

**ESTUDO E SIMULAÇÕES DO DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE DE
CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTOR**

Felipe da Silva Lázaro

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:



Prof. Sebastião Ércules Melo Oliveira, D.Sc
(Orientador)



Orsino Borges de Oliveira Filho, M.Sc
(Co-orientador)



Prof. Rubens de Andrade Junior, D.Sc



Alexander Polasek, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 2009

Para minha família e esposa por estarem
comigo em todos os momentos.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus que me deu a vida, e a ele devo agradecimentos por ter me ajudado a ingressar e concluir minha graduação.

À minha família por me estimular a estudar e por ter fornecido todos os meios para que eu fosse feliz e tivesse sucesso nos meus estudos.

À minha esposa por ter paciência ao suportar os momentos de estresse e preocupação, sempre me dando carinho e apoio para que eu chegasse ao sucesso.

Aos professores do departamento de engenharia elétrica da UFRJ por terem transmitidos seus conhecimentos e se esforçado para que eu aprendesse.

Ao CEPEL por ter me ajudado com infra-estrutura e financeiramente durante meu período de estágio.

Aos pesquisadores do CEPEL Orsino Borges de Oliveira Filho e Alexander Polasek por terem me ajudado em todas as ocasiões, pela atenção a mim dada e pela disposição de tentar me tornar um engenheiro mais capacitado.

Ao meu orientador o professor Sebastião Ércules Melo de Oliveira.

À UFRJ por ter me proporcionado 5 anos de aprendizado, me formando como pessoa e como profissional.

Aos amigos da UFRJ e do Laboratório de Supercondutividade do CEPEL.

Resumo do projeto final apresentado ao DEE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

ESTUDO E SIMULAÇÕES DO DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTOR

Felipe da Silva Lázaro

Janeiro/2008

Orientador: Sebastião Hércules de Oliveira

Co-orientador: Orsino de Oliveira Filho

Departamento de Engenharia Elétrica

Este trabalho aborda o tema supercondutividade e suas aplicações no setor elétrico com ênfase no dispositivo limitador de corrente de curto-circuito supercondutor (DLCCS).

Devido ao constante crescimento do setor elétrico (expansão e construção de subestações) e ao sistema brasileiro ser fortemente interligado para aumentar a confiabilidade no fornecimento de energia, os níveis de curto-circuito vêm aumentando, podendo tornar a proteção presente superada, de forma a ser necessária a substituição total ou parcial do dispositivo de proteção contra curto-circuito.

Diversos dispositivos de proteção contra sobrecorrente são empregados atualmente (fusíveis, reatores, ...), porém possuem suas limitações, seja pela capacidade, tamanho, custo, perdas ou mesmo a necessidade de troca manual após a ocorrência do curto-circuito.

É possível se utilizar os materiais supercondutores no setor elétrico como limitadores de corrente de curto-circuito, se beneficiando da característica dos materiais supercondutores que é a passagem do estado supercondutor ao estado não-supercondutor quando algum dos parâmetros críticos forem superados.

Este trabalho enfoca nos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores do tipo resistivo e na modelagem da variação da resistência durante a transição do estado supercondutor ao não-supercondutor, em como ocorre essa variação no tempo, possibilitando efetuar simulações para prever o comportamento da corrente de um circuito quando um dispositivo limitador de corrente de curto-circuito estiver presente.

Índice

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – O Fenômeno da Supercondutividade.....	2
1.1.1 – Efeito Meissner.....	7
1.1.2 – Supercondutores do tipo I e do tipo II.....	10
CAPÍTULO 2 – APLICAÇÕES DE MATERIAIS SUPERCONDUTORES NA ENGENHARIA ELÉTRICA.....	12
2.1 – Armazenamento de energia em campo magnético.....	12
2.2 – Mancais magnéticos.....	14
2.3 – Motores e Geradores.....	15
2.4 – Cabos.....	15
2.5 – Transformadores.....	15
2.6 – Limitador de corrente.....	16
CAPÍTULO 3 – CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....	17
3.1 – Descrição do problema.....	18
3.2 – Determinação de correntes de curto-circuito.....	22
3.2.1 – Curto-circuito trifásico.....	25
3.2.2 – Curto-circuito bifásico.....	26
3.2.3 – Curto-circuito bifásico-terra.....	27
3.2.4 – Curto-circuito fase-terra.....	28
3.3 – Curto-circuito através de impedância.....	29
CAPÍTULO 4 – DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO.....	33
4.1 – Reator limitador de Núcleo de Ar.....	34
4.2 – Dispositivo Pirotécnico.....	35
4.3 – Elos de Corrente contínua.....	38
4.3.1 – ATCC Convencional.....	38

4.3.2 – ATCC não-convencional.....	39
4.4 – Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida.....	40
4.5 – Controlador de Potência Interfases.....	40
4.6 – Dispositivo com Tecnologia FACTS.....	41
CAPÍTULO 5 – O DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO SUPERCONDUTOR (DLCCS).....	43
5.1 – Tipos de DLCCS.....	44
5.1.1 – Tipo resistivo.....	44
5.1.2 – Tipo indutivo.....	46
5.1.3 – Tipo Transformador.....	48
5.1.4 – Tipo Ponte.....	50
5.1.5 – Dispositivo com multifunções.....	51
CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÕES DO DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTOR DO TIPO RESISTIVO (DLCCS-R).....	54
6.1 – Variação da resistividade de um material supercondutor.....	56
6.2 – O DLCCS-R em um circuito elétrico.....	58
6.3 – Modelagem da variação da resistividade no tempo.....	62
6.4 – Simulações.....	65
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	70
7.1 – Conclusões.....	70
7.2 – Trabalhos futuros.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
APÊNDICE A.....	76
Listagem do programa para plotagem da tabela nº 6.1.....	76
APÊNDICE B.....	79
Listagem do programa para as simulações da seção 6.4.....	79

Capítulo 1

Introdução

A partir da descoberta dos materiais supercondutores em 1911 por Kamerlingh Onnes, que verificou que ao se abaixar a temperatura do mercúrio até perto de zero Kelvin (aproximadamente 4,2 K) a resistividade do mercúrio diminuía drasticamente a zero. A partir dessa descoberta iniciou-se uma avalanche de estudos sobre o tema. Descobriu-se que existiam parâmetros que separavam o estado condutor do supercondutor, parâmetros esses que são a temperatura crítica (T_c), densidade de corrente crítica (J_c) e campo magnético crítico (H_c), abaixo dos quais o material permanece no estado supercondutor.

Contudo, até 1986, o recorde de T_c era de 23K, do composto Nb_3Ge (Nióbio-Germânio). Naquele ano foi descoberto o primeiro supercondutor de alta temperatura, que foi o $LaBaCaCuO$ com temperatura crítica acima de 30K. A partir daí muitos outros materiais de alta temperatura foram descobertos, com destaque aos que podiam ser refrigerados com nitrogênio líquido, tornando a sua utilização muito mais viável já que o nitrogênio líquido tem menor custo que o

Hélio líquido, que antes era utilizado para refrigerar os materiais supercondutores de baixa temperatura.

A temperatura crítica mais alta descoberta hoje, oficialmente é de aproximadamente 133 K. [1]

Essas descobertas estimularam pesquisas a fim de se encontrar aplicações para os materiais supercondutores no setor elétrico, algumas das quais são: transformadores, limitadores de corrente, armazenadores de energia, cabos, motores etc.

A aplicação escolhida para esse projeto sobre supercondutores foi o limitador de corrente de curto-circuito supercondutor, já que as características dos supercondutores indicam a possibilidade de serem utilizados como limitadores de corrente.

Quando ocorre uma falta, em geral, a corrente de curto-circuito se torna muito maior que a corrente nominal do circuito. Utilizando-se um material supercondutor com corrente crítica um pouco acima da nominal do circuito; quando ocorrer a falta a corrente será maior que a corrente crítica do material, fazendo com que ocorra a transição para o estado não-supercondutor, passando da condição de baixa resistência para uma resistência que não pode ser desprezada, limitando assim a corrente e protegendo o circuito da elevada corrente de curto-circuito. Após cessar a falta o material resfria e volta ao seu estado supercondutor.

1.1 – O Fenômeno da supercondutividade

A supercondutividade é um fenômeno pelo qual certos materiais, quando resfriados a temperaturas extremamente baixas, apresentam resistividade nula em corrente contínua, baixas perdas em corrente alternada e diamagnetismo perfeito, expulsando campos magnéticos de seu interior (efeito Meissner).

O físico holandês Kamerlingh Onnes considerava que as vibrações dos átomos dos metais criavam barreiras para o deslocamento dos elétrons, causando resistência. Com a diminuição da temperatura, as vibrações deveriam diminuir até se cessarem no zero absoluto, diminuindo-se assim a resistência até cair a zero ohms no zero absoluto em um metal puro e sem defeitos na rede cristalina [2].

Já Lord Kelvin previa que, já que o metal se encontrava na temperatura de zero absoluto, não haveria fluxo de elétrons, pois esses também estariam em repouso. Assim sendo, a

resistência elétrica na temperatura zero absoluto seria infinita. [3]

Para se determinar o verdadeiro comportamento dos metais seria necessário se efetuar experimentos a baixíssimas temperaturas. Isso só foi possível em 1908, quando o professor Kamerlingh Onnes conseguiu liquefazer o hélio, atingindo uma temperatura de aproximadamente 4,2 K.

Em 1911 Kamerlingh Onnes verificou que ao se abaixar a temperatura do mercúrio até aproximadamente 4,2 K, a resistividade do mercúrio diminuía drasticamente a zero; em particular, que a resistividade diminuía quando a temperatura era inferior a uma temperatura específica, que foi denominada temperatura crítica de transição (T_c), conforme mostrado na figura 1.1 [4]. Vale ressaltar que o valor de T_c depende da composição química do material supercondutor.

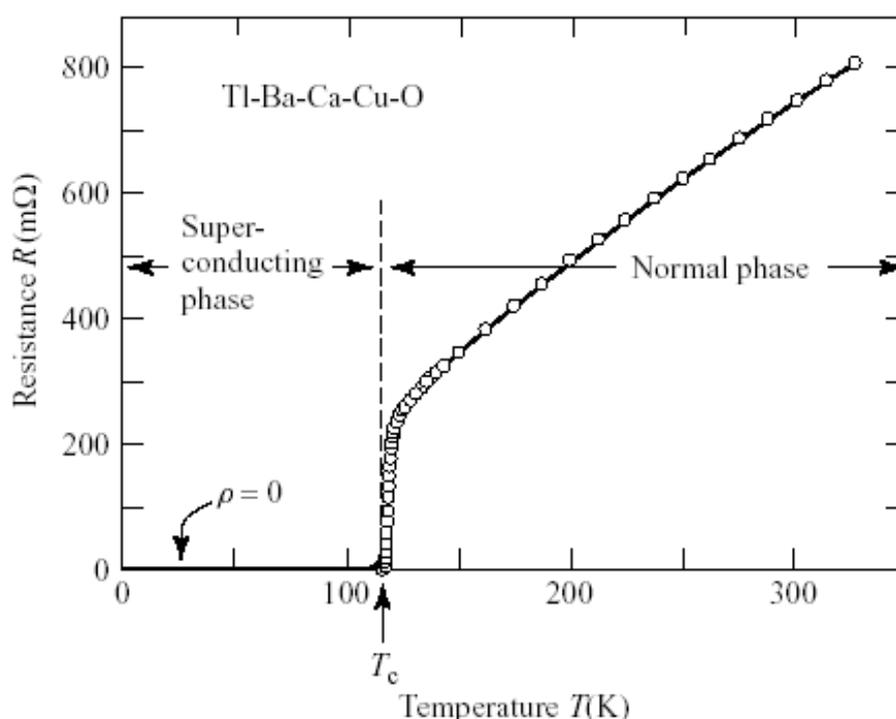


Figura 1.1 – Comportamento de um supercondutor em função da temperatura. [4]

Posteriormente, verificou-se que, além da temperatura crítica, existiam mais dois parâmetros que também limitavam o fenômeno da supercondutividade de um material, que eram a densidade de corrente crítica (J_c) e o campo magnético crítico (H_c), acima dos quais também não se via mais o fenômeno da supercondutividade.

A figura 1.2 mostra o estado supercondutor em função dos parâmetros críticos T_c , H_c e J_c . Enquanto a temperatura (T), o campo magnético (H) e a densidade de corrente elétrica (J) estiverem com valores inferiores aos críticos, isto é, no interior da superfície mostrada na figura 1.2 o material permanece no estado supercondutor. Isto é:

$$\text{Estado supercondutor} \rightarrow \begin{cases} T < T_c \\ H < H_c \\ J < J_c \end{cases} \quad (1.1)$$

Se pelo menos uma das relações de (1.1) não for satisfeita, o material transita ao estado não-supercondutor.

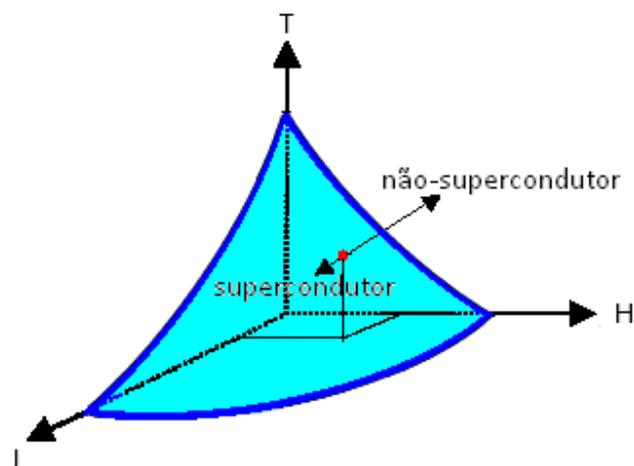


Figura 1.2 – Superfície genérica para o estado supercondutor

Uma das primeiras aplicações dos materiais supercondutores imaginadas por Kamerlingh Onnes foi a fabricação de um forte magneto supercondutor. No entanto, os valores medidos de H_c e de J_c para os materiais conhecidos na época eram relativamente baixos. Por isso só foi possível construir fortes magnetos supercondutores após a descoberta dos chamados supercondutores do tipo II.

As primeiras ligas metálicas que apresentam supercondutividade do tipo II foram descobertas a partir de 1930, mas só nas décadas de 50 e 60 mostrou-se experimentalmente que

materiais supercondutores poderiam suportar altas correntes em altos campos magnéticos, levando ao desenvolvimento e produção de magnetos supercondutores para altos campos [5].

A partir dessas novas descobertas, intensificaram-se ainda mais os estudos sobre os materiais supercondutores e, em 1986, Berdnorz e Müller, pesquisadores da IBM de Zurique, descobriram o primeiro supercondutor de alta temperatura crítica, um material cerâmico com temperatura crítica acima de 30 K. [3]

Esta descoberta desafiava paradigmas teóricos até então estabelecidos e também estimulou a descoberta de novos materiais com valores de T_c ainda mais altos, o que levou Berdnorz e Müller a ganharem o prêmio Nobel de Física de 1987.

Oficialmente, a temperatura crítica mais alta alcançada até hoje é de aproximadamente 133 K; a pressão ambiente e cerca de 160 K; sob altas pressões. [6]

Na figura 1.3 está a evolução da descoberta de materiais supercondutores, com temperaturas críticas cada vez mais elevadas. Vale notar o grande salto ocorrido a partir de 1986.

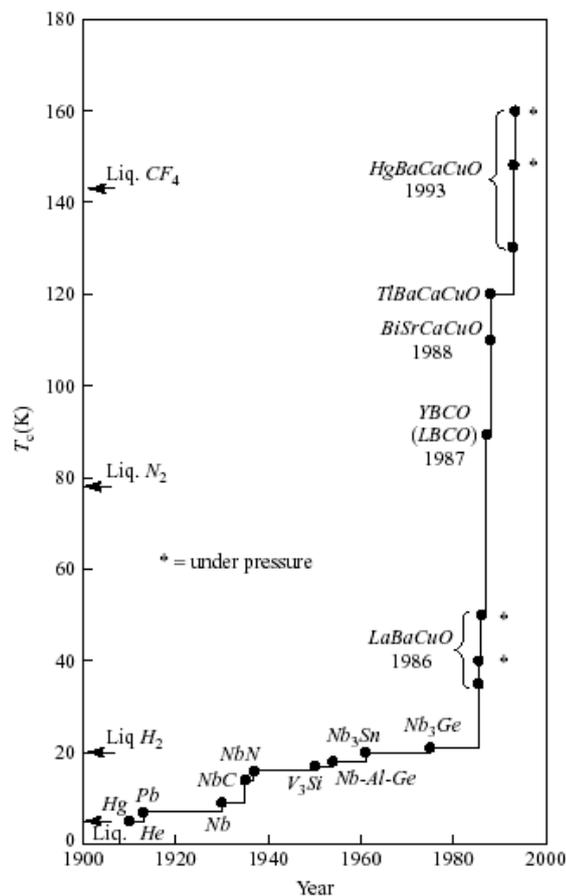


Figura 1.3 – Evolução do valor de T_c dos materiais supercondutores. [4]

A tabela 1.1 mostra diversos tipos de supercondutores de baixa temperatura crítica, sendo que a liga NbTi (nióbio-titânio) domina o mercado atual dos materiais supercondutores, seguida pelo composto intermetálico Nb₃Sn (nióbio-estanho). Porém, devido à necessidade de resfriamento a hélio líquido, a utilização destes materiais em aplicações no setor elétrico não são atrativos economicamente.

