**

Inoltre sono stati definiti alcuni parametri prestazionali:

η_0 Follow current ratio (dato dal rapporto tra il valore di picco della corrente limitata e il valore di picco della corrente nominale di carico)

$$\frac{I_{f10}}{I_n}$$

η_1 peak current limiting ratio (dato dal rapporto tra il valore massimo di corrente limitata e il valore massimo della corrente di corto circuito)

$$\frac{I_p}{I_{max}}$$

η_2 current limiting ratio (dato dal rapporto tra il valore di picco della corrente limitata e il valore massimo della corrente di corto circuito)

$$\frac{I_{f10}}{I_{max}}$$

t_a action time (l'intervallo di tempo tra l'istante in cui avviene il guasto t_0 e l'istante in cui la corrente raggiunge il valore di picco limitato (3))

t_d fault duration (l'intervallo di tempo tra l'istante t_0 e l'istante in cui il guasto risulta estinto)

t_r recovery time (l'intervallo di tempo tra l'istante in cui il guasto risulta estinto e l'istante in cui il dispositivo FCL ripristina le condizioni iniziali precedenti all'insorgere del guasto)

In definitiva l'atto di caratterizzare e stabilire le specifiche funzionali può essere un utile strumento per favorire analisi comparative delle differenti tipologie e tecnologie. E' da segnalare però, che il confronto tra le diverse tipologie viene fatto in genere utilizzando come termine di paragone un SFCL ideale al quale si aggiungono, oltre ai valori quantitativi delle specifiche funzionali qui riportati, anche i requisiti elencati nel seguente paragrafo 2.3

2.3 Requisiti di un dispositivo FCL

Un elenco di fattori e requisiti da prendere necessariamente in considerazione nella fase di progettazione e commercializzazione di un dispositivo FCL, soprattutto in riferimento alle tecnologie emergenti [36], risultano essere:

- potenza nominale e di corto circuito (dati di targa)
- impedenza trascurabile durante le normali condizioni di funzionamento
- basse perdite
- un effetto limitante soddisfacente per tutta la durata di vita del dispositivo
- l'innesco del dispositivo deve essere tempestivo (intervenire prima che la corrente di guasto raggiunga il valore di picco)
- ripristino automatico e veloce dopo ogni guasto (compatibile con i tempi di richiusura degli interruttori)
- resistenza agli stress termici, magnetici e meccanici dovuti a ripetuti cicli di intervento
- compatibilità con gli schemi e i piani di intervento delle protezioni
- elevata affidabilità
- bassa manutenzione

- assenza di rischi per il personale
- dimensioni ridotte
- assenza di sistemi accessori ausiliari o limitata presenza
- bassi costi di gestione

E' ragionevole pensare, in ogni caso, che alcuni dei requisiti sopra elencati possano essere più o meno vincolanti a seconda dell'applicazione e del punto di installazione del dispositivo. Infatti come accennato alla fine del paragrafo 2.2, la valutazione per confronto delle prestazioni di un dispositivo FCL non può, in linea di principio, prescindere da alcuni criteri impiantistici che influenzano il punto in cui è prevista l'installazione. Da questo punto di vista, a parere dell'autore e con riferimento particolare alle tecnologie emergenti, non necessariamente l'evoluzione dello stato di sviluppo di queste potrebbe portare all'affermazione di una unica tecnologia a discapito di tutte le altre.

2.4 Classificazione delle tecnologie FCL

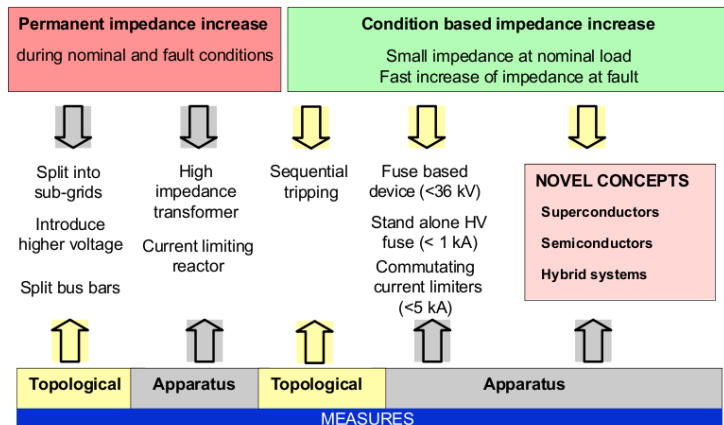


Figura 2.2: *classificazione tecnologie FCL*

La figura 2.2 riporta una classificazione e una identificazione delle tecnologie FCL [37]. Essa rappresenta una revisione di una classificazione già fatta precedentemente [38] in cui si faceva distinzione invece tra dispositivi passivi e attivi.

Come si può osservare dalla figura 2.2, il criterio di classificazione si basa sulla modalità di funzionamento, e in particolare, se l'aumento di impedenza necessario per limitare le correnti di guasto sia permanente oppure condizionato al verificarsi dell'evento di corto circuito. Un'ulteriore classificazione viene effettuata discernendo se l'effetto limitante è ottenuto attraverso un'apparecchiatura/dispositivo oppure attraverso la possibilità di agire su diverse configurazioni di rete.

Le tecnologie di carattere innovativo cadono nella categoria aumento di impedenza condizionato. Queste hanno una caduta di tensione praticamente trascurabile durante le normali condizioni di funzionamento della rete, mentre in occasione di un evento di guasto, inseriscono istantaneamente una induttanza o resistenza in serie alla linea o al carico da proteggere oppure interrompere direttamente il circuito.

Quelle convenzionali invece inseriscono un aumento di impedenza permanente in rete sia in condizioni di guasto che in condizioni di normale funzionamento. Nei paragrafi che seguono vengono citate in sintesi le soluzioni e le misure di limitazione di corrente di guasto più comunemente utilizzate.

2.5 Aumento Permanente dell'impedenza di Rete

Quasi sempre sono di natura dissipativa e risultano essere in contrasto sia con i principi ispiratori delle normative internazionali in materia di ambiente e sviluppo sostenibile, che con la richiesta di energia elettrica con elevate performance qualitative. È noto, infatti, che aumentando l'impedenza induttiva di rete si abbassa il limite di stabilità statica della rete, riducendo l'efficienza e la potenzialità di quest'ultima (per esempio il rapporto tra la potenza effettivamente utilizzabile e quella installata). Inoltre una elevata impedenza induttiva di rete comporta l'amplificazione dei disturbi condotti dovuti alle eventuali armoniche di corrente di ordine superiore con evidenti ricadute sulla qualità dell'energia elettrica fornita.

Innesco Sequenziale

È una soluzione particolare che non trova larghissimo uso ed è adottata quando si vuole evitare la sostituzione di più interruttori di potenza. Essa prevede l'installazione di un ulteriore interruttore di potenza posto a monte

degli altri. Lo schema ad innesco sequenziale evita che gli interruttori di

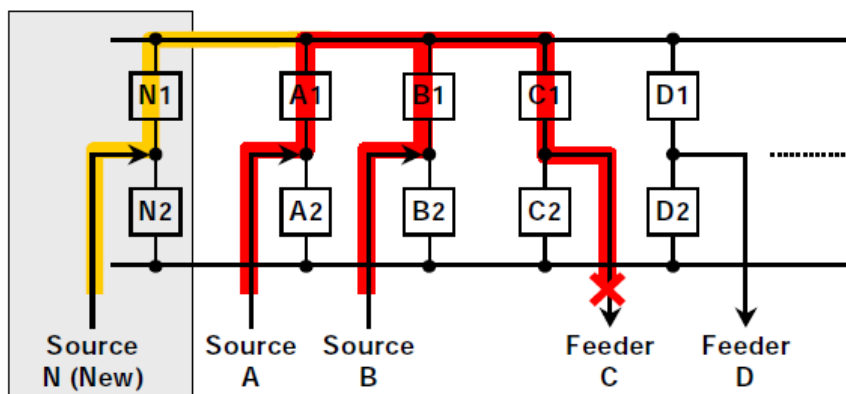


Figura 2.3: *schema esemplificativo di tecnologia FCL ad innesco sequenziale*

potenza lavorino con correnti di corto circuito di valore eccessivo. Se viene rilevata la presenza di un guasto viene innescato per primo l'intervento di apertura dell'interruttore a monte. Ciò riduce la corrente di corto circuito vista dall'interruttore a valle che opera nelle zona interessata dal guasto, sicchè quest'ultimo può interrompere il circuito in modo sicuro. Uno svantaggio di tale soluzione è quello di introdurre un ritardo nella estinzione del guasto.

Un esempio utile a chiarire quanto detto è illustrato nella figura 2.3. In una sottostazione due linee uscenti C e D sono connesse mediante due sbarre a due sorgenti A e B. Tutti gli interruttori da A1 a D2 hanno un potere di interruzione adeguato al valore della corrente di corto circuito che si suppone possa avvenire sulla linea C. Per esigenze di servizio, supponiamo che una ulteriore sorgente N debba essere connessa alla sottostazione. Come conseguenza il valore di corrente di corto aumenta e il potere di interruzione degli interruttori può non essere più adeguato. L'innesco sequenziale prevede allora l'installazione di due interruttori N1 e N2 a monte della sottostazione. In caso di guasto N1 ed N2 interverranno prima dei restanti interruttori, che nel nuovo assetto di protezione saranno tarati in modo tale da avere un tempo di intervento ritardato rispetto all'assetto precedente.

Provvedimenti Topologici

Sono provvedimenti che mirano a sezionare la rete con l'obiettivo di diminuire il livello di interconnessione e di magliatura riducendo così il valore delle correnti di corto circuito, ma al tempo stesso contribuendo, in alcuni casi, a rendere il sistema meno robusto.

Può essere annoverato tra i provvedimenti in assoluto più costosi. Di seguito vengono elencati alcuni provvedimenti.

Aumento del livello di tensione

Di prassi nella progettazione di nuove reti si tende a scegliere sistemi con livelli di tensione più alti possibili, compatibilmente con la potenza di corto circuito e le taglie di interruttori commercialmente disponibili. Per i sistemi già esistenti, la scelta di aumentare il livello della tensione è maggiormente praticabile nei sistemi MV, poichè in commercio sono disponibili soluzioni che rispettano i requisiti e i vincoli dettati fondamentalmente da ragioni logistiche (peso e ingombro). Nei sistemi ad alta tensione essa richiede investimenti consistenti e pertanto è una prassi di rara applicazione.

Infine, l'introduzione di un sistema di alta tensione di livello più alto che si sovrappone ad uno precedente è un'ulteriore opzione. Esso permette di sezionare il sistema subordinato al fine di ridurre il valore delle correnti di corto circuito. Tuttavia, simili provvedimenti riguardano programmi di adeguamento ed aggiornamento di più ampio respiro che agiscono a livello di sistema, piuttosto che a livello locale.

Sezionamento in sotto-reti

La rete viene sezionata in porzioni più piccole e alimentate in modo separato dal livello di tensione primario. Il sezionamento riduce il livello delle correnti di corto circuito e contestualmente la lunghezza dei cavi che pertanto sono soggetti a minor rischio di sovraccarico. In Italia, per esempio, Terna Spa ed Enel Spa trovano valido, sebbene costoso, adottare questo tipo di soluzione [39] grazie anche alla disponibilità di alcune innovazioni tecnologiche quali le apparecchiature compatte [40] a basso impatto ambientale.

Sezionamento alle sbarre

Il sezionamento delle sbarre nelle sottostazioni è la pratica più utilizzata in questo tipo di provvedimento. Quando necessario esse vengono comunque connesse per mezzo di un congiuntore. Spesso tale congiuntore deve essere esercito in modalità normalmente aperto in quanto la sua chiusura comporta livelli di corrente di corto circuito superiore ai poteri di interruzione delle apparecchiature di protezione.

Apparecchiature

Reattori in aria

Una reattanza induttiva viene permanentemente inserita in serie in modo da aumentare l'impedenza di rete e tenere il valore di corrente di corto circuito sotto i limiti consentiti. Nelle normali condizioni di funzionamento, tale dispositivo comporta una caduta di tensione e delle perdite di tipo resistivo. E' importante che la reattanza rimanga costante durante sia le condizioni di normale funzionamento che in condizioni di guasto. Pertanto, esse sono realizzate con avvolgimenti in aria.

Trasformatori ad alta impedenza

L'utilizzo della impedenza interna di un trasformatore per limitare le correnti di corto circuito è una prassi largamente utilizzata e consolidata.

Quando questo non è sufficiente, un modo diretto per limitare le correnti di corto circuito è di aumentare ulteriormente l'impedenza interna del trasformatore rispetto a quella offerta dalle taglie commercialmente disponibili. Tuttavia, durante le condizioni di normale funzionamento, l'alta impedenza è causa di cadute di tensione e di perdite. La possibilità di variazione della tensione al secondario risulta fortemente limitata, pertanto non è consentito realizzare valori di impedenza molto elevati (per tale scopo spesso vengono impiegati autotrasformatori). Dal punto di vista economico, essi hanno costi aggiuntivi dovuti alla customizzazione e alle procedure di collaudo e di certificazione.

2.6 Aumento di Impedenza Condizionato

Fusibili

Le apparecchiature di protezione basate su fusibili coprono livelli di tensione fino a circa 70 kV. Un limite insuperabile è che non hanno modalità di ripristino automatico ed è necessario l'intervento del manutentore per cambiare manualmente le cartucce. Tale attività oltre che costosa può richiedere tempi di ripristino inaccettabili.

HV Stand Alone

Hanno poteri di interruzione che possono arrivare fino a 63 kA e portate di poche centinaia di ampere in quanto la corrente di linea attraversa direttamente l'elemento fusibile attivo, quindi i requisiti termodinamici da tenere in conto in fase di progettazione rappresentano un vincolo non trascurabile.

Pirotecnici

Consistono in un conduttore connesso in parallelo ad un fusibile. In condizioni di normale funzionamento tutta la corrente di linea attraversa il conduttore, il quale è dotato di una carica esplosiva attivata da un rilevatore elettronico, opportunamente tarato, in grado di misurare la derivata della corrente di guasto (di/dt). Quindi in caso di guasto avviene l'esplosione che apre il circuito dirottando la corrente nel fusibile, il quale interviene aprendo definitivamente la corrente ed estinguendo l'arco in pochi millisecondi. E' disponibile commercialmente per applicazioni in MV che non superano i 40 kV con potere di interruzione fino a 140 kA. Il vantaggio è dato dal fatto che l'elemento fusibile non deve essere progettato per portare la corrente di carico.

2.7 Tecnologie emergenti

Le nuove tecnologie FCL sono basate sul concetto di aumentare istantaneamente l'impedenza di rete esclusivamente in occasione dell'occorrenza del guasto. Se fosse commercialmente disponibile un simile dispositivo significherebbe avere un utile strumento di investimento, poichè si eviterebbe di effettuare l'adeguamento delle reti ai crescenti valori di corrente di corto

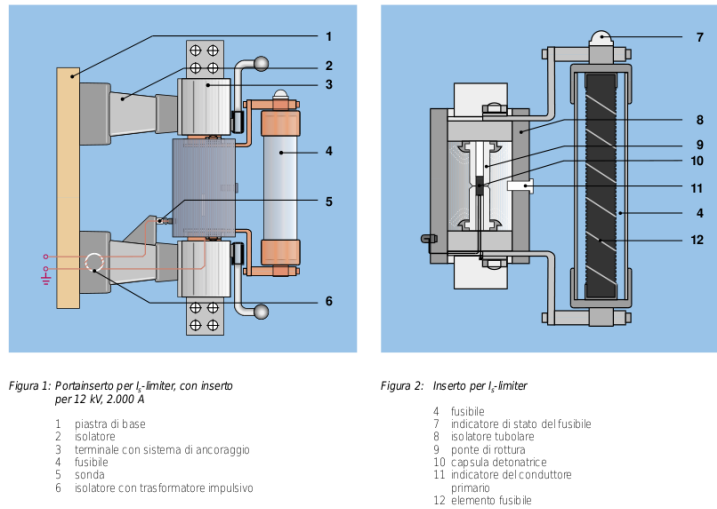


Figura 2.4: Particolari costruttivi Is-Limiter ABB

circuito mediante sostituzione degli apparati obsoleti. Come conseguenza ulteriore vi sarebbe un allungamento della durata della vita dei componenti e apparecchiature che costituiscono la rete in quanto sarebbero limitate anche le sollecitazioni termiche ed elettrodinamiche in caso di guasto. Altro vantaggio, la possibilità di progettare e realizzare reti ad alta efficienza evitando l'utilizzo di macchine elettriche ad alta impedenza interna. Da questo punto di vista le tecnologie emergenti FCL rivestono un ruolo fondamentale nell'implementazione delle politiche comunitarie e nel raggiungimento degli obiettivi che queste si sono prefissate. Sebbene le tecnologie superconduttive restino le più accreditate per alcune applicazioni nei sistemi elettrici di potenza [41], negli ultimi tempi [42] le tecnologie basate su componenti semiconduttori allo stato solido (SSFCL) sono state rivalutate; infatti vi sono delle aspettative derivanti dall'impiego del carburo di silicio (SiC) come materiale semiconduttore nei dispositivi elettronici di potenza [43].

2.7.1 Tecnologia a semiconduttori allo Stato Solido

Il principio di funzionamento è basato su un interruttore elettronico di potenza (fast solid-state switch) attivato e comandato da un sistema capace di rilevare istantaneamente il verificarsi delle condizioni di guasto. Da ciò si evince immediatamente la presenza di sistemi elettronici accessori che intervengono in modo "attivo" nel funzionamento dispositivo. All'occorrenza

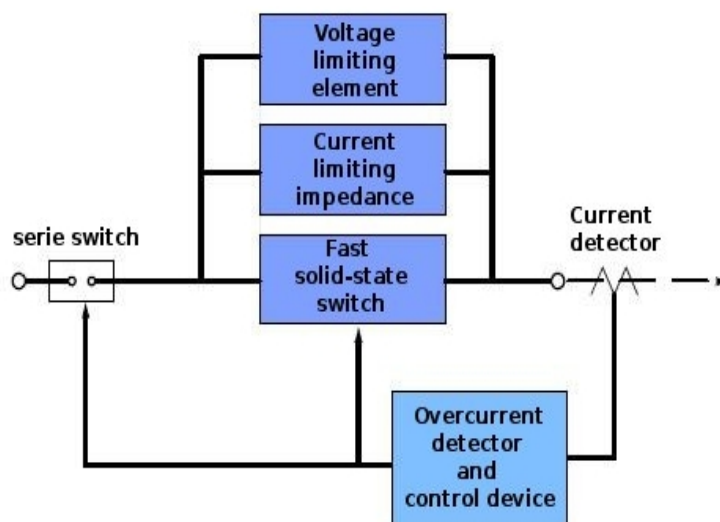


Figura 2.5: *Schema architettura di base di un SSFCL*

del guasto l'interruttore elettronico si apre obbligando la corrente a circolare in un ramo alternativo dove viene limitata da una impedenza. Il ramo che contiene l'impedenza è ovviamente cortocircuitato in assenza di guasto. È necessario dotare il sistema di protezioni contro le sovratensioni derivanti dalla interruzione quasi istantanea ($40 \mu\text{s}$) della corrente di guasto e dalla natura, in prevalenza induttiva, dell'impedenza di rete. Completa il sistema uno switch meccanico per le operazioni di manovra e isolamento del carico a sua volta attivato e comandato da un sistema di controllo. In letteratura si trova riferimento di due versioni di questo dispositivo: quella serie [44] e quella parallelo [45] entrambe risalenti ai primi anni '90. Tuttavia tracce più recenti riguardo l'interesse verso questa tecnologia da parte di alcuni operatori del settore si trovano in una agenzia di stampa [46]. In essa è riportato un finanziamento da parte del DOE (Department of Energy's Office of Electricity Delivery and Energy Reliability) di un prototipo di 69 kV progettato per l'istituto EPRI, e in alcuni lavori congressuali relativi all'applicazione di questi ultimi nei sistemi di potenza MT [47, 48].

Tali dispositivi diventano ulteriormente interessanti quando oltre alla funzione di limitazione si associa quella della interruzione. Il successo di tali dispositivi è messo in discussione dalla capacità di ottenere soluzioni affidabili, di dimensioni e investimenti ridotti. Una notevole spinta in tal senso può essere data dalla emergente tecnologia dei dispositivi allo stato solido

che utilizzano come materiale semiconduttore il carburo di silicio. Recente (2010) la presentazione da parte di Agarwal et al [49] dei risultati sperimentali relativi al funzionamento di un GTO SiC da 9KV dalle dimensioni ridotte (1 cm x 1 cm) sottoposto a regime di corrente impulsivo dell'ordine dei kA.

Configurazione serie

Come si evince dalla figura 2.6 i componenti elettronici di potenza sono interessati dalla corrente di carico durante le condizioni di normale funzionamento. Ciò provoca una caduta di tensione e un riscaldamento eccessivo dovuti alle perdite interne dei componenti. Conseguentemente è necessario prevedere un sistema di raffreddamento complesso che richiede dimensioni di ingombro notevoli.

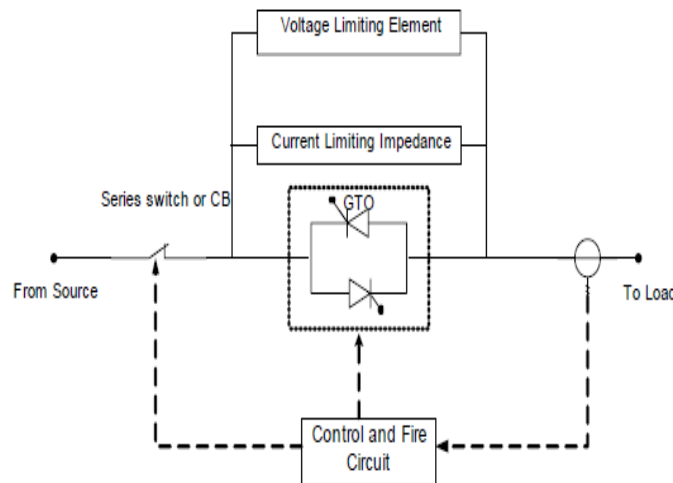


Figura 2.6: *SSFCL:configurazione serie [1]*

Configurazione parallelo

Il sistema è costituito da un interruttore ad intervento istantaneo sotto vuoto (VCB) connesso in parallelo a dei GTO come illustrato nella figura 2.7. I fattori chiave di questo sistema sono l'alta velocità di intervento dell'interruttore (VCB) unita alla elevata tempestività e velocità di rilevamento delle condizioni di guasto. Importante è anche la velocità di commutazione

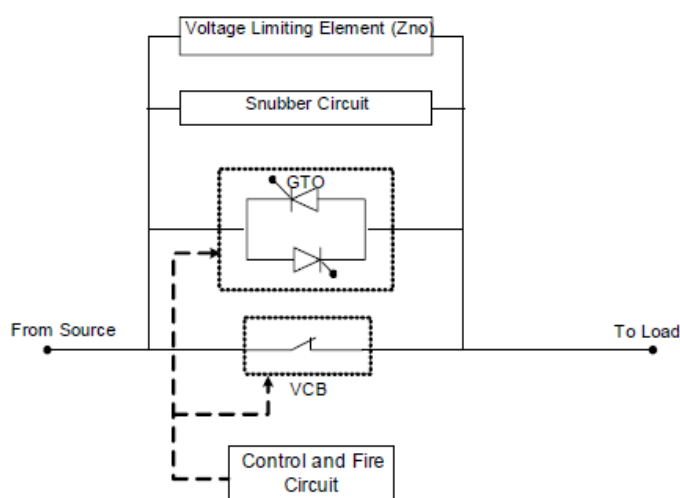


Figura 2.7: *SSFCL:configurazione parallelo [1]*

della corrente di guasto dal ramo VCB al ramo GTO e pertanto il circuito chiuso che questi due rami formano deve avere un ridotto valore di induttanza. In questo dispositivo la sequenza di operazioni da eseguire una volta rilevato il guasto sono: innescio di chiusura dei GTO, apertura del VCB i cui poli diventano sede di un arco elettrico, commutazione della corrente da VCB a GTO con estinzione spontanea dell'arco ed infine spegnimento mediante i circuiti snubber dei dispositivi GTO.

2.7.2 Tecnologia Superconduttiva

Dopo la scoperta della superconduttività, fissata ed attribuita H.K. Onnes nel 1911, bisogna aspettare il 1986 affinché il mondo della ricerca fosse scosso da nuovi stimolanti interrogativi, nonché da prospettive applicative di più ampio respiro. In tale data, infatti, J.G.Bednorz e K.A.Müller scoprirono che dei materiali ceramici opportunamente trattati mostravano un comportamento superconduttivo a temperature (azoto liquido, 77 K) ben al di sopra di quelle all'epoca conosciute (elio liquido 4 K)[50].

Dal punto di vista pratico il notevole innalzamento della temperatura critica ha aperto nuove prospettive per l'applicazioni dei materiali su larga scala e in particolar modo per i materiali HTS definiti di II tipo [2]. Questi ultimi a differenza, di quelli definiti di I tipo, ammettono un regime di

funzionamento superconduttivo anche se penetrati da un campo magnetico la cui intensità però non deve superare un valore massimo H_c ; quest'ultimo varia a seconda del materiale superconduttore preso in considerazione. Nella figura 2.8 è possibile apprezzare un ordine di grandezza dei valori di campo magnetico e di densità di corrente per differenti materiali superconduttori. Lo stato di superconduttore non dipende solo dalla temperatura critica T_c e

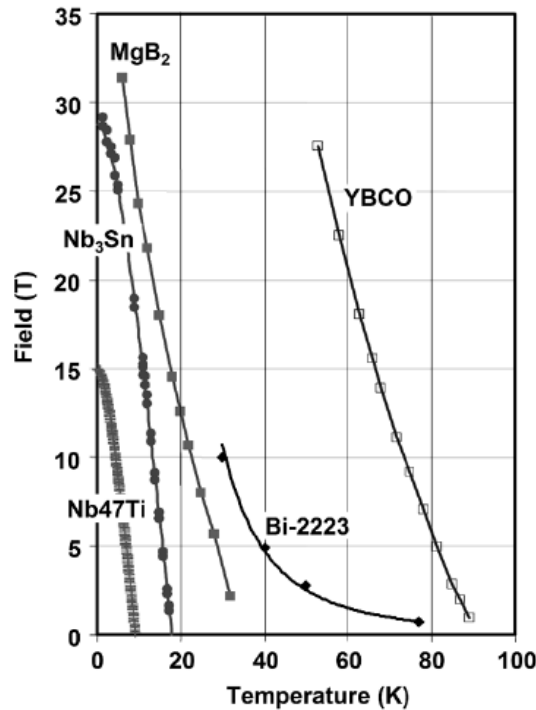


Figura 2.8: Diagramma di fase H - T per i materiali SC commercialmente disponibili[2]

dalla intensità del campo magnetico critico H_c , ma anche dal valore medio dell'intensità della densità di corrente J_c (figura 2.9) Tipicamente la caratterizzazione dei materiali SC avviene attraverso la seguente legge, conosciuta con il termine anglosassone di Power-law:

$$E(J, T) = E_c \cdot \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n(T)}$$

dove $E_c = 10^{(-4)} V/m$ e la J_c è la densità di corrente critica corrispondente. Il valore dell'indice n , così come E_c e J_c , dipendono dalla temperatura e dal

materiale SC.