Tabela 1.1 – Alguns materiais supercondutores de baixa temperatura [4].

Composto	T_c (K)	B_{c2} (T)
LaMo ₆ S ₈	7	45
VTi	7	11
NbTi	9,8	15
SnMo ₆ S ₈	12	34
V ₃ Ga	14	21
PbMo ₆ S ₈	15	60
V ₃ Si	17	25
Nb ₃ Sn	18	24
Nb ₃ Ge	23.2	38

Com a descoberta dos materiais supercondutores de alta temperatura, principalmente aqueles com temperatura crítica superior a 77 K, tornando-se possível seu resfriamento com o nitrogênio líquido, que possui menor custo que a refrigeração a hélio líquido, tornou-se viável a utilização dos materiais supercondutores em aplicações no setor elétrico.

A tabela 1.2 lista alguns materiais supercondutores de alta temperatura crítica com suas respectivas temperaturas críticas.

Tabela 1.2 – Alguns materiais supercondutores de alta temperatura e com $T_c > 30\text{K}$. [4]

Composto	T_c (K)
MgB ₂	39
La _{1.85} Sr _{0.15} CuO ₄	39
Yba ₂ Cu ₃ O ₇	92
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	< 96 K
Bi ₂ SrCa ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
Tl ₂ Ba ₂ CuO ₆	90
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₈	110
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125
TlBa ₂ CaCu ₂ O ₇	91
TlBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉	116
TlBa ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₁₁	122
HgBa ₂ CuO ₄	95
HgBa ₂ CaCu ₂ O ₆	122
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	133

O MgB₂ explicitado na tabela 1.2, descoberto em 2001, é de grande importância atualmente por ser um material barato e por ser relativamente fácil a sua utilização na fabricação de fios. A sua temperatura crítica, porém, é inferior a temperatura do nitrogênio no estado líquido, não sendo possível ser resfriado pelo mesmo.

1.1.1 – Efeito Meissner

Em 1933, Meissner e Ochsenfeld fizeram uma experiência para observar a penetração de campo magnético em materiais no estado supercondutor, comparando com a penetração de campo magnético em um condutor ideal (hipótese), conforme mostrado nas figuras 1.4 e 1.5

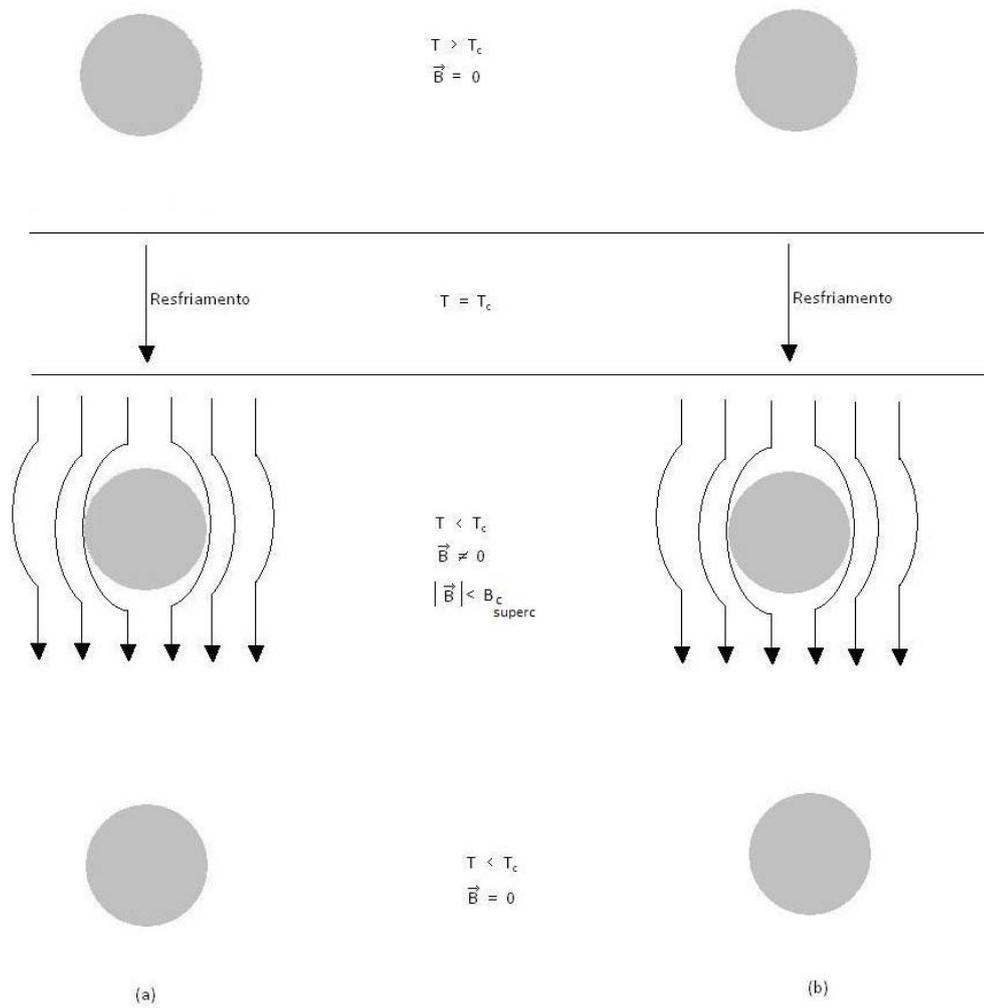


Figura 1.4 – Comportamento do material supercondutor com campo inicial nulo: (a) Condutor normal ideal, (b) Supercondutor

1.1.2 – Supercondutores do tipo I e do tipo II

Os materiais supercondutores foram separados em dois grupos, tipo I e tipo II, devido a diferenças significativas entre eles.

Os supercondutores do tipo I possuem dois estados, supercondutor e normal. Se o campo magnético aplicado for inferior ao campo magnético crítico, não ocorre penetração de campo.

Se o campo aplicado for superior ao campo magnético crítico do material, ocorre penetração total de campo e o material deixa de ser supercondutor. [7]

Os supercondutores do tipo II possuem três estados: Supercondutor, misto e normal, e apresentam dois campos magnéticos críticos, entre os quais se encontra o estado misto.

Se o campo magnético aplicado for inferior ao campo magnético crítico inicial (H_{c1}), não ocorre penetração de campo no núcleo do material, mas se o campo aplicado for superior ao crítico inicial (H_{c1}) do material, ocorre penetração parcial de campo, na forma de fluxos magnéticos quantizados, e o material se encontra no estado misto, onde permanece supercondutor. Quando o campo magnético aplicado supera o campo magnético crítico final (H_{c2}), ocorre a penetração total e o material deixa de ser supercondutor.

A figura 1.6 mostra como varia a magnetização nos materiais supercondutores do tipo I e do tipo II em função do campo magnético aplicado.

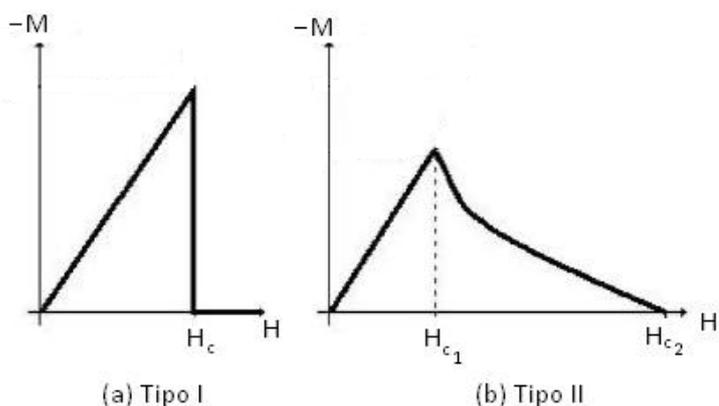


Figura 1.6 - Variação da magnetização em função do campo magnético em materiais supercondutores do tipo I e do tipo II.

Sabe-se que:

$$B = \mu(H + M) \quad (1.2)$$

Para $B = 0$:

$$B = \mu(H + M) = 0 \rightarrow H = -M \quad (1.3)$$

A figura 1.7 mostra o diagrama de fases dos materiais supercondutores relacionando o campo magnético aplicado e a temperatura, para os materiais do tipo I e II.

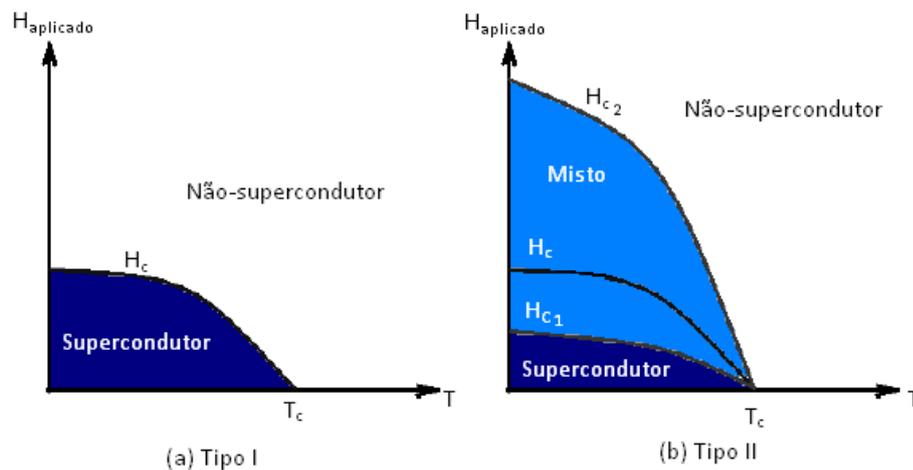


Figura 1.7 – Diagramas de fases dos supercondutores do tipo I e II.

Com a descoberta dos materiais supercondutores do tipo II, o interesse nas aplicações dos materiais supercondutores aumentou, devido principalmente a possibilidade de utilização do material no estado supercondutor em campos magnéticos mais elevados, já que $H_{c2} \gg H_{c1}$.

Uma característica importante nos supercondutores do tipo II é a possibilidade de aprisionamento do fluxo magnético na rede de vórtices, basta que o supercondutor tenha sido fabricado com algumas imperfeições espalhadas no material, chamadas de centros de aprisionamento [8]. Essas regiões evitam que os fluxóides mudem constantemente de posição, evitando que ocorra perda de energia no supercondutor e fazendo com que surja uma força restauradora oposta, caso haja mudança no campo externo.

Capítulo 2

Aplicações de materiais supercondutores na engenharia elétrica

No capítulo anterior foi apresentado o fenômeno da supercondutividade. Agora serão vistas algumas formas de aplicações dos materiais supercondutores na engenharia elétrica. As tecnologias descritas a seguir encontram-se em desenvolvimento em diversos países, tendo sido demonstradas em protótipos de média e de larga escala.

2.1 – Armazenamento de energia em campo magnético

Um método de armazenamento de energia elétrica sem praticamente nenhuma perda consiste na utilização de bobinas supercondutoras, ou anéis supercondutores, que armazenam energia sob a forma de energia magnética, através das correntes persistentes, correntes que

circulam sem que se tenha uma fonte conectada ao circuito, que circulam numa bobina supercondutora, sendo que o tempo de relaxação de uma corrente persistente em um armazenador de energia supercondutor é previsto como sendo maior que a do tempo decorrido desde o Big-Bang até os dias atuais [9]. Estes dispositivos são conhecidos como SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage Systems).

O armazenamento energia é feito ligando-se uma bobina supercondutora a uma fonte de corrente, a fonte de corrente impõe uma corrente circulante no circuito, posteriormente a fonte é curto-circuitada e retirada do circuito, e verifica-se que a corrente circulará indefinidamente na bobina supercondutora até que ela seja conectada a um circuito para ser descarregada.

Uma das aplicações para o armazenamento de energia em bobinas supercondutoras é o armazenamento de energia por longo tempo, sob a forma: [7]

$$U_B = \frac{Li^2}{2} \quad (2.1)$$

Onde:

$$\begin{cases} U_B \rightarrow \text{Energia armazenada em uma bobina} \\ L \rightarrow \text{Indutância da bobina} \\ i \rightarrow \text{corrente elétrica que percorre a bobina} \end{cases}$$

As correntes persistentes podem ser demonstradas por: [7]

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{R}{L}t} (A) \quad (2.2)$$

Como para um supercondutor a resistência é aproximadamente zero em corrente contínua, pode-se ver pela equação 2.2 que a corrente permanecerá com o mesmo valor inicial.

A única limitação no caso da bobina supercondutora refere-se ao fato de que a corrente circulante (i) tem que ser menor do que a corrente crítica do material supercondutor da bobina. Porém, como a densidade de corrente crítica é função da temperatura (T) e do campo magnético (H), aumentando-se a seção reta do fio pode-se obter valores mais elevados de corrente, para T e H constantes.

A relação entre a quantidade de material supercondutor e a energia armazenada pode ser

dada pela equação 2.2. [10]

$$V_{sc} = \sqrt{U^3} \quad (2.3)$$

Onde:

V_{sc} = volume de material supercondutor;

U = energia armazenada.

Uma simples planta em grande escala pode armazenar milhares de megawatt-hora de energia, porém este nível de armazenamento de energia ainda está um pouco fora da realidade. [10].

O aperfeiçoamento das técnicas de armazenamento de energia mediante o uso de corrente persistente certamente determinará futuramente a larga utilização do material supercondutor como armazenador de energia.

2.2 – Mancais magnéticos

Duas propriedades dos supercondutores são utilizadas nessa aplicação: o diamagnetismo, responsável pela levitação do disco de magnetos permanentes, e o aprisionamento do fluxo magnético na rede de vórtices do supercondutor, que proporciona a estabilidade passiva (vertical e horizontal) do mancal [8].

Fazendo o resfriamento do supercondutor na presença do campo magnético, ocorre o aprisionamento do fluxo magnético proveniente dos ímãs no supercondutor, devido aos centros de aprisionamento, o que evita o movimento dos vórtices, tornando possível o equilíbrio estável do magneto permanente. Isso também origina uma força restauradora, que traz o magneto para a posição inicial, caso ocorra algum deslocamento [8].

Os seguintes aspectos tornam os mancais magnéticos interessantes para aplicação em motores e geradores elétricos:

- redução do atrito mecânico;
- aumento no rendimento;
- possibilidade de alcance de maiores velocidades que nos mancais convencionais;
- menor dispersão de calor

2.3 – Motores e Geradores

A possibilidade de substituir os enrolamentos dos motores por enrolamentos com fios supercondutores, e até mesmo a utilização de um mancal magnético supercondutor, diminui bastante o tamanho, o peso e aumenta a eficiência da máquina; para grandes máquinas a expectativa de redução de peso e volume é de aproximadamente 50-70% [11].

O uso de materiais supercondutores de baixa temperatura não são economicamente viáveis para essa aplicação, porém com o crescente desenvolvimento dos materiais supercondutores de alta temperatura essa aplicação se tornou viável, tendo-se hoje, em desenvolvimento, motores propulsores de até 36.5 MVA e 120 rpm, turbo-geradores de 100 MVA e 3600 rpm e condensadores síncronos de 10 MVAR e 1800 rpm, que segundo a expectativa se tornarão comercialmente viáveis na próxima década [11].

2.4 – Cabos

A transmissão de energia elétrica através de cabos supercondutores não apresenta perdas em corrente contínua e uma pequena perda em corrente alternada. Entretanto, as perdas em corrente alternada são menores do que as perdas em condutores convencionais. Além da contribuição em relação ao nível de perdas, os cabos supercondutores podem suportar grande densidade de corrente, de 3 a 5 vezes a ampacidade de cabos convencionais [11]. Sendo assim, é possível o emprego de cabos supercondutores em linhas de transmissão subterrâneas, dependendo somente da viabilidade econômica, de futuras descobertas e desenvolvimentos tecnológicos que levem a materiais supercondutores mais baratos e/ou com temperaturas críticas mais altas. Cabos supercondutores de média e alta tensão estão se mostrando como uma solução para o aumento da ampacidade em trechos de galerias subterrâneas congestionadas pela crescente demanda de grandes centros urbanos. O maior destes cabos já instalado foi energizado em abril de 2008, em Long Island, Nova York de 138KV com aproximadamente 600 metros [12].

2.5 – Transformadores

A utilização de uma bobina supercondutora possibilita diminuir bastante o peso e o

volume de um transformador, além de aumentar sua eficiência, já que as perdas nas bobinas supercondutoras são muito menores que nas bobinas normais. Adicionalmente, o nitrogênio líquido empregado para refrigerar o material supercondutor também atua como isolante, substituindo óleos isolantes, o que confere uma grande vantagem para o meio-ambiente e reduz riscos de incêndio nos transformadores [7].

Existem estudos de transformadores supercondutores há décadas [10]. Em 1998, um grupo incluindo a ABB e a EDF construiu e conectou um transformador supercondutor trifásico de 630-kVA 18.7KV/420V na rede de Genebra, Suíça [13]. Diversos protótipos têm sido demonstrados com sucesso [10]. Nos EUA está sendo testado um protótipo de um transformador supercondutor trifásico de 5/10-MVA, 24.9/4.6 KV

2.6 – Limitador de corrente

A aplicação dos materiais supercondutores como limitadores de corrente de curto-circuito é o objeto deste trabalho e será abordado com detalhes no capítulo 5. Antes disso, no capítulo 3 seguinte é feita uma revisão dos conceitos sobre curto-circuito e no capítulo 4 são apresentados alguns dispositivos limitadores de corrente não-supercondutores, alguns com experiência de uso e outros em desenvolvimento.

Capítulo 3

Correntes de curto-circuito

A determinação das correntes de curto-circuito de sistemas elétricos é de fundamental importância para o projeto de um sistema de proteção, somente com o conhecimento desta é possível:

- Dimensionamento das capacidades de interrupção ou ruptura dos equipamentos interruptores (chaves-fusíveis, disjuntores, religadores);
- Dimensionamento de transformadores de corrente;
- Ajustes de relés de proteção;
- Estudo de seletividade e coordenação;
- Verificar a necessidade e dimensionar um dispositivo limitador de corrente.

Além disso, essas correntes também são usadas para determinação dos limites de suportabilidade térmica de cabos, transformadores, chaves de manobra, etc., e pelo tempo

necessário para atuação dos equipamentos de proteção.

É importante observar que a magnitude de uma corrente de curto-circuito, ao contrário da corrente de carga, independe da potência da carga, depende diretamente da potência do gerador, isto é, quanto maior for a potência que o sistema poderá fornecer, maior será a corrente de curto.

3.1 - Descrição do problema

Quando ocorre um curto, surge um transitório equivalente ao fechamento de um circuito RL, em que R e L são os parâmetros do circuito (resistências e indutâncias). Nos primeiros instantes após o curto, a corrente é assimétrica em relação ao eixo dos tempos, isto se deve ao fato do circuito possuir indutância, gerando uma sobrecorrente, que pode ser verificada através da equação diferencial expressa na equação 3.1, a figura 3.1 expressa a equação 3.2.

$$|V_m| \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3.1)$$

Logo:

$$i_{cc}(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + i_{cc,M} \sin(\omega t + \alpha - \theta) \quad (3.2)$$

onde: $\tau = \frac{X}{R}$, $i_0 = \frac{|V_m|}{|Z|} \sin(\theta - \alpha)$, $i_{cc,M} = \frac{|V_m|}{|Z|}$

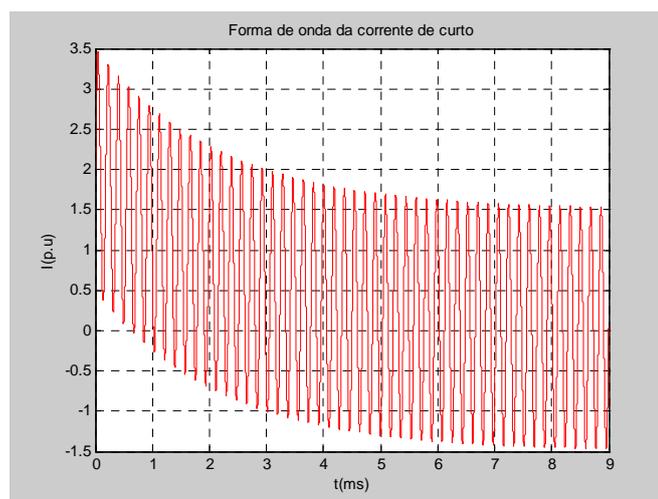


Figura 3.1 – Forma de onda típica da corrente de curto-circuito

A componente $i_{cc,M} \sin(\omega t + \alpha - \theta)$ é conhecida como componente em regime ou simétrica, já a componente $i_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ é uma exponencial chamada de componente unidirecional (ou contínua), a componente assimétrica, $i_{cc}(t)$, é a corrente dinâmica.

Observando-se a equação da corrente de curto, pode-se concluir que a assimetria da corrente será máxima imediatamente após o curto, tornando-se gradualmente simétrica com o passar do tempo, como visto na figura 3.1.

A duração da componente exponencial é função da constante de tempo do circuito, ou seja, X/R , isto é:

$$\begin{aligned} \text{Se } R \ll X, \text{ então } \tau \rightarrow \infty &\Rightarrow i_0 \rightarrow \text{constante} \\ \text{Se } R \gg X, \text{ então } \tau \rightarrow 0 &\Rightarrow i_0 \rightarrow 0 \end{aligned}$$

Em sistemas elétricos de potência, os valores típicos dos tempos de duração da componente contínua são de 0.5 a 8 ciclos de 60Hz (8.3 ms a 133.3 ms).

Tendo em vista a dificuldade de se determinar a magnitude de corrente assimétrica, ela é dividida, para efeito de simplificação de cálculo, nas suas componentes simétrica e exponencial.

A componente simétrica ou de regime, é determinada pelos métodos convencionais de cálculo de curto-circuito. Para isso, empregam-se componentes simétricas, conforme será visto.

A corrente assimétrica é calculada de forma prática, através de fatores de assimetria. São utilizados para multiplicar o valor eficaz da componente em regime. São números que assumem valores típicos entre 1 e 1.7, a depender da relação X/R e pode ser calculada pela equação 3.3. Portanto, dependem da localização do curto-circuito.

Segundo uma tabela de valores típicos de fatores de assimetria [14], pode-se gerar uma curva relacionando os fatores de assimetria com a relação X/R , conforme a figura 3.2.

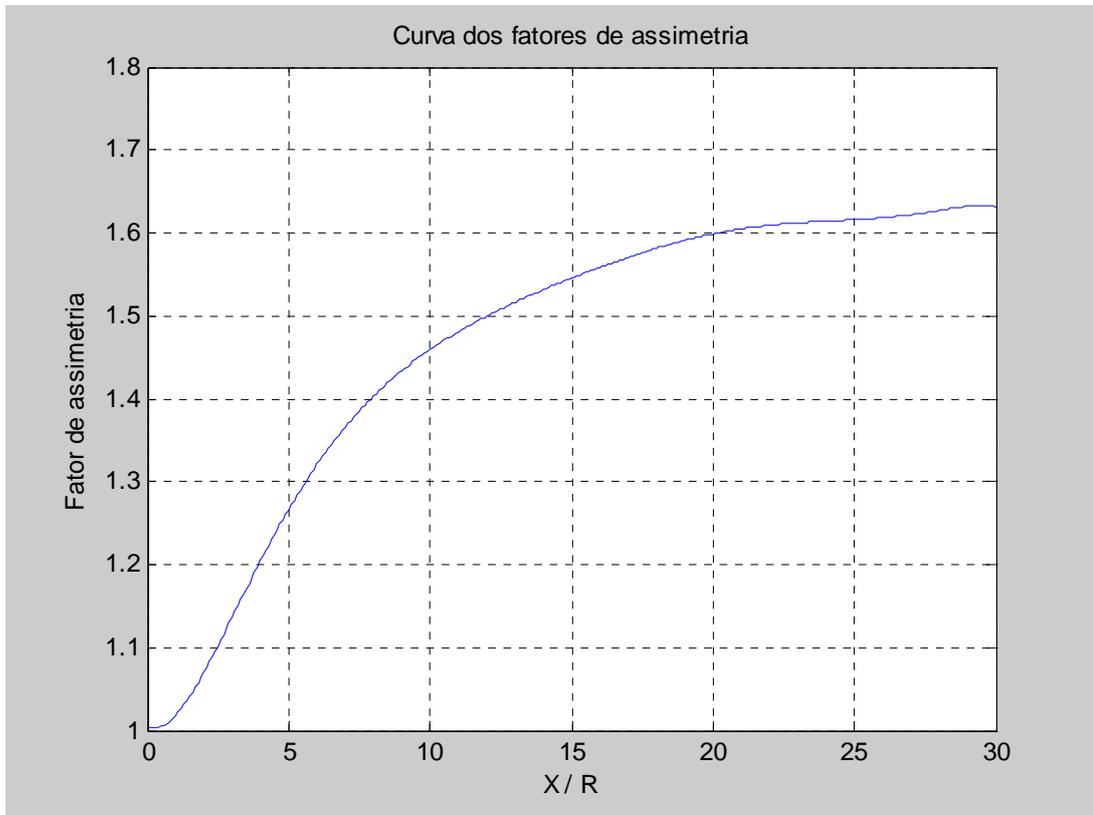


Figura 3.2 – Curva dos fatores de assimetria

Com base na curva da figura 3.2 pode-se representá-la pela equação 3.3:

$$y = -7.44 \times 10^{-12} x^9 + 1.07 \times 10^{-9} x^8 - 6.7 \times 10^{-8} x^7 + 2.42 \times 10^{-6} x^6 - 5.56 \times 10^{-5} x^5 + 8.2658411 \times 10^{-4} x^4 - 0.0076 x^3 + 0.036 x^2 - 0.016 x + 1 \quad (3.3)$$

Para $x \in [0.001; 30]$, com um desvio padrão igual a 0.0026342 e $R^2 = 1.0009388$.

Geralmente, a magnitude da corrente assimétrica é empregada para determinar a capacidade de interrupção de chaves e disjuntores de proteção. Já o valor eficaz da componente simétrica é usado nos estudos de seletividade e coordenação.

Na tabela 3.1 estão explícitos alguns níveis de curto-circuito, e na tabela 3.2 uma estatística de faltas.

Tabela 3.1 – Simulação dos níveis de curto-circuito trifásico e monofásico [15].

Subestações	Tensão [KV]	Capacidade do Disjuntor [KA]	Nível de Curto-Circuito [KA]			
			Sem Usinas Térmicas		Com Usinas Térmicas	
			Trifásico	Monofásico	Trifásico	Monofásico
			Santa Cruz	138	20	22,1
Área de Fontes	138	40	29,1	19,1	37,7	24,8
Rocha Leão	138	20	7,6	7,5	14,8	13,7
Terminal Sul	138	40	33,9	21,8	36,6	22,4
Cascadura 1	138	40	23,5	15,2	28,9	18,9
Cascadura 2	138	40	34,7	22,7	37,8	23,7
Jacarepaguá	138	37	38,2	36,4	43,2	38,4
Grajaú	500	31,5	12,6	11,7	13,0	12,0
Grajaú	138	50	44,9	38,7	47,8	38,8
São José	500	40	12,7	10,6	20,6	16,7
São José 1	138	50	36,5	33,6	43,0	38,9
São José 2	138	50	33,9	31,1	39,1	35,5
Adrianópolis	138	37	19,9	22,5	29,5	33,0
Adrianópolis	345	25	15,3	15,2	26,0	25,1
Adrianópolis	500	31,5	14,5	12,9	24,0	21,5
Campos	345	25	6,2	5,9	13,5	10,0
Campos	138	20	12,8	14,4	21,7	21,9
C. Paulista	500	31,5	17,7	13,4	27,8	19,4
Angra	500	31,5	15,0	16,5	19,8	20,5

Tabela 3.2: Taxas de faltas em linhas de transmissão CA [16].

Tensão	Taxas de faltas	Fase-neutro	Bifásica-terra	Bifásica	Trifásica
345KV	2,31	91 %	7 %	1 %	1 %
230KV	1,68	80 %	17 %	1,5 %	1,5 %
138KV	2,98	73 %	17 %	6 %	4 %

Taxas de faltas = número de faltas por 100 km / ano.

A tabela 3.1 se refere a simulações para calcular o aumento dos níveis de curto-circuito com a inserção de usinas termoelétricas na rede elétrica, os números em azul se referem aos níveis de curto que estão no limite dos disjuntores presentes no circuito, e os números em vermelho se referem aos níveis de curto-circuito que já superaram a capacidade de interrupção de corrente do disjuntor presente.

Dessa forma pode-se entender a grande utilidade de um dispositivo limitador de corrente

para esses casos, diminuindo-se os níveis de curto-circuito com limitadores de corrente é possível se adiar a troca dos disjuntores.

É interessante destacar que segundo a tabela 3.2 a maior incidência de faltas é do tipo fase-neutro.

3.2 - Determinação de correntes de curto-circuito

Para o cálculo das correntes de curto, são necessários os seguintes dados:

- Potências de curto-circuito (monofásica e trifásica) na barra de alta-tensão da subestação, ou impedâncias equivalentes (de seqüências positiva e negativa), vistas atrás desta barra (impedâncias equivalentes do sistema);
- Características do transformador da subestação: potência nominal, tensões nominais (primária, secundária e terciária, se for o caso), impedâncias de seqüências positiva e zero, tipo de ligação;
- Características do circuito: tipo, bitola e espaçamento dos condutores;
- Distâncias entre os pontos que se deseja calcular os curtos;
- Classe de aterramento do sistema (se for aterrado, informar a resistência de terra).

No cálculo das correntes de curto-circuito são usados os diagramas de seqüências de fases, acoplados convenientemente de acordo o tipo de curto.

Os diagramas de seqüências são de três tipos:

- Seqüência positiva
- Seqüência negativa
- Seqüência zero

Na montagem destes diagramas, a fim de se determinar as correntes de curto-circuito, é necessário se conhecer os circuitos de seqüências de seus componentes, basicamente: gerador, transformador e linha.

a) Diagramas de seqüências de um gerador (Figura 3.3):

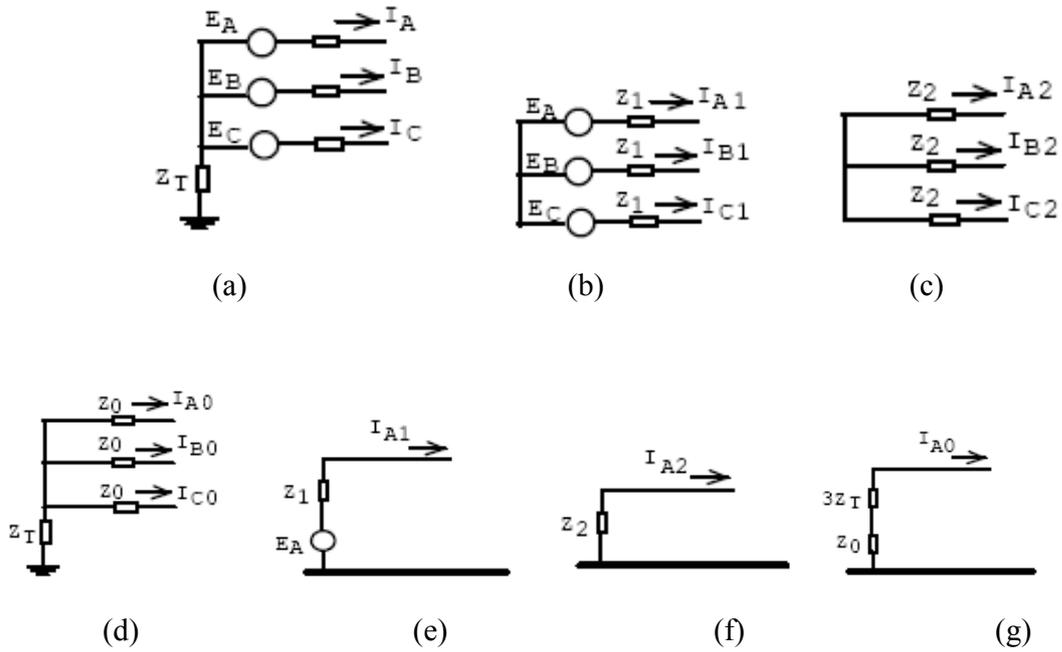


Figura 3.3 – Diagrama de seqüências, (a) Gerador em vazio aterrado através de uma impedância, (b) Circuito trifásico de seq. positiva, (c) Circuito trifásico de seq. negativa, (d) Circuito trifásico de seq. zero, (e) Circuito monofásico de seq. positiva (f) Circuito monofásico de seq. negativa, (g) Circuito monofásico de seq. zero.

b) Diagramas de seqüência zero de bancos trifásicos de transformadores ou de transformadores trifásicos de núcleo envolvente (figura 3.4):

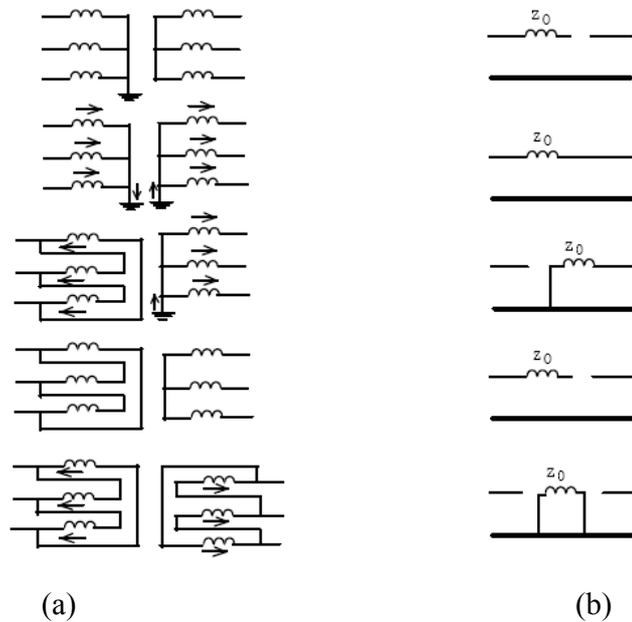


Figura 3.4 - Diagramas de seqüência zero de um transformador trifásico de núcleo envolvente ou de um banco trifásico, (a) Diagrama de ligações, (b) Circuitos equivalente de seqüência zero.