Un andamento tipico a temperatura costante è illustrato nella figura 2.10 I

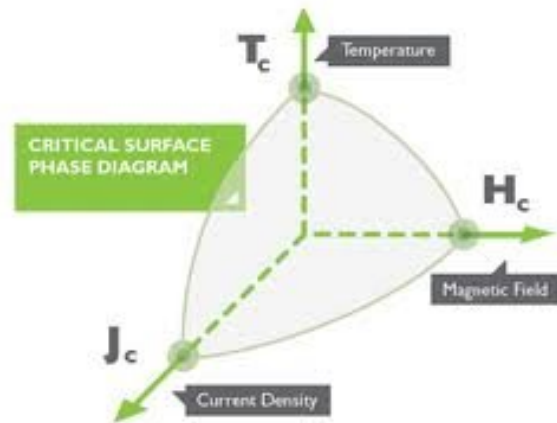


Figura 2.9: *Diagramma di fase tipico di un materiale superconduttore di tipo II*

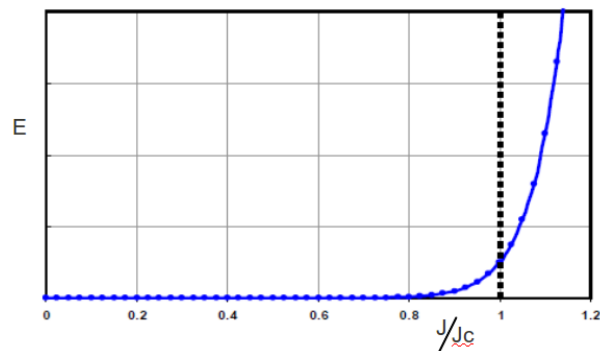


Figura 2.10: *Caratteristica tipica di un materiale SC per applicazioni SFCL*

materiali superconduttori ad alta temperatura critica trovano applicazione nei dispositivi FCL per due ragioni fondamentali:

1. hanno un automatismo intrinseco grazie alla proprietà fisica del materiale superconduttore di transire istantaneamente (pochi μs) e spontaneamente quando una delle tre grandezze fisiche (fig. 2.9) che lo caratterizzano, superano un determinato valore di soglia;

2. permettono, grazie al fatto di condurre corrente con resistenza praticamente nulla, significative riduzioni di peso, ingombro e dispersioni energetiche.

In base a queste caratteristiche fisiche, sono state sviluppate diverse tipologie di SFCL [51] in cui l'effetto limitante può essere ottenuto sfruttando la possibilità di far transire o meno il superconduttore dallo stato SC allo stato normale.

Un SFCL, in linea del tutto generale, può essere rappresentato attraverso lo schema di figura 2.11.

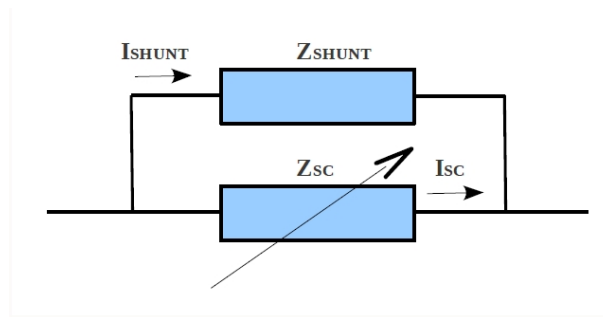


Figura 2.11: Schema elettrico di principio di un SFCL

Esso è composto da due componenti elettrici in parallelo di cui uno a parametri non lineari. Il componente elettrico lineare Z_{SHUNT} può essere un resistore oppure un induttore ed è realizzato con materiali conduttori di tipo convenzionale, mentre l'elemento Z_{SC} è un complesso circuito elettromagnetico che impiega materiali superconduttori ad alta temperatura critica T_c . Le modalità realizzative di Z_{SC} caratterizzano la tipologia di SFCL e

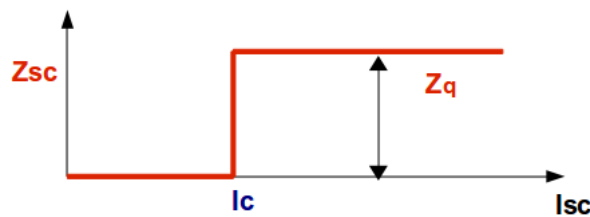


Figura 2.12: Funzionamento ideale della Z_{SC} non lineare in funzione della corrente

il suo principio di funzionamento [51]. Z_{SC} , che può essere una resistenza o un'induttanza, entrambe non lineari, dipende dal valore istantaneo della

corrente I_{SC} e nel suo concetto ideale implementa una funzione di tipo a gradino, così come illustrato in figura 2.12.

Ovviamente, in caso di transizione, va tenuto conto che il valore di soglia I_c si riduce per effetto dell'aumento della temperatura.

In condizioni di normale funzionamento, Z_{SC} ha un valore quasi nullo, pertanto l'impedenza Z_{SHUNT} è cortocircuitata, la corrente I_{SHUNT} è quasi nulla e il dispositivo SFCL è praticamente trasparente alla rete. Quando I_{SC} supera un valore di soglia I_C predeterminato, come di fatto avviene quando un evento di guasto di corto circuito si manifesta, allora Z_{SC} passa dal valore nullo ad un valore di progetto R_q se si tratta di un resistore non lineare oppure ad un valore L_q se si tratta di un induttore non lineare. I valori R_q e L_q sono scelti con il criterio di garantire un soddisfacente effetto limitante e condizioni di funzionamento durante il guasto che non compromettano le proprietà chimico-fisiche dei materiali superconduttori. Quindi la corrente limitata deve essere tale che il campo elettrico \vec{E} e la densità di corrente elettrica \vec{J} applicati nel verso di percorrenza della corrente non superino determinati valori nel materiale superconduttore.

Quest'ultima esigenza però potrebbe essere controproducente ai fini impiantistici, infatti il valore e la forma d'onda della corrente di guasto di corto circuito, o il valore di impedenza di rete, durante un guasto incidono sui tempi e sulle modalità di intervento delle protezioni. Quindi il valore di Z_{SHUNT} può essere scelto secondo le esigenze del gestore della rete evitando sostanziali modifiche al sistema di rivelazione del guasto. Il cambio di valore di Z_{SC} è istantaneo (pochi μs) e contribuisce con la presenza di Z_{SHUNT} a limitare la corrente di corto circuito già al primo picco.

A guasto estinto, avviene la fase di ripristino che può essere più o meno critica a secondo della tipologia di SFCL in esame.

2.7.3 Tecnologia Ibrida

Il concetto di limitatore di corrente di guasto di tipo ibrido prevede la possibilità di dirottare la corrente di guasto su più rami connessi in parallelo a diverso valore di impedenza. Ciò è possibile mediante l'impiego, a seconda dei casi, di superconduttori, semiconduttori, fusibili, interuttori convenzionali e/o a intervento istantaneo (fast switches). Il loro principio di funzionamento si basa sul fatto che la corrente di guasto viene limitata

in diversi step essendo dirottata dal percorso a impedenza nulla a quello a impedenza diversa da zero.

Lo studio delle tecnologie ibride è stimolato dalla necessità di superare alcune problematiche tecniche ed economiche legate all'applicazione pratica e alla commercializzazione dei limitatori di corrente di guasto emergenti, in particolare di quelli superconduttivi [52] dove il volume di materiale superconduttore può raggiungere quantità ragguardevoli (30000cm^3 per un prototipo di classe 15 kV e 1250 A nominali)[53]. A parte dei tentativi di prototipi di laboratorio in piccola scala [54], l'unico FCL ibrido che ha visto l'impiego in una rete in MT [55] è quello presentato da G.H. Lee et al [3], di cui viene mostrato uno schema di principio in figura 2.13. Questo prototipo era stato preceduto da una prima versione bocciata dalla utility per la presenza di un fusibile che interveniva sistematicamente in fase di limitazione [56]. La soluzione di figura 2.13 sfrutta la proprietà dei materiali superconduttori di transire in pochissimi μs dallo stato superconduttivo a quello di normale conduzione. Durante le condizioni di normale funzionamento tutta la corrente attraversa il ramo in cui è connesso un elemento superconduttivo, mentre i restanti rami connessi in parallelo risultano cortocircuitati.

All'insorgenza del guasto l'elemento superconduttivo transisce opponendo un valore di resistenza non elevato ma sufficiente a commutare buona parte della corrente di guasto nella bobina la quale genera un forte campo magnetico. Le forze magnetiche conseguenti garantiscono l'apertura istantanea dell'interruttore del circuito principale, interrompendo la corrente residua nell'elemento superconduttivo, e la chiusura del circuito del ramo comprendente l'elemento resistivo limitatore. In tal modo il guasto di corto circuito viene gestito dal limitatore resistivo. L'elemento superconduttivo non ha l'obiettivo di limitare la corrente di corto circuito ma quello di fungere da sensore e attuatore (deviare la corrente nel ramo adiacente), pertanto la quantità utilizzata è talmente ridotta da abbattere i costi di quasi il 90% rispetto a un dispositivo SFCL. Tale limitatore però non garantisce la limitazione nella prima semionda della corrente di guasto non essendo ancora risolte le problematiche legate alla disponibilità tecnica e commerciale di interruttori adeguati ad intervento istantaneo.

Tuttavia la tipologia ibrida potrebbe trovare un suo impiego parziale per risolvere le questioni legate alle problematiche dei lunghi tempi di recupero per quelle tipologie di SFCL che sfruttano il principio di transizione dallo

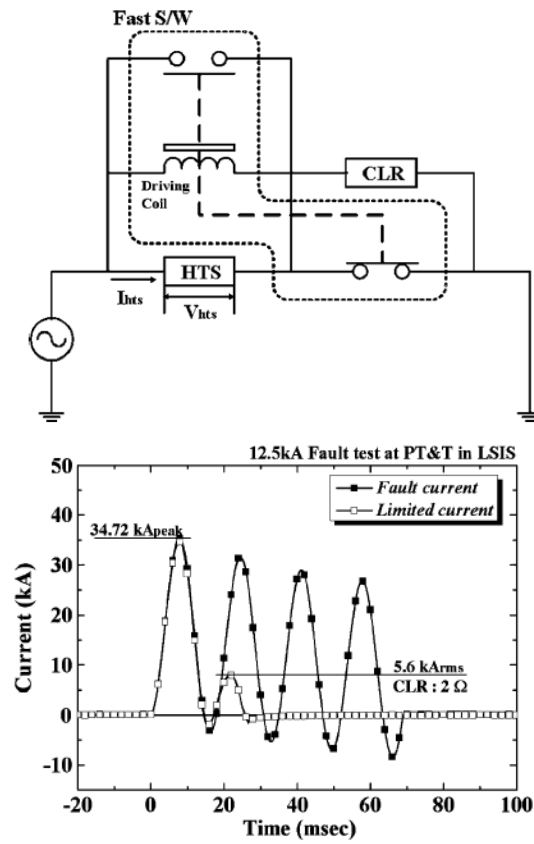


Figura 2.13: Test di laboratorio su SFCL ibrido del tipo non limitante nel primo semiperiodo [3]

stato SC a quello di normale conduzione come illustrato nella figura 3.7 di pagina 36.

Capitolo 3

Tipologie di SFCL

Nel seguente capitolo vengono illustrati i principi di funzionamento delle diverse tipologie di dispositivi di SFCL e il relativo stato dell'arte. Le tipologie di SFCL resistivo e di tipo a ponte, riportate nel paragrafo 3.1 e 3.2, sono state trattate con maggiore dettaglio anche in riferimento allo sviluppo e allo stato dell'arte, in quanto il concetto innovativo DC Resistive SFCL prende spunto proprio dall'applicazione sinergica delle loro caratteristiche funzionali. Per completezza vengono riportati anche le caratteristiche funzionali di altri tipi di SFCL per i quali il livello di approfondimento è funzione della quantità e qualità dei prototipi realizzati.

3.1 SFCL Resistivo

Nella figura 3.1 è illustrato il circuito elettrico di un SFCL resistivo:

E' costituito da due elementi fondamentali:

1. un elemento superconduttivo R_{SC} che implementa un resistore non lineare il cui comportamento dipende in ogni istante dalle tre grandezze fisiche \vec{J}, \vec{B}, T che lo caratterizzano e dal tipo di materiale utilizzato;
2. un elemento conduttore convenzionale Z_{SHUNT} ovvero un'impedenza lineare che può essere un resistore o un induttore

Il suo principio di funzionamento si basa sulla proprietà dei materiali superconduttori di transire istantaneamente dallo stato superconduttivo a quello di conduzione normale.

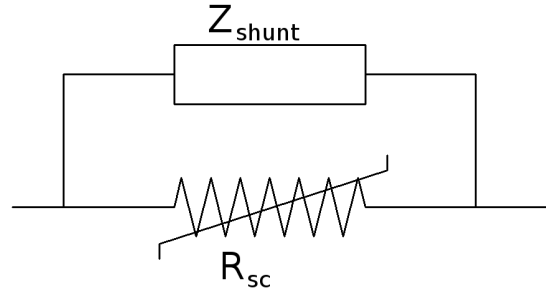


Figura 3.1: *Schema di principio di un Resistive SFCL*

Facendo riferimento alla figura 2.10 di pagina 24 che riporta la caratteristica E-J del materiale SC, durante le condizioni di normale funzionamento la resistenza dell'elemento R_{SC} , e di conseguenza il campo elettrico $|\vec{E}|$, risultano essere di valore trascurabile o nullo; quindi il dispositivo è praticamente invisibile alla rete elettrica.

Durante le condizioni di guasto invece la corrente di corto circuito supera il valore della corrente critica portando il superconduttore a transire e ad aumentare la sua resistenza istantaneamente ed esponenzialmente ad un valore R_q , che in parallelo all'impedenza Z_{SHUNT} , contribuisce a limitare la corrente di guasto.

Ovviamente il dispositivo è progettato in modo tale che il valore della corrente nominale sia inferiore al valore di corrente critica.

Durante le condizioni di normale funzionamento, inoltre, l'elemento superconduttivo R_{SC} diventa sede di perdite (AC losses) in quanto attraversato da una corrente alternata. Tali perdite insieme a quelle dovute ai discendenti di corrente rappresentano le componenti dissipative più significative che avvengono nella camera criostatica.

Per le sue caratteristiche di elevata compattezza, assenza di accessori di controllo e sicurezza intrinseca, il dispositivo SFCL di tipo resistivo vanta il maggior numero di prototipi realizzati [5] ed è quello che ha maggior credito dalla comunità scientifica in termini di possibilità di soddisfare a breve termine i requisiti tecnici ed economici richiesti ed elencati nel paragrafo 2.3 di pagina 12.

Lo stato di sviluppo e dell'arte di questa tipologia di SFCL è stato fortemente condizionato dall'evoluzione tecnologica relativa alla realizzazione dell'elemento di materiale superconduttivo R_{SC} che rimane il cuore e l'elemento centrale dell'intero sistema.

Sui Materiali

Bulk

In un primo momento l'elemento superconduttivo R_{SC} è stato realizzato attraverso percorsi e/o meandri ricavati su piatti o volumi di materiale superconduttore che si presentavano in forma massiccia, detti a "biscotto" o "bulk" in gergo anglosassone. Un esempio di un modulo R_{SC} bulk è rappresentato in figura 3.2

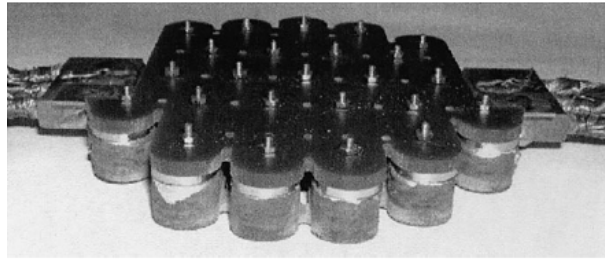


Figura 3.2: *Percorso a meandri di YBCO melt textured polycrystalline $l=1.1$ m [4]*

Questi ultimi però peccavano in affidabilità [4] in quanto il processo produttivo per realizzarli non garantiva l'uniformità e l'omogeneità, nel volume massiccio, di alcune caratteristiche tecniche, in particolare della corrente critica[57, 58]. Pertanto accadeva, soprattutto in fase di limitazione e quindi in prossimità della fase di transizione che sovrariscaldamenti localizzati ("hot spots") dovuti a transizioni parziali e puntuali portavano il materiale superconduttore a subire danneggiamenti irreversibili.

Altra caratteristica critica dei materiali superconduttivi HTS è la elevata fragilità dovuta essenzialmente alla loro natura ceramica.

Pertanto l'approccio bulk è stato presto abbandonato a parte una soluzione tecnologica che sfrutta il concetto di transizione assistita dal campo magnetico.

Degno di nota, a riguardo, è lo sviluppo di un progetto di un SFCL avvenuto in Germania, denominato CURL10 [59]. Esso utilizza un dispositivo innovativo (vedi figura 3.3) che, sfruttando la dipendenza del valore della corrente critica dal campo magnetico applicato, risolve almeno in parte la problematica degli hot spots nella fase di limitazione[60].

L'elemento base è una bobina bifilare antinduttiva ricavata per incisione da un tubo cilindrico di $BiSCCO_{2212}$ adeguatamente sagomato e forgiato (Mealt Cast Processing). Essa è coassialmente inserita in una bobina induttiva, questa volta ottenuta con materiale convenzionale, e connessa elettricamente in parallelo a quest'ultima. Durante le condizioni di normale funzionamento la bobina di rame convenzionale è cortocircuitata dal materiale superconduttore.

Durante le condizioni di guasto, la transizione inizia nei punti più deboli (weakest spots) facendo aumentare localmente la resistenza R_{SC} . La tensione che nasce per effetto della transizione locale richiama corrente nella bobina induttiva, la quale produce un campo magnetico che contribuisce ad abbassare e a rendere omogeneo il valore di corrente critica in tutti i punti del materiale.



Figura 3.3: *MCP $BiSCCO_{2212}$ bobina bifilare con particolare dei contatti ed isolamento*

Questo dispositivo SFCL resistivo vanta la prima commercializzazione avvenuta nel 2009 a cura della Nexans [61] anche se non sono noti i costi di

acquisto. Ad oggi non vi è notizia di fabbricazione di prototipi di questa tipologia per applicazioni in alta tensione sebbene in letteratura vi è traccia di una stima e di una progettazione di massima per un prototipo da 110 kV [62]

Nastri di prima generazione 1G HTS

In questo caso l'elemento R_{SC} è di fatto realizzato da un nastro composito da un materiale superconduttivo e da materiali convenzionali. Esso deve soddisfare i seguenti requisiti:

- una elevata j_c in modo da ridurre il numero di conduttori da mettere in parallelo per raggiungere la I_n di progetto
- basse perdite in regime AC nelle normali condizioni di funzionamento al fine di minimizzare i costi di refrigerazione;
- un'ottima resistenza meccanica per far fronte alle sollecitazioni termomeccaniche e magnetiche, soprattutto durante la fase di limitazione
- una buona stabilità termica ed elettrica per evitare stress termici localizzati "hot spots"
- una ottima resistenza dielettrica tra gli strati di materiale che compongono il conduttore per far fronte alle sollecitazioni elettriche durante la fase di limitazione, soprattutto per le applicazioni in alta tensione (rigidità elettrica dei buffer)

A titolo di esempio viene illustrato in figura 3.4 una sezione di un nastro *BiSCCO* della Sumitomo, dove è possibile notare i filamenti di materiale SC immersi nella matrice di argento. Quindi per risolvere il problema elettrotermico, i nastri prevedono, tipicamente, un contatto stretto e continuo con un metallo convenzionale ad elevata capacità e conducibilità termica. Tale strato di materiale costituisce la matrice del composito. Con il termine di substrato invece si intende lo strato metallico a cui è dato il compito di assorbire le sollecitazioni meccaniche altrimenti letali per un materiale altamente fragile come quello dei superconduttori ceramici. Spesso tra questi materiali vi sono delle pellicole (buffer) che fanno da isolante chimico ed elettrico per evitare il degrado molecolare e i processi di ossidazione.



Figura 3.4: Sezione di un nastro $BiSCCO_{2223}$ 1G HTS

La conseguenza di questa soluzione tecnica, però, è che per avere elevati valori di resistenza transita R_q sono necessarie elevate lunghezze e quindi grandi volumi di materiale SC. La conducibilità elettrica della matrice, infatti, ha valori relativamente grandi. L'utilizzo di grandi volumi di materiale SC comporta un aggravio dei costi di fabbricazione e una dissipazione di potenza eccessiva nel criostato durante le normali condizioni di funzionamento. Il processo di produzione di nastri così realizzati avviene in linea del tutto generale attraverso fasi di sinterizzazione delle polveri e di estrusione dei compositi. Questi vengono detti di prima generazione e sono identificati con la sigla 1G HTS.

Una criticità di tali nastri è rappresentata dall'utilizzo ingente di materiali nobili o quasi, come per esempio dell'argento nel caso del $BiSCCO$ e dell'oro e dello zaffiro nel caso dell' $YBCO$. Quest'ultimi tra l'altro sembrano essere particolarmente delicati e soggetti a rottura durante la fase di limitazione [63]. In Italia si sta portando avanti una importante collaborazione tra due prestigiose realtà ovvero tra Erse Spa e la utility elettrica A2A in merito ad un progetto avviato nel 2008 il cui obiettivo è progettare, realizzare e testare in rete, un prototipo da 15 MVA che utilizza nastri in $BiSCCO$ 1G HTS per applicazioni in media tensione [64].

Nastri di seconda generazione 2G HTS CC (coated conductor)

Al fine di ridurre la lunghezza e le perdite in regime AC sono stati sviluppati invece nastri detti di seconda generazione o 2G HTS CC . Questi sono realizzati sfruttando processi di produzione derivati dalla nanotecnologia che rendono possibile stendere su un supporto di una lega di materiale convenzionale ad alta resistività successivi rivestimenti (coated) di bassissimo spessore tra i quali quello di materiale superconduttore dell'ordine del micron. In figura 3.5 è possibile notare il numero di strati e la complessità dell'oggetto.

Ad oggi, il costo di tali nastri 2G HTS e i loro tempi di produzione risultano essere però proibitivi anche se in futuro sono previste migliorie [65] sia dal punto di vista del processo produttivo che da quello dei costi così come si può vedere dal grafico estimativo di figura 3.6

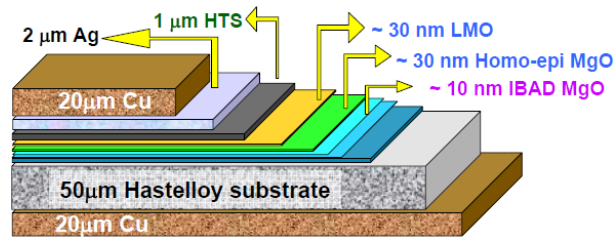


Figura 3.5: *Nastro YBCOCC 2G HTS AMSC*

Pur nelle rosee e ottimistiche previsioni che il costo e la produzione dei nastri 2G HTS CC possa soddisfare un giorno le richieste del mercato rimane tra le questioni ancora non risolte quella dovuta alle perdite in regime AC e al tempo di recupero [66].

In effetti a causa della transizione e del riscaldamento durante la fase di limitazione è poi necessario un certo intervallo di tempo per ripristinare le condizioni esistenti prima dell'insorgenza del guasto. Il sistema criogenico, infatti, deve smaltire l'energia termica accumulata durante la fase di limitazione in tempi compatibili con quelli richiesti dalla rete che sono dell'ordine di poche centinaia di millisecondi.

Allo stato dell'arte, al fine di risolvere la problematica del tempo di ripristino e scalare il livello di tensione dalla media all'alta tensione, sono

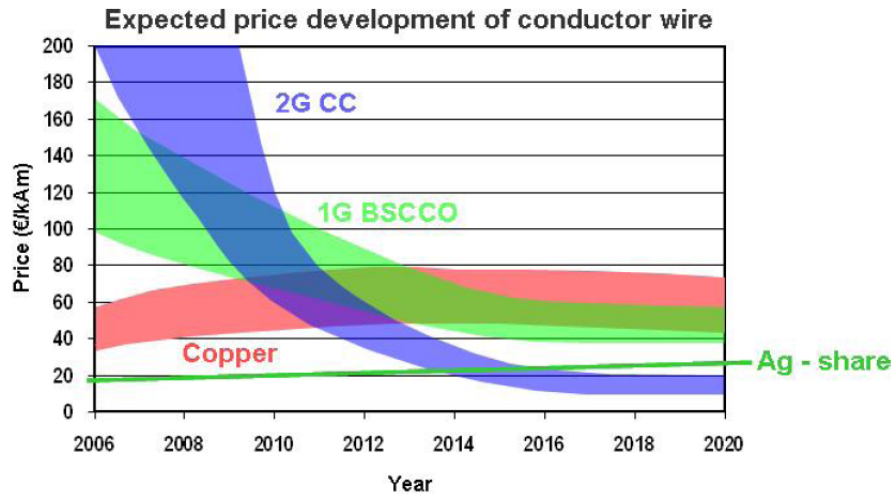


Figura 3.6: *Proiezione stima dei costi dei nastri HTS*[5]

stati individuati due diversi approcci per la realizzazione di prototipi di SFCL resistivi di classe 138 kV.

Nel progetto denominato Super Limiter [6], guidato dalla AMSC, si è scelta la soluzione ibrida che prevede l'introduzione nel sistema di un interruttore ad intervento istantaneo (Fast Switch) inserito in serie all'elemento R_{SC} (vedi figura 3.7).

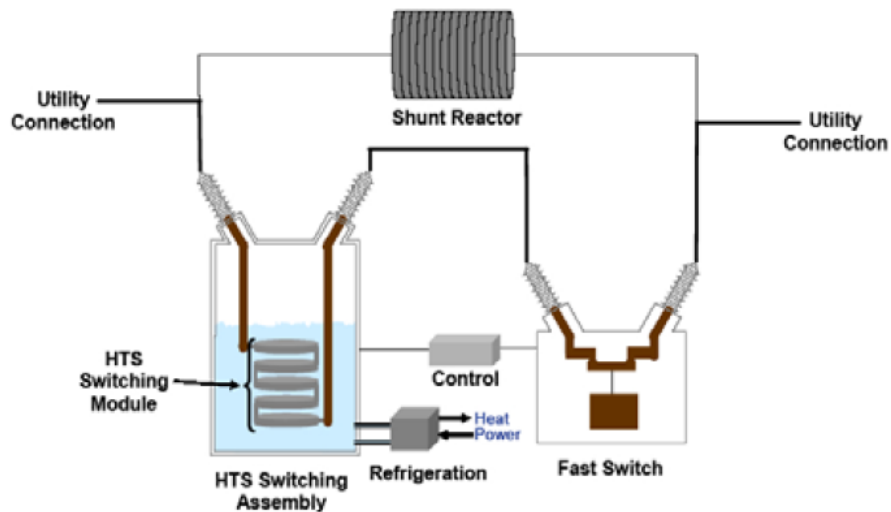


Figura 3.7: *Schema Prototipo SFCL AMSC* [6]

L'interruttore, all'occorrenza del guasto, isola rapidamente il superconduttore dopo che la maggior parte delle corrente è passata sull'elemento shunt, consentendo all'elemento superconduttore di iniziare il ciclo di recupero, mentre l'azione di limitazione è sostenuta dalla Z_{shunt} . In ogni caso per agevolare il funzionamento dell'interruttore FS, tale da garantire una rapida estinzione del guasto, è necessario che l'effetto limitante dell'elemento R_{SC} sia il più elevato possibile e ciò potrebbe comportare comunque l'utilizzo di grande quantità di materiale.