[17].

Vale lembrar que não havendo o aterramento da estrela não haverá caminho para as correntes de seqüência zero.

Os diagramas de seqüências positiva e negativa de transformadores se apresentam de acordo com os circuitos das figuras 3.5a e 3.5b:



Figura 3.5 - Diagramas de seqüências positiva e negativa de um transformador, (a) Diagrama de seq. positiva, (b) Diagrama de seq. negativa.

As impedâncias são representadas por fase. No o caso de ligação em delta é feita a

transformação para estrela.

c) Diagramas de seqüências de linhas:

Os circuitos de seqüências dos condutores das linhas são dados conforme figura 3.6. Na prática, as impedâncias de seqüências positiva e negativa são tomadas iguais ($Z_1 = Z_2$).

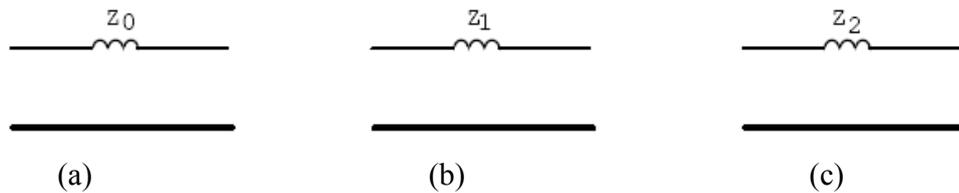


Figura 3.6 - Diagramas de seqüências de uma L.T., (a) Diagrama de seq. zero, (b) Diagrama de seq. positiva, (c) Diagrama de seq. negativa.

De acordo com o estudo de componentes simétricas para sistemas trifásicos, têm-se as seguintes relações [17]:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{AN} \\ \dot{V}_{BN} \\ \dot{V}_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ ; \alpha^2 = 1 \angle -120^\circ$$

3.2.1 - Curto-circuito trifásico

Será considerado primeiramente uma falta trifásica equilibrada (figura 3.7). Portanto, que

é representada somente pelo diagrama de seqüência positiva, não aparecendo componentes de seqüências negativa e zero [18]. A corrente é dada pela expressão:

$$\dot{I}_{cc,3\phi} = \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{Z_1} \quad (3.6)$$

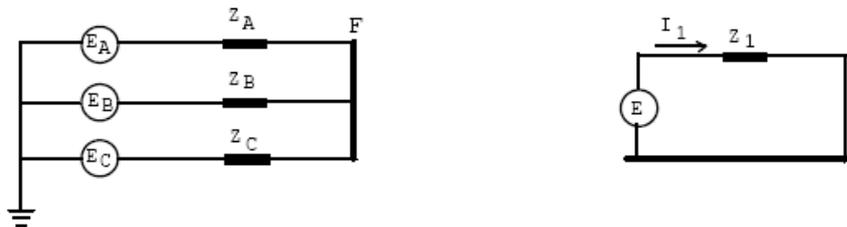


Figura 3.7 - Curto trifásico com seu circuito de seqüência positiva

As tensões da fonte são consideradas equilibradas, então nos diagramas de seqüências irá aparecer somente a componente de seqüência positiva.

A impedância Z_1 , representa a soma das impedâncias de seqüência positiva da fonte e dos condutores, por fase, até o ponto de falta F (Figura 3.7) .

3.2.2 - Curto-circuito bifásico

Na figura 3.8, está representado um curto-circuito envolvendo as fases B e C. O seu diagrama seqüencial equivalente é composto pelos circuitos de seqüência positiva e negativa. A seqüência zero não aparece, pois o curto não envolve a terra, portanto não oferece caminho para \dot{I}_0 .

Como a falta acontece nas fases b e c. A condições na falta são expressas pelas seguintes equações:

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c \quad \dot{I}_a = 0 \quad \dot{I}_b = -\dot{I}_c$$

Isto pode ser representado por um circuito equivalente no qual a rede de seqüência zero não intervém [19].

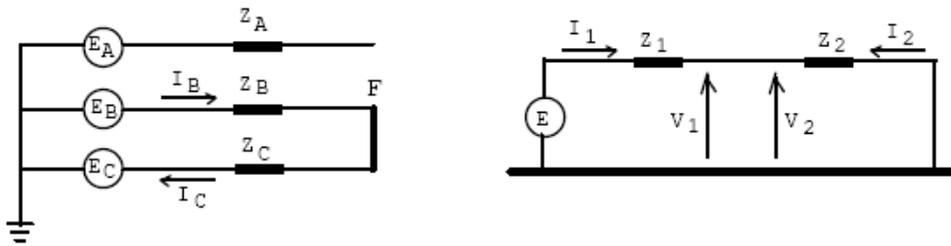


Figura 3.8 – Curto-circuito bifásico e seu circuito de seqüências

De acordo com os circuitos da figura 3.8, pode-se escrever:

$$\dot{I}_A = 0 ; \dot{I}_B = -\dot{I}_C ; \dot{V}_B = \dot{V}_C ; \dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{Z_1 + Z_2} \quad (3.7)$$

Conclui-se então que o diagrama de seqüência zero deve ser mantido em circuito aberto ($I_0=0$), ao passo que se deve interligar as barras de referência dos diagramas de seqüência direta e inversa, pois $I_1 = -I_2$. Conclui-se assim, já que $V_1 = V_2$, que o defeito entre duas fases é simulado pela ligação em paralelo dos diagramas de seqüência direta e inversa [17].

3.2.3 - Curto-circuito bifásico-terra

Este tipo de curto (Figura 3.9) é desequilibrado e envolve a terra, portanto o seu circuito de seqüência tem as componentes de seqüência zero, positiva e negativa.

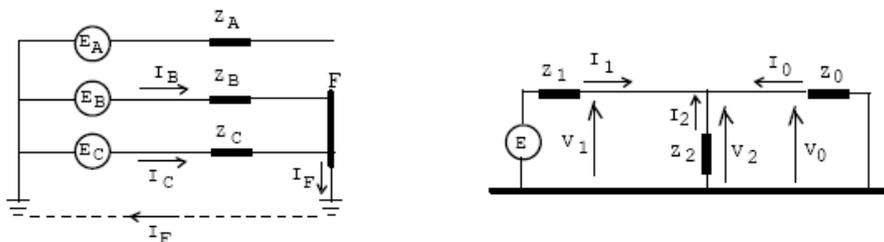


Figura 3.9 – Curto-circuito bifásico-terra e seu circuito de seqüências

Observando-se os circuitos da figura nº 3.9, obtêm-se as seguintes relações:

$$\dot{I}_A = 0 ; \dot{I}_{cc,2\phi} = \dot{I}_F = \dot{I}_B + \dot{I}_C ; \dot{V}_B = \dot{V}_C = 0 \text{ (no ponto de falta)} ; \dot{V}_0 = \dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} = \frac{\dot{E}(Z_2 + Z_0)}{Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_2} \xrightarrow{D=Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_2} \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}(Z_2 + Z_0)}{D} \rightarrow \dot{E} = \frac{D \dot{I}_1}{Z_2 + Z_0} \quad (3.8)$$

$$-\dot{I}_2 = \frac{\dot{E} - Z_1 \dot{I}_1}{Z_2} \rightarrow \dot{I}_2 = \frac{\dot{E} Z_0}{D} \quad (3.9)$$

$$-\dot{I}_0 = \frac{\dot{E} - Z_1 \dot{I}_1}{Z_0} \rightarrow \dot{I}_0 = \frac{\dot{E} Z_2}{D} \quad (3.10)$$

Substituindo os valores de \dot{I}_0 , \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , nas equações das componentes de seqüências:

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}(-Z_2 + \alpha^2 Z_2 + \alpha^2 Z_0 - \alpha Z_0)}{D} \quad (3.11)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}(-Z_2 + \alpha Z_2 + \alpha Z_0 - \alpha^2 Z_0)}{D} \quad (3.12)$$

$$\dot{I}_{cc,2\phi T} = \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{-3\dot{E}Z_2}{D} \quad (3.13)$$

Como:

$$Z_1 = Z_2 \rightarrow \dot{I}_{cc,2\phi T} = \frac{-3\dot{E}Z_1}{D} \quad (3.14)$$

No caso de curto-circuito entre duas fases e terra inclui-se na rede de seqüência zero a impedância $3Z_g$. No valor de Z_g estão incluídas as impedância de aterramento das máquinas e a de curto-circuito [19].

3.2.4 - Curto-circuito fase-terra

Este curto é desequilibrado e envolve a terra (Figura 3.10), então o seu circuito de seqüências é constituído das seqüências zero, positiva e negativa.

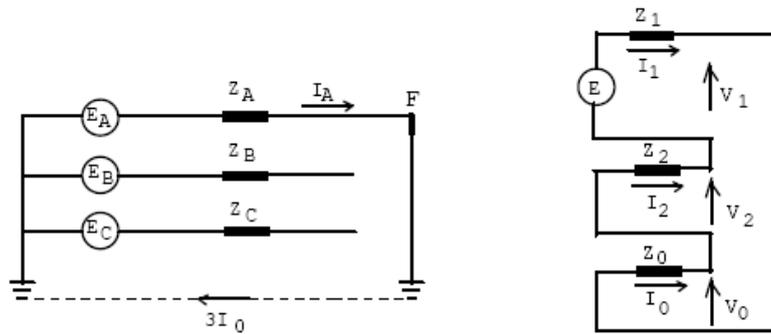


Figura 3.10 – Curto-circuito fase-terra com seu circuito de seqüências

As seguintes relações podem ser tiradas dos circuitos:

$$\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0 ; \dot{I}_A = \dot{I}_{cc, \phi T} ; \dot{V}_A = 0 \text{ (no ponto da falta)} ; \dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (3.15)$$

Como: $Z_1 = Z_2$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{Z_0 + 2Z_1} \quad (3.16)$$

Substituindo-se os valores das componentes simétricas, obtém-se:

$$\dot{I}_{cc, \phi T} = \dot{I}_A = \frac{3\dot{E}}{2Z_1 + Z_0} \quad (3.17)$$

3.3 - Curto-circuito através de impedância

As faltas discutidas na seção 3.2 consistiam de curtos diretos entre fases ou entre uma ou duas fases e a terra. Isto é, foram desprezadas as impedâncias de falta (Z_F) e esta raramente é nula. Entretanto, a maioria das faltas são resultantes de arcos entre fases ou entre estas e pontos aterrados, envolvendo, geralmente, os isoladores. Isto resulta em resistência de arco (R_{arco}). Além disso, quando a falta é para a terra, a resistência de terra (R_T) deverá ser considerada. A figura 3.11 mostra os diversos tipos de curto através da impedância de falta (Z_F) [20].

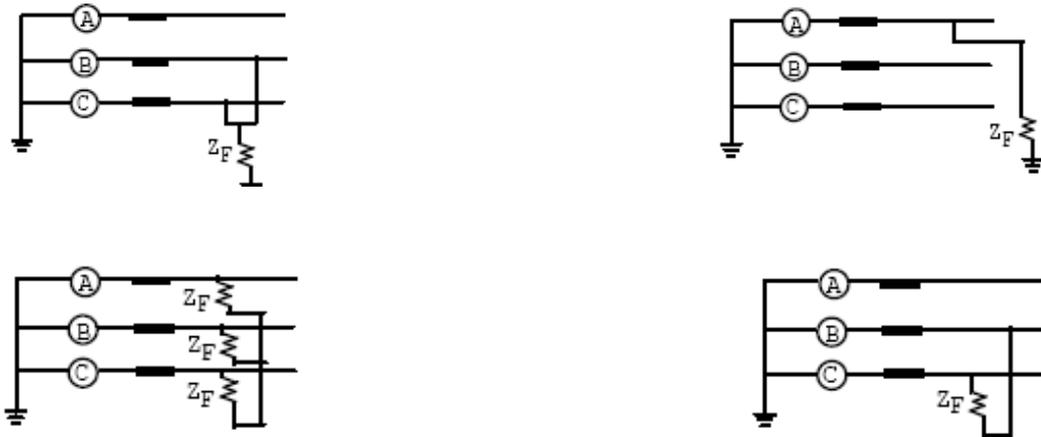


Figura 3.11 – Curto-circuito através da impedância de falta (Z_F)

Considerando Z_F igual nas três fases, o curto trifásico permanece equilibrado, portanto somente circulam correntes de seqüência positiva (figura 3.12), então:

$$\dot{I}_{cc,3\phi} = \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{Z_1 + Z_F} \quad (3.18)$$

Para a falta bifásica, tem-se:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{Z_1 + Z_{1F} + Z_2 + Z_{2F}} \quad (3.19)$$

Considerando: $Z_1 = Z_2$, $Z_F = Z_{1F} = Z_{2F}$

Resulta:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{2(Z_1 + Z_F)} \rightarrow \dot{I}_{cc,2\phi B} = \dot{I}_{cc,2\phi C} = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\dot{E}}{(Z_1 + Z_F)} \quad (3.20)$$

A figura 3.12 mostra os diagramas de seqüências desse curto, aonde pode ser visto Z_F .

No caso da falta bifásica à terra, a corrente que irá circular para a terra através da impedância Z_F , será:

$$\dot{I}_{cc,2\phi T} = -3 \dot{E} \frac{Z_1}{D} \quad (3.21)$$

O produto dessa corrente por Z_F resulta na queda de tensão de seqüência zero no ponto de falta:

$$\dot{V}_{0F} = Z_F \left(-3 \dot{E} \frac{Z_1}{D} \right) = \left(-\dot{E} \frac{Z_1}{D} \right) 3Z_F = 3 \dot{I}_0 Z_F \quad (3.22)$$

Então, Z_F deverá se apresentar no circuito de seqüência zero multiplicada por 3, para manter a queda de tensão, uma vez que neste circuito circula I_0 , e não $3I_0$, (figura 3.12). Com Z_F incluído, o valor do denominador D, passa a ser:

$$D' = Z_1 Z_2 + Z_1 (Z_0 + 3Z_F) + Z_2 (Z_0 + 3Z_F) \quad (3.23)$$

portanto, a corrente do curto será dada por :

$$\dot{I}_{cc,2\phi T} = -3 \dot{E} \frac{Z_1}{D'} \quad (3.24)$$

Se a falta for fase-terra, a corrente de falta é dada por:

$$\dot{I}_{cc,\phi T} = \frac{3 \dot{E}}{2Z_1 + Z_0} \quad (3.25)$$

A queda de tensão de seqüência zero, no ponto de falta, é:

$$\dot{V}_{0F} = 3Z_F \left(\frac{\dot{E}}{2Z_1 + Z_0} \right) = 3 \dot{I}_0 Z_F \quad (3.26)$$

Então, do mesmo modo da falta bifásica-terra, a impedância Z_F , será representada no digrama de seqüência zero com seu valor multiplicado por 3.

$$\dot{I}_{cc,\phi T} = \frac{3 \dot{E}}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_F} \quad (3.27)$$

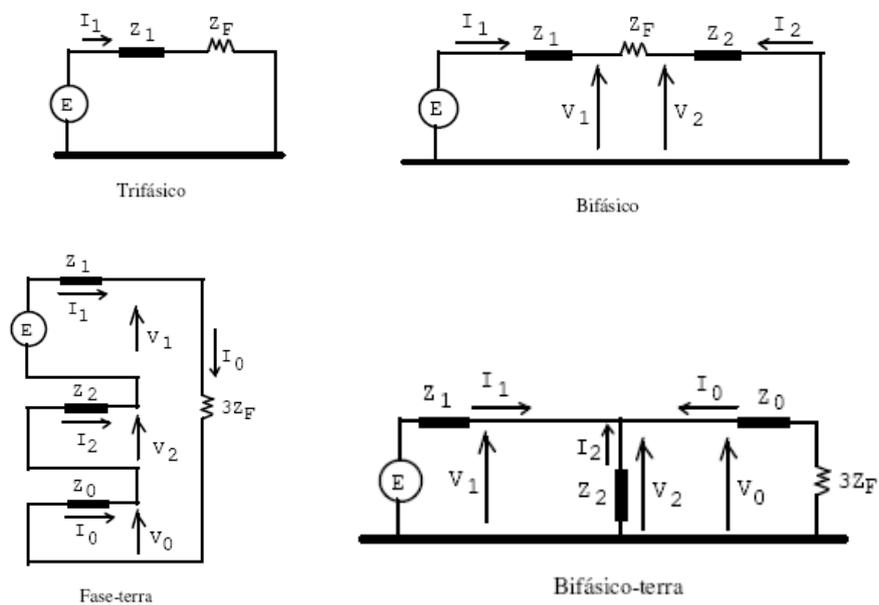


Figura 3.12 – Circuitos de seqüências para curto-circuito através de impedância

Quando se considera a impedância de falta, a tensão na mesma não pode ser tomada igual a zero, o seu valor será:

$$\dot{V}_F = Z_F \dot{I}_F \quad (3.28)$$

Capítulo 4

Dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito

Um dispositivo limitador de corrente tem como função limitar a corrente elétrica de um circuito a níveis compatíveis com aspectos operacionais e térmicos pré-estabelecidos.