L'altro progetto, capitanato dalla SuperPower, prevede invece un recupero sotto carico (RUL ovvero Recovery Under Load). Per tale approccio la criticità sta nel progettare e realizzare un dispositivo SFCL, ma soprattutto un nastro HTS, che possa lavorare nelle condizioni richieste [67].

3.2 SFCL di tipo a ponte

Il concetto di SFCL di tipo a ponte (bridge type) è stato introdotto da H. J. Boening nel 1983 [7]. Come si evince dalla figura 3.8 esso utilizza un ponte di diodi (D1-D4), un induttore L e un generatore di tensione V_b .

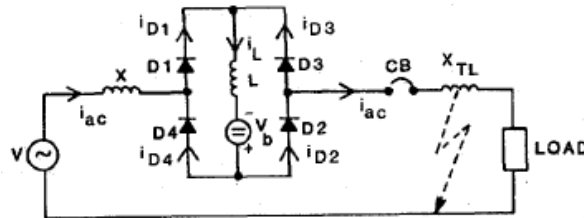


Figura 3.8: Schema elettrico monofase di principio[7]

In pratica il sistema implementa un induttore non lineare la cui induttanza è nulla per valori della corrente di linea minori di un determinato valore di soglia I_0 , mentre è pari ad un valore costante L per valori di corrente superiori. Il generatore di tensione V_b , che può essere realizzato mediante un ponte di Graetz, serve a compensare la caduta di tensione sui diodi e fornisce la corrente i_L che attraversa l'induttore. Il valore di soglia I_0 è scelto in modo da essere superiore al valore massimo di picco della corrente di linea a pieno carico. Quindi durante le condizioni di normale funzionamento i diodi, da

D1 a D4, sono polarizzati direttamente da V_b e percorsi dalla corrente di valore $\frac{I_0}{2}$ e l'induttore L risulta essere corto circuitato. Pertanto, a meno delle cadute sui diodi, il limitatore e la rete non hanno alcuna influenza reciproca.

Come si può osservare in dettaglio in figura 3.9, la corrente di linea I_{line} tenderebbe a ripartirsi nei due rami in parallelo del ponte ACB e ADB , mentre quella generata da V_b si ripartisce nei rami in parallelo DAC e DBC .

Dove sono presenti i diodi D1 e D4 e cioè nei rami AC e DB metà della corrente di linea è equiversa sommandosi alla corrente $\frac{I_0}{2}$ prodotta dal generatore V_b , pertanto è lecito scrivere:

$$I_{DB} = I_{AC} = \frac{I_0 + I_{line}}{2}$$

mentre nei rami AD e CB, in cui sono presenti rispettivamente i diodi D2 e D3, le due correnti sono di verso opposto e quindi si sottraggono; per cui si può scrivere:

$$I_{DB} = I_{AC} = \frac{I_0 - I_{line}}{2}$$

Da quanto detto appare chiaro che i diodi D3 e D2 rimangono in conduzione fin quando il valore $\frac{I_0 - I_{line}}{2}$ è positivo, cioè fin quando $I_0 > I_{line}$.

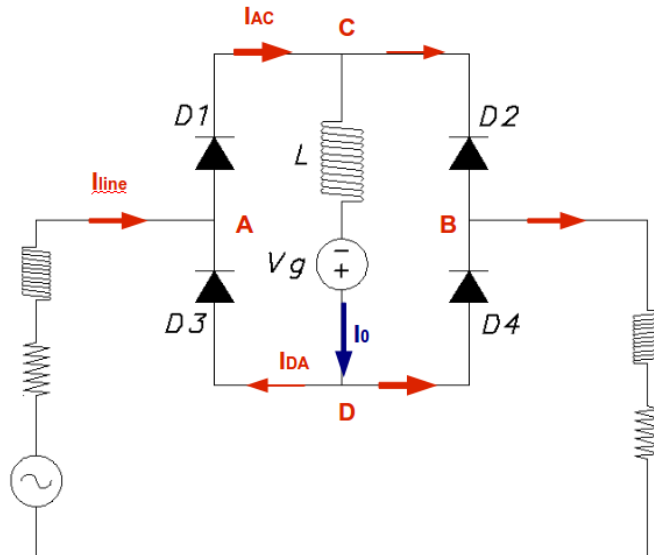


Figura 3.9: Flussi delle correnti nei diodi in condizioni di normale funzionamento

La situazione si ripete ovviamente a parti invertite per la coppia di diodi D1-D4 e D2-D3 nel caso di semionda negativa della corrente di linea.

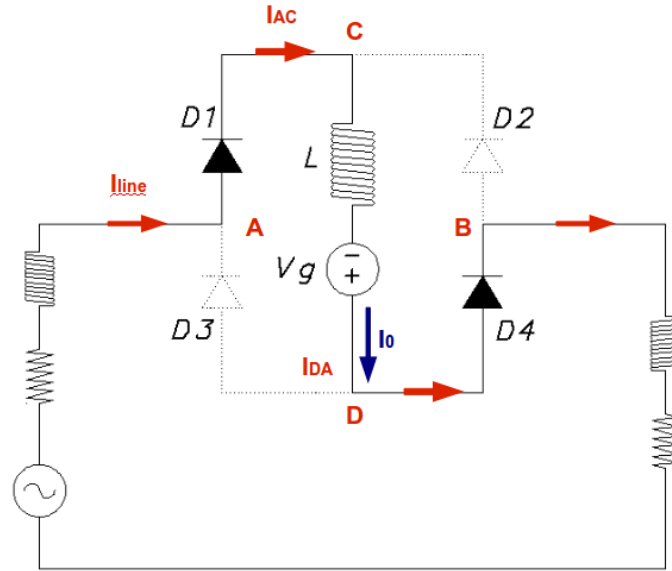


Figura 3.10: *Flussi delle correnti nei diodi in condizioni di guasto*

In condizioni di guasto invece la corrente di linea cresce istantaneamente in ampiezza raggiungendo il valore I_0 . In questo preciso istante una delle due coppie di diodi, D2 e D3 nell'esempio di figura 3.10, risulta contropolarizzata entrando in uno stato di interblocco. In questo caso si ha:

$$I_{line} = I_{AC} = i_L = I_{DB}$$

L'induttore allora è inserito istantaneamente in serie al circuito di linea contribuendo con la propria induttanza costante L a limitare il valore della corrente di guasto.

Al fine di ridurre l'ingombro e le perdite sarebbe opportuno che la bobina L fosse realizzata utilizzando materiali HTS.

Questo limitatore ha il vantaggio di essere interamente automatico senza la necessità di complessi sistemi di controllo e di prestanti sensori. Inoltre, da notare l'assenza di transizione del materiale HTS e quindi ciò porta ad avere un recupero istantaneo dopo l'estinzione del guasto. Una criticità sta nel fatto che la realizzazione pratica di un induttore a induttanza di valore

relativamente elevata e costante, sia nel caso che questo venga realizzato con materiali convenzionali che con materiali SC, rimane un aspetto non di poco conto in quanto problemi connessi alla saturazione del materiale ferromagnetico in un caso, e di elevati valori del campo induzione nel materiale SC nell'altro, potrebbero introdurre eccessi di dimensionamento tali da mettere in seria discussione la fattibilità dell'intero sistema [68].

Sulla base di tale concetto, preceduto da diversi step di sviluppo [69] dove è stata ravvisata l'inopportunità della presenza del generatore di tensione V_b , è stato costruito e testato dalla General Atomics un prototipo di 15 kV, 18 MVA [70]. Tale progetto ha apportato tre elementi innovativi (figura 3.11):

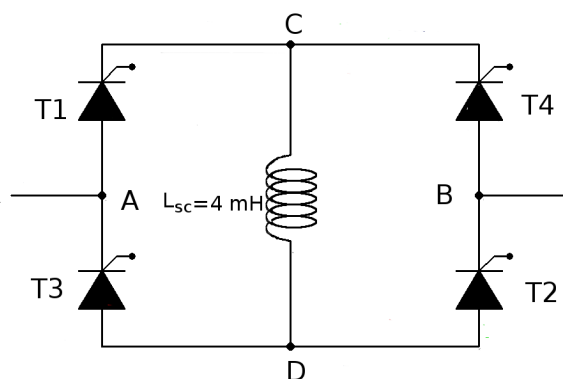


Figura 3.11: *Schema di principio del HTS FCC General Atomics*

1. è stato ritenuto vantaggioso implementare l'induttore L attraverso la fabbricazione di un avvolgimento superconduttivo (15 kM di nastro BiSCCO 2223 per fase)
2. attraverso la sostituzione dei diodi con dei tiristori si è dotato il sistema della capacità di interrompere la corrente di guasto oltre che limitarla;
3. si è eliminato il generatore V_b in quanto ritenuto non necessario;

L'utilizzo di tiristori al posto dei diodi ha comportato ovviamente una complicazione aggiuntiva dovuta all'inserimento di sistemi di innesco dei gate. E' vero però che le funzioni ulteriori di controllo e interruzione della corrente di guasto conferiscono al dispositivo un valore aggiunto. In questo caso

viene utilizzato l'acronimo FCC (fault current controller) al posto di FCL. Il fatto di aver eliminato il generatore V_b , che rappresenta una semplificazione costruttiva non di poco conto, comporta una variazione di comportamento del sistema durante la condizione di normale funzionamento. L'induttore infatti a regime è sottoposto in ogni semiperiodo ad una fase di carica e una fase di scarica il cui effetto è rappresentato dalla forma oscillante (ripple) della corrente in esso circolante, come si evince dai grafici di figura 3.12. Le fasi di carica e di scarica si ripetono quindi con una frequenza doppia rispetto a quella di rete.

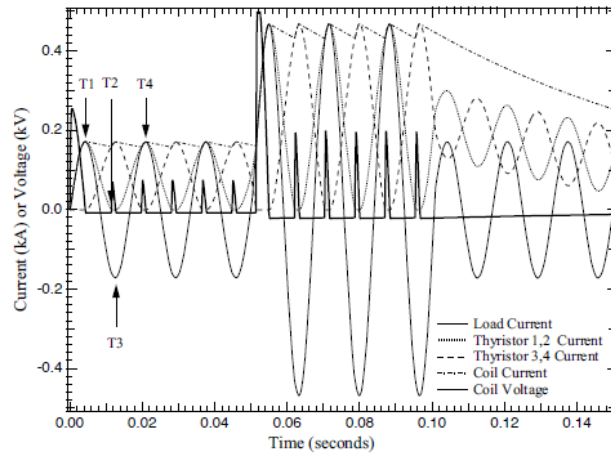


Figura 3.12: *Andamenti delle onde di tensione e di corrente [8]*

Durante la fase di carica, l'induttore è connesso in serie alla linea e interviene modificando la forma d'onda della corrente e della tensione applicata sul carico.

Ne consegue quindi una variazione del tasso armonico THD della tensione e della corrente, il quale è funzione sia del valore dell'induttanza dell'avvolgimento superconduttivo che della resistenza complessiva equivalente del circuito di evoluzione libera del ponte CDBC e CDAC.

In ogni caso il principio di funzionamento sarà meglio e più dettagliatamente illustrato nel paragrafo 4.2 di 57

Un aspetto da non trascurare è proprio il valore della induttanza. Infatti è stato evidenziato in [71] che per avere soddisfacenti effetti limitanti bisogna scegliere dei valori dell'induttanza di L relativamente grandi. D'altra parte

però, ciò comporta influenzare in modo inaccettabile la forma di corrente e di tensione, soprattutto durante le manovre di inserzione dei carichi.

In [72] è stato definito un range di valori dell'induttanza dell'avvolgimento L (0.7-1.2)p.u. che potrebbe rappresentare il giusto compromesso affinché si possa ottenere una corrente di guasto non superiore a 10 volte la corrente nominale e un buco di tensione non superiore al 20% durante le manovre di inserzione dei carichi.

Tuttavia, tale studio non fa riferimento se tale compromesso possa essere compatibile con gli standards qualitativi delle varie nazioni che ospitano i sistemi elettrici (per esempio in europa sono vigenti gli standards EN 50160).

Gli stessi autori hanno poi proposto in seguito soluzioni che comportavano la sostituzione dell'induttore L ad induttanza costante con un induttore che presenta invece una induttanza variabile.

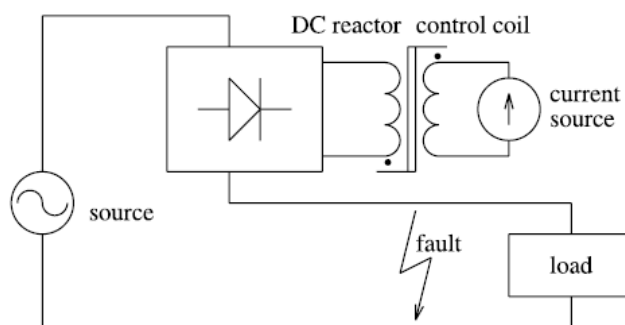


Figura 3.13: *Schema di principio del Saturated DC Reactor type SFCL*[9]

Nel 2001 viene proposto in [9], dove si rimanda per ulteriori dettagli, di sostituire l'induttore L con un induttore che utilizza le proprietà di funzionamento del limitatore superconduttivo a nucleo di ferro saturato presentato nel paragrafo 3.5 a pagina 48 (vedi figura 3.13).

Nel 2004 viene proposto una versione più semplificata di quella illustrata nella figura 3.13 così come dichiarato dagli autori [10]. Come induttore variabile viene proposto un induttore variabile a nucleo schermato (vedi figura 3.14).

Infine sempre nel 2004 in [11] viene proposto un induttore variabile a flusso bloccato (figura 3.15). I due avvolgimenti M ed T , entrambi superconduttivi, sono accoppiati magneticamente ed in modo che i rispettivi flussi magnetici possano eliminarsi a vicenda. Nelle normali condizioni di funzionamento l'induttanza di livellamento del ripple di corrente è data dalla

induttanza di dispersione dei due avvolgimenti. L'avvolgimento T è caratterizzato dall'aver una corrente critica minore rispetto a quello M per cui, in condizione di guasto, esso transisce mentre l'avvolgimento M rimane superconduttivo. La transizione di T comporta una rottura dell'equilibrio dei due flussi esistente precedentemente, e pertanto la nascita istantanea di una caduta di tensione induttiva dovuta al flusso diverso da zero che insiste tra i due avvolgimenti.

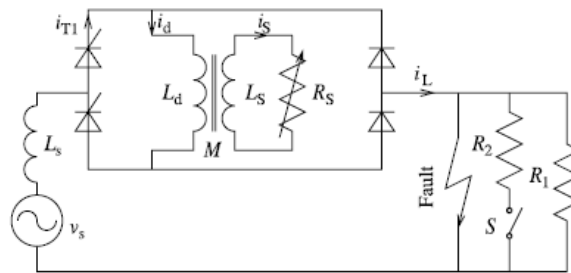


Figura 3.14: *Schema di principio del DC Shield Reactor type SFCL[10]*

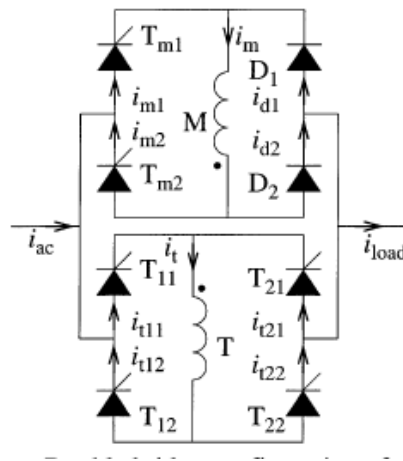


Figura 3.15: *Configurazione a doppio ponte del Rectifier Type SFCL with Non-Inductive Reactor[11]*

Quest'ultimo, nella sua versione a doppio ponte (figura 3.15), presenta il vantaggio ulteriore dato dalla possibilità di poter comandare i tiristori nel ponte comprendente l'avvolgimento T interrompendo la corrente in modo

da consentire un agevole ripristino e non sollecitare ulteriormente il sistema criogenico. Ciò però obbliga a sostituire tutti i diodi del ponte con dei tiristori. Una ulteriore funzione è quella di poter limitare le correnti di spunto dovute alle ordinarie manovre di inserzione di grandi carichi induttivi semplicemente escludendo l'avvolgimento T

3.3 SFCL a Nucleo Schermato

Questa tipologia di SFCL, detto anche induttivo, è costituito da un nucleo ferromagnetico, un avvolgimento primario in rame ed un tubo cilindrico di materiale superconduttore che svolge la funzione del circuito secondario (vedi figura 3.16).

Il principio di funzionamento è, in pratica, quello di un trasformatore il cui circuito primario è inserito in serie alla linea o al carico da proteggere, mentre il secondario è cortocircuitato come illustrato nello schema di principio di figura 3.17.

In condizioni di normale funzionamento il circuito secondario realizza di fatto un corto circuito che annulla il flusso magnetico nel nucleo. Quest'ultimo viene deviato all'esterno della superficie che si trova tra il circuito superconduttivo e l'avvolgimento primario attraversando necessariamente le superfici del criostato.

In tali condizioni il sistema è dimensionato in modo che la corrente di massimo carico circolante nel secondario sia inferiore al valore di corrente critica del circuito superconduttivo. L'impedenza residua è molto bassa ed è determinata dalla resistenza del circuito primario e dall'induttanza di dispersione dell'accoppiamento tra il circuito primario e secondario.

In condizioni di guasto la corrente al secondario supera il valore della corrente critica portando il materiale superconduttore del circuito secondario a transire allo stato normale e a perdere la sua proprietà schermante. Quindi si hanno due contributi all'effetto limitante: uno dovuto all'incremento dell'induttanza dovuta alla magnetizzazione della porzione di nucleo precedentemente schermata, l'altro dovuto alla resistenza di transizione equivalente del circuito secondario riportata al primario $N_1^2 R_{SC}$.

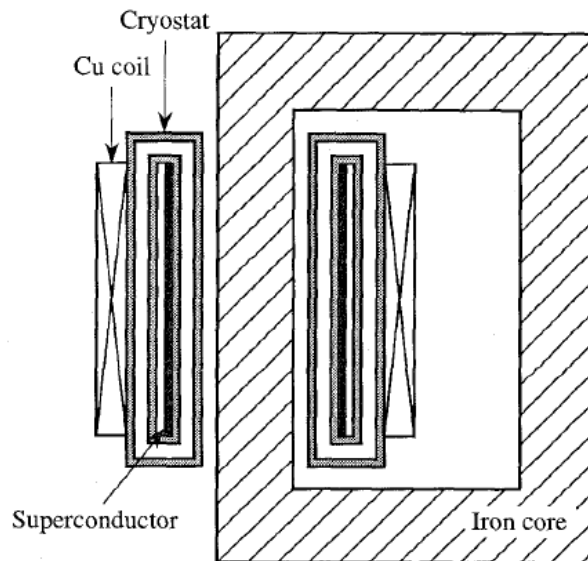


Figura 3.16: Grafico struttura di principio di un SFCL a nucleo schermato [12]

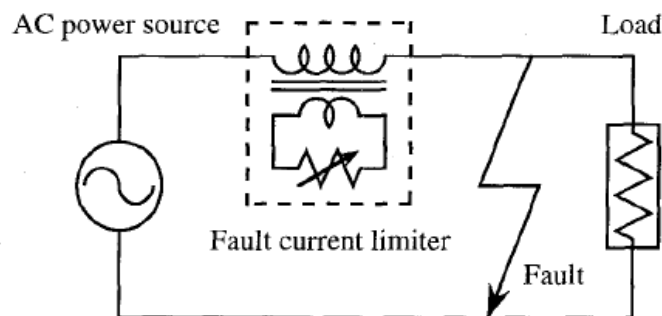


Figura 3.17: Schema elettrico di principio di un SFCL a nucleo schermato [12]

Tale tipologia ha il vantaggio di evitare l'uso dei discendenti di corrente e di far lavorare il materiale superconduttore ad elevate correnti ma a livelli di tensione limitati, mentre presenta dei tempi di recupero elevati. La problematica maggiore è legata all'ingombro e al peso dovuto all'impiego massiccio di materiale ferromagnetico che sono paragonabili a quelli di un trasformatore della stessa taglia. Questa tipologia di limitatore vanta la realizzazione da parte di ABB del primo prototipo in media tensione (1.2 MVA, 10.5 kV, 70 A) di un dispositivo SFCL testato in una centrale idroelettrica

a protezione di una linea di alimentazione dei servizi ausiliari [73]. Già dai primi studi, dubbi relativi alla scelta del *BiSCCO*₂₂₂₃ bulk quale materiale HTS da utilizzare per la realizzazione del circuito schermante, vengono avanzati in merito alle caratteristiche di fattibilità e scalabilità del concetto [74] e definiti dei requisiti per i materiali HTS da tenere in conto per evitare problematiche legate al fenomeno del flux-jumping.

Una soluzione recente è stata proposta in [75] dove l'intero dispositivo, ovvero il circuito primario e il secondario chiuso in corto circuito, è realizzato mediante l'utilizzo di un nastro in BiSCCO della Sumitomo. Per tale realizzazione è impiegata una tecnica di avvolgimento particolare (rewound) che mira a ridurre l'induttanza del circuito secondario L_2 aumentandone la resistenza R_2 in modo che l'effetto limitante sia massimizzato e realizzato con il contributo della reattanza del circuito primario.

3.4 SFCL Trasformatore

Per risolvere la problematica dell'ingombro e del peso elevati è stato proposto di integrare il concetto di limitatore HTSFCL a nucleo schermato in un trasformatore di potenza [13] (vedi figura 3.18).

In questo concetto, definito con l'acronimo CLT, la limitazione della corrente di guasto avviene non solo per effetto dell'aumento istantaneo dell'impedenza interna del trasformatore, ma anche per una altrettanto istantanea e significativa attenuazione della tensione di alimentazione.

Il secondario, infatti, è costituito da due avvolgimenti accoppiati magneticamente e avvolti in senso opposto in modo che la forza elettromotrice totale sia data dalla differenza di quella raccolta su W_2 e W_S .

In condizione di normale funzionamento il flusso che si concatena in W_S è nullo in quanto schermato dal tubo cilindrico fatto di materiale superconduttivo, per cui la tensione al secondario sarà data dal contributo, a meno delle perdite, della forza elettromotrice raccolta da W_2 . In condizioni di guasto, il tubo cilindrico HTS transisce permettendo al flusso magnetico di concatenarsi con W_S , quindi la tensione al secondario sarà ridotta del contributo di tensione raccolto su W_S . Di questo concetto però, a parte studi comparativi proposti da Sokolovsky [76], non si registrano in letteratura sviluppi e test di prototipi degni di nota. In alternativa al concetto precedente sono stati

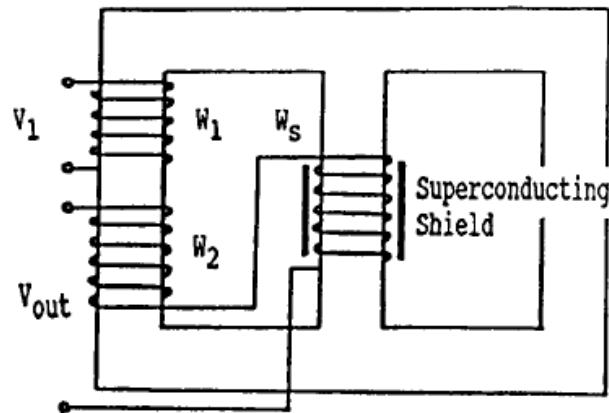


Figura 3.18: *Schema grafico di un trasformatore limitatore di corrente di guasto[13]*

effettuati studi di fattibilità volti a verificare la possibilità di sviluppo di un vero e proprio trasformatore con avvolgimenti realizzati in materiale HTS in grado di transire e limitare la corrente di guasto [77]. Identificato con l'acronimo SFCLT, questo concetto si propone di aggiungere la funzione di limitatore di corrente di guasto al classico trasformatore di potenza, per cui in condizioni di normale funzionamento la macchina statica esplica la sua funzione classica, mentre in condizione di guasto riesce a limitare la corrente di corto circuito.

Come detto, i trasformatori convenzionali vengono progettati e costruiti in modo da presentare una induttanza di dispersione relativamente elevata (circa il 20%) tenendo basso in questo modo il limite di stabilità statica e la capacità di trasmissione del sistema di potenza, e non ultima, la qualità dell'energia fornita. Da questo punto di vista invece i dispositivi SFCLT potrebbero tranquillamente essere progettati e costruiti minimizzando l'induttanza di dispersione a vantaggio dell'efficienza del sistema di potenza e della qualità dell'energia fornita. Dopo una serie di step, che hanno contribuito ad approfondire alcuni aspetti riguardanti l'applicazione di nastri YBCO CC e in particolare il recupero [78] e il comportamento dell'effetto limitante [79], è stato sviluppato e costruito dal team giapponese un prototipo di 2 MVA (22 kV/6.6 kV) [80].

Avere in un unico dispositivo entrambe le funzioni di trasformatore e limitatore è senz'altro un vantaggio di indubbio valore. La sua probabilità

di successo è legata al raggiungimento di un'affidabilità e manutenibilità che dovranno essere almeno pari a quella dei trasformatori convenzionali.

3.5 SFCL a Nucleo Saturato

Il concetto presenta un tentativo di sviluppo e di fabbricazione risalente agli inizi degli anni 80 [81]. Esso utilizza due nuclei ferromagnetici e due avvolgimenti per ogni fase come si può vedere dallo schema di figura 3.19. I due avvolgimenti, fatti di materiale convenzionale, sono entrambi avvolti intorno al nucleo e inseriti in serie al circuito da proteggere. Entrambi i nuclei sono avvolti da un ulteriore avvolgimento realizzato con materiale HTS e alimentato da una sorgente in corrente continua e costante. Esso ha il compito di portare i due nuclei a lavorare in condizioni di saturazione al fine di minimizzare le rispettive induttanze ($L = d|\vec{B}|/d|\vec{H}|$).

Come si può vedere dalla figura 3.20 si può schematicamente immaginare di ridurre l'induttanza se il punto di lavoro viene spinto in una zona dove $|\vec{B}|$ è quasi costante rispetto al variare della corrente, per cui la caduta di tensione induttiva è ridotta a un valore trascurabile.

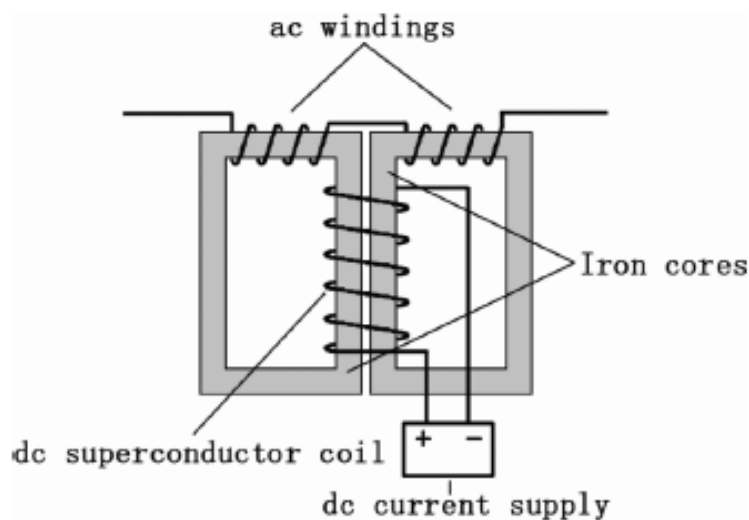


Figura 3.19: Schema grafico di struttura monofase di SFCL a nucleo saturato [14]

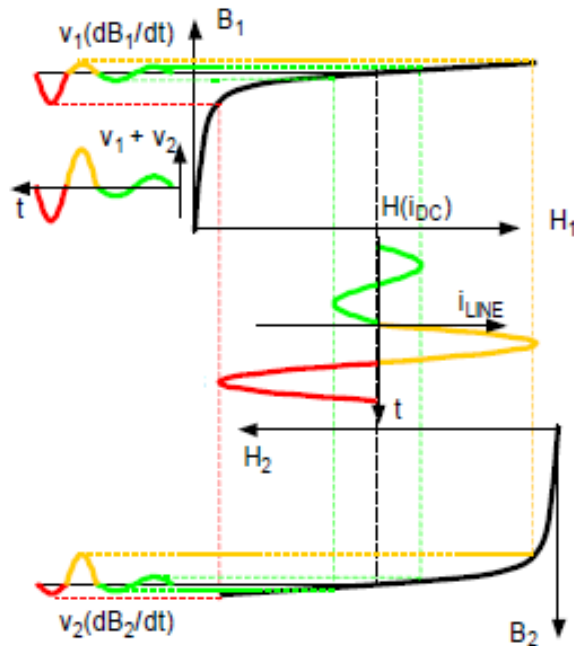


Figura 3.20: *Andamento tipico di una curva B–H di un nucleo ferromagnetico*

La corrente circolante, in ogni semiperiodo, esalterà la condizione di saturazione in un nucleo, mentre nell'altro tenderà ad indebolirlo. In condizioni di normale funzionamento bisogna dimensionare il sistema in modo che la corrente di linea non porti uno dei nuclei fuori saturazione. In tali ipotesi la caduta di tensione in condizioni di normale funzionamento dipende dalla resistenza degli avvolgimenti AC e dalla frequenza di rete.

In caso di guasto invece, il valore elevato della corrente porterà alternativamente, in ogni semiperiodo, a far lavorare i due avvolgimenti fuori la zona di saturazione e in una regione dove la permeabilità ha valori elevati. In tal modo una elevata induttanza risulterà essere inserita in serie al circuito di potenza.

In questo limitatore il materiale HTS lavora in regime di corrente continua e costante e non è in contatto con il circuito di potenza. Conseguentemente, la quantità di materiale HTS e il sistema criogenico si riducono notevolmente.

Resta invece la caratteristica indesiderata di avere delle dimensioni di ingombro e valori di peso notevoli, oltre a fattori di limitazione del valore

della corrente di guasto non particolarmente elevati.

In ogni caso per questa tipologia di limitatore SFCL è notizia recente [82] che è disponibile una versione commerciale per applicazioni in media tensione da parte della Zenergy Power.

Altra iniziativa degna di nota è il progetto finanziato dal governo cinese che ha portato come primo step alla realizzazione di un prototipo dimostratore di 35kV/90 MVA. Successivamente (2007) è stato installato [15] nella sottostazione (Pujii) operativa nel sud della Cina. Il team di progetto ha come capofila la InnoPower Superconductor Cable, la prima società cinese produttrice di cavi HTS. Il prototipo è costituito da sei nuclei rettangolari disposti secondo una geometria esagonale al fine di minimizzare l'ingombro e l'uso del ferro (vedi figura 3.21).

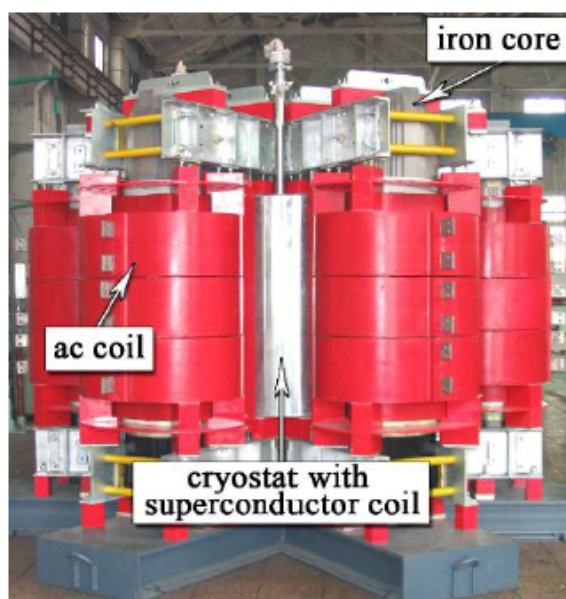


Figura 3.21: Particolare del limitatore SFCL 35kV/90MVA [ref xin09]

Il nucleo centrale è avvolto dalla bobina HTS che risulta essere contenuta in un criostato che necessariamente avrà una forma cilindrica cava. Le restanti colonne e gioghi sono invece avvolte dai circuiti convenzionali in AC fatti di rame. I nuclei ferromagnetici così disposti permettono sia una distribuzione ottimale del flusso magnetico, che la cancellazione delle componenti alternate che si concatenano con la bobina DC in HTS. Rispetto al desi-

gn sviluppato da Zenergy Power, quello cinese ha una sostanziale differenza che si evince soprattutto durante la fase limitante. Infatti, quando il sistema rileva una corrente di guasto la sorgente di tensione in DC viene esclusa mediante l'impiego di un interruttore a intervento istantaneo. In questo modo l'impedenza offerta è maggiore poichè il nucleo è portato fuori saturazione per tutta la durata del periodo, a differenza del dispositivo Zenergy che invece limita solo i picchi della corrente di guasto. Come si evince dalla figura 3.22 per evitare sovratensioni pericolose dovute all'intervento istantaneo dell'interruttore e per azzerare repentinamente il flusso dovuto al circuito DC è necessario inserire in parallelo alla bobina HTS un resistore di resistenza elevata.

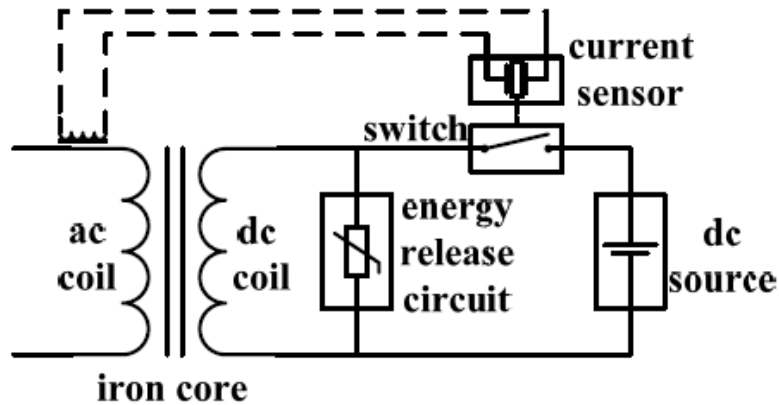


Figura 3.22: Particolare del sistema di controllo di alimentazione della bobina DC HTS [15]

Come detto il SFCL a nucleo saturato ha lo svantaggio di avere peso e dimensioni ragguardevoli. In questo caso, come si evince nella figura 3.23, il dispositivo SFCL non passa inosservato in quanto l'ingombro cilindrico ha un'altezza poco più di 4 metri per un diametro di 4 metri, mentre il peso è di 27 tonnellate.

Nelle condizioni di normale funzionamento, durante i test è stata registrata una impedenza di 0.355Ω corrispondenti ad una caduta di tensione tra i due terminali di circa lo 0.8% della tensione di fase. Un altro test ha



Figura 3.23: *Limitatore SFCL 35kV/90MVA installato nella utility CNC [15]*

interessato il sistema del circuito DC che ha registrato un tempo di magnetizzazione di 450 ms e di 1.8 ms per la scarica a fronte di quelli previsti rispettivamente da progetto di 800ms e di 5 ms [83].

Altri test per verificare la sua capacità di limitazione e il tempo di ripristino hanno riportato dei dati in linea con le aspettative.

3.6 SFCL a flusso bloccato

Presenta un principio di funzionamento che si caratterizza per originalità e interesse accademico ma ad oggi non si registrano sviluppi e fabbricazioni di prototipi di taglia interessanti. Il dispositivo SFCL a nucleo saturato risulta probabilmente un competitor che a parità di ingombro e peso presenta alcune caratteristiche vincenti come ad esempio assenza di transizione, criogenia ridotta e ripristino immediato.

Tuttavia non mancano pubblicazioni di studi rivolti alla ottimizzazione della struttura nella direzione di garantire miglior prestazioni e nel ridurre la quantità di materiale HTS utilizzato [84, 85, 86]. In figura 3.24 è illustrata la configurazione base del limitatore che presenta tre bobine accoppiate elettromagneticamente mediante un nucleo di materiale ferromagnetico. La bobina 2 in serie con un elemento superconduttivo è connessa in parallelo alla bobina 1; insieme costituiscono un reattore a flusso bloccato. La bobina

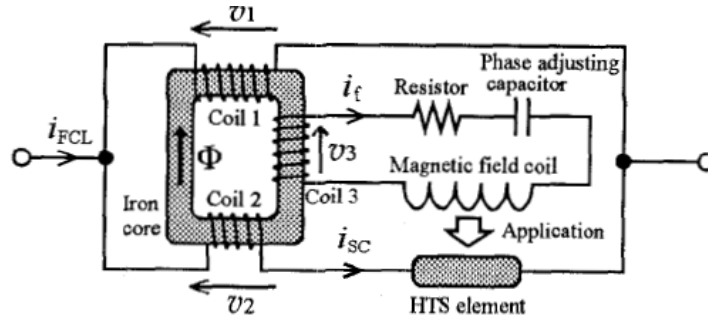


Figura 3.24: Configurazione di base del SFCL a flusso bloccato [16]

3 alimenta un circuito serie RLC. Le bobine 1 e 2 sono avvolte in senso contrario in modo che il flusso totale sia dato dalla differenza dei due flussi. Le tensioni indotte sulle bobine sono infatti date dalle seguenti relazioni:

$$v_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}, v_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}, v_3 = n_3 \frac{d\Phi}{dt}$$

Durante le condizioni di normale funzionamento si ha che $v_1 = v_2$ in quanto la tensione sull'elemento HTS è praticamente nulla per cui le due bobine risultano connesse in parallelo. Da ciò deriva che:

$$(n_1 + n_2) \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

Poichè $n_1 + n_2 \neq 0$ segue che

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0$$

,

da cui il fatto che il flusso Φ risulti vincolato a mantenere un valore costante. Da ciò consegue che la tensione indotta nella bobina 3 è nulla così come è nulla la corrente i_f per cui l'elemento HTS non è sottoposto ad alcun campo magnetico. In condizioni di guasto l'elemento HTS perde il suo stato superconduttivo rompendo l'equilibrio descritto nella condizione di normale funzionamento. Φ non risulta essere costante ed una tensione non nulla viene indotta nelle bobine, ciò provoca un istantaneo aumento dell'impedenza che contribuisce a limitare la corrente di guasto. Nella bobina 3, in particolare, la circolazione di corrente crea un campo magnetico che investe il materiale HTS provvedendo a stabilizzare e a rendere omogenea la sua transizione.

Capitolo 4

DC resistive SFCL

Il principio di funzionamento del DC Resistive SFCL si basa sull'interazione tra le grandezze fisiche principali del circuito di rete e la natura induttiva dell'avvolgimento SC che è connesso nel ramo trasversale del ponte. Durante il funzionamento a regime, la corrente nell'avvolgimento SC è data dall'involuppo dei picchi della corrente sinusoidale che attraversa la linea del sistema elettrico di potenza.

Con l'ausilio di grafici e di una descrizione dettagliata delle equazioni che regolano il funzionamento del circuito, nel paragrafo 4.1 viene illustrato lo schema elettrico generale del DC Resistive SFCL e il suo principio di funzionamento.

Nel paragrafo 4.2 viene riportato in sintesi un approccio per definire il suo modello matematico. Il circuito, oltre a essere caratterizzato da non linearità (diodi), è un sistema il cui funzionamento è influenzato durante il guasto da fenomeni sia termici che elettromagnetici.

Infine nel paragrafo 4.3, con l'ausilio del sw EMPT, sono stati osservati il comportamento e i benefici che il dispositivo può offrire in una applicazione particolare di un sistema elettrico di potenza in media tensione (20 kV). Inoltre è stato effettuato un dimensionamento di massima dei parametri base del DC Resistive SFCL.

4.1 Principio di funzionamento

Il DC resistive SFCL è un limitatore di guasto superconduttivo funzionante in corrente continua per applicazioni in corrente alternata.

Nella figura 4.1 è illustrato lo schema di principio del circuito elettrico. Esso è costituito da un ponte di diodi connesso in serie alla linea da proteggere mediante i nodi A e B e da un dispositivo superconduttivo, tipicamente un avvolgimento, connesso nel ramo trasversale tra i nodi C e D.

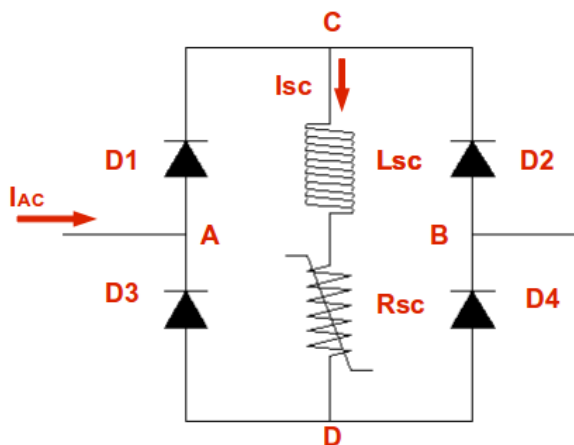


Figura 4.1: Schema elettrico di principio del DC Resistive SFCL

L'avvolgimento superconduttivo è tale da realizzare la funzione di un induttore lineare e di un resistore non lineare, rispettivamente collegati in serie.

In linea di principio, si tratta di una bobina superconduttiva a bassa induttanza realizzata in modo da transire quando la corrente in essa circolante supera un determinato valore di soglia I_c .

Durante le condizioni di normale funzionamento la corrente I_{SC} , circolante nell'avvolgimento superconduttore, è data dall'involuppo dei picchi della corrente sinusoidale I_{AC} che attraversa la linea da proteggere. Il valore dell'induttanza di L_{SC} è adeguatamente contenuto e la resistenza di R_{SC} è praticamente nulla; pertanto a meno delle dissipazioni sui diodi, il dispositivo ha un impatto trascurabile sul normale funzionamento della rete.

Poichè la I_{SC} è una corrente continua quasi costante, è ragionevole aspettarsi che in tali condizioni la dissipazione di potenza nel criostato ad essa associata sia praticamente trascurabile.

All'insorgere di un corto circuito invece, il valore elevato della corrente di guasto porta l'avvolgimento superconduttivo R_{SC} a transire e ad inserire in serie al circuito da proteggere una resistenza di valore R_q che contribuisce a limitare la corrente di guasto.

Dal punto di vista dell'effetto limitante quindi, il DC Resistive SFCL agisce come un SFCL di tipo resistivo (AC Resistive SFCL).

La differenza sostanziale però sta nel fatto che nel DC Resistive SFCL vi è assenza di dissipazione di potenza durante le condizioni di normale funzionamento, pertanto diventa una concreta possibilità l'idea di progettare avvolgimenti superconduttivi con nastri di elevata lunghezza in modo da introdurre elevati valori di resistenza transita.

Il problema del costo di fabbricazione legato alla elevata quantità di materiale superconduttivo utilizzato, potrebbe essere superato mediante l'impiego di un materiale poco costoso, quale per esempio l'MgB₂. Quest'ultimo risulta inoltre facile da sagomare e non complicato da produrre.

Aumentando la capacità termica complessiva dell'avvolgimento, ottenuta attraverso l'impiego di grandi volumi di materiale, è possibile inoltre pensare a transizioni e fasi limitanti con aumenti di temperatura del materiale HTS limitati, permettendo così tempi di recupero ridotti.

Analisi del circuito

La I_{SC} è composta da due contributi: una componente costante e una componente alternata (ripple) a frequenza doppia rispetto a quella di alimentazione. Per il ripple di corrente (figura 4.2) si possono distinguere due

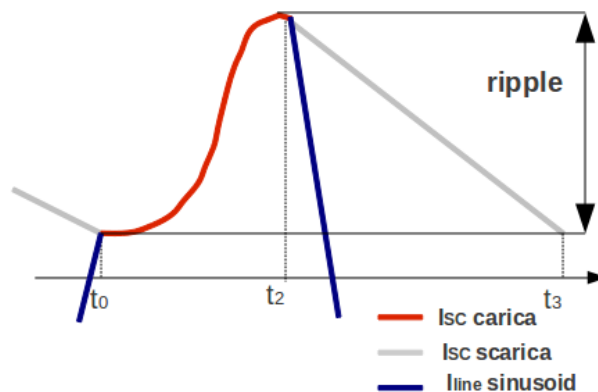


Figura 4.2: Particolare ripple di corrente

modalità di funzionamento:

- modalità di carica: fase crescente della corrente I_{SC} (rosso)
- modalità di scarica: fase decrescente della corrente I_{SC} (grigio)

L'andamento dei flussi di corrente nel ponte nelle due distinte fasi sono riportati nella figura 4.3 e 4.4. Durante la fase di carica i diodi D2 e D3

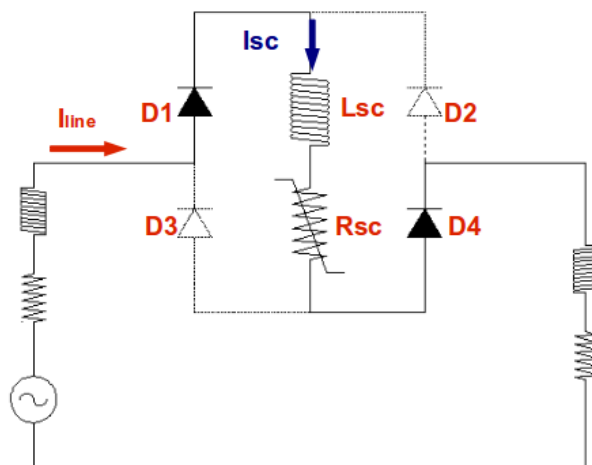


Figura 4.3: Schema circuito equivalente: (a) fase carica

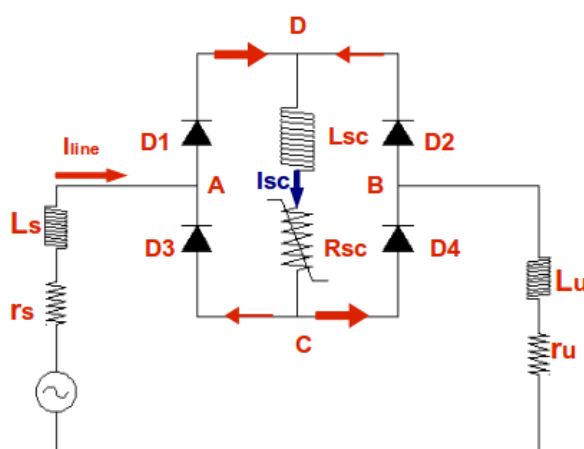


Figura 4.4: Schema circuito equivalente: (b) fase scarica

risultano contropolarizzati e la corrente di linea I_{line} coincide con la corrente I_{SC} ; essa è costretta a circolare tutta nell'avvolgimento superconduttivo caricandolo di una certa quantità di energia magnetica.

La bobina risulta essere inserita in serie al circuito di potenza, i diodi D1 e D4 sono nello stato di conduzione, mentre D2 e D3 come detto nello stato di interdizione. Tale condizione si ripete nel semiperiodo successivo a coppie di diodi invertite.

Per la presenza dei diodi, componenti caratterizzati da un comportamento non lineare, il circuito in figura 4.1 andrebbe risolto con tecniche di calcolo numerico, tuttavia sotto certe ipotesi possiamo ricavare le espressioni analitiche delle correnti che circolano nei rami di interesse.

In particolare, se consideriamo l'intervallo di tempo $[t_0 - t_2]$ (figura 4.2), è lecito scrivere la seguente equazione

$$V \text{sen}(\omega t) = r i_{line}(t) + L \frac{di_{line}(t)}{dt} + 2U_{DF} \quad (4.1)$$

la cui soluzione è data dalla equazione (4.2)

$$i_{line}(t) = e^{(-\frac{r}{L})(t-t_0)} \left\{ i_0 - \frac{V}{z} \text{sen}(\omega t_0 - \varphi) + \frac{2U_{DF}}{r} + \right. \\ \left. + \frac{V}{z} \text{sen}(\omega t - \varphi) - \frac{2U_{DF}}{r} \right\} \quad (4.2)$$

dove

$$i_{line}(t) = i_{SC}$$

$$r = r_s + R_{SC} + r_u$$

$$L = L_s + L_{SC} + L_u$$

U_{DF} caduta di tensione diretta su ogni diodo

$$i_0 = i(t_0)$$

$$z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$$

$$\tan \varphi = \omega L / r$$

Qualche istante dopo aver toccato il valore di picco, inizia la fase di scarica compresa tra l'istante t_2 e t_3 .

L'energia magnetica precedentemente accumulata viene scaricata per effetto joule sui diodi sotto forma di caduta di tensione resistiva.

Al termine della fase di carica, le due correnti, quella di linea I_{line} e la I_{SC} , assumono adesso andamenti diversi. In particolare per la corrente di linea vale la seguente espressione:

$$i_{line}(t) = e^{(-\frac{r}{L})(t-t_2)} \left\{ i_2 - \frac{V}{z} \text{sen}(\omega t_2 - \varphi) + \right. \\ \left. + \frac{V}{z} \text{sen}(\omega t - \varphi) - \frac{2U_{DF}}{r} \right\} \quad (4.3)$$

dove $r = r_s + R_{SC} + r_u$, con $R_{SC} = 0$ nelle cond. di normale funzionamento
 $L = L_s + L_u$

$$i_2 = i(t_2)$$

che risulta essere soluzione dell'equazione 4.4:

$$V_{sen}(\omega t) = r i_{line}(t) + L \frac{di_{line}(t)}{dt} \quad (4.4)$$

mentre per la corrente I_{SC} :

$$i_{SC}(t) = \begin{cases} e^{-\frac{R_{SC}}{L_{SC}}(t-t_2)} \left\{ i_2 + \frac{u_{D1}+u_{D3}}{R_{SC}} \right\} & \text{se } R_{SC} \neq 0 \\ i_2 - \frac{u_{D1}+u_{D3}}{L_{SC}} (t-t_2) & \text{se } R_{SC} = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

ricavata come soluzione dell'equazione 4.6 scritta in una delle due maglie interne individuate dai rami del ponte.

$$L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} + R_{SC} i_{SC}(t) + u_{D1} + u_{D3} = 0 \quad (4.6)$$

Il passaggio dalla modalità di carica a quella di scarica dipende in modo particolare dal valore dell'induttanza L_{SC} e dalla tensione diretta dei diodi che costituiscono il singolo ramo del ponte.

Prendendo in considerazione il caso di funzionamento in condizioni normali, cioè con $R_{SC} = 0$, in ogni istante di tempo, sia per la fase di carica che di scarica, è possibile riscrivere l'equazione 4.6 come:

$$-L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} = u_{D1} + u_{D3} \quad (4.7)$$

Consideriamo, per esempio, la fase di carica in cui il diodo D1 è in conduzione (vedi fig. 4.3), mentre il diodo D3 è interdetto. Allora sicuramente la caduta di tensione u_{D3} avrà valore negativo mentre la u_{D1} sarà positiva. Riscrivendo la 4.7

$$-L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} - u_{D1} = u_{D3} < 0 \quad (4.8)$$

si può osservare che il diodo D3 rimane contropolarizzato praticamente dalla caduta di tensione positiva su L_{SC} e da u_{D1} . Anche nell'istante in cui la $\frac{di_{SC}(t)}{dt}$, derivata della eq. 4.2 si annulla, continua ad essere $-u_{D1} = u_{D3} < 0$ poichè il diodo D1 continua a condurre.

In effetti per passare alla fase di scarica è necessario che la $\frac{di_{SC}(t)}{dt}$ inverta il segno e il suo valore sia tale che moltiplicato per L_{SC} superi la tensione

u_{D1} di almeno U_{DF} la u_{D3} , cioè della tensione diretta di conduzione:

$$L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} - u_{D1} = u_{D3} \geq U_{DF} \quad (4.9)$$

Da questo istante in poi il diodo D3 comincia a condurre, e l'energia magnetica accumulata nell'induttore L_{SC} comincia a scaricarsi nei due rami del ponte, poichè il diodo D1 e D3 sono entrambi direttamente polarizzati.

Durante la fase di scarica, ipotizzando che su entrambi i diodi D1 e D3 (così come su D2 e D4) la tensione diretta di conduzione si possa approssimare a un valore costante U_{DF} , e detto N il numero di diodi per ogni singolo ramo, si ha che:

$$\frac{di_{SC}}{dt} = \frac{2 \cdot N \cdot U_{DF}}{L_{SC}} \quad (4.10)$$

Quindi quando la derivata della corrente assume almeno l'uguaglianza dell'eq. 4.10 avviene il passaggio dalla fase di carica a quella di scarica. Si può asserire allora che, per valori relativamente piccoli L_{SC} se si desidera un decremento di corrente pari a 1 A/ms, è necessario imporre un valore di induttanza pari a:

$$L_{SC} = 2 \cdot N \cdot U_{DF} \quad mH \quad (4.11)$$

Poichè il periodo del ripple è pari a 10 ms in caso di frequenza di rete pari a $50H_z$, ci si deve aspettare in questo caso un ripple di corrente non superiore a 10 A (tipicamente si ha che $U_{DF} = 1 \text{ V}$). Il fattore moltiplicativo 2 è dovuto alla presenza nel circuito di evoluzione libera dei due rami del ponte. Da questa considerazione ne consegue che il limite superiore del ripple risulta dimezzato se un ulteriore ramo di N diodi viene connesso in parallelo all'avvolgimento superconduttivo così come illustrato dalla figura 4.5. In questo caso infatti il circuito di evoluzione libera vede solo N diodi connessi in serie.

Il valore dell'induttanza di L_{SC} va scelto quindi in un intervallo $[L_{min} - L_{max}]$ dove L_{max} è il valore dell'induttanza in corrispondenza del quale il sistema di potenza non risulta essere influenzato durante le condizioni di normale funzionamento. Per un sistema di distribuzione a 20 KV, ad esempio, rispettando gli standards qualitativi stabiliti nella norma EN5016, si è visto che 5 mH può essere un buon valore di compromesso [87].

L_{min} invece è il valore dell'induttanza a cui corrisponde un ripple di corrente tale che ad esso sia associato una quantità di dissipazione di potenza,

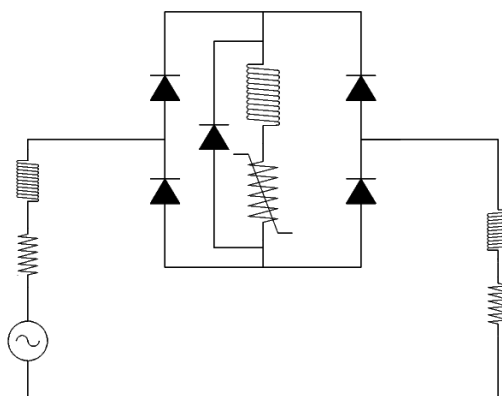


Figura 4.5: *Connessione ramo diodi in antiparallelo all'avvolgimento SC*

relativamente bassa, tollerata e adeguatamente smaltita dal sistema criogenico. In definitiva la componente induttiva dell'avvolgimento nel DC Resistive SFCL, piuttosto che garantire un buon effetto limitante, ha principalmente la funzione di garantire un ripple di corrente adeguato.