As características desejáveis para um dispositivo limitador de corrente são:

- Impedância baixa ou nula, quando o sistema funcionar no regime normal;
- Impedância significativa, quando a corrente superar um valor pré-estabelecido;
- Transição rápida ou instantânea do modo normal ao modo limitador e vice-versa;
- Alta confiabilidade no funcionamento para períodos longos de operação e manutenção mínima;
- Pequeno volume, para facilitar a instalação;
- Baixo custo.

Alguns dispositivos limitadores de corrente já estão disponíveis para utilização, como o reator de núcleo de ar, dispositivos pirotécnicos, IPC (Interphase power controller) e dispositivos com tecnologia FACTS (Flexible AC Transmission Systems)

A tabela 4.1 apresenta os principais dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito encontrados no mercado ou em fase de desenvolvimento, em função da experiência de uso.

Tabela 4.1 - Principais DLCC's [15].

DLCCs disponíveis no mercado com larga experiência de uso	DLCCs disponíveis no mercado em fase de pesquisa e desenvolvimento ou com experiência limitada
Reator com núcleo de ar	Supercondutores (média e alta tensão)
Dispositivo pirotécnico	Dispositivos com tecnologia FACTS
Disjuntores	IPC (Interphase power controller)

4.1 – Reator limitador de Núcleo de Ar

O reator limitador de núcleo de ar, ou RLC, é o dispositivo limitador de corrente com maior experiência de utilização para redução da corrente de falta.

Os RLC's podem ser aplicados em níveis de tensão de 13,8KV, em serviços auxiliares de usinas e subestações, até em sistemas de 138KV, 345KV e 500KV.

Algumas subestações no Brasil utilizam este tipo de limitador [15]:

- Subestação de Jaguará 138KV (Minas Gerais);
- Subestação de Angra 138KV (Rio de Janeiro);
- Subestação de Mogi das Cruzes 345KV (São Paulo);
- Subestação de Tucuruí 500KV (Pará).



Figura 4.1 - Reatores limitadores da Subestação de Mogi das Cruzes

Uma característica importante dos RLC's, que deve ser analisada, é que os RLC's introduzem perdas consideráveis durante o regime permanente, além de provocarem quedas de tensão, outra consideração se deve ao fato que os RLC's produzem elevados campos magnéticos, sendo necessário considerar o espaçamento entre RLC's o que pode inviabilizar sua utilização caso a área útil para a instalação não seja suficiente.

Bancos de capacitores também são empregados para evitar as quedas de tensão devidas a RLC's.

Uma característica positiva dos RLC's está no custo, pois os RLC's geralmente são os DLCC's de menores custos.

A especificação do RLC é feita mediante estudos de curto-circuito, fluxo de potência e de transitórios eletromagnéticos. Além do estudo técnico, é necessário se fazer uma análise de viabilidade econômico-financeira comparando o custo da solução e a substituição dos equipamentos superados, levando em consideração o cálculo das perdas introduzidas no sistema.

4.2 – Dispositivo Pirotécnico

Os dispositivos pirotécnicos têm capacidade de interrupção de elevadas correntes de falta em tempos inferiores a $\frac{1}{4}$ de ciclo [21], devido ao fato do dispositivo possuir carga explosiva e elementos fusíveis para interrupção do circuito.

Comparativamente, por exemplo, dispositivos mecânicos não têm capacidade de interrupção de elevadas correntes em tempo tão curtos.

Os dispositivos pirotécnicos possuem vasta experiência de utilização, tendo sido desenvolvidos desde os anos 50. No Brasil, dispositivos pirotécnicos foram adotados a partir dos anos 90 por algumas empresas como a ACESITA, ARACRUZ, CENIBRA, CSN, CST Steel e MANNESMAN [22].

Essas indústrias passaram a ter em suas plantas o sistema de cogeração, o que elevou os níveis de curto-circuito, acarretando a superação das proteções pré-existentes; para evitar a troca destes equipamentos, essas indústrias optaram pela instalação de um dispositivo limitador pirotécnico [15].

A figura 4.2 mostra uma imagem de um dispositivo pirotécnico instalado em uma subestação, as figuras 4.3 e 4.4 mostram os componentes de um dispositivo pirotécnico.



Figura 4.2 - Limitador de Corrente de Falta Pirotécnico da G&W Eletric de 38KV e 2500A [3]

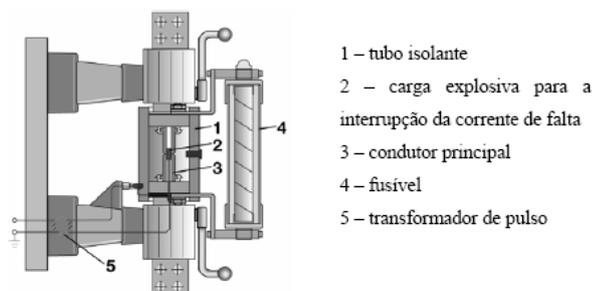


Figura 4.3 – Componentes do dispositivo pirotécnico da ABB [23].

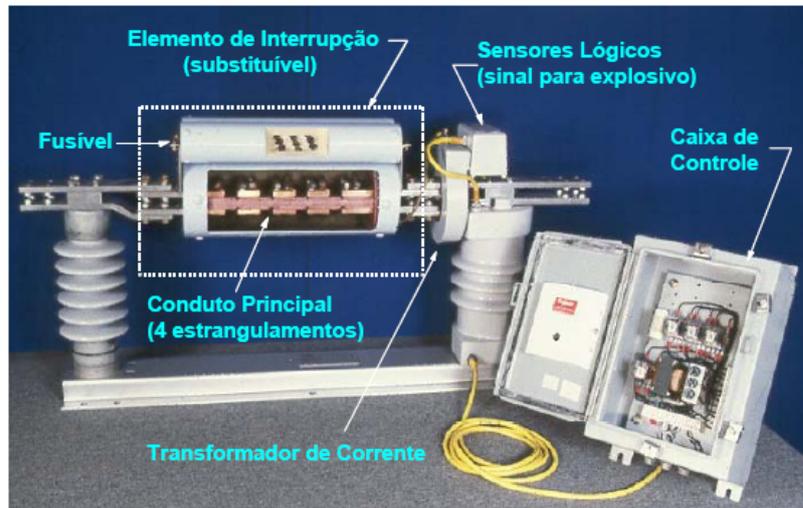


Figura 4.4 – Componentes do dispositivo pirotécnico da G&W Electric [15].

Os dispositivos pirotécnicos, figuras 4.2 a 4.4, possuem duas câmaras em paralelo: uma contém um condutor de cobre que conduz a corrente nominal juntamente com a carga explosiva inserida em estrangulamentos no condutor; a outra câmara contém o elemento fusível. A carga explosiva é acionada através de sensores que detectam a variação da corrente. Na iminência de um surto de corrente, os sensores acionam os explosivos, interrompendo a passagem de corrente pelo condutor principal e o elemento fusível extingue a corrente de curto em menos de $\frac{1}{4}$ ciclo [21].

A figura 4.5 mostra o fusível e o barramento principal, antes e depois da ação dos explosivos.

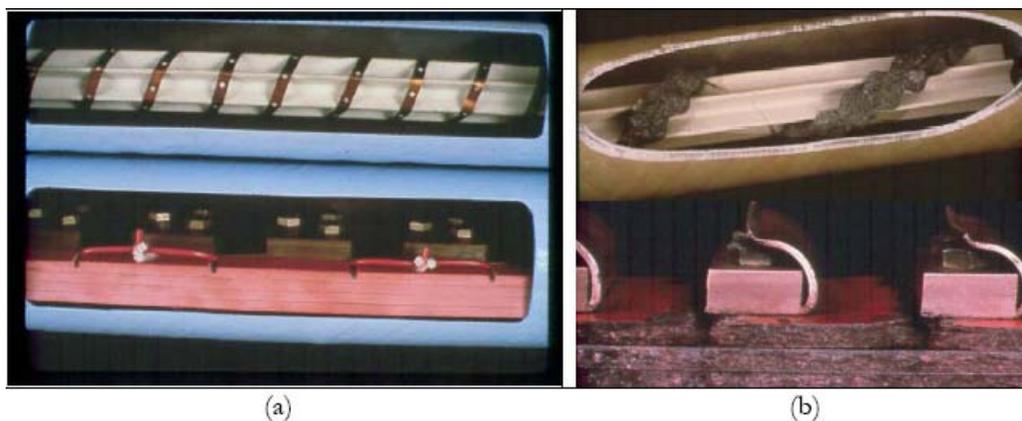


Figura 4.5 - Fusível e barramento principal: (a) Antes da atuação do elemento explosivo e (b) Após a atuação do elemento explosivo [15].

Para o restabelecimento do sistema é necessária a troca do fusível e a troca da câmara do barramento de cobre e da carga explosiva.

Esse dispositivo não elimina a necessidade de utilização de manobras convencionais de circuitos, como chaves seccionadoras e disjuntores [3].

A utilização do dispositivo pirotécnico em paralelo com um RLC é interessante devido ao fato de reduzir as perdas no reator e quedas de tensão em regime normal de operação, isto é, durante a operação normal, a corrente circula pelo dispositivo pirotécnico, pois a impedância do reator é muito superior a do dispositivo pirotécnico.

Quando ocorre uma falta o dispositivo pirotécnico atua, explodindo seu barramento abrindo o circuito conforme a figura 4.5, a corrente então, passa a circular pelo reator fazendo com que o circuito passe a ter uma impedância que antes não estava presente.

A utilização do dispositivo pirotécnico e o reator em paralelo possibilita a não interrupção do transporte de corrente ou caso um disjuntor tenha atuado abrindo o circuito, ele pode ser religado antes que o dispositivo pirotécnico seja reparado e recolocado na rede.

4.3 – Elos de Corrente contínua

A interligação de sistemas de corrente alternada aumenta o nível de curto-circuito consideravelmente.

Uma alternativa para evitar este problema é a interligação em corrente contínua (elos de corrente contínua) visto que, desta forma, não haverá contribuição de corrente de curto-circuito de um sistema para o outro.

Pode-se destacar o ATCC (Alta Tensão em Corrente Contínua) convencional, que é baseado em conversores de fonte de corrente, e o ATCC baseado em conversores de fonte de tensão.

4.3.1 - ATCC Convencional

Os sistemas de corrente contínua não contribuem para o aumento dos níveis de curto-circuito, assim sendo, esta tecnologia pode ser utilizada para a interligação de sistemas ou

subsistemas elétricos, mantendo-se assim a interligação dos sistemas, aumentando a confiabilidade e protegendo os sistemas interligados contra faltas ocorridas em outros sistemas.

Por ser uma tecnologia de custo muito elevado e de estudos de viabilidade bastante complexos, a utilização de ATCC só seria viável se fossem agregadas à sua utilização outras finalidades além da redução dos níveis de curto-circuito, como por exemplo transmissão em longas distâncias.

4.3.2 - ATCC não-convencional

A tecnologia do ATCC não-convencional é um dos mais recentes desenvolvimentos na área de corrente contínua, ao contrário do ATCC convencional, que é baseado em conversores de fonte de corrente e tiristores, a nova tecnologia em ATCC é baseada em conversores fonte de tensão e chaves semicondutoras autocomutadas.

O conversor fonte de tensão tem a vantagem de poder controlar independentemente a potência ativa e a reativa.

Outra vantagem deste dispositivo, no caso de transmissão de energia elétrica, é a utilização de cabos especiais entre as conversoras, por serem cabos que possuem um isolamento de polímero extrudado, tornam-se mais finos do que os utilizados em cabos CA de mesma tensão, desta forma, obtém-se cabos com maior capacidade de transmissão resultando em instalações mais compactas [15].

As principais aplicações do ATCC não-convencional são [15]:

- Conexão de pequenas gerações em redes básicas (cogeração e produtores independentes);
- Alimentação de pequenas cargas pela rede básica;
- Alimentação de centros urbanos e balanço de fluxo de carga entre os circuitos alimentadores;
- Conexão de redes assíncronas;
- Controle de fluxo de carga;
- Limitação de níveis de curto-circuito;
- Melhoria da estabilidade de redes interligadas.

Assim como o ATCC convencional, esta tecnologia também apresenta um custo muito elevado e sua utilização só é viável caso sejam agregadas finalidades além da redução dos níveis de corrente de curto-circuito.

4.4 - Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida.

Os disjuntores convencionais podem possuir tempo de abertura de 1,5 ciclos, sendo considerados lentos comparados com as chaves semicondutoras de eletrônica de potência.

Os disjuntores, contendo chaves eletrônicas, atuam no máximo em 0,5 ciclo [15] aumentando a velocidade de atuação destes disjuntores eletrônicos. Porém, as chaves de estado sólido provocam perdas em regime permanente maiores que as dos disjuntores convencionais.

A utilização dos disjuntores rápidos, como limitadores, é realizada fazendo com que os disjuntores eletrônicos sejam mais rápidos que os disjuntores convencionais superados. Os disjuntores rápidos atuam seccionando o barramento ou abrindo a linha, reduzindo o nível de curto-circuito total, permitindo a operação normal dos disjuntores convencionais.

4.5 - Controlador de Potência Interfases (IPC)

A tecnologia IPC, Controlador de Potência Interfases, foi desenvolvida pela Asea Brown Boveri - ABB e Hydro Quebeq - CITEQ.

O IPC utiliza equipamentos como capacitores, indutores, transformadores defasadores, e até módulos de eletrônica de potência [3].

Os IPC's são conectados entre duas barras e possuem, no mínimo, dois ramos paralelos, sendo um indutivo e o outro capacitivo [24].

Além disso, um elemento defasador pode estar em série com a reatância nesses ramos. Este elemento defasador pode ser:

- Transformador defasador;
- Conexões de transformadores convencionais;
- Conexões entre fases diferentes de dois sistemas síncronos.

As principais aplicações do IPC são:

- Interligações de redes assíncronas;
- Interligações de subsistemas síncronos;
- Aumento da capacidade de transformação sem elevar os níveis de correntes de curto-circuito;
- Controle do fluxo de potência em linhas de transmissão.

Para cada aplicação existe um tipo específico de IPC, sendo que os IPC's também são subdivididos em IPC's síncronos e IPC's assíncronos. Os IPC's síncronos são aplicados em redes síncronas e os IPC's assíncronos são aplicados em redes assíncronas.

Os IPC's síncronos podem ser designados pelos seguintes termos [3]:

- Interligador de Desacoplamento (ID): usados para desacoplar redes em interligações, evitando os problemas de oscilação, de flutuações excessivas de tensões e de elevação dos níveis de curto-circuito.
- Transformador Limitador de Corrente de Curto-Circuito (TLCC): usados para desacoplar redes quando existir outros transformadores convencionais em paralelo, permitindo o aumento da capacidade de transformação sem elevar os níveis de curto-circuito nas redes envolvidas.
- Transformador Defasador Assistido (TDA): estes dispositivos podem ser usados para aumentar a capacidade de transferência dos transformadores defasadores (PST) existentes ou para implementar um equivalente PST de maior capacidade por um custo mais baixo.