4.2 Modello Matematico

Per poter fare delle valutazioni estimative, risulta essere di grande ausilio l'utilizzo di un modello matematico, che sotto alcune ipotesi semplificative, può aiutare ad effettuare un dimensionamento di massima oppure, se implementato in un software, a lanciare delle simulazioni per interpretare e osservare alcuni fenomeni di interesse.

Per completezza, e senza pretesa di essere esaustivi, riportiamo un esempio di modello matematico che potrebbe essere applicato per i fini sopra riportati.

Esso è tipicamente formato da equazioni termiche ed elettricomagnetiche accoppiate [88, 89].

Come primo passaggio è necessario calcolarsi la corrente di trasporto che ovviamente è funzione delle grandezze fisiche e parametriche del circuito di potenza; in linea generale in ogni istante valgono le equazioni 4.2:

$$\begin{aligned} \sum_j v_j &= 0; && \text{alle maglie} \\ \sum_j i_j &= 0; && \text{ai nodi} \\ f(v_j, i_j) &= 0; && \text{caratteristica del componente } j \end{aligned}$$

L'elemento R_{SC} tipicamente viene modellato come il parallelo di diverse resistenze ognuna associata al materiale che fa parte del nastro.

Identificando con R_{SC} la resistenza dell'avvolgimento SC si ha che:

$$R_{SC} = \left(\sum_k \frac{1}{R_k} \right)^{-1} \quad (4.12)$$

con R_k resistenza associata al materiale k costituente il nastro.

La corrente in ogni elemento k è calcolata come:

$$i_k = \frac{R_{SC}}{R_k} \cdot i_{line} \quad (4.13)$$

La resistività del materiale HTS è descritta come:

$$\rho_{hts} = \begin{cases} 0 & J < J_c, T < T_c \\ \rho_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1} & J > J_c, T < T_c \quad \text{resistenza di flux flow} \\ f(T) & \text{funzione estrapolata dai dati sperimentali} \end{cases} \quad (4.14)$$

dove,

$$\rho_c = \frac{E_c}{J_c}, E_c = 10^{-4} \text{V/m}, J_c = J_{c0} \frac{(T_c - T)}{(T_c - T_{op})}, n = \text{value}$$

J_{c0} densità di corrente critica alla temperatura di normale funzionamento

T_c temperatura critica

T_{op} temperatura di normale funzionamento

Riguardo al modello elettromagnetico, esso può basarsi sull'uso diretto del campo magnetico \vec{H} come variabile di stato [90].

L'accoppiamento tra il campo elettrico e quello magnetico è descritto dalla legge di Faraday:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.15)$$

dove $\vec{E} = E_z$, è la componente longitudinale de campo elettrico lungo la direzione di sviluppo del nastro che è data da

$$E_z = \rho(J_z) J_z \quad (4.16)$$

La densità di corrente è data dalla legge di Ampère, che in condizione di regime quasi statico, considerando i bordi della sezione del nastro, può essere

espressa come:

$$J_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (4.17)$$

Definita la geometria del sistema, bisogna poi imporre le condizioni al contorno che legano il campo magnetico \vec{H} alla corrente di trasporto e considerare la continuità delle componenti tangenziali e normali del campo \vec{B} sulle superfici di separazione degli elementi dei diversi materiali

$$i_{line} = \oint \vec{H} dl \quad (4.18)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.19)$$

Passando al modello termico, esso è dato in generale dalla seguente legge:

$$Q = \rho_d C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) \quad , \quad Q = \frac{i_k^2 R_k}{V_k} \quad (4.20)$$

dove,

ρ_d è la densità di massa del materiale k considerato

C è il calore specifico;

k il coefficiente di conduttività termica;

Q la quantità di calore prodotta per effetto joule;

V_k il volume del materiale k

Le modalità di implementazione del modello matematico sopra esposto dipendono dal livello desiderato di precisione e dal fenomeno fisico che si vuole interpretare, nonchè dalle approssimazioni numeriche e tecniche di calcolo utilizzate.

4.3 Case Study

Una applicazione parziale del modello matematico sopra riportato è stata realizzata con l'ausilio del software EMTP in cui sono state implementate le equazioni 4.2 e 4.14.

In figura 4.6 è rappresentato lo schema elettrico del sistema di distribuzione a 20 kV considerato per lo studio di una particolare applicazione del dispositivo DC resistive SFCL.

Il dispositivo DC Resistive SFCL ha una taglia di 25 MVA, 20kV; obiettivo dello studio è la determinazione dei valori dell'induttanza L_{SC} e della resi-

stenza transita R_q osservando gli effetti che questi possono avere sul sistema sia durante le condizioni di normale funzionamento, che in condizioni di guasto. Due sistemi di sbarre, ognuno dei quali alimenta un carico con potenza

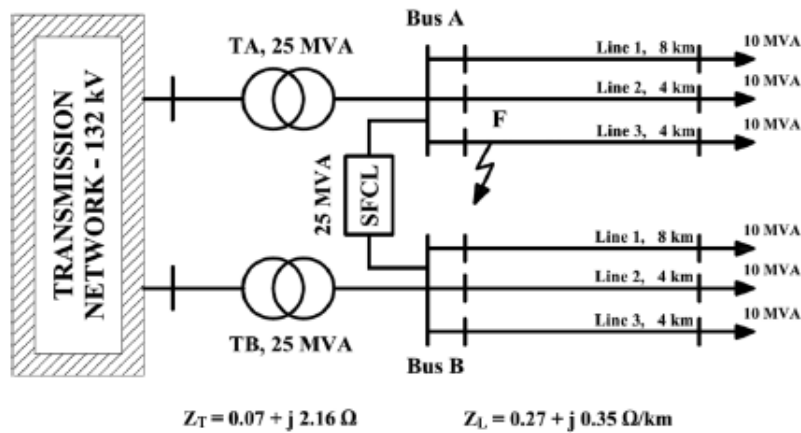


Figura 4.6: Schema elettrico del sistema di distribuzione a 20 kV

installata di 30 MVA, sono connessi al sistema di trasmissione mediante due trasformatori di pari taglia (25 MVA).

Con i due trasformatori funzionanti la corrente circolante nel dispositivo SFCL è nulla a causa della perfetta simmetria del sistema.

Ai fini della nostra analisi facciamo l'ipotesi che il sistema funzioni inizialmente in una configurazione che vede entrambi i carichi assorbire una potenza apparente pari al 50% di quella installata.

Condizioni di normale funzionamento

Supponiamo che, durante le condizioni di normale funzionamento, il trasformatore A venga disconnesso per motivi legati ad esigenze di servizio. A un certo istante, dunque, la disconnessione del trasformatore A produce una circolazione di corrente nel dispositivo SFCL e un transitorio di tensione sul sistema di sbarre A. Il transitorio di tensione, in seguito al passaggio della corrente dal valore nullo a quello di regime, è influenzato dalla presenza della induttanza L_{SC} che risulta inserita in serie tra il sistema di sbarre A e il sistema di sbarre B, per effetto della nuova configurazione di rete.

Nella figura 4.7 è illustrato il transitorio del valore efficace della tensione al sistema di sbarre A per diversi valori dell'induttanza L_{SC} .

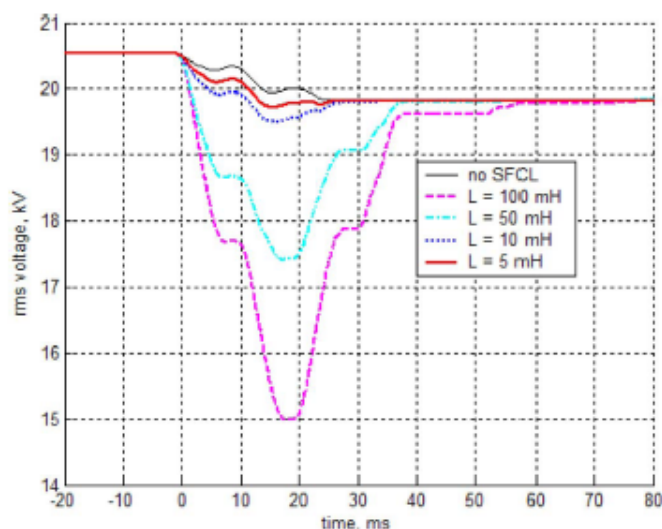


Figura 4.7: *Transitorio di tensione al sistema di sbarre A*

E' possibile notare che elevati valori di L_{SC} comportano cadute di tensioni inaccettabili, mentre al decrescere dei valori e in particolare per $L_{SC} = 5mH$ la caduta di tensione è sotto l'1%, ben al di sotto del limite del 4% imposto dalle norme EN 50160[91].

Per $L_{SC} = 5mH$, una volta raggiunto il regime permanente, il THD della tensione rimane inferiore allo 0.1%, mentre la corrente che circola nel superconduttore è data dalla somma di una componente continua e costante pari a 478 A e da un ripple di corrente alla frequenza di $100Hz$ di $\pm 5A$ (circa l'1%).

La figura 4.8 che mostra sia la corrente di linea che quella circolante nel superconduttore è abbastanza eloquente.

Da essa si evince che il ripple di corrente picco-picco che circola nel superconduttore è circa di 2 ordini di grandezza inferiore rispetto a quello $\pm 500A$ che circola in linea a frequenza industriale. Quest'ultima se circolasse nell'avvolgimento SC darebbe luogo sicuramente a delle perdite significative.

Condizioni di guasto

Per simulare la condizione di guasto viene invece considerata la configurazione di funzionamento in cui i carichi sono alimentati contemporaneamente

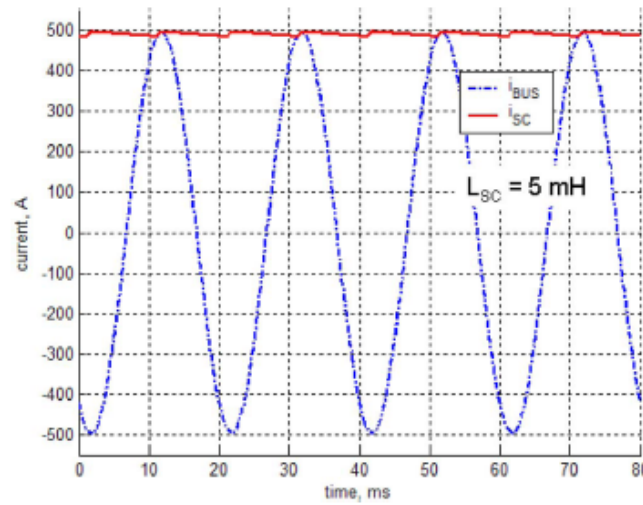


Figura 4.8: *Transitorio di tensione al sistema di sbarre A*

sia dal trasformatore A che dal trasformatore B.

Viene ipotizzato un guasto su una linea del bus A.

1225 A è il valore stabilito per la corrente critica del dispositivo SFCL, vale a dire il 120% del valore di picco della corrente nominale.

Al fine di determinare il valore di resistenza transita dell'avvolgimento sono state lanciate diverse corse corrispondenti a diversi valori di resistenza. In funzione di questi valori si è potuto osservare che l'effetto limitante del dispositivo SFCL ha delle conseguenze in termini di qualità dell'energia fornita e di attenuazione dei disturbi sul sistema di sbarre B non affetto dal guasto. In figura 4.3 sono riportati i valori del tasso di distorsione armonica THD della tensione in funzione del valore di resistenza transita R_q . In particolare, dai dati della simulazione risulta che per un valore della resistenza transita $R_q = 10\Omega$ corrisponde una tensione di $19.7kV_{rms}$ con un THD pari all'1%, mentre per $R_q = 5\Omega$ corrisponde una tensione di $19.2kV_{rms}$ con un THD pari all'1.9% entrambi ben al di sotto del limite dell'8% previsto dalle norme EN 50160.

In figura 4.9 è possibile osservare l'andamento della tensione alle sbarre B in seguito ad un guasto di corto circuito trifase a terra che avviene a valle del sistema di sbarre A. Per mettersi nelle condizioni peggiori, il guasto viene fatto avvenire nell'istante in cui la tensione passa per lo zero e mantenuto per i restanti 80 ms fino all'intervento di apertura dell'interruttore di potenza.

Voltage of bus B during the fault		
R_q, Ω	$V_{B_{rms}}, V$	THD %
0	5.5	
1	12.2	
2	15.1	7.7
5	19.2	1.9
10	19.7	1.1
No Interc.	20	0

Tabella 4.1: Valori del THD di tensione sul bus B in funzione di R_q

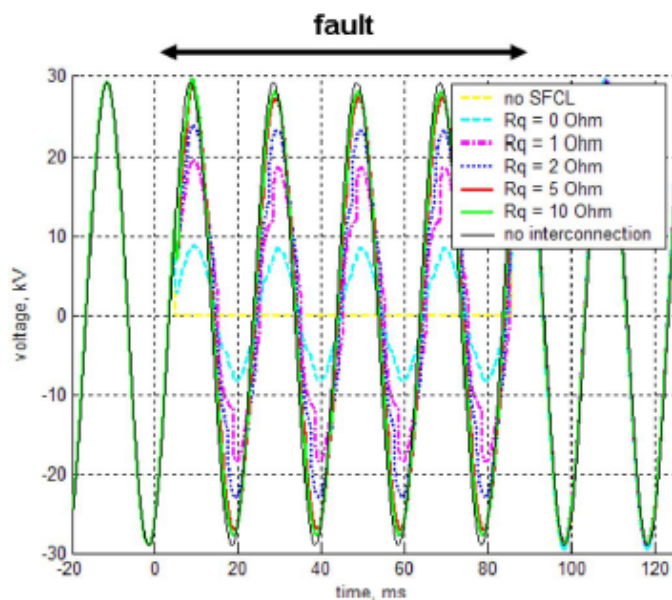


Figura 4.9: Andamento della tensione al sistema di sbarre B in seguito ad un guasto al sistema di sbarre A

E' possibile notare come, in caso di assenza del limitatore o di assenza di transizione dell'avvolgimento SC, la tensione sul sistema di sbarre B, non affetto da guasto, crolla a valori nulli o a valori inaccettabili ($R_q = 0$) per tutta la durata del guasto.

Invece per valori elevati della resistenza transita, la tensione sul sistema di sbarre B rimane in piedi durante il guasto. In figura 4.10 è illustrata la corrente di guasto sul sistema di sbarre A in assenza del dispositivo SFCL e

in assenza dell'interconnessione tra i due sistemi di sbarre.

E' possibile notare che la presenza del dispositivo SFCL riduce il valore della corrente di guasto a quello che si avrebbe se l'interconnessione non fosse presente.

Quindi in definitiva la presenza del dispositivo SFCL, nel caso oggetto di studio, garantisce l'accoppiamento in sicurezza dei due sistemi di sbarre garantendo un miglioramento della qualità dell'energia fornita nelle condizioni di normale funzionamento; inoltre limita la corrente di corto circuito in caso di guasto garantendo continuità di esercizio e assenza di disturbi sul sistema di sbarre non affetto da guasto.

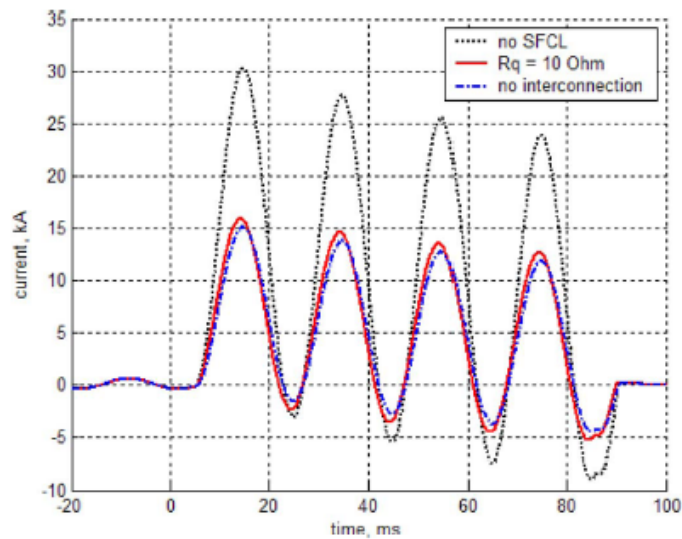


Figura 4.10: Corrente di guasto al sistema di sbarre A

Capitolo 5

Valutazione sperimentale delle prestazioni funzionali del DC Resistive SFCL

In questo capitolo vengono riportate le attività sperimentali effettuate su un prototipo in scala ridotta di DC Resistive SFCL svolte nel Laboratorio di Ingegneria Magnetofluidodinamica e Superconduttività Applicata (LIM-SA) dell'Università di Bologna. L'obiettivo di tale attività è stato quello di osservare sperimentalmente le prestazioni del DC resistive SFCL in merito alla dissipazione di potenza durante le condizioni di normale funzionamento, e al suo comportamento durante le condizioni di guasto. Contestualmente, per entrambe le prove sono stati allestiti i rispettivi circuiti di potenza e di acquisizione dati. Per il test di corto circuito in particolare, è stato implementato un codice labview in grado di acquisire istantaneamente le informazioni sullo stato di funzionamento del circuito e di simulare il ciclo di apertura e richiusura di un interruttore di potenza durante le condizioni di guasto.

5.1 Valutazione AC losses

Lo scopo della prova è di effettuare un'analisi comparativa tra le prestazioni del dispositivo DC Resistive SFCL e quelle del dispositivo AC Resistive SFCL, con particolare riferimento alle dissipazioni di potenza per unità di lunghezza ($W/metro$) di nastro che avvengono nella camera criostatica.

La configurazione DC Resistive SFCL è illustrata nella figura 5.1, mentre quella AC Resistive SFCL, che fa riferimento al concetto classico di SFCL di tipo resistivo riportato nel paragrafo 3.1 di pagina 29, è illustrata nella figura 5.2

5.1.1 Prototipo SFCL

Per le attività sperimentali è stato allestito un prototipo in scala ridotta (fig. 5.1) in cui gli elementi base sono:

- una bobina superconduttiva antinduttiva SC
- una bobina induttiva convenzionale
- un ponte di diodi

La bobina SC antinduttiva, avvolta con tecnica bifilare, utilizza un nastro 1G di $BiSCCO_{2223}$ con matrice in Ag della Sumitomo, le cui caratteristiche sono riportate in figura 5.1. La bobina SC è connessa in serie ad un induttore

Tape	Thickness	0.3 mm
	Width	4.2 mm
	Critical current (77K, self-field)	135 A
Coil	Outer Diameter	158 mm
	Height of the coil	205 mm
	Number of layers	2
	Number of turns	96 (47x2)
	Total HTS tape's length	47 m (23.5 m x 2)
	Winding pattern	bifilar
	Stray inductance	2.6 μ H
	Resistance at 300 K	1.56 Ω a 100 Hz

Tabella 5.1: *Caratteristiche tecniche della bobina antinduttiva $BiSCCO_{2223}$*

convenzionale di induttanza L_{cu} variabile nell'intervallo $[0.0-1.5]mH$ avente un nucleo in materiale ferromagnetico e avvolgimenti in rame. In laboratorio si ha la possibilità di utilizzare una quantità di due induttori. La corrente

massima di saturazione dichiarata per ogni induttore convenzionale è di 90 A.

Il ramo elettrico ottenuto è inserito trasversalmente all'interno del ponte così come proposto in figura 5.1. Il ponte di diodi è stato realizzato utilizzando i componenti Semipack 2 SKKD 162/12 della Semikron la cui caratteristiche tecniche possono essere recuperate in [92].

5.1.2 Configurazione DC

Il prototipo DC Resistive SFCL è inserito nel circuito di prova così come illustrato nella figura 5.1

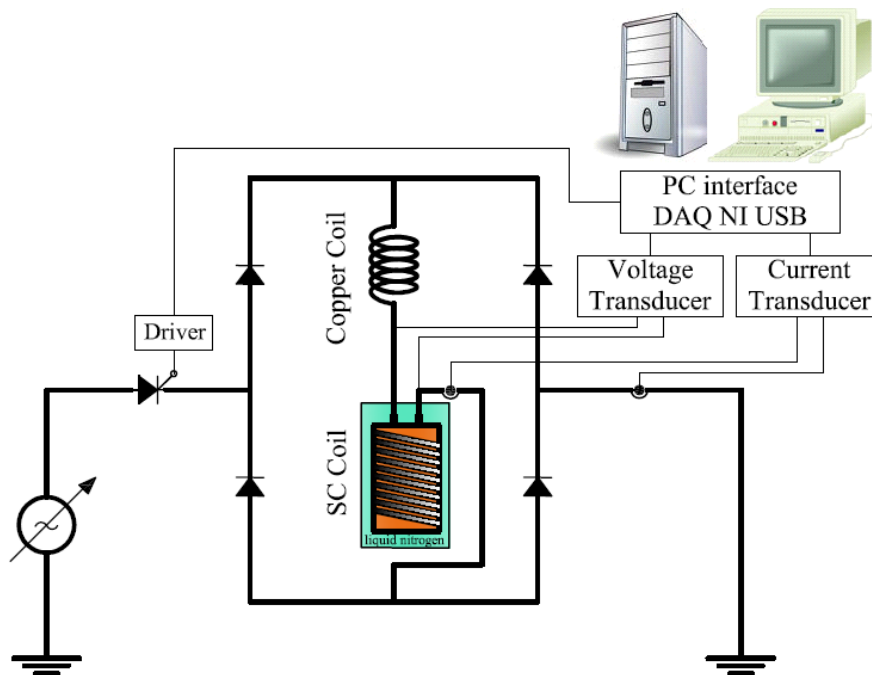


Figura 5.1: *Schema del circuito allestito per la prova di misura nella configurazione DC Resistive SFCL*

L'alimentazione è fornita da un autotrasformatore ed è gestita da un triac composto da due tiristori connessi in antiparallelo e controllato dalla postazione del PC mediante il sw Labview.

Per questa configurazione la prova è stata ripetuta con due diversi valori dell'induttanza L_{cu} , rispettivamente di $1.5mH$ e $3.0mH$.

5.1.3 Configurazione AC

Lo stesso circuito di alimentazione è utilizzato per la configurazione AC Resistive SFCL. In questo caso però il prototipo è realizzato connettendo la bobina SC direttamente in serie all'autotrasformatore così come illustrato nella figura 5.2.

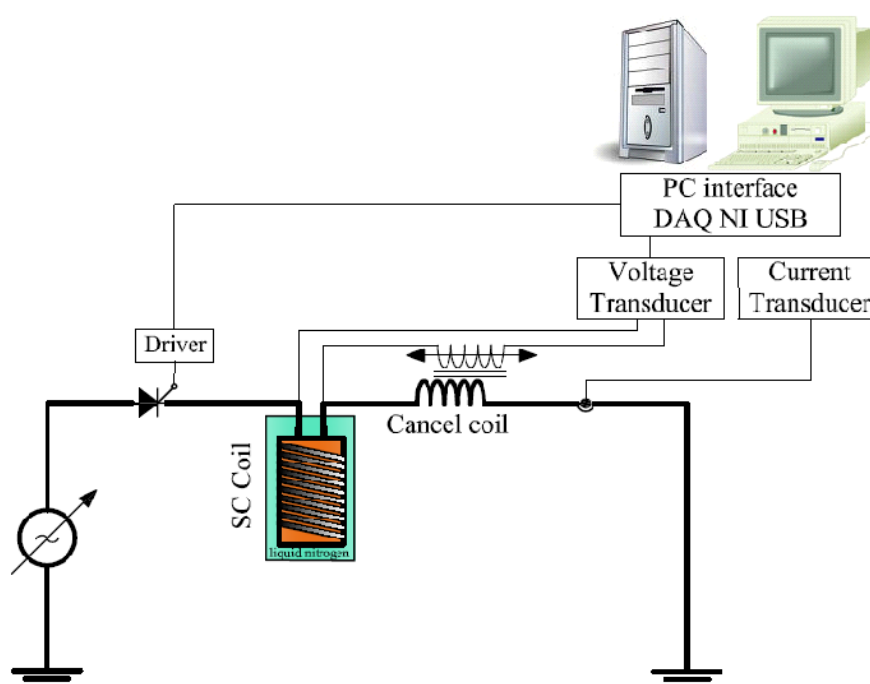


Figura 5.2: Schema del circuito allestito per la prova di misura nella configurazione AC Resistive SFCL

Sistema Acquisizione Dati

Il cuore del sistema è rappresentato dalla scheda NI USB 9234 utilizzata per l'acquisizione e registrazione dei dati. E' dotata di quattro canali ad acquisizione simultanea con una frequenza di campionamento di $52kS/s$. La tensione di ingresso è di $\pm 5V$ con una risoluzione ADC di 24 bits che corrispondono a poco più di $0.5\mu V$. I segnali di corrente e di tensione sono rilevati mediante trasduttori ad effetto hall connessi rispettivamente in serie e in parallelo alla bobina HTS.

5.1.4 Procedura di misura

Dati il piccolo valore dell'induttanza (circa $2.6\mu H$) della bobina HTS e l'assenza di campo magnetico nell'ambiente circostante, è lecito ritenere trascurabili le perdite per isteresi magnetica dovuta a sorgenti esterne. Pertanto, sia nel caso AC che nel caso DC, le perdite di potenza dovute alla corrente di trasporto costituiscono l'unica componente da misurare. Poichè la forma d'onda di corrente è diversa nei due casi, è necessario assumere due differenti approcci di misura.

Nel caso di configurazione AC illustrato in figura 5.2, l'acquisizione viene effettuata con l'ausilio di una bobina compensatrice (cancel coil). Essa è costituita da un avvolgimento primario, connesso in serie al circuito di potenza, mutuamente accoppiato (in aria) con un avvolgimento secondario che è invece connesso in serie al circuito di prelievo e misura del segnale di tensione.

Il circuito secondario è a geometria variabile ed è quindi possibile variare il valore del coefficiente di accoppiamento mutuo variando la sua posizione rispetto al circuito primario. In tal modo si provvede ad elidere e depurare il segnale acquisito dalle componenti induttive dovute alla corrente di trasporto e ad eventuali sorgenti esterne di disturbo. Infatti, anche se l'operazione di integrazione sul periodo del segnale di potenza elettrica ha come effetto l'autoeliminazione delle componenti induttive, l'errore che si commette durante l'acquisizione, a parità di errore percentuale, dipende dall'ampiezza del valore istantaneo acquisito. Eliminando la componente induttiva quindi, che può essere diversi ordini di grandezza più grande rispetto al segnale di tensione resistivo da acquisire, si riduce il rischio che l'errore assoluto commesso possa essere più grande del segnale vero da acquisire.

Nel sw di acquisizione, inoltre, è stato implementato una routine che svolge la funzione del cosiddetto lock-in analyzer che ha la particolarità di filtrare, amplificare e selezionare, le componenti armoniche del segnale di tensione che risultano in fase con il segnale di corrente preso come riferimento.