4.6 - Dispositivo com Tecnologia FACTS

No final da década de 80, surgiu, nos Estados Unidos, o conceito FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) que trata da aplicação da eletrônica de potência em sistemas de potência, visando um controle rápido e eficiente do fluxo de potência ativo e reativo.

Este controle de fluxo de potência pode ser obtido pelo uso de circuito eletrônico que controla rapidamente o ângulo de carga, a impedância ou a tensão do sistema CA, tornando o sistema de transmissão mais flexível e conseqüentemente com resposta mais rápida. Esses

dispositivos também podem ser usados para amortecimento de oscilações eletromecânicas, aumento da capacidade de transmissão e limitação de corrente de curto-circuito [15].

Os dispositivos FACTS são divididos em três categorias [3]:

- dispositivos FACTS shunt(derivação);
- dispositivos FACTS série;
- dispositivos FACTS série e shunt simultaneamente;

Dentre estas divisões são citados alguns destes dispositivos [3]:

- Compensadores estáticos, SVC (*Static Var Compensator*);
- Reator controlado por tiristor, TCR (*Thyristor Controlled Reactor*);
- Capacitor chaveado por tiristor, TSC (*Thyristor Switched Capacitor*);
- Capacitor série chaveado por tiristor, TSSC (*Thyristor Series Switched Capacitor*);
- Capacitor série controlado por tiristor, TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*);
- Transformador defasador, PST (*Phase Shift Transformer*);

Capítulo 5

Os Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito Supercondutores (DLCCS)

Uma das mais promissoras aplicações para os materiais supercondutores de alta temperatura no setor elétrico é o dispositivo limitador de corrente de curto-circuito supercondutor. O dispositivo apresenta características que não são encontradas em dispositivos convencionais, que são:

- Em operação normal, a influência no circuito é desprezível;
- Reduz rapidamente a corrente de curto-circuito;
- Atuam automaticamente;
- Depois de resfriado, retorna a seu estado supercondutor automaticamente.

Um dos primeiros dispositivos limitadores de corrente de falta supercondutor, foi instalado em 1996 na Suíça, em uma indústria alimentada em 10,5 kV com uma potência instalada de 1,2 MVA [25].

A Siemens também desenvolveu um limitador de 100 KVA, refrigerado a nitrogênio líquido, produzido com técnicas de deposição de filmes finos de material supercondutor de alta temperatura [26].

A Nexans já contruiu um limitador de 10KV/10MVA e atualmente em conjunto com as empresas Siemens, Superpower e outras vêm desenvolvendo um limitador de 138KV.

Desde então, vários protótipos de DLCCS's já vêm sendo estudados como uma nova tecnologia para limitar correntes de curto-circuito [25], [27].

5.1 – Tipos de DLCCS

Atualmente existem diferentes arquiteturas para os dispositivos limitadores de curto-circuito supercondutores. Nos itens a seguir serão apresentadas algumas dessas arquiteturas.

5.1.1 - Tipo resistivo

O dispositivo limitador de corrente de curto-circuito supercondutor do tipo resistivo (DLCCS-R) é inserido em série com o circuito que se deseja proteger, conforme a figura 5.1.

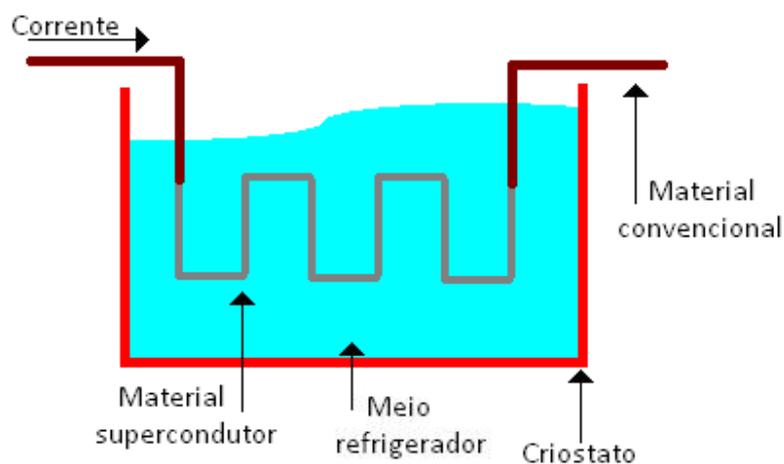


Figura 5.1 – DLCCS tipo resistivo

Seu princípio de funcionamento se baseia no fato da resistividade do material supercondutor ser dependente dos parâmetros críticos. Se um dos parâmetros for violado, o material deixa de ser supercondutor, ocorrendo uma rápida variação na resistência do material e por conseqüência, o aumento da resistência do circuito.

Quando da ocorrência de um curto-circuito, a densidade de corrente circulante no circuito aumenta. Quando essa corrente supera a densidade de corrente crítica do material, o material aquece, devido ao movimento dos vórtices magnéticos, e sua temperatura crítica também é superada, fazendo com que o material supercondutor deixe de ser supercondutor, inserindo assim uma resistência que antes não estava presente, fazendo com que a corrente de curto-circuito seja reduzida.

Em condições normais de operação, os parâmetros críticos não são superados, então o material supercondutor mantém suas características supercondutoras e o circuito praticamente não “enxerga” a presença do DLCCS-R no circuito.

$$\text{Antes do curto: } R_{SFCL} = 0$$

$$\text{Durante o curto: } R_{SFCL} \neq 0$$

Segundo [28] [29], tempos inferiores a 1 ms podem ser alcançados entre a ocorrência do curto-circuito e da redução dos níveis de corrente. Com isso, a corrente de curto-circuito pode ser reduzida antes do valor do primeiro pico de corrente.

O DLCCS-R é responsável pela redução dos níveis de curto-circuito mas a eliminação do curto-circuito não é feita pelo DLCCS-R devido ao alto aquecimento que ocorreria caso permanecesse no circuito por vários ciclos durante o curto-circuito, sendo assim o DLCCS-R reduz o nível do curto-circuito até que um disjuntor seja capaz de fazer a abertura do circuito.

Para a retirada do DLCCS-R do circuito após a redução da corrente, é necessário manobrar o dispositivo. Depois de resfriado e a da normalização do circuito, o dispositivo é reinserido e retornar a sua operação normal até a ocorrência de um novo defeito.

Supondo que a área do material supercondutor seja A, tem-se que:

$$I_c = J_c A \quad (5.1)$$

Onde I_c é a máxima corrente que o material supercondutor suporta antes de deixar de ser

supercondutor.

A resistência do material supercondutor em estado normal (não-supercondutor) de comprimento l é:

$$R = \frac{\rho_N l}{A} = \frac{\rho_N l J_c}{I_c} \quad (5.2)$$

Logo, o volume do supercondutor pode ser expresso como:

$$l = \frac{RI_c}{\rho_N J_c} \rightarrow lA = \frac{RAI_c}{\rho_N J_c} \rightarrow V = \frac{RI_c^2}{\rho_N J_c^2} \quad (5.3)$$

Adicionalmente, o DLCCS do tipo resistivo possui ainda uma característica peculiar e importante para utilização no setor elétrico que é o fato de que, em caso de falha no dispositivo, ele continua limitando a corrente, pois, mesmo que o material perca suas características supercondutoras ele será uma impedância permanente que limitará a corrente. Esta característica é conhecida na literatura como falha segura (do inglês fail safe).

5.1.2 - Tipo indutivo

O dispositivo limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo (DLCCS-L), também conhecido como núcleo de ferro blindado (shielded-core), constitui-se basicamente de um transformador de pequeno porte. O enrolamento primário é constituído por material condutor convencional, já o enrolamento secundário é supercondutor e na maioria das vezes possui somente uma espira, que é um invólucro cilíndrico, chamado de blindagem, conforme figura 5.2. [28] [29].

Diferentemente do tipo resistivo, que está inserido diretamente no circuito, o tipo indutivo só está acoplado magneticamente com o circuito a ser protegido.

Em operação normal, o material supercondutor impede que o campo magnético gerado pelo enrolamento primário circule pelo núcleo de ferro.

Na ocorrência de uma falta, a corrente no enrolamento primário cresce, fazendo com que o campo magnético gerado pelo enrolamento primário aumente, com o aumento do campo magnético a densidade de corrente crítica característica do material diminui, no momento que a

corrente induzida na blindagem supera a corrente crítica, o material supercondutor deixa de ser supercondutor, fazendo com que circule fluxo magnético no núcleo de ferro, resultando em uma indutância que limitará a corrente.

$$\text{Antes do curto: } L_{1a} = \frac{\lambda_1}{i_1} \rightarrow \lambda_1 = 0 \rightarrow L_{1a} = 0 \quad (5.4)$$

$$\text{Durante o curto: } L_{1d} = \frac{\lambda_2}{i_2} \rightarrow \lambda_2 \neq 0 \rightarrow L_{1d} \neq 0 \quad (5.5)$$

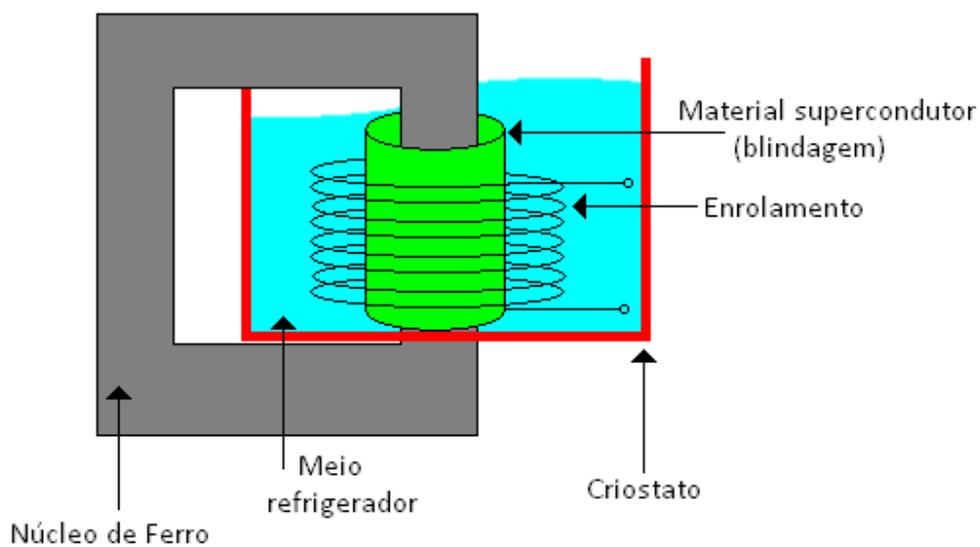


Figura 5.2 - DLCCS do tipo indutivo.

Para o projeto de construção de um dispositivo limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo é necessário analisar os seguintes parâmetros [28]:

- Número de espiras do enrolamento primário;
- Altura do enrolamento primário;
- Diâmetro do enrolamento primário;
- Espessura da parede do tubo supercondutor.

Assim como o tipo resistivo, o tipo indutivo necessita ser retirado do circuito para o seu resfriamento e retorno a seu estado supercondutor, sendo assim também é necessário manobrar o dispositivo e também semelhantemente ao DLCCS-R também possui falha segura.

5.1.3 – Tipo Transformador

O DLCC supercondutor tipo transformador também conhecido como híbrido, consiste de um transformador comum com um DLCC supercondutor tipo resistivo conectado em série com o enrolamento secundário do transformador, o enrolamento primário do transformador é conectado em série com a rede a ser protegida, conforme figura 5.3.

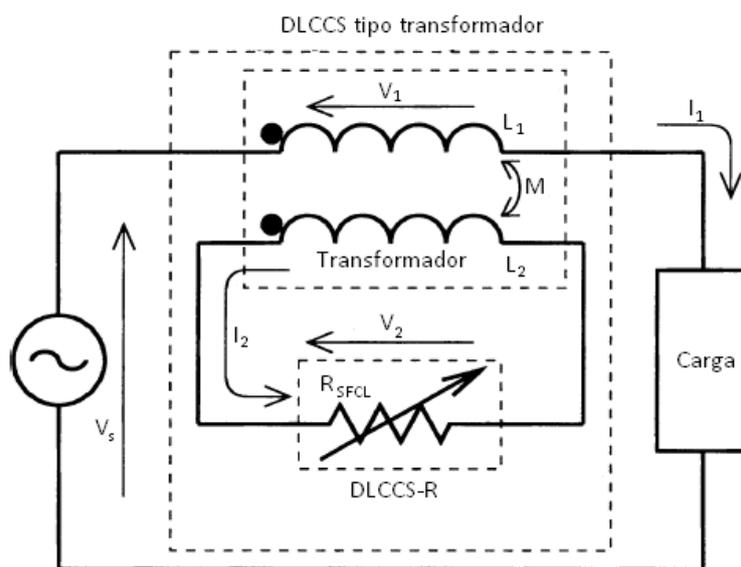


Figura 5.3 - DLCCS do tipo transformador.

Em condições normais de operação, o material supercondutor permanece em seu estado supercondutor, fazendo com que se tenha uma baixa impedância quando se referindo ao primário.

Na ocorrência de uma falta, a corrente do secundário ultrapassa a corrente crítica do material supercondutor, fazendo com que ele deixe de ser supercondutor e gerando uma impedância que antes não era vista pelo circuito. Referindo essa impedância para o primário, a corrente de falta na rede é limitada.

Convertendo os componentes para uma mesma base, que será o primário, tem-se que:

$$a = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (5.6)$$

Sabe-se que:

$$R_2' = a^2 R_2 \quad (5.7)$$

$$I_2' = I_2 / a \quad (5.8)$$

$$V_2' = a V_2 \quad (5.9)$$

As características de tensão e de corrente do DLCC supercondutor tipo transformador podem ser obtidas usando um circuito equivalente, baseado no acoplamento magnético (k).

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5.10)$$

Logo, referindo-se ao primário tem-se a figura 5.4:

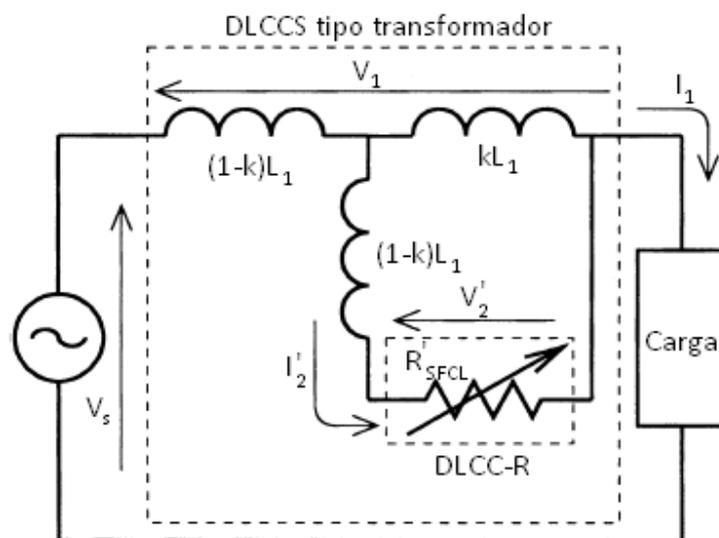


Figura 5.4 - DLCCS do tipo transformador referido ao primário.

O DLCCS do tipo transformador assim como, os DLCCS-R e DLCCS-L possui falha segura caso o material supercondutor falhe.

5.1.4 - Tipo Ponte

O Dispositivo limitador de corrente supercondutor tipo ponte possui diodos (ou tiristores) conectados a um enrolamento supercondutor ou convencional, isto é, uma indutância limitante, conforme figura 5.5.

A tensão contínua é ajustada para que os quatro diodos sempre estejam conduzindo durante o regime normal de operação, fazendo com que a indutância não atue, pois a corrente é praticamente constante. Durante a falta, a corrente de linha do circuito aumenta, quando essa corrente supera a corrente da ponte, os pares de diodos D_1/D_2 ou D_3/D_4 estão reversamente polarizados e fazendo com que haja fluxo de corrente no indutor, limitando a corrente.