Quindi con l'ausilio del lock in è stato possibile, agendo contemporaneamente sulla geometria variabile del circuito secondario della cancel coil, trovare la giusta posizione in corrispondenza della quale il segnale di tensione risulta perfettamente in fase con il segnale di corrente. Una volta verificata

questa condizione il segnale è stato acquisito, registrato ed elaborato ai fini del calcolo della potenza.

Tale accorgimento non è necessario applicarlo nel caso DC Resistive SFCL dove la dinamica dei fenomeni è fortemente attenuata (la corrente di trasporto nella bobina HTS è continua e quasi costante). In entrambe le configurazioni, una volta acquisiti e registrati i dati in memoria, la potenza attiva è stata calcolata per integrazione sul periodo del prodotto dei segnali di tensione e corrente acquisiti:

$$\frac{1}{L} \int_0^{\frac{1}{f}} v_{acq}(t) \cdot i_{acq}(t) dt$$

dove L è lunghezza del nastro HTS.

In ognuna delle due configurazioni, l'operazione di acquisizione, registrazione e calcolo, è stata ripetuta per diversi valori della corrente compresi nell'intervallo [0–120%] della corrente critica I_c con step pari a circa il 10%.

Un esempio di acquisizione dei segnali di tensione e di corrente corrispondenti al valore di corrente $I_{peak} = 85A$ (63% della I_c) per la configurazione AC è illustrato nella figura 5.3; il valore corrispondente calcolato di potenza attiva è di 4 mW/m :

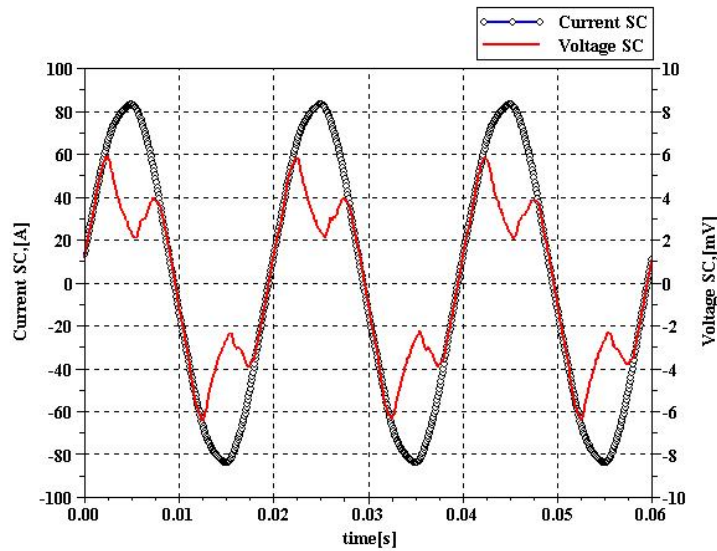


Figura 5.3: *Onda di tensione e corrente nella configurazione AC Resistive SFCL*

Come si può osservare, la tensione acquisita ha una forma d'onda che segue

una sinusoide nei punti in cui il valore assoluto della derivata di corrente è massima, mentre nei punti prossimi al picco di corrente, dove la derivata diminuisce fino ad annullarsi, essa subisce un calo altalenante. Analogamente in figura 5.4 sono illustrati i segnali acquisiti con $I_{peak} = 85A$ per la configurazione DC; in questo caso la potenza attiva risulta non apprezzabile. Il ripple di corrente picco-picco dai dati sperimentali risulta essere pari a circa 8 A, valore che soddisfa le considerazioni fatte in merito all'eq. 4.10 a pagina 61. Infatti si ha che:

$$\Delta i_{SC} = \frac{2U_{DF}}{L_{SC}} \Delta t = 8A \quad (5.1)$$

con $U_{DF} = 1V$, $L_{SC} = 1.5mH$ e Δt circa pari a $6ms$.

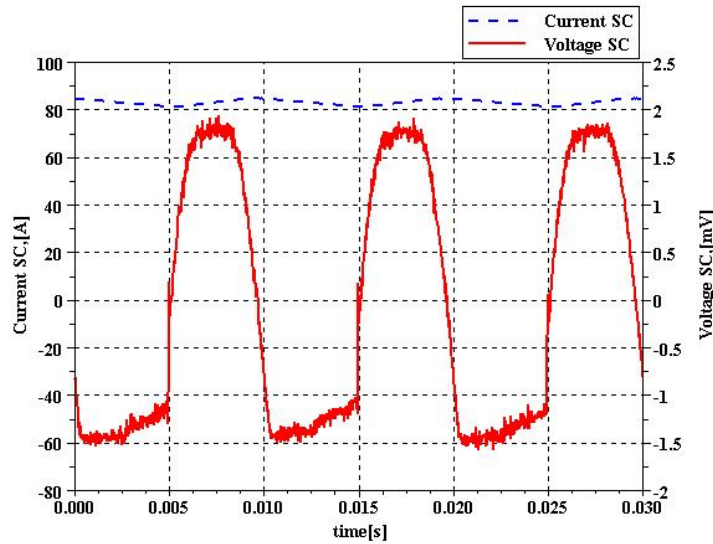


Figura 5.4: *Onda di tensione e corrente nella configurazione DC Resistive SFCL*

5.1.5 Discussione

In figura 5.5 la potenza dissipata nel nastro HTS sia nel caso AC che DC è rappresentata in funzione del rapporto tra il valore della corrente di picco e il valore della corrente critica I_{peak}/I_c .

Come riportato in [93], è possibile notare che per tutti i valori di corrente inferiori a quello della corrente critica e per entrambi i valori di induttanza

L_{cu} considerati, a parità di livello di precisione e di strumentazione utilizzati, le perdite di potenza nel caso DC Resistive SFCL non sono apprezzabili rispetto a quelle che si hanno nel caso AC Resistive SFCL.

Le perdite nella configurazione DC sono apprezzabili solo quando la corrente circolante supera il valore della corrente critica e cioè quando quest'ultima comincia a utilizzare come percorso preferenziale quello offerto dalla matrice di argento.

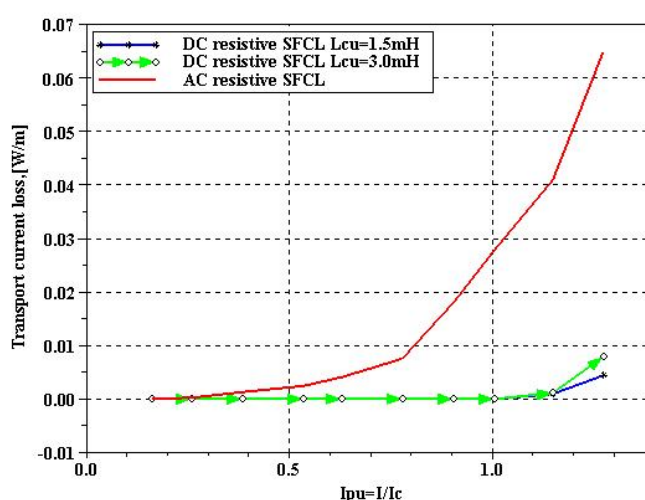


Figura 5.5: Potenza dissipata nel criostato in funzione della corrente critica

A transizione avvenuta la dissipazione di potenza è maggiore nella configurazione che utilizza il valore di induttanza $L_{cu} = 3.0mH$ nonostante l'ampiezza del ripple risulti minore. Ciò è dovuto al fatto che il valore medio della corrente nel caso $L_{cu} = 3.0mH$ è maggiore che nel caso $L_{cu} = 1.5mH$, e denota il fatto che il meccanismo di perdita è praticamente quello resistivo dovuto alla transizione parziale del materiale HTS.

Questa esperienza dimostra e conferma che la potenza dissipata nel nastro HTS imputabile alla sola corrente di trasporto è praticamente nulla nella configurazione DC Resistive SFCL dove la corrente circolante nell'avvolgimento SC risulta essere la somma di una componente continua e costante e di una componente alternata dal ripple contenuto .

E' però da sottolineare il fatto che nel prototipo utilizzato la compo-

nente induttiva è data da un induttore convenzionale che risulta fisicamente separato dalla bobina SC antinduttiva. E' presumibile, che sia invece conveniente realizzare nel caso pratico, un avvolgimento unico realizzato in modo da contenere la componente induttiva oltre che alla resistenza non lineare. In tal caso, infatti, non è scontato che le perdite siano trascurabili poiché il campo induzione generato dalla corrente di trasporto in prossimità del materiale HTS potrebbe portare a dissipazioni per isteresi per effetto della possibile magnetizzazione, oltre che a ridurre il valore della corrente critica.

Bisogna quindi, per ritenere tale risultato attendibile, che l'assetto geometrico dell'avvolgimento adottato e le soluzioni di progetto che si realizzano devono riprodurre una condizione di funzionamento tale da garantire una distribuzione di campo magnetico che non interagisca in modo significativo con la superficie del nastro superconduttore.

5.2 Short Test

Scopo della prova è osservare il comportamento del prototipo DC Resistive SFCL durante la fase di limitazione del guasto. Anche in questo caso, per mettere in risalto l'osservazione sul comportameto del materiale superconduttore, sono state allestite due configurazioni del prototipo.

Una configurazione in cui il prototipo DC Resistive SFCL è inserito interamente nel circuito di prova (figura 5.6); l'altra, che chiameremo Boening, in cui non è previsto l'innesto della bobina SC in serie all'induttore convenzionale (figura 5.7).

Sia nella prima che nella seconda configurazione il valore dell'induttanza L_{cu} è pari a $0.75mH$ ed è ottenuto mediante la connessione di due induttori convenzionali in parallelo.

5.2.1 Configurazione DC Resistive SFCL

Il circuito di prova è rappresentato in figura 5.6. Il prototipo DC Resistive SFCL è connesso in serie ad un carico di resistenza $R_L = 0.42 \Omega$. L'alimentazione è fornita dal secondario di un autotrasformatore con il primario connesso alla rete di bassa tensione 230 V, 50 Hz ed è gestita attraverso un triac CB1 comandato da PC che ha la funzione di aprire e chiudere il circuito secondo un ciclo che è possibile settare a priori.

Il triac CB2 invece, connesso in parallelo al carico, ha la funzione di simulare un evento di corto circuito.

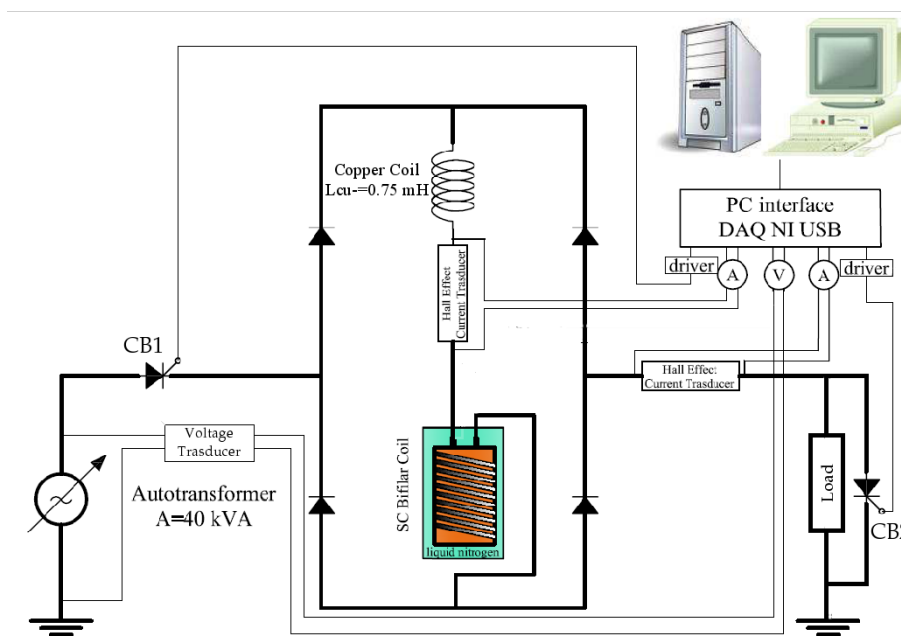


Figura 5.6: *Circuito di prova: configurazione DC Resistive SFCL*

5.2.2 Configurazione Boeing

In figura 5.7 è possibile cogliere la differenza dalla configurazione della figura 5.6. Il prototipo è costituito dal solo induttore connesso nel ramo trasversale del ponte di diodi a sua volta in serie al carico di resistenza $R_L = 0.42 \Omega$.

L'alimentazione del circuito avviene con le stesse modalità della configurazione DC Resistive SFCL.

5.2.3 Sistema Acquisizione Dati

Entrambi i triac sono comandati da una scheda NI USB 6289 con cui è possibile gestire 36 canali in ingresso e 4 canali in uscita con una frequenza di campionamento impostata in questo caso sul valore di 1000 campioni al secondo. Vengono utilizzati due driver, opportunamente progettati e costruiti in laboratorio, per separare elettricamente il circuito di potenza dal sistema DAQ. Questi ricevono in ingresso gli impulsi di accensione e spegni-

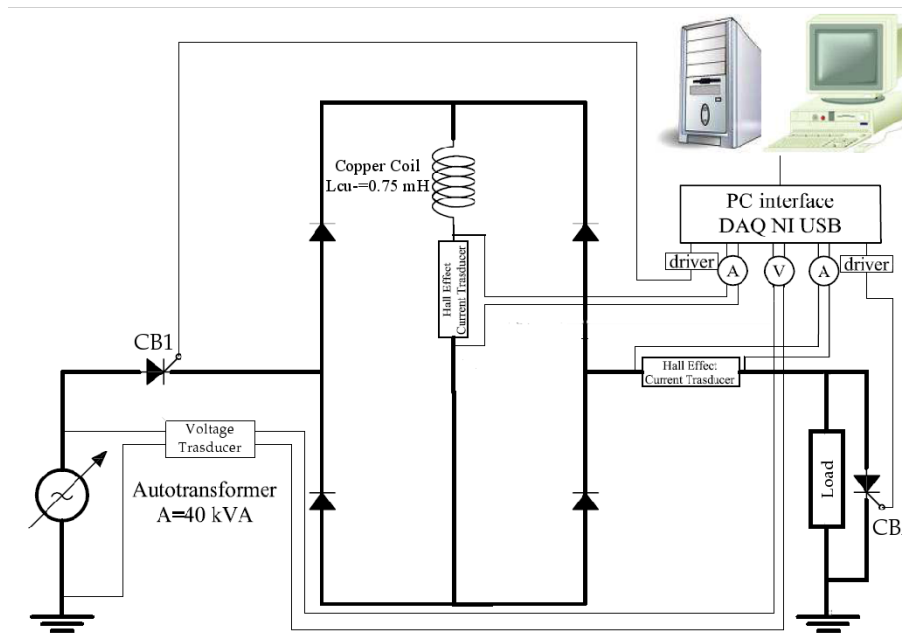


Figura 5.7: *Circuito di prova: configurazione Boening*

mento provenienti dalla scheda NI e attraverso dei dispositivi optoelettronici li inviano in uscita ai gate dei tiristori. Al sistema DAQ arrivano anche i segnali elettrici di tensione e di corrente prelevati mediante dei trasduttori ad effetto hall. La modalità di gestione dei triac (CB1 e CB2) e di acquisizione dei segnali è controllata da un software scritto in codice Labview che, implementato su un PC, è capace di dialogare con la scheda NI. Quest'ultimo presenta a video una maschera di input in cui è possibile impostare sia i segnali che si vogliono acquisire in entrata che i segnali in uscita. In particolare i segnali in uscita sono degli impulsi rettangolari che possono essere settati in ampiezza (volt) e in durata (ms).

5.2.4 Procedura di prova

L'acquisizione dei dati viene fatta secondo la seguente procedura: si alimenta il circuito di potenza controllando a video che le grandezze oggetto di studio vengano adeguatamente lette e visualizzate dal sistema DAQ; successivamente mediante l'autotrasformatore viene selezionato il valore di tensione di alimentazione di esecuzione della prova; questo viene scelto realizzando un valore di picco della corrente di linea pari ad una assegnata

percentuale del valore della corrente critica di nastro.

Nella maschera di input si settano gli istanti di innesco, l'ampiezza e la durata degli impulsi, sia per il corto circuito del triac CB2 che per l'apertura e richiusura del triac CB1.

Per gli istanti di innesco il codice prende come riferimento il primo zero di tensione di alimentazione a derivata positiva. In questo modo il lancio della corsa può essere inviato in qualsiasi istante, poichè il programma provvederà automaticamente ad acquisire e registrare i dati al primo punto di riferimento utile.

In figura 5.8 sono rappresentati gli impulsi ovvero il ciclo di apertura e chiusura dei triac CB1 e CB2 in funzione delle condizioni di funzionamento del circuito che si desidera realizzare. In particolare tutte le prove di corto

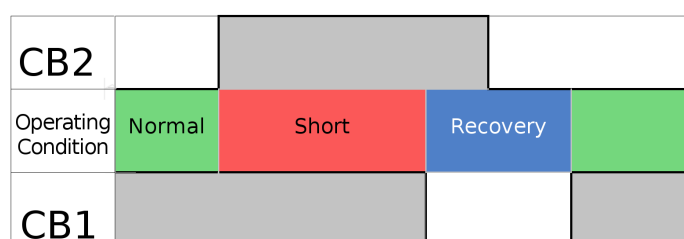


Figura 5.8: *Ciclo di apertura e chiusura dei triac*

circuito sono state effettuate impostando l'istante di innesco del corto circuito nelle condizioni peggiori e cioè quando la tensione di alimentazione passa per lo zero. Sono state realizzate dieci acquisizioni una per ogni livello di tensione. In figura 5.9 è illustrata una corsa di acquisizione per il valore di picco della corrente di linea pari al 90% della corrente critica ($I_c = 135A$). In essa sono evidenziati l'impulso di corto circuito inviato al triac CB2 e quello di apertura al triac CB1 secondo lo schema di figura 5.8.

5.2.5 Discussione

In figura 5.10 è possibile osservare, dall'andamento della tensione "Voltage SC" prelevata ai capi della bobina SC, che la transizione avviene entro pochi millisecondi dopo l'innesco del corto circuito e non appena l'intensità di corrente si approssima al valore della corrente critica di nastro. L'innesco del corto circuito è dato all'istante $t_{fault} = 41ms$.

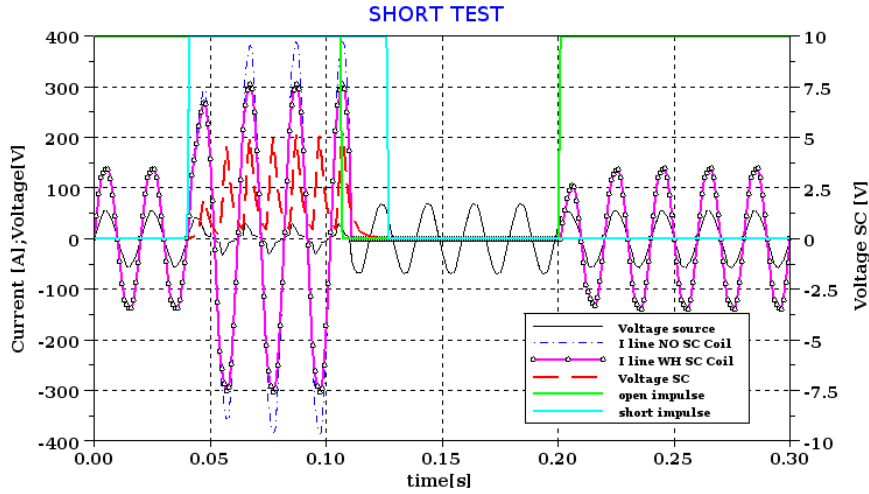


Figura 5.9: Circuito di prova per il test di corto circuito

L'effetto limitante nella prima semionda è preso in carico quasi totalmente dall'induttore. Nella seconda semionda di corrente, dopo l'innescio del guasto, il contributo all'effetto limitante della bobina SC aumenta e rimane della stessa intensità fino all'apertura del circuito. Nei punti di picco della tensione (circa 5 V), prelevata ai capi del nastro superconduttivo, il contributo all'effetto limitante del resistore non lineare R_{SC} è poco inferiore al 25%, mentre il restante 75% è dato dalla bobina induttiva CU (circa 13.1 V).

Il circuito viene aperto 10 ms dopo l'istante di apertura $t_{open}=110ms$ poiché bisogna aspettare che la corrente si azzeri per avere lo spegnimento definitivo dei tiristori.

Dai dati sperimentali sulla tensione prelevata ai capi della bobina SC si osserva in questo caso che il dispositivo SFCL recupera entro il periodo successivo all'apertura dell'interruttore di linea.

E' interessante allora effettuare una serie di osservazioni sui dati sperimentali acquisiti, utilizzando i modelli matematici a disposizione al fine di identificare i fattori chiave che hanno influenzato il comportamento del materiale SC nel caso specifico oggetto di studio. Nella figura 5.11 è rappresentato il grafico dell'andamento della resistenza transita del nastro SC. Come si può osservare il valore di picco della resistenza raggiunge il valore di $16 \text{ m}\Omega$, mentre il valore della resistenza a temperatura ambiente è di $1.56 \text{ }\Omega$, a $100Hz$. In figura 5.11 è stato considerata la resistenza totale equivalente del nastro, ma

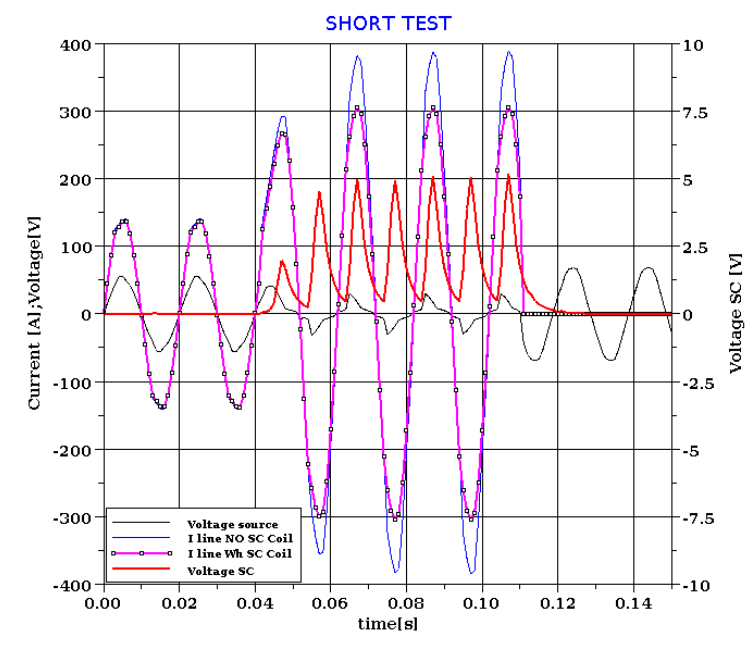


Figura 5.10: *Particolare test corto circuito*

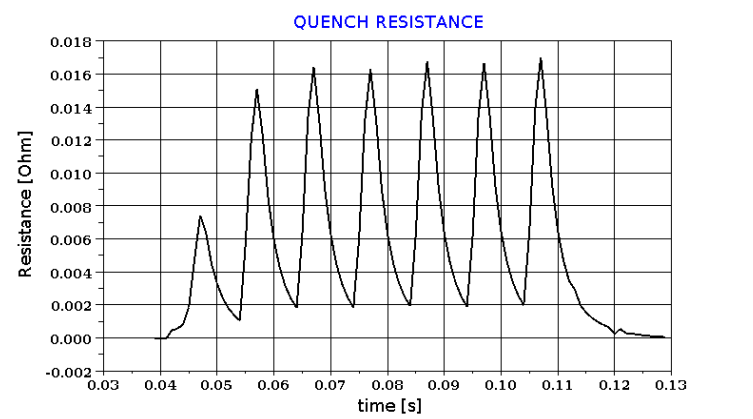


Figura 5.11: *Andamento della resistenza del nastro BISCCO₂₂₂₃*

con opportune ipotesi è possibile calcolare il contributo dato alla resistenza totale dalla sezione di matrice di argento e da quella del materiale HTS.

Il rapporto tra la matrice d'argento e il materiale HTS dichiarato è di 1.5 (aspect ratio).

Seguendo l'approccio di considerare il parallelo elettrico della matrice di argento e del materiale HTS [94], è lecito utilizzare per il nastro un modello semplificato illustrato in figura 5.14

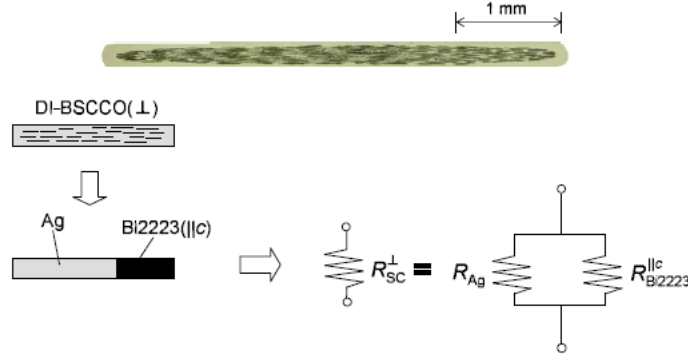


Figura 5.12: *Modello elettro-termico semplificato del nastro BISCO₂₂₂₃[17]*

In esso viene assunto che dal punto di vista elettrico e termico il nastro possa essere considerato costituito da due porzioni compatte di materiale secondo i rapporti (aspect ratio) dichiarati dal produttore.

La resistenza totale R_{SC} è data allora dalla equazione 4.12, mentre la partizione delle correnti dalla equazione 4.13 entrambe a pagina 63.

Quindi assumendo che:

$$S_{ag} = \frac{3}{5}S_{sc} \quad \text{e che} \quad S_{hts} = \frac{2}{5}S_{sc} \quad (5.2)$$

dove $S_{SC} = 4.2 \cdot 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, ovvero la sezione del nastro intero.

Assunto $\rho_{ag} = 10^{-9}$ [89] alla temperatura di 77 K, dai dati sperimentali si può ricavare l'andamento delle resistenze della matrice di argento e del materiale HTS (figura 5.13)

Nella figura 5.14 è illustrato l'andamento dell'energia dissipata nel nastro per effetto joule.

L'energia dissipata per effetto joule raggiunge il valore di $11mWh$ e viene assorbita dal liquido criogenico nell'arco di $20ms$. Dall'osservazione dei dati sperimentali è lecito pensare che la temperatura della matrice di argento si discosti poco da quella del liquido refrigerante (azoto liquido) che stimiamo essere di 77 K. Nel calcolo della resistenza della matrice di argento abbiamo fatto l'ipotesi che la temperatura del materiale Ag rimanga costante.

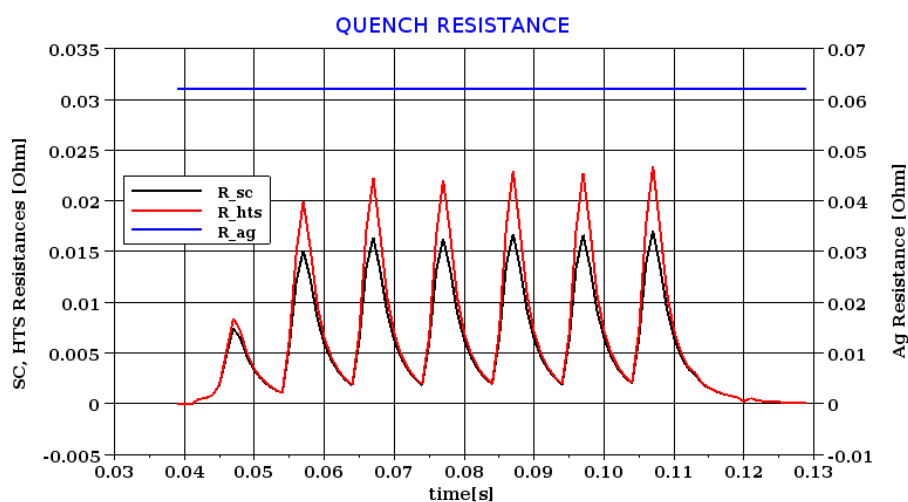


Figura 5.13: *Andamento nel tempo durante il guasto delle singole resistenze*

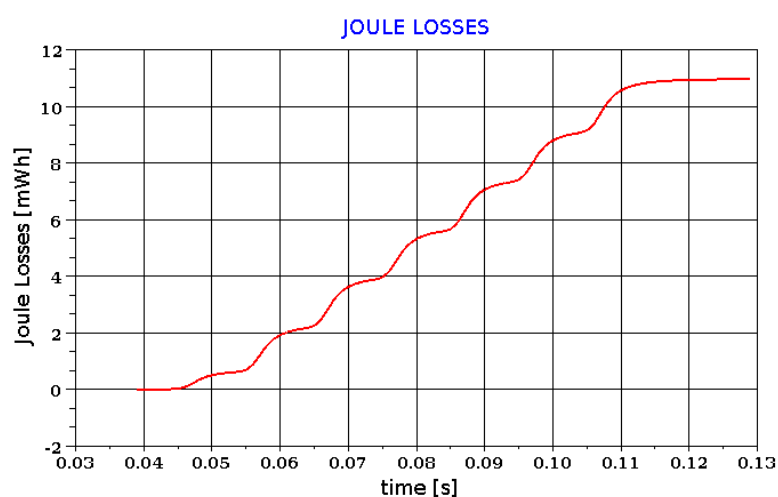


Figura 5.14: *Andamento della energia dissipata per effetto joule*

Infatti sulla base di calcoli della temperatura della superficie di argento, applicando il modello monodimensionale dell'equazione termica 4.11 di pagina 61, risulta che l'andamento della temperatura è quello illustrato nella figura 5.15.

Tale risultato è stato ottenuto nell'ipotesi peggiori che non vi sia scambio termico, cioè in condizioni adiabatiche, e che tutta la potenza elettrica investa la sola matrice di argento.

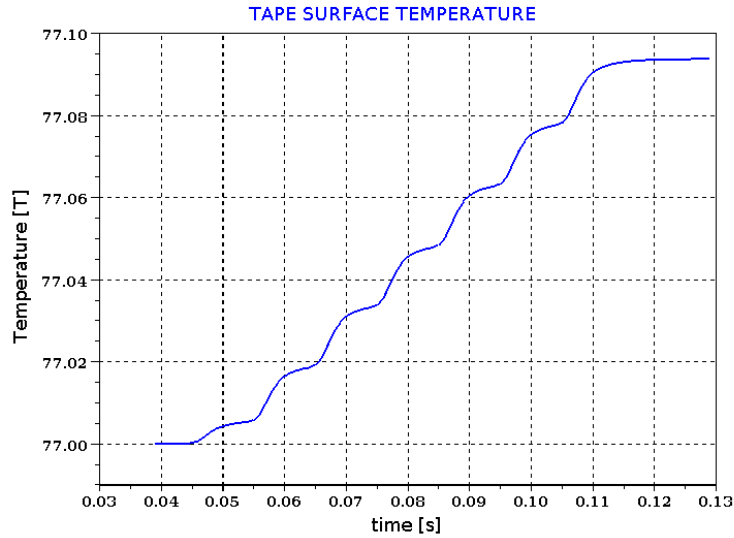


Figura 5.15: *Andamento della temperatura sulla superficie del nastro - hp regime adiabatico*

Assunto che la temperatura dell'argento risulta essere praticamente costante, si è ripetuto il calcolo della temperatura per materiale HTS, questa volta considerando la potenza elettrica che effettivamente investe il materiale e rimuovendo l'ipotesi che lo scambio termico avvenga in condizioni adiabatiche. Per effettuare il calcolo è necessario il coefficiente di conducibilità termica del $BiSCCO_{2223}$ che è pari a $k_{hts} = 244 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [95]. Il risultato del calcolo della temperatura del materiale HTS è illustrato in figura 5.16.

Come si può osservare dalla figura 5.16, il materiale recupera lo stato di superconduttivo entro la durata di un periodo in pieno accordo con i dati sperimentali. Il grafico dimostra inoltre che la temperatura del materiale SC si mantiene di poco inferiore alla sua temperatura critica e che la sua transizione avviene per effetto del solo superamento della densità di corrente critica (regime di flux-flow). Dai dati sperimentali risulta allora che per garantire un recupero accettabile dopo l'estinzione del guasto la potenza totale per unità di lunghezza di nastro dissipata durante la fase di limitazione deve avere un valore limitato in modo che l'aumento di temperatura del materiale SC sia attenuato dall'inerzia termica del sistema criogenico.

Tale risultato lo si può ottenere impegnando lunghezze elevate di nastro

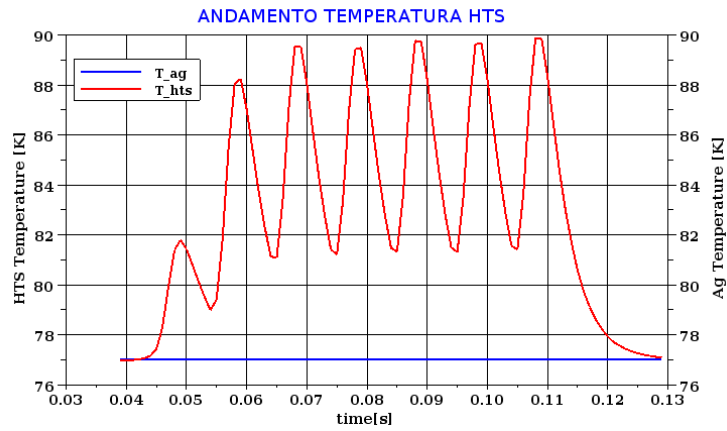


Figura 5.16: *Andamento della temperatura del materiale HTS*

SC in modo tale che la capacità termica complessiva del sistema nastro e la superficie di scambio siano grandi abbastanza al fine di attenuare l'aumento di temperatura.

Aumentare a dismisura il volume di materiale SC nel caso del DC resistive SFCL non implica necessariamente un aumento delle perdite di potenza così come avviene nel caso del dispositivo AC Resistive SFCL.

Capitolo 6

Dimensionamento di massima

In questo capitolo viene presentata una progettazione di massima di un dispositivo DC Resistive SFCL i cui parametri di progetto sono stati ricavati dallo studio illustrato nel paragrafo 4.3 a pagina 64.

Le caratteristiche tecniche del dispositivo sono illustrate nella tabella 6.1 In

Nominal Rate	25 MVA
Nominal Voltage	20 kV
Quenching current	1225 A
Inductance	5 mH
Quenched resistance	5 Ω

Tabella 6.1: *Caratteristiche nominali di un dispositivo DC Resistive SFCL*

particolare l'obiettivo della progettazione di massima è fornire la quantità e la dimensione dei dispositivi elettrici fondamentali che costituiscono l'intero sistema.

Sono esclusi dalla trattazione il sistema criogenico e il sistema di isolamento elettrico.

Nel paragrafo 6.1 vengono fatte delle considerazioni in merito alle possibili modalità di connessione dello shunt resistivo e alla scelta del valore della sua resistenza.

Prendendo come riferimento lo schema elettrico di base di figura 4.1 a pagina 56, nel paragrafo 6.2 si eseguirà il dimensionamento dell'avvolgimento superconduttivo compreso tra i morsetti CD del ponte, mentre nel paragrafo 3.2 viene riportato il dimensionamento del ponte di diodi.

6.1 Shunt Resistor

Questo dispositivo è di fondamentale importanza in quanto può essere visto come elemento di raccordo tra le esigenze tecniche del dispositivo limitatore e quelle del sistema elettrico di potenza destinato ad ospitarlo.

La progettazione di un dispositivo limitatore SFCL può prevedere diversi approcci [96].

Al fine di agevolare la fase di recupero del limitatore, si può scegliere la strategia di avere un effetto limitante in cui la transizione del materiale SC avviene con lieve aumento della temperatura così come asserito alla fine del Capitolo 5. Ciò implica avere un valore molto elevato di resistenza transita ovvero un impiego di nastri SC con elevate lunghezze. Infatti vale la seguente relazione:

$$\left(\frac{U}{l}\right)^2 = \frac{1}{\Delta t} \int_{T_c}^{T_{max}} \rho_{av} c_{av} dT$$

dove

U è la tensione di linea

l è la lunghezza del nastro SC

T_c la temperatura critica

T_{max} la temperatura max raggiunta

ρ_{av} la resistività elettrica

c_{av} il calore specifico complessivi del nastro

Essendo fissati i valori della tensione di linea e dei parametri ρ_{av} e c_{av} , l'unico modo per contenere l'aumento di T_{max} è di aumentare la lunghezza del nastro l .

Tuttavia una resistenza transita elevata potrebbe ridurre troppo la corrente di corto circuito ed essere tale da non garantire l'intervento tempestivo delle protezioni.

In questo senso, la scelta del valore della resistenza di shunt va fatta principalmente per adeguare il valore della corrente di corto circuito ai requisiti

del sistema di protezione della rete.

Lo shunt resistor, inoltre, contribuisce a limitare la potenza dissipata per effetto joule nell'avvolgimento superconduttivo; la corrente richiamata da esso, infatti, genera una caduta di tensione ulteriore sull'impedenza di corto circuito della rete attenuando così quella sul dispositivo limitatore [97, 98]. Con riferimento a uno shunt resistivo, un altro contributo importante è l'ulteriore assorbimento di potenza attiva che esso comporta durante la fase di limitazione; questo porta ad avere due vantaggi:

- attenua la tensione di ripristino e agevola l'estinzione dell'arco tra i poli durante la fase di apertura dell'interruttore di potenza;[99]
- migliora la stabilità transitoria del sistema riducendo e attenuando l'angolo di deviazione δ nelle macchine sincrone[100]

Un'ulteriore funzione dello shunt resistor è quella di attenuare eventuali sovratensioni sull'avvolgimento superconduttivo conseguenti all'istantanea transizione dallo stato SC a quello normale.

Nel caso del dispositivo DC Resistive SFCL possono essere presi in considerazione due configurazioni possibili di connessione per lo shunt resistor.

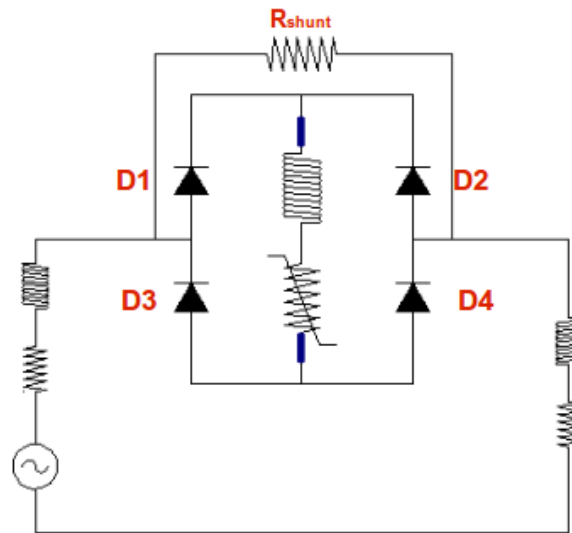


Figura 6.1: Configurazione a) shunt resistor DC Resistive SFCL

La configurazione in figura 6.1 a) prevede che, durante la condizione di guasto, lo shunt resistor si trovi in parallelo con il ramo serie L_{SC}, R_{SC} . La

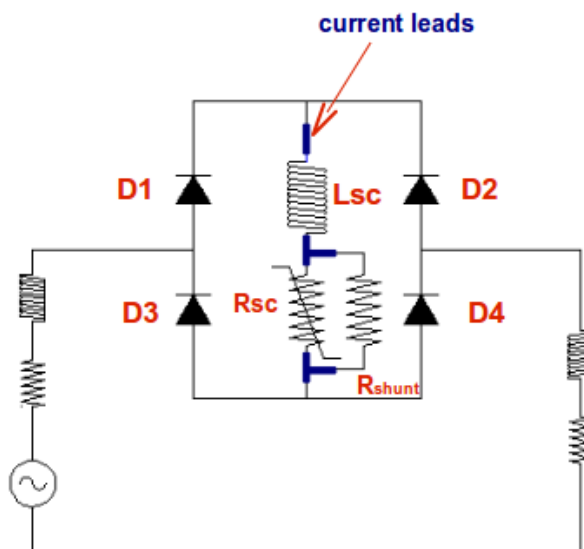


Figura 6.2: Configurazione b) shunt resistor DC Resistive SFCL

configurazione in figura 6.2 b) invece, prevede il parallelo tra lo shunt resistor e l'avvolgimento superconduttivo con la sola componente resistiva R_{SC} . Quest'ultima configurazione presuppone che L_{SC} e R_{SC} siano realizzati separatamente mediante due avvolgimenti dedicati e che la connessione con lo shunt resistor avvenga attraverso un ulteriore discendente di corrente.

La configurazione di 6.2 b) garantisce una dissipazione di potenza per effetto joule inferiore rispetto a quella 6.1 a). Infatti in tal caso, a parità di corrente I_{SC} , la tensione sull'avvolgimento superconduttivo R_{SC} risulta essere più piccola in quanto una parte della tensione di alimentazione cade oltre che sull'impedenza di rete anche sulla induttanza L_{SC} [101].

Nel paragrafo 4.3 di pagina 64 si è stabilito che un valore di resistenza complessiva transita di $5\ \Omega$ poteva essere ritenuto adeguato per disaccoppiare le due sbarre durante il guasto e al tempo stesso limitare adeguatamente la corrente di guasto.

Questo valore di resistenza dovrebbe essere complessivamente garantito anche in caso di presenza di un resistore di shunt, pertanto la resistenza equivalente del parallelo tra la resistenza transita R_q e la resistenza R_{shunt} dovrebbe essere almeno uguale a $5\ \Omega$.

Al fine di ridurre al massimo il valore della corrente di guasto che attraversa il superconduttore, la R_q deve avere un valore più elevato possibile rispetto

a quello di R_{shunt} . Come parametri di progetto scegliamo allora $R_q = 30 \Omega$ e $R_{shunt} = 6 \Omega$.

Con questi due valori l'effetto limitante del limitatore durante il guasto è lo stesso di quello illustrato in figura 4.9 e figura 4.10 di pagina 69.

Da calcoli effettuati con EMTP risulta che la potenza dissipata per effetto joule nel superconduttore durante la fase di estinzione del guasto, che in questo caso si è supposta durare 80 ms, è di 0.61 MJ (circa 170 Wh) nel caso di figura 6.1 a) e di 0.14 MJ (circa 40 Wh) nel caso di figura 6.2 b).

Nel caso in cui il resistore di shunt non venga connesso, l'energia dissipata per effetto joule sul conduttore è di 1.8 MJ (circa 500 Wh).

Quella di figura 6.1 a) è da scegliere come configurazione di connessione di progetto se si desidera evitare l'installazione di un ulteriore discendente di corrente. Inoltre ciò permetterebbe di avere maggiori vincoli di libertà nel progettare un unico avvolgimento superconduttivo avente in seno sia l'effetto induttivo che quello resistivo non lineare.

6.2 Avvolgimento Superconduttivo

Il nastro MgB2

Il regime di funzionamento del DC Resistive SFCL, praticamente vicino a quello di corrente continua e costante, riduce drasticamente le perdite e pertanto apre prospettive interessanti riguardo all'utilizzo di materiali e sistemi criogenici economici. In tali condizioni di regime, infatti, è possibile pensare all'impiego di un materiale come l'MgB2, il quale ha la caratteristica di avere un basso valore della temperatura critica $T_c = 39K$. Esso è comunque apprezzato per il suo processo di produzione, che risulta essere semplice, flessibile ed economico[102]. Tale caratteristica, unita al basso costo del mixing di polveri del Diboruro e del Magnesio, lo porta ad essere di gran lunga il più economico tra i materiali HTS. Il suo processo di produzione, infatti, in linea di massima, comporta fasi tipiche dell'industria metallurgica convenzionale. Esso prevede in sintesi una sinterizzazione delle polveri con successivi cicli di riscaldamento e raffreddamento ed estrusione finale.

Un nastro MgB2, a differenza di quelli 2GHTS, può essere sagomato secondo diverse forme, con soluzioni multi o monofilamentare, e con diverse op-

zioni di scelta sui materiali da utilizzare come stabilizzatore elettrico, termico e/o come supporto meccanico.

Studi e valutazioni sulle caratteristiche e proprietà del materiale MgB_2 , in merito alla sua applicazione in un dispositivo SFCL, sono stati effettuati su campioni di diversa tipologia [103].

Questi dimostrano la robustezza del materiale nei confronti di eventuali disomogeneità. Buono e soddisfacente anche il comportamento termico dimostrato in particolare per un campione di nastro di MgB_2 ottenuto con processo ex-situ dove come stabilizzatore e supporto meccanico vengono utilizzati rispettivamente N_b , Cu e una lega $CuNi$.

In letteratura è possibile trovare altri test di corto circuito eseguiti su prototipi da laboratorio. In [104] vengono illustrati quelli relativi ad un prototipo ottenuto impiegando un nastro monofilamentare immerso in una guaina di Cu e in un involucro di acciaio inossidabile. I test mostrano il suo buon comportamento nell'effetto limitante soprattutto in riferimento alla velocità con cui avviene la transizione. Interessante è notare che in questo caso il sistema di raffreddamento utilizzato è ottenuto mediante l'applicazione di una soluzione criogenica commercialmente disponibile che evita l'utilizzo di liquidi refrigeranti (cryogen-free).

Risultati a ulteriore conferma di quanto sopra detto si trovano nei test di corto circuito di un prototipo di 500 kVA [105] effettuati nell'ambito del progetto italiano LIMSAT. In questo studio vengono utilizzati due cavi in MgB_2 ; entrambi utilizzano il N_i come supporto meccanico, ma in un caso viene utilizzato un nucleo di Cu come stabilizzatore elettrico e termico (vedi figura 6.3). Viene puntualizzata la criticità legata alla quantità apprezzabile

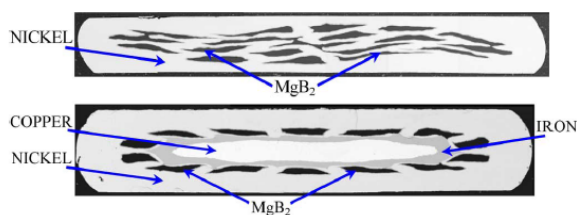


Figura 6.3: Micrografie nastri multifilamentari MgB_2 progetto LIMSAT

di perdite AC dovute alla presenza della matrice ferromagnetica del N_i . Alla temperatura di esercizio dell' MgB_2 , infatti, lo smaltimento delle perdite è sicuramente più gravoso.

In figura 6.4 è possibile vedere il ciclo di isteresi legato alle perdite di magnetizzazione della matrice di N_i rilevato elaborando i dati acquisiti durante le condizioni di funzionamento nominale del prototipo.

Tale tipo di problematica sarebbe comunque fortemente attenuata nel DC Resistive SFCL, in quanto le perdite si ridurrebbero ad una piccola area appendice del vertice del ciclo di isteresi.

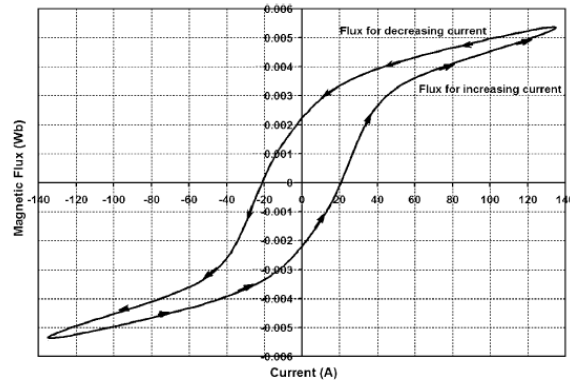


Figura 6.4: *Curva di isteresi del flusso magnetico in funzione della corrente*

Il fenomeno delle perdite nella matrice di N_i è stato studiato con dovizia di dettagli e approfondimenti sia con analisi sperimentali [106] che con simulazioni numeriche [107, 108].

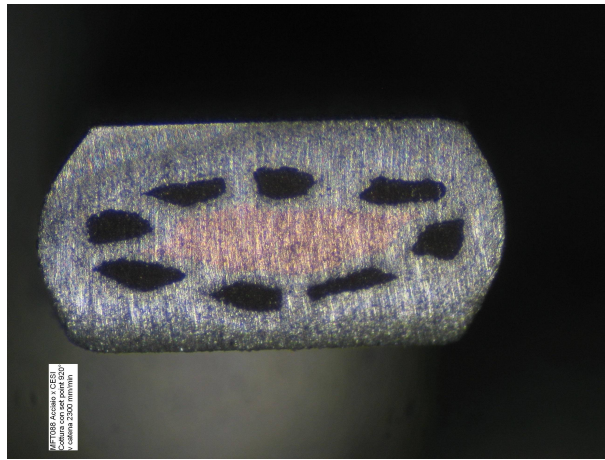
La problematica relativa alle perdite AC nella guaina metallica può essere affrontata attraverso l'utilizzo di nastri di MgB2 che utilizzano per esempio il Titanio (T_i) (materiale non ferromagnetico) in sostituzione del N_i . Analisi numeriche su tali tipi di nastro, infatti, dimostrano una riduzione drastica delle perdite in regime di AC [109].

La figura 6.5 mostra la sezione del nastro multifilamentare prodotto dalla Columbus Superconductors che è stato scelto nel dimensionamento riportato nel presente capitolo. Le caratteristiche tecniche dal nastro utilizzato sono presentate nella tabella 6.2 Il valore della corrente critica rispetto al campo induzione magnetica applicato è illustrato nella figura 6.6.

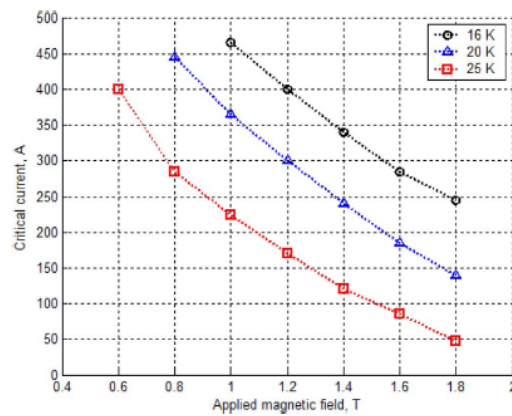
Geometria Avvolgimento

L'avvolgimento superconduttivo da realizzare per il dispositivo DC Resistive SFCL oggetto di studio deve avere le seguenti caratteristiche:

- una induttanza $L_{SC} = 5mH$

Figura 6.5: Sezione nastro MgB₂ Columbus Superconductor

Cross section	$2.30 \times 1.10 \text{ mm}^2$
Number of MgB ₂ filaments	8
Superconducting section	0.32 mm^2
Stabilization material	Cu
Sheath material	Steel
Quenched resistance per unit length	$0.1 \Omega/\text{m}$

Tabella 6.2: Caratteristiche tecniche del nastro MgB₂Figura 6.6: Corrente critica del nastro MgB₂ Columbus Superconductors

- una resistenza $R_q = 30\Omega$
- un valore di corrente critica $I_c = 1225A$

La configurazione geometrica e spaziale dell'avvolgimento deve essere tale da assicurare sia il valore di induttanza desiderato che quello di corrente critica.

Il valore della corrente critica del dispositivo dipende, infatti, da quello del nastro utilizzato che a sua volta dipende dall'intensità e direzione del campo induzione \vec{B} . La distribuzione nello spazio di quest'ultimo dipende ovviamente dalla distribuzione del campo densità di corrente \vec{J} che è vincolata dalla disposizione nello spazio del nastro SC.

Inoltre la lunghezza complessiva del nastro MgB2 ha un limite inferiore in quanto deve essere garantito il valore di resistenza transita R_q .

Per la realizzazione dell'avvolgimento complessivo sono considerati dei moduli unitari di avvolgimento denominati pancakes o anche gallette che saranno opportunamente collegati in serie tra loro.

La modalità secondo la quale queste unità di avvolgimento vengono disposte nello spazio ed elettricamente connesse tra loro, stabilisce e determina i valori di L_{SC} , I_c e R_q .

Questi ultimi dipendono in particolare:

- dal numero di pancakes utilizzato
- dalla distanza assiale tra questi
- dal numero di spire
- dal raggio interno
- dal verso di percorrenza della corrente

Attraverso una procedura di ottimizzazione è possibile trovare la configurazione ottimale che realizza i valori di progetto richiesti. La configurazione risultante, a seguito dei valori di progetto desiderati che costituiscono i dati di ingresso da inserire nella procedura di calcolo, risulta essere costituita da 19 pancakes tutti dello stesso spessore.

La distanza tra i pancakes è di 26 mm.

Ogni pancake è realizzato mediante tre nastri in parallelo con 2.30 mm di larghezza e 1.10 mm di spessore.

I pancakes risultano mutuamente accoppiati secondo una matrice di elementi il cui segno è determinato dalla modalità di connessione elettrica dei morsetti di ogni singolo pancake.

Alcuni di questi vengono connessi in modalità opposta (anti-series) rispetto al verso di percorrenza della corrente ritenuto convenzionalmente positivo.

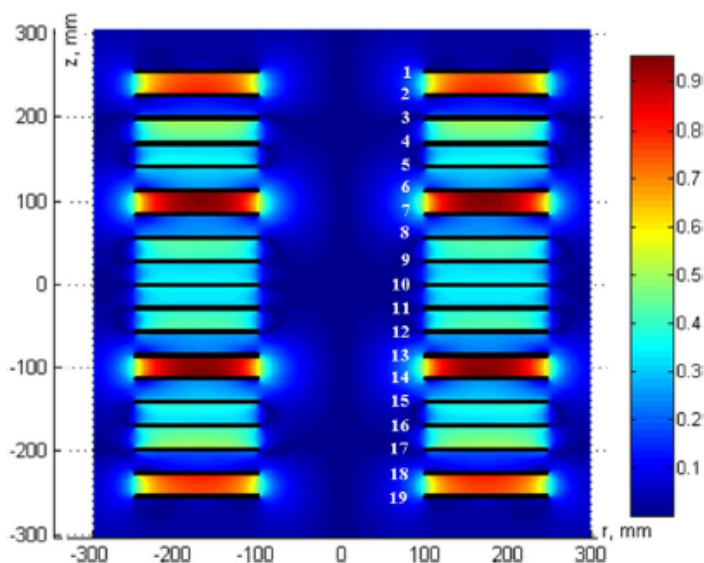


Figura 6.7: *Configurazione pancakes e distribuzione del campo induzione \vec{B}*

In figura 6.7 è possibile comprendere meglio la configurazione finale della disposizione dei 19 pancakes e della intensità della distribuzione di campo induzione magnetica in corrispondenza della circolazione del valore di corrente nominale di progetto. Le caratteristiche principali dell'avvolgimento sono elencati nella tabella 6.3.