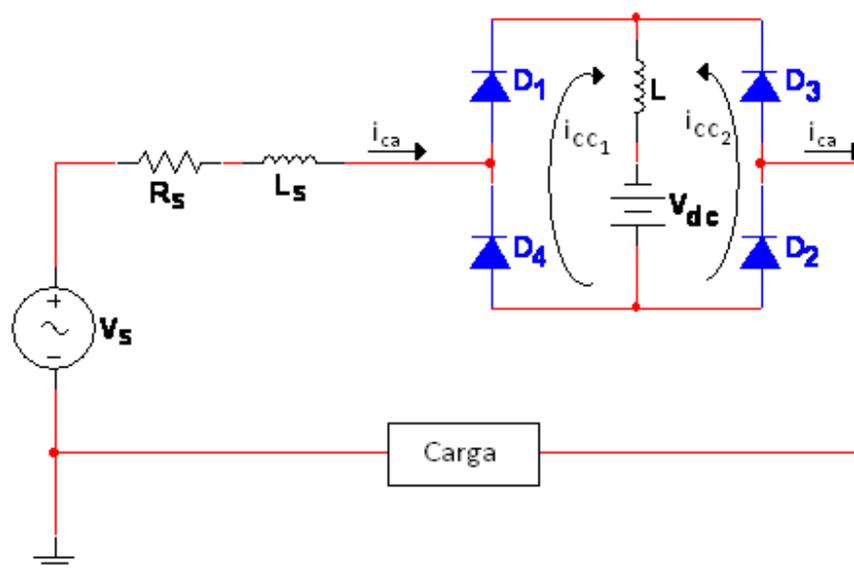


Figura 5.5 - DLCCS do tipo ponte.

Utilizando tiristores na ponte ao invés de diodos, o DLCCS tipo ponte pode reduzir a corrente de falta a zero em meio ciclo [10], permitindo que a bobina seja menor, tornando o circuito de proteção mais barato.

A utilização de uma bobina supercondutora permite a diminuição do volume do indutor.

O DLCCS tipo ponte tem como vantagem o fato da bobina supercondutora sempre permanecer em seu estado supercondutor, porém possui perdas nas chaves eletrônica e não possui falha segura.

5.1.5 – Dispositivo com multifunções

O Dispositivo com multifunções possui três funções:

- Acoplador de circuito convencional ao circuito supercondutor e vice-versa;
- Transformador
- Limitador de corrente

O dispositivo com multifunções (figura 5.6) é construído com um núcleo de ferro com três braços. Num braço é colocado o enrolamento convencional e o enrolamento supercondutor, fazendo a função de acoplador e transformador. No segundo braço é colocado um enrolamento supercondutor em oposição de polaridade aos enrolamentos do braço anterior, e o núcleo de ferro é blindado por um cilindro supercondutor a fim de não permitir o fluxo magnético pelo braço em condições normais de operação. O terceiro braço é deixado livre, conforme figura 5.6.

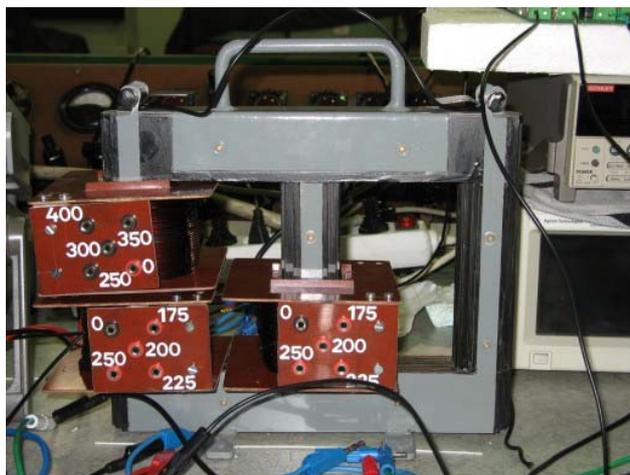
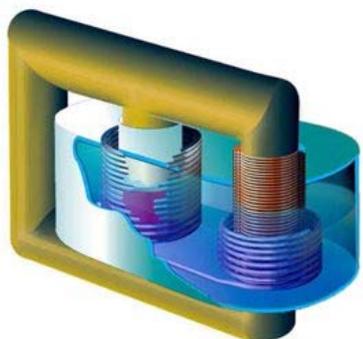


Figura 5.6 - DLCCS do tipo ponte [30].

A figura 5.7 mostra a configuração do dispositivo com multifunções, onde as bobinas 1 e 3 são supercondutoras e a bobina 2 é convencional.

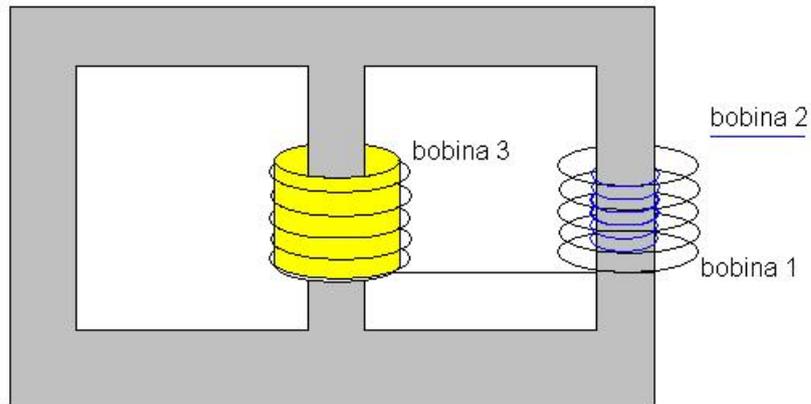


Figura 5.7 – Dispositivo com multifunções

Em condições normais de operação o dispositivo se comporta apenas como transformador e acoplador, sendo visto pelo circuito conforme a figura 5.8.

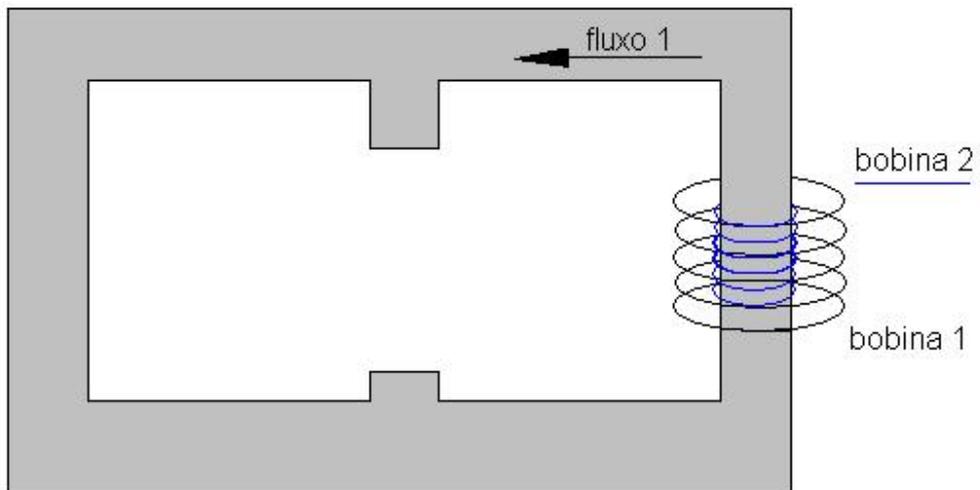


Figura 5.8 – Dispositivo com multifunções em operação normal como transformador e acoplador

Sendo que as indutâncias em condições normais de operação são:

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{i_1} = \frac{N_1 \Phi_1}{i_1} \quad (5.11)$$

$$L_3 = \frac{\lambda_3}{i_3} = 0 \quad (5.12)$$

Em condições de falha, o dispositivo se comporta como limitador de corrente. A figura 5.9 mostra o circuito magnético para a condição de falha.

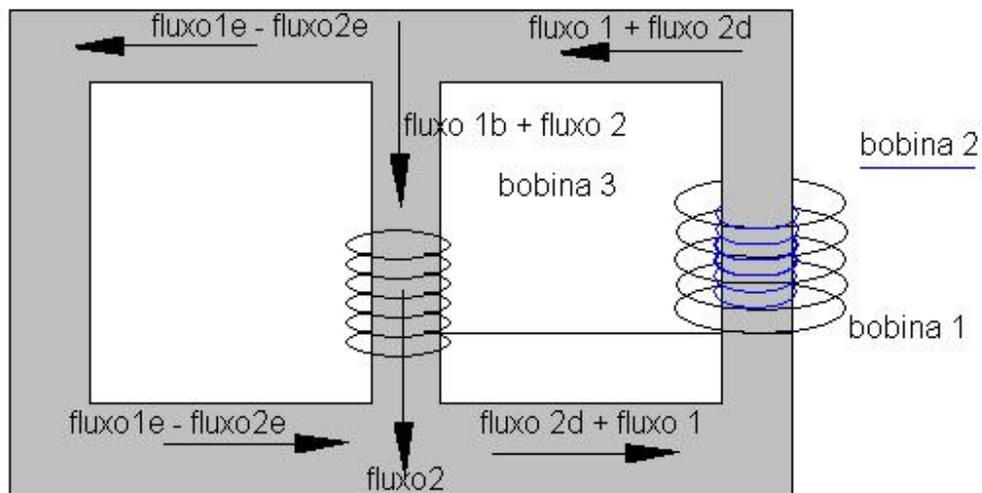


Figura 5.9 – O dispositivo na função de limitador de corrente

Sendo assim, as indutâncias em condições de falha são:

$$L_1 = \frac{\lambda_2}{i_2} = \frac{N_1(\Phi_1 + \Phi_{2d})}{i_2} \quad (5.13)$$

$$L_3 = \frac{\lambda_3}{i_2} = \frac{N_3(\Phi_2 + \Phi_{1d})}{i_2} \quad (5.14)$$

Logo, verifica-se que existe um aumento da indutância no momento da falha, fazendo com que a corrente seja limitada.

Capítulo 6

Simulações do Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-circuito Supercondutor do tipo Resistivo (DLCCS-R)

No capítulo anterior foi descrito o funcionamento de diferentes tipos de DLCCS's. Neste capítulo será dada ênfase ao DLCCS do tipo resistivo e será demonstrado o funcionamento do dispositivo quando inserido em um circuito através de simulações computacionais.

As justificativas para a escolha do DLCCS-R são as seguintes:

Os DLCCS's do tipo resistivo tem se mostrado o mais atrativo devido a simplicidade,

menor tamanho, menos peso, por interferir menos nos sistemas de proteção já existentes e por possuir a falha segura que aumenta a confiabilidade no dispositivo, por essas razões o DLCCS-R tem sido o tipo mais pesquisado no momento [31].

Os DLCCS-L quando construídos em escala real se mostraram grandes demais e causavam interferências nos sistemas de proteção, dessa forma seria mais atrativo se o DLCCS-L englobasse mais de uma função para compensar os inconvenientes dos mesmo.

Os dispositivos utilizando chaves eletrônicas não possuem a função de falha segura, são complexos e possuem perdas nas chaves eletrônicas.

A figura 6.1 mostra três oscilogramas de ensaios realizados pelo CEPEL com um módulo limitador de Bi-2212 da NEXANS resistivo (DLCCS-R).

Por provável falha no projeto, foi visto que a indutância não era desprezível, o que gerou um defasagem entre a tensão e a corrente, conforme visto na figura 6.1. A corrente de curto assimétrica prospectiva (sem o limitador) era de 11 kA (valor de pico).

Foram realizados três ensaios consecutivos, com intervalos de alguns minutos entre um e outro para que a bobina de Bi-2212 resfriasse de volta a $T < T_c$, voltando a ser supercondutora.

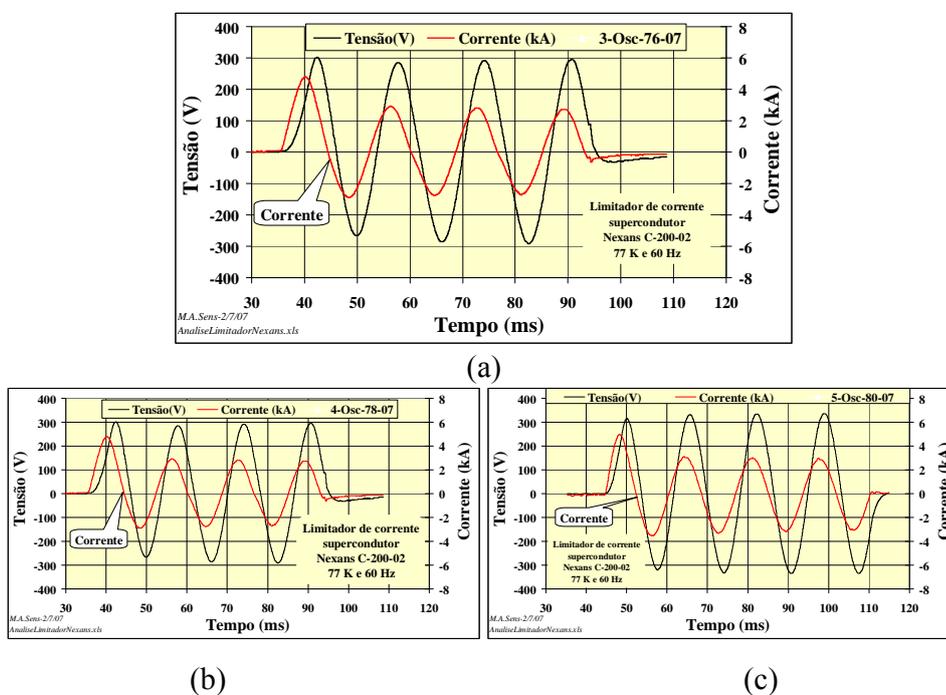


Figura 6.1 - Oscilogramas dos ensaios realizados pelo CEPEL com um módulo limitador de Bi-2212 da NEXANS.

6.1 – Variação da resistividade de um material supercondutor

Um modelo clássico que descreve a variação do campo elétrico em função da variação da corrente é dado pela equação 6.1 [32]:

$$E = E_c \left(\frac{|I|}{I_c} \right)^n \quad (6.1)$$

Onde:

E_c = campo elétrico crítico

n = índice de transição resistiva

Com base na equação 6.1 pode-se fazer uma derivação para se determinar a variação da resistência do material supercondutor:

$$El = V = E_c l \left(\frac{|I|}{I_c} \right)^n \quad (6.2)$$

$$V = E_c l \left(\frac{|I|}{I_c} \right) \left(\frac{|I|}{I_c} \right)^{n-1} \quad (6.3)$$

$$\frac{V}{|I|} = R = \frac{E_c l}{I_c} \left(\frac{|I|}{I_c} \right)^{n-1} \quad (6.4)$$

$$R = \frac{E_c l}{I_c} \left(\frac{|I|}{I_c} \right)^{n-1} \quad (6.5)$$

Uma expressão de outra modelagem que caracteriza a variação da resistividade de um material supercondutor de forma mais completa que a da equação 6.1 é a seguinte [33]:

$$\rho = \frac{(\rho_{PL1} + \rho_{PL2} + \rho_0) \rho_{sat}}{\rho_{PL1} + \rho_{PL2} + \rho_0 + \rho_{sat}} \quad (6.6)$$

Onde:

ρ_{sat} = resistividade no estado não supercondutor (“Flux flow”)

ρ_0 = resistividade no estado supercondutor

$$\rho_{PL1} = \begin{cases} 0 & \text{se } J < J_c \\ \frac{E_0}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_c} - 1 \right)^{n_1} & \text{se } J \geq J_c \end{cases} \quad (6.7)$$

$$\rho_{PL2} = \begin{cases} 0 & \text{se } J < \alpha J_c \\ \frac{E_0}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_c} - \alpha \right)^{n_2} & \text{se } J \geq \alpha J_c \end{cases} \quad (6.8)$$

E_0 = campo elétrico crítico

J = densidade de corrente do circuito

J_c = densidade de corrente crítica do material supercondutor

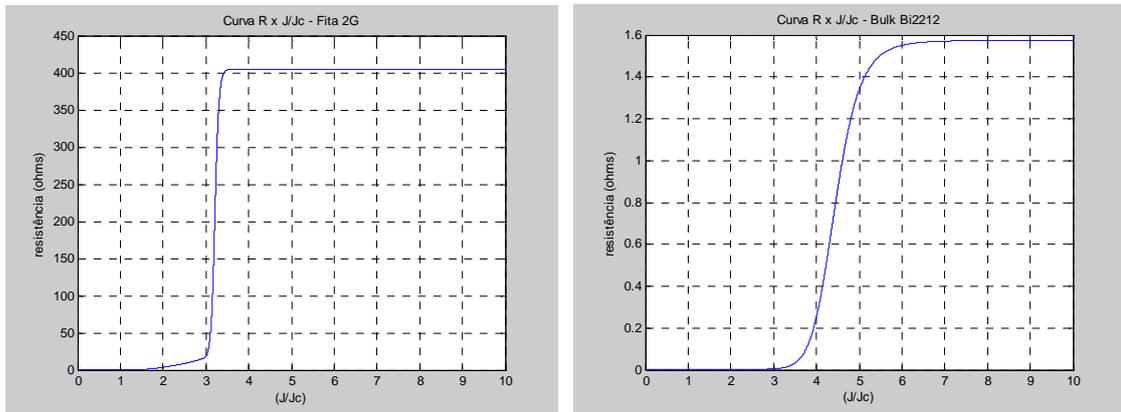
α = constante de proporcionalidade

n_1 e n_2 = índices de transição resistiva

Com base nas equações (6.6) a (6.8) pode-se gerar gráficos segundo os dados da tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Dados de uma fita da segunda geração e de um bulk de Bi-2212 [34][35].