Il valore massimo dell'intensità del campo induzione calcolato che attraversa il nastro è di 0.6 T; in base alle caratteristiche tecniche del nastro MgB2 (figura 6.6) a 25 K il valore di corrente critica corrispondente è di 400 A, quindi il valore di corrente critica del SFCL è di 1200 A, che è prossimo al valore di corrente nominale di progetto.

Il valore di corrente critica tuttavia dipende anche dalla temperatura di esercizio, quindi variando quest'ultima si può ottenere, nei limiti del possibile, il valore desiderato di corrente critica.

Operating Temperature	24 K
Critical current	1200 A
Inductance	5.1 mH
Quenched resistance	31.2 Ω
Maximum field on the conductor	0.6 T
Space between the pancakes	26 mm
Number of Pancakes	19
Pancakes connected in anti-series	2,3,5,6,9,11,14,15,17,18
Inner diameter	200 mm
Number of parallel tapes	3
Number of turns of one pancake	45
Outer diameter	497 mm
Height of a single pancake	2.3 mm
Total height of the windings	512 mm
Total length of MgB ₂ cable	2.81 km

Tabella 6.3: *Caratteristiche tecniche avvolgimento*

Come si può vedere dalla figura 6.6 si può avere un aumento di I_c diminuendo la temperatura di esercizio da 25 K a 20 K. Tale manovra è possibile se si utilizza un sistema di raffreddamento senza uso di liquidi criogenici (cryogen-free). Del resto la configurazione geometrica e la tecnologia di avvolgimento presi in considerazione si prestano in modo particolare a questo tipo di raffreddamento. Ogni pancake, infatti, presenta una superficie superiore e inferiore che può essere sfruttata come ponte termico tra il conduttore ed un eventuale scambiatore di calore superficiale (piste termiche).

6.3 Ponte Diodi

Per dimensionare il ponte di diodi sono state prese in considerazione le caratteristiche tecniche (tabella 6.4) di un dispositivo a semiconduttore commercialmente disponibile.

Nelle normali condizioni di funzionamento ogni ramo del ponte è interessato da metà semionda della corrente di linea. Secondo i dati nominali quindi, esso dovrebbe portare un valore medio di corrente pari a circa 600 A. Tale

Breakdown Voltage, V_{BR}	5000 V
RMS forward current ($T_c = 88\text{ }^\circ\text{C}$), I_{FRMS}	700 A
Average forward current ($T_c = 88\text{ }^\circ\text{C}$, half sinusoid), I_{FAV}	400 A
Surge forward current ($T_c = 160\text{ }^\circ\text{C}$), I_{FSM}	6600 A

Tabella 6.4: *Diodo Semikron SKNa 402*

esigenza di trasporto può essere soddisfatta impiegando due diodi in parallelo, cui corrisponde un valore medio di impulso tollerabile di 13.2 KA che è ben al di sotto di quello che interesserebbe il dispositivo SFCL in caso di guasto (un valore di picco di corrente di circa 1.5 kA).

Un'altra considerazione da fare è che nelle condizioni di guasto, ogni ramo del ponte che rimane interdetto alla conduzione può essere sottoposto nel peggiore dei casi alla tensione nominale di rete, che nel caso esaminato è di 11.5 kV_{rms} ovvero di 16.3 kV di picco. Poiché la tensione di Breakdown di ogni diodo è di 5 kV, è necessario che ogni ramo del ponte sia costituito dalla serie di quattro coppie di diodi connessi in parallelo; in tal caso esso sarà in grado di sostenere le sollecitazioni elettriche e termiche durante il guasto. In definitiva il singolo diodo rappresentato schematicamente nelle

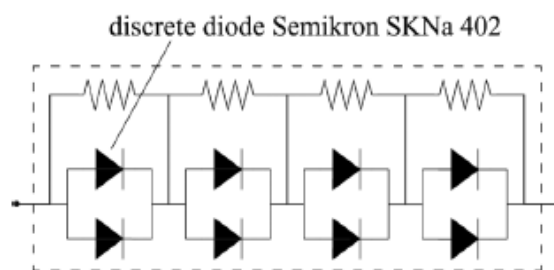
Figura 6.8: *Schema elettrico di connessione di diodi per ogni ramo del ponte*

figure precedenti è in realtà simbolo di un modulo di otto diodi connessi così come rappresentato in figura 6.8.

I resistori collegati in parallelo hanno elevati valori di resistenza e sono necessari per garantire una distribuzione uniforme della tensione ai capi dei singoli diodi quando sono inversamente polarizzati.

In definitiva, il numero totale di diodi necessari a realizzare il dispositivo SFCL trifase è 96.

La potenza media dissipata in ogni diodo calcolata nelle normali condizioni di funzionamento a regime nominale e a pieno carico è di 23.3 W. Tale valore, calcolato utilizzando la caratteristica tensione–corrente a 90 ° C riportata nella documentazione tecnica del componente, risulta coerente con i dati di potenza dissipata riportati dal costruttore in funzione di determinati regimi di funzionamento.

La potenza totale dissipata dal ponte di diodi risulta quindi essere pari a 2.2 kW che è un valore trascurabile rispetto ai dati nominali di targa del dispositivo.

Tale valore è la potenza necessaria utilizzata da un sistema di raffreddamento per asportare circa 148 W equivalenti di perdite in regime AC a 66 K e circa 48 W equivalenti di perdite in regime AC a 25 K (utilizzando un coefficiente di prestazione COP di 15). Questo dato è importante in quanto definisce il limite economico di convenienza del dispositivo DC Resistive SFCL rispetto ad un SFCL di tipo resistivo in cui il superconduttore è attraversato da una corrente alternata a frequenza industriale.

Infatti il DC Resistive SFCL non avrebbe senso di esistere se un SFCL di tipo resistivo, a parità di costo e avente simili caratteristiche e prestazioni, avesse delle perdite AC inferiore o uguali a 148 W a 66 K.

Capitolo 7

Conclusioni

La problematica dell'aumento dei valori delle correnti di corto circuito ha preso maggiore vigore nell'ultimo decennio in seguito all'aumento della richiesta di consumo energetico.

I dispositivi SFCL rappresentano senz'altro una valida soluzione tecnica, ma non ancora una realtà concreta per il mercato. I nastri 2G HTS CC infatti non sono prodotti ancora in quantità industriali e a costi accettabili.

Tuttavia per assicurare elevate prestazioni è necessario l'impiego di elevati volumi di materiale SC, soprattutto se si pensa alle applicazioni in AT dove la potenza di corto circuito ha valori decisamente superiori rispetto a quelle in MT.

Per i dispositivi SFCL, in cui è previsto un regime di funzionamento in AC per il materiale SC impiegato, l'utilizzo di grandi quantità di volume di quest'ultimo potrebbe comportare elevate quantità di energia elettrica dissipata nella camera criostatica, dove il raffreddamento e l'asportazione del calore avvengono a temperature di circa 70 gradi Kelvin.

Nel presente lavoro di tesi è stato proposto un concetto innovativo di dispositivo SFCL per applicazioni di potenza in AC, denominato DC Resistive SFCL, concepito e brevettato all'interno del Dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università degli Studi di Bologna. Esso ha la caratteristica di garantire un regime di funzionamento DC per il materiale superconduttore. Tale concetto innovativo ha le potenzialità per essere una valida soluzione economica oltre che tecnica.

Il principale aspetto qualificante del concetto innovativo del DC Resistive SFCL è rappresentato, infatti, dalla possibilità di ridurre drasticamente le

dissipazioni di energia elettrica nel criostato rispetto a quelle sviluppate nel concetto di dispositivo SFCL resistivo illustrato nel capitolo 3 par.3.1 a pagina 29.

La peculiarità di avere perdite basse, o quasi nulle nel criostato, permette una maggiore efficienza e minori sollecitazioni per il sistema criogenico, oltre alla possibilità di utilizzare soluzioni impiantistiche “snelle”, dette in gergo anglosassone “cryogen-free”, ovvero in assenza di liquido refrigerante.

Un'altra conseguenza del fatto di avere perdite quasi nulle nel criostato è la possibilità di impiegare elevati volumi di materiale superconduttivo al fine di aumentare le prestazioni del dispositivo SFCL durante la fase della limitazione della corrente di guasto.

Questa ultima conseguenza non porta necessariamente ad un aggravio dei costi di fabbricazione del dispositivo, poichè il concetto DC Resistive SFCL permette di utilizzare un materiale superconduttivo come il Diboruro di Magnesio (MgB_2) che è di gran lunga il più economico tra quelli attualmente presenti sul mercato.

Il suo valore di temperatura critica (circa 39 K) non risulta essere, infatti, motivo di preclusione per il suo utilizzo, così come avviene nelle altre tipologie di SFCL esistenti che prevedono un regime di funzionamento AC per il materiale SC impiegato.

Il materiale MgB_2 inoltre è disponibile commercialmente nelle quantità desiderate e trova in Italia punti di eccellenza, sia per competenza tecnica che per capacità produttiva.

Dalle attività sperimentali eseguite e dalle simulazioni effettuate emergono alcuni indirizzi da seguire nella fase di progettazione e realizzazione di un eventuale prototipo.

Gli elementi qualificanti sopra riportati aprono prospettive interessanti e incoraggianti per investire risorse al fine di procedere ad ulteriori approfondimenti e analisi di tipo impiantistico e ingegneristico.

A fine 2010 è stato siglato un accordo di concessione di licenza di brevetto da parte dell'Università di Bologna con una nota azienda italiana, leader europea nella produzione di nastri MgB_2 .

Il progetto prevede la realizzazione di un prototipo per un'applicazione nel sistema elettrico di potenza in media tensione a 20 kV.

Bibliografia

- [1] T Taylor et al. *Fault Current Review Study*. Technical Report no 2005-11222-1-R.04, ABB, 2005.
- [2] RM Scanlan et al. Superconducting materials for large scale applications. In *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, volume vol 92 no 10, pages pp 1639–1654, October 2004.
- [3] B. W. Lee et al. *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter of the First Half Cycle Non-Limiting Type*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19(no.3):pp 1888–1891, june 2009.
- [4] M.Noel et al. *Testing Bulk HTS Modules for Resistive Superconducting Fault Current Limiters*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13(no.2):pp 1976–1979, june 2003.
- [5] W Prusseit. *Superconductor Industry in Germany: Status and Perspectives*. *IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM, No. 4, April*, 2008.
- [6] H.W. Neumueller et al. *Development of Resistive Fault Current Limiters Based on YBCO Coated Conductors*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19(no.3):pp 1950–1955, june 2009.
- [7] H.J. Boening and D.A. Paice. *Fault Current Limiter Using a Superconducting Coil*. *IEEE Trans. On Magnetics*, vol. 19(no.3):pp 1051–1053, may 1983.
- [8] JA Waynert et al. *Restoration and Testing of an HTS Fault Current Controller*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13(no.2):pp 1984–1987, june 2003.

- [9] T. Hoshino et al. *Proposal of Saturated DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)*. *Cryogenics*, vol. 41(no.7):pp 469–474, 2001.
- [10] I. Muta et al. *Proposal of DC Shield Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter*. *Cryogenics*, vol. 44(no.7):pp 177–182, 2004.
- [11] K. M. Salim et al. *Proposal of Rectifier Type Superconducting Fault Current Limiter with No-Inductive Reactor (SFCL)*. *Cryogenics*, vol. 44(no.7):pp 177–182, 2004.
- [12] K Kaiho K Kajikawa and N Tamada. *Design and Current-Limiting Simulation of Magnetic-Shield type Superconducting Fault Current Limiter with High Tc Superconductors*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 32, NO. 2, July 1996.
- [13] Y A Bashkirov et al. *Application of Superconducting Shields in Current-Limiting and Special-Purpose Transformers*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 5, NO. 2, June 1995.
- [14] Y Xin et al. *Development of Saturated Iron Core HTS Fault Current Limiters*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 17, NO. 2, June 2007.
- [15] Y Xin et al. *Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 19, NO. 3, June 2009.
- [16] T Uchii T Matsumura and Y Yokomizu. *Development of Flux-Lock-Type Fault Current Limiter with High-Tc Superconducting Element*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 7, NO. 7, June 1997.
- [17] H Fujishiro T Naito and Y Yamada. *Anisotropic thermal transport in double-pancake coil wound with DI-BSCCO tape*. *Physica C*, 470:pp 1397–1400, 2010.
- [18] Zorzoli. *Black out del sistema elettrico produttivo del 28 settembre 2003*. Technical report, Ministero Attività Produttive, 2003. <http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it>.
- [19] E Mazzini. *Requisiti e caratteristiche di riferimento delle stazioni elettriche della RTN*. Technical report, Terna Spa, 2006. pp. 8, <http://www.terna.it>.

- [20] Salvati. *Piano di difesa del Sistema Elettrico*. Technical report, Terna Spa, 2000. pp. 8, <http://www.terna.it>.
- [21] Terna Spa. *Piano di sviluppo della rete RTN 2007*. Technical report, Terna Spa, 2007. pp. 72, <http://www.terna.it>.
- [22] Terna Spa. *Piano di sviluppo della rete RTN 2010*. Technical report, Terna Spa, 2010. pp. 62, <http://www.terna.it>.
- [23] ENTSOE. *Pilot Ten Yeras Network Development Plan 2010:executive summary*. Technical report, Terna Spa, 2010. <https://www.entsoe.eu>.
- [24] R Adapa. *Fault Current Managment Guidebook-Update*. EPRI, December 2006.
- [25] CIGRÉ WG A3.10. *Fault Current Limiters in Medium and High Voltage Systems*. Technical report, CIGRÉ Technical Brochure 239, December 2003.
- [26] H Schmitt. *Fault current limiters report on cigre wg a3.10 activities*. In *Power Engineering Society General Meeting, 2006*. IEEE, Print ISBN: 1-4244-0493-2, page 5, 2006.
- [27] L Kovalsky et al. *Applications of Superconducting Fault Current Limiter in Electric Power Trasmission Systems*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15(no. 2), june 2005.
- [28] A Newmann. *Application of Fault Current Limiters*. Technical report, BERR, 2007.
- [29] JH Teng and CN Lu. *Optimum of fault current limiter placement*. In *The 14th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*. ISAP, 2007. November 4–8.
- [30] H Jäger. *Interaction between fault current limiters and protection – a glance at the final report of cigre–wg a3.16*. In *Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, Print ISBN: 978-1-4244-1905-0, page 5 pp, 2006.

- [31] EPRI. *Fault Current Limiters – Utility Needs and Perspectives*. 1008696 1008694, EPRI, Palo Alto.
- [32] M Noe and B R Oswald. *Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power System*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 9(NO. 2), june 1999.
- [33] B Marchionini and M Steurer. *An Assessment for Fault Current Limiter Testing Requirements*. Technical report, US Department of Energy, 2009.
- [34] N K Fall and B Marchionini. *Fault Current Limiter – R & D Status and Testing Issues*. <http://www.energetics.com/resourcecenter/products/studies/samples/Documents/2009-FCL-RandD-Status-Report.pdf>, 2009.
- [35] CIGRÉ WG 13.10. *Functional Specification for a Fault Current Limiter*. Technical Report 194, CIGRÉ, 2001. pp.22-29.
- [36] PM. Duggan. *Integration Issues for Fault Current Limiters and other new Technologies - a Utility Perspective*. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006.
- [37] R Adapa. *Survey of Fault Current Limiter (FCL) Technologies*. Technical report, EPRI, Palo Alto.
- [38] M Steurer and K Fröhlich. *Current Limiters—State of Art*. In *Fourth Workshop and Conference on EHV Technology, Bangalore*, 1998.
- [39] Colloca et al. *Environmentally friendly, low cost hv/mv distribution substations using new compact hv and mv equipment*. In *Electricity Distribution*. CIREN. 16th International Conference and Exhibition on, IEE Conf. Publ No. 482, 2001.
- [40] C Romano and G Perli. *Technological evolution of mv equipment technological evolution*. In *Electricity Distribution, 2005. CIREN 2005. 18th International Conference and Exhibition on*, 2005.
- [41] W V Hassenzahl et al. *Electric power applications of superconductivity*. In *Proceedings of the IEEE*, volume VOL. 92 NO 10. IEEE, October 2004.

- [42] M Noe et al. Progress on the r&d of fault current limiters for utility applications. In *PESGM - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008.
- [43] Alan Mantooth et al. Solid-state fault current limiters:silicon versus silicon carbide. In *PESGM - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008.
- [44] T Ueda et al. *Solid-state current limiter for power distribution system. IEEE Trans. on Power Delivery*, vol 8(no 4):pp. 1796–1801, October 1993.
- [45] T Genjj et al. *400 V class highspeed current limiting circuit breaker for electric power system. IEEE Trans. on Power Delivery*, vol 9(no 3):pp. 1428–1435, July 1994.
- [46] Press release. Fault current limiters: An overview. <http://www.superconductivitynewsupdate.com/newsletters/FaultCurrentLimitersOct2007web.htm>, October 2007.
- [47] C. Meyer S. Schröder Rik W. De Doncker. *Solid-State Circuit Breakers and Current Limiters for Medium-Voltage Systems Having Distributed Power Systems. IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol. n.19(n.5), september 2004.
- [48] K Kunde et al. Integration of fast acting electronic fault current limiters (efcl) in medium-voltage systems. In *17th International Conference on Electricity Distribution. CIRED, Barcelona, 12-15 May 2003* 2003.
- [49] Argawal et al. *9 kV, 1 cmx1 cm SiC super gto technology development for pulse power. In Pulsed Power Conference, 2009. PPC '09. IEEE*, pages pp 264–269, january 2010.
- [50] J G Bednorz and K A Müller. *Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, vol 64(no 2):pp 189–193, 1986.
- [51] M Noe and M Steurer. *High-Temperature Superconductor Fault Current Limiters: concepts, applications,and development status. Supercond. Sci. Technol.*, 20 R15(no. 3), 2007.

- [52] B. W. Lee et al. *Practical application issues of superconducting faultcurrent limiters for electric power systems. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18(no.2):pp 620–623, june 2008.
- [53] S Kalsi and A Malozemoff. *HTS fault current limiter concept. In Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, 2004.*
- [54] M. Steurer et al. *A Novel Hybrid Current-Limiting Circuit Braker for Medium Voltage: Principle and Test Result. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18(no. 2):pp 460–467, 2003.
- [55] O. B. Hyun et al. *Introduction of a Hybryd SFCL in KEPCO Grid and Local Points at issue. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19(no.3):pp 1946–1949, june 2009.
- [56] B. W. Lee et al. *Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18(no.2):pp 624–627, june 2008.
- [57] P. Tixador et al. *Current Limitation with Bulk Y–Ba–Cu–O. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11(no.1):pp 2034–2037, june 2001.
- [58] M. Chen et al. *6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi–2212 superconductor. Physica C, 372:pp 1657–1663, 2002.*
- [59] J Bock et al. *CURL 10: Development and Field-Test of a 10 kV/10 MVA Resistive Current Limiter Based on Bulk MCP-BSCCO 2212. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 15, NO. 2, JUNE 2005.
- [60] H Walter S Elschner, F Breuer and J Bock. *Magnetic Field Assisted Quench Propagation as a New Concept for Resistive Current Limiting Devices. Journal of Physics: Conference Series 43, 468:pp 917–920, 2008.*
- [61] Dommerque et al. *First Commercial Medium Voltage Superconducting Fault-Current Limiters:production, test and installation. Supercond. Sci. Technol.*, 23 (2010) 034020 (6pp).
- [62] M Noe et al. *Conceptual Design of a 110 kV Resistive Superconducting Fault Current Limiter Using MCP-BSCCO 2212 Bulk Material. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 17, NO. 2, JUNE 2007.

- [63] Ootani et al. *Breakdown of YBCO Thin Films during Current Limiting and Methods of Improving Current Limiting Performance. Electrical Engineering in Japan*, vol. 166, No. 1, 2009.
- [64] L Martini et al. *Design and Development of 15 MVA Class Fault Current Limiter for Distribution Systems. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19(no.3):pp 1855–1858, june 2009.
- [65] A P Malozemoff et al. *Progress in high temperature superconductor coated conductors and their applications. Supercond. Sci. Technol.*, 21(034005):pp 7, 2008.
- [66] Y. J. Kim et al. *Recovery estimation for over-current test of non-inductive fault current limiters using numerical analysis. Cryogenics*, 2010. doi:10.1016/j.cryogenics.2010.07.007.
- [67] D.W. Hazelton J.H. Llambes and C.S. Weber. *Recovery Under Load Performance of 2nd Generation HTS Superconducting Fault Current Limiter for Electric Power Transmission Lines. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19(no.3):pp 1968–1971, june 2009.
- [68] T Yazawa et al. *Design and Test Results of 66 kV High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 16, NO. 2, June 2006.
- [69] E.M. Leung at al. *High Temperature Superconducting Fault Current Limiter Development. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7(no.2):pp 985–988, june 1997.
- [70] E.M. Leung at al. *Design & Development of a 15 kV,20 kA HTS Fault Current Limiter. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 10(no.1):pp 832–835, march 2000.
- [71] T. Hoshino et al. *DC Reactor Effect on Bridge Type Superconducting Fault Current Limiter During Load Increasing. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11(no.1):pp 1944–1947, march 2001.
- [72] K.M. Salim et al. *Waveform Analysis of the Bridge Type SFCL During Load Changing and Fault Time. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13(no.2):pp 1992–1995, june 2003.

- [73] W. Paul et al. *Test of 1.2 MVA high-Tc superconducting fault current limiter. Supercond. Sci. Technol.*, 10 (1997) 914–918.
- [74] M Ichikawa and M Okazaki. *A Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter using a Bi2212 Thick Film Cylinder. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 5, NO. 2, June 1995.
- [75] Y Shouno T Nii and Y Shirai. *Basic Experiments on Transformer Type SCFCL of Rewound Structure Using BSCCO Wire. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 19, NO. 3, June 2009.
- [76] V Meerovich V Sokolovsky and I Vajda. *Comparison of a Self-Limiting Transformer and a Transformer Type FCL With HTS Elements. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 17, NO. 2, June 2007.
- [77] N Hayakawa et al. *Feasibility study on superconducting fault current limiting transformer (SFCLT). Cryogenics* 40 (2000) 325-331.
- [78] H Kojima et al. *Self-recovery Characteristics of High-Tc SFCL Transformer (HTc-SFCLT) with 2G CC. Supercond. Sci. Technol.*, Conference Series 97, 2007.
- [79] K Omura et al. *Current Limiting Characteristics of Parallel-Connected CC for High-Tc SFCL Transformer (HTc-SFCLT). IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 19, NO. 3, June 2009.
- [80] M Kotari et al. *Development of 2 MVA Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with YBCO Coated Conductors. IEEE European Supercond. News Forum* n 11 january 2010.
- [81] KC Parton BP Raju and TC Bartram. *A Current Limiting Device Using Superconducting DC Bias Applications and Prospects. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, VOL. 101, NO. 9, September 1982.
- [82] Zenergy Power. *First Commercial Sale of Fault Current Limiter.* <http://www.zenergypower.com>.
- [83] Y Sun et al. *Dc bias system of a 35 kV/90 MVA saturated iron core SFCL. Cryogenics*, 2010.

- [84] SH Lim. *Comparative study on current limiting characteristics of flux-lock type SFCL with series or parallel connection of two coils. Physica C*, 468:pp 2076–2080, 2008.
- [85] JF Moon SH Lim and JC Kim. *Improvement on Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Using E-I Core. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 19, NO. 3, June 2009.
- [86] JC Kim SH Lim and BW Lee. *Improvement of Recovery Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Using a Superconductor's Trigger. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, VOL. 20, NO. 3, June 2010.
- [87] A. Morandi and S. Imparato. *A DC Operating Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter for AC Applications. Supercond. Sci. Technol.*, vol. 22, 2009.
- [88] K Nam et al. *Thermal and Electrical Analysis of Coated Conductor Under AC Over-Current. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17(no.2):pp 1923–1926, june 2007.
- [89] F Roy et al. *Magneto-Thermal Modeling of Second-Generation HTS for Resistive Fault Current Limiter Design Purpose. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18(no.1):pp 29–35, march 2008.
- [90] R Brambilla et al. *Development of an edge-element model for AC loss computation of High Temperature Superconductors. Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, 2007.
- [91] EN 50160. *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems. Europea Standards.*
- [92] http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKKD_162_07891000.pdf.
- [93] S Imparato et al. *Experimental of AC losses of a DC Resistive SFCL Prototype. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20(no.3):pp 1199–1201, june 2010.
- [94] M Brocchi et al. *Design and Development of 15 MVA Class Fault Current Limiter for Distribution Systems. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20(no.3):pp 1199–1201, june 2010.

- [95] H Fujishiro T Naito and Y Yamada. *Thermal Conductivity and Thermal Dilatation of Commercial BSCCO (DI-BSCCO) Tapes*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19(no.3):pp 3034–3036, june 2009.
- [96] W. Paul et al. *Fault Current Limiter based on High Temperature Superconductors—Different Concepts, Test Results, Simulations, Applications*. *Physica C*, 354:pp 27–33, 2001.
- [97] HP Kraemer et al. *Test of a 2 MVA medium voltage HTS fault current limiter module made of YBCO coated conductors*. IOP Conference Series 97: EUCAS 2007.
- [98] W Schmidt et al. *Design and test of current limiting modules using YBCO-coated conductors*. *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 23,, december 2010. doi:10.1088/0953-2048/23/1/014024.
- [99] L. Ye and A.M. Campbel. *Case study of HTS resistive superconducting fault current limiter in electrical distribution systems*. *Electric Power Systems Research*, 77(5–6):534–539, April 2007. doi:10.1016/j.epsr.2006.05.007.
- [100] Y. Shirai et al. *Improvement of Power System Stability by Use of Superconducting Fault Current Limiter With ZnO Device and Resistor in Parallel*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18(no.2):pp 680–683, june 2008.
- [101] S. Imparato A. Morandi M. Fabbri F. Negrini and P. L. Ribani. *Investigation of shunt resistor’s connection for a DC Resistive SFCL*. *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 9,(no. 4), 2009. 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 09).
- [102] G. Grasso. *Cost consideration for MgB2 conductors*. *SCENET–WG Workshop*, march 7–8 2005. Enschede, The Netherlands.
- [103] M. Majoros et al. *Fault current limiting properties of MgB2 Superconducting Wires*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17(no.2):pp 1764–1767, june 2007.
- [104] Lin Ye et al. *MgB2 Sample Test for Possible Applications of Superconducting Fault Current Limiters*. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17(no.2):pp 2826–2829, june 2007.

- [105] R.B. Dalessandro et al. *Test Result on 500 kVA— MgB₂ —Based Fault Current Limiter Prototypes. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17(no.2):pp 1776–1779, june 2007.
- [106] S. Murase et al. *Self–Field Loss in AC Transport Current of Ni–Sheated MgB₂ Superconducting Tapes. IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16(no.2):pp 1403–1406, june 2006.
- [107] ·TA. Coombs · Z. Hong · L. Ye · M. Majoros, A.M. Campbel. *Numerical estimation of Ac losses in MgB₂ wires in self–field conditions. J Supercond Nov Magn*, pages pp205–211, 2010.
- [108] K Kajikawa et al. *AC Losses in monofilamentary MgB₂ round wire carrying alternating transport currents. Supercond. Sci. Technol.*, vol. 23,, march 2010. doi:10.1088/0953-2048/23/4/045026.
- [109] L. Rostila · S. Brisigotti · G. Grasso. *New Type of Non-magnetically Sheathed MgB₂ Wires—First Sight to AC Losses with Numerical Simulations. J Supercond Nov Magn*, 2010.