	Fita 2G	Bulk Bi-2212
E_0 (V/cm)	1.6	1
J_c (A/cm ²)	1,68x10 ⁶	1300
n_1	2.8	2.8
n_2	27	9
Área (cm ²)	1.2x10 ⁻⁴	0.24
ρ_0 (μΩcm)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸
ρ_{sat} (μΩcm)	90	700
l (cm)	540	540



(a) (b)

Figura nº 6.2 – Curva de $R \times J/J_c$ (a)Fita 2G (b) Bulk de Bi-2212

Como visto na figura 6.2, quanto maior o valor de n_2 maior será a inclinação da curva. Além disso, a fita de segunda geração limita a corrente quando esta supera em aproximadamente quatro vezes a corrente crítica, enquanto que para o Bulk de Bi-2212 é necessário uma corrente de aproximadamente sete vezes a corrente crítica. Isso não é considerado um problema e sim uma característica para ser levada em conta durante o projeto da inclusão do dispositivo na rede elétrica.

6.2 – O DLCCS-R em um circuito elétrico

O funcionamento do DLCCS-R pode ser descrito conforme a figura 6.3.

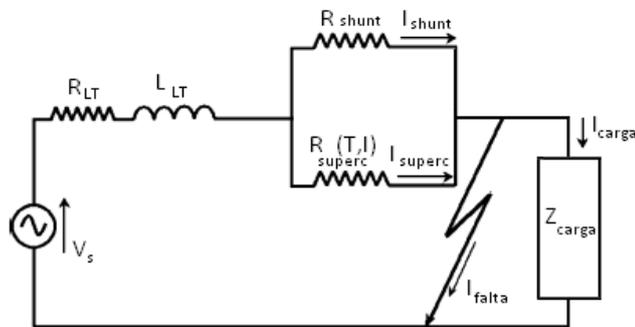


Figura 6.3 – Circuito equivalente do DLCCS-R

Em condições normais de operação, o material supercondutor permanece no estado supercondutor possuindo resistividade muito baixa. Na figura 6.4 aproximou-se essa resistência como sendo zero, de forma que a corrente de carga do circuito passa totalmente pelo material supercondutor que se comporta como um curto-circuito.

É interessante ressaltar que o shunt normalmente é utilizado para homogeneizar a temperatura no material supercondutor, ele envolve toda a superfície da fita ou cabo. Além disso, por necessidades de projeto pode-se colocar um shunt físico externo, uma impedância, em paralelo com o dispositivo.

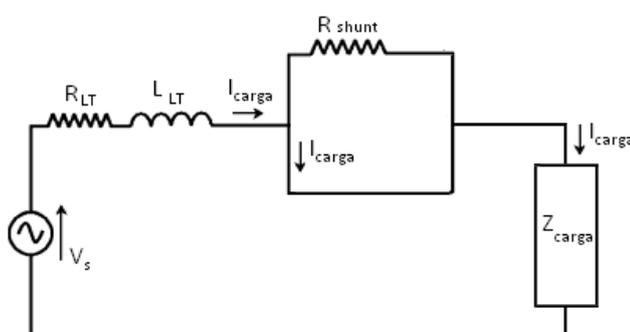


Figura 6.4 – Circuito equivalente do DLCCS-R em condições normais de operação

$$I = \frac{\dot{V}_s}{(Z_{LT} + Z_{carga})} \quad (6.9)$$

Em condições de falta, o material supercondutor deixa de ser supercondutor e apresenta uma resistividade que não pode ser desprezada, conforme está demonstrado na figura 6.5. A corrente de falta que antes passava por um ramo sem resistência passa a se dividir e circular por dois ramos com resistência. Sendo assim a corrente ficará limitada pela impedância da linha e dos ramos em paralelo.

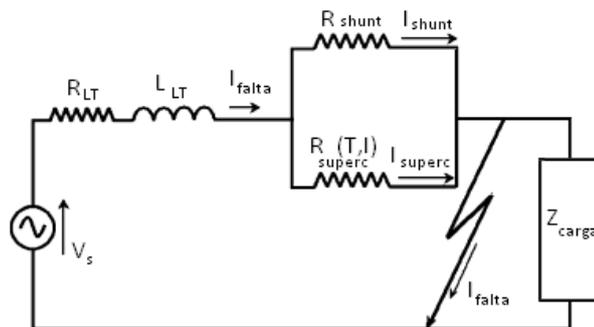


Figura 6.5 – Circuito equivalente do DLCCS-R em condições de falta

Dessa forma a corrente com o DLCCS-R é dada pela equação 6.10:

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}_s}{\left(Z_{LT} + \left(R_{shunt} // R_{superc} \right) \right)} \quad (6.10)$$

O DLCCS-R é projetado de forma que após o início da transição ao estado não-supercondutor a corrente passe a circular preferencialmente pelo shunt, preservando o supercondutor, dessa forma pela equação 6.10 pode-se concluir que :

Como, $R_{shunt} \ll R_{superc} \rightarrow R_{shunt} // R_{superc} \cong R_{shunt}$

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}_s}{\left(Z_{LT} + R_{shunt} \right)} \quad (6.11)$$

Caso não houvesse o dispositivo a corrente seria:

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}_s}{Z_{LT}} \quad (6.12)$$

De forma a se demonstrar o funcionamento de um DLCCS do tipo resistivo, foi montado um circuito utilizando o programa Electronics Workbench da National Instruments onde o DLCCS-R foi representado por um potenciômetro. Em condições normais de operação ele se comporta idealmente como um curto-circuito, isto é, o potenciômetro está no tap de 0%. Na ocorrência do curto ele se comporta idealmente transitando instantaneamente, isto é, instantaneamente muda o tap para 100%. O valor da corrente eficaz foi medido através de um

múltímetro na função de amperímetro representado pelo nome XMM1, conforme as figuras 6.6 a 6.8.

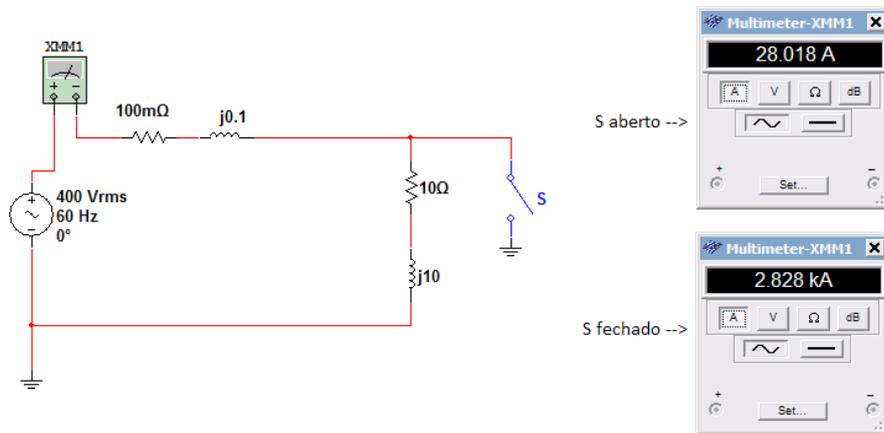


Figura 6.6 - Simulação do circuito sem o DLCCS-R

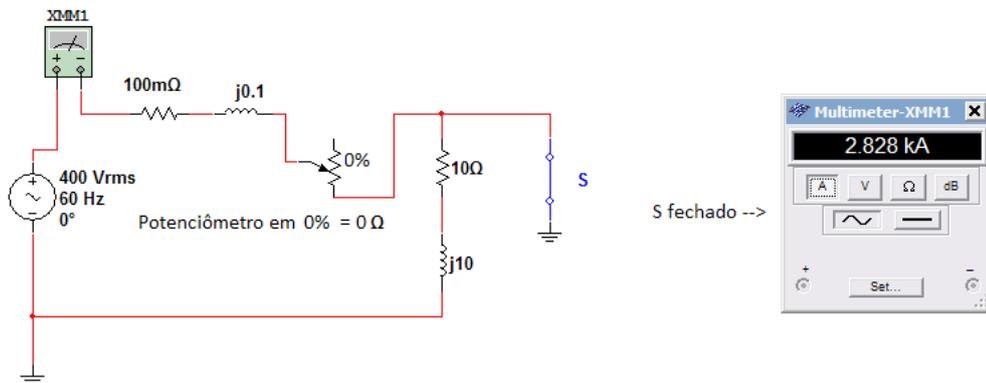


Figura 6.7 - Simulação do circuito com o DLCCS-R no tempo $t = t_{curto}$

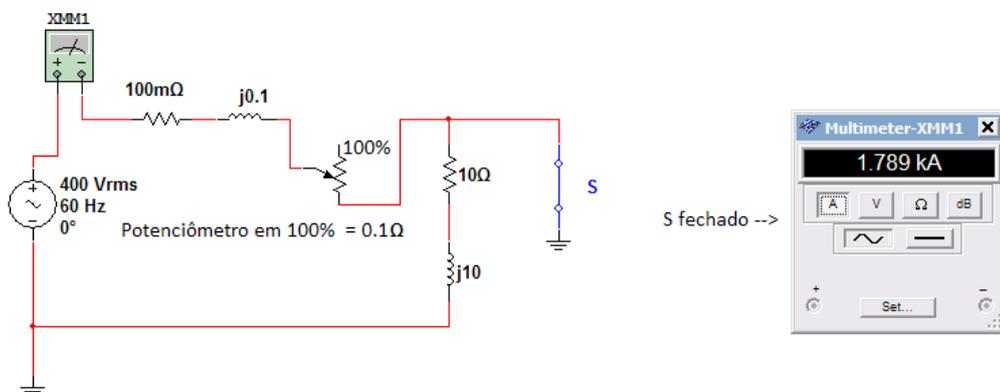


Figura 6.8 - Simulação do circuito com o DLCCS-R no tempo $t = t_{curto} +$

O tempo $t = t_{curto}$ representa o instante em que o curto-circuito é aplicado. Como visto na figura 6.8 o DLCCS-R reduz a corrente do circuito.

Uma das dificuldades desse trabalho foi determinar a transição do DLCCS-R, a simulação supôs transição instantânea, porém não está de acordo com a realidade, dessa forma será feita uma tentativa de determinar como ocorre a transição de estados.

6.3 – Modelagem da variação da resistividade no tempo

Um dos pontos principais desse trabalho está na determinação da transição do material do estado supercondutor ao seu estado não-supercondutor, isto é, de como variará a resistividade do material em função de um degrau de corrente e em quanto tempo ocorrerá a transição.

A primeira tentativa foi modelar a transição de forma linear, conforme descrito na figura 6.9.

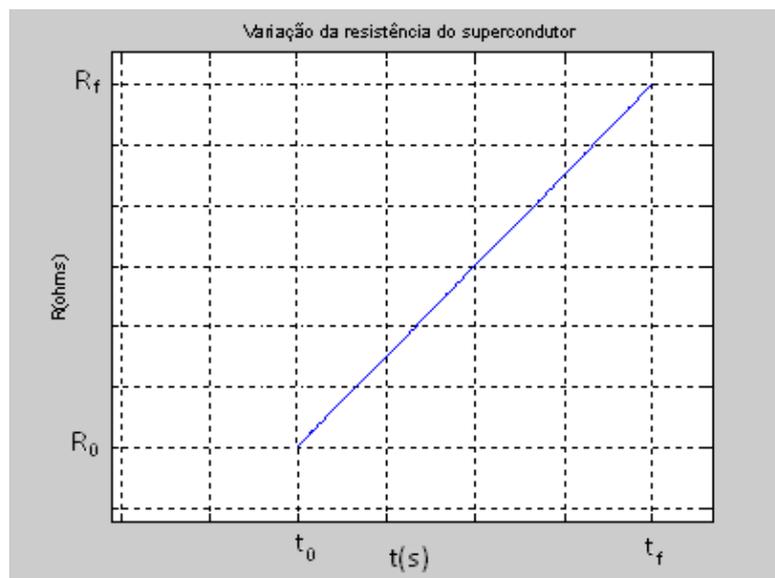


Figura 6.9 – Modelagem linear

Para essa modelagem a resistência varia da seguinte forma:

$$y = ax + b \rightarrow R = \left(\frac{R_0 - R_f}{t_0 - t_f} \right) t + \left[R_0 - \left(\frac{R_0 - R_f}{t_0 - t_f} \right) t_0 \right] \quad (6.13)$$

Posteriormente a modelagem foi feita de forma exponencial, conforme figura 6.10.

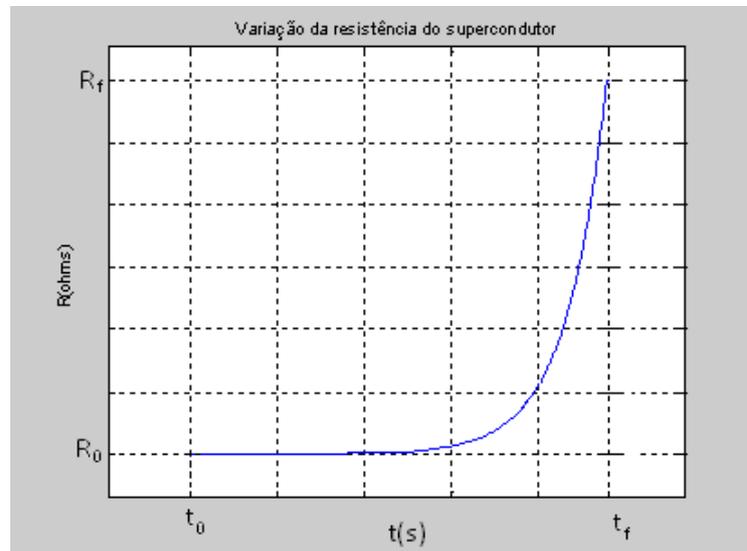


Figura 6.10 – Modelagem exponencial

Para essa modelagem a resistência varia da seguinte forma:

$$y = ae^{bx} \rightarrow R = \frac{R_0}{e^{\left(\frac{\log_e\left(\frac{R_0}{R_f}\right)}{t_0-t_f}\right)t_0}} e^{\left(\frac{\log_e\left(\frac{R_0}{R_f}\right)}{t_0-t_f}\right)t} = R_0 e^{\left(\frac{\log_e\left(\frac{R_0}{R_f}\right)}{t_0-t_f}\right)(t-t_0)} \quad (6.14)$$

Pode-se ainda se fazer uma modelagem equivalente utilizando duas retas, utilizando duas retas pode-se fazer uma aproximação de qualquer curva.

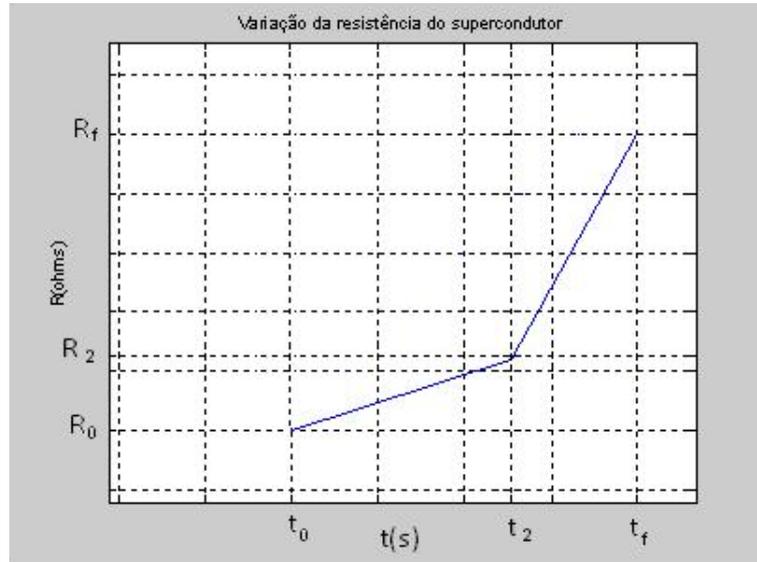


Figura 6.11 – Modelagem por duas retas

Para a modelagem por duas retas a resistência varia da seguinte forma:

$$y = ax + b \rightarrow R = \begin{cases} \left(\frac{R_0 - R_2}{t_0 - t_2} \right) t + \left[R_0 - \left(\frac{R_0 - R_2}{t_0 - t_2} \right) t_0 \right] & \text{se } t_0 \leq t < t_2 \\ \left(\frac{R_2 - R_f}{t_2 - t_f} \right) t + \left[R_2 - \left(\frac{R_2 - R_f}{t_2 - t_f} \right) t_2 \right] & \text{se } t_2 \leq t < t_f \end{cases} \quad (6.15)$$

Por último com base na literatura viu-se que a melhor modelagem seria na forma potencial sendo modelada pela equação 6.5, obtendo-se assim, a figura 6.12. [32]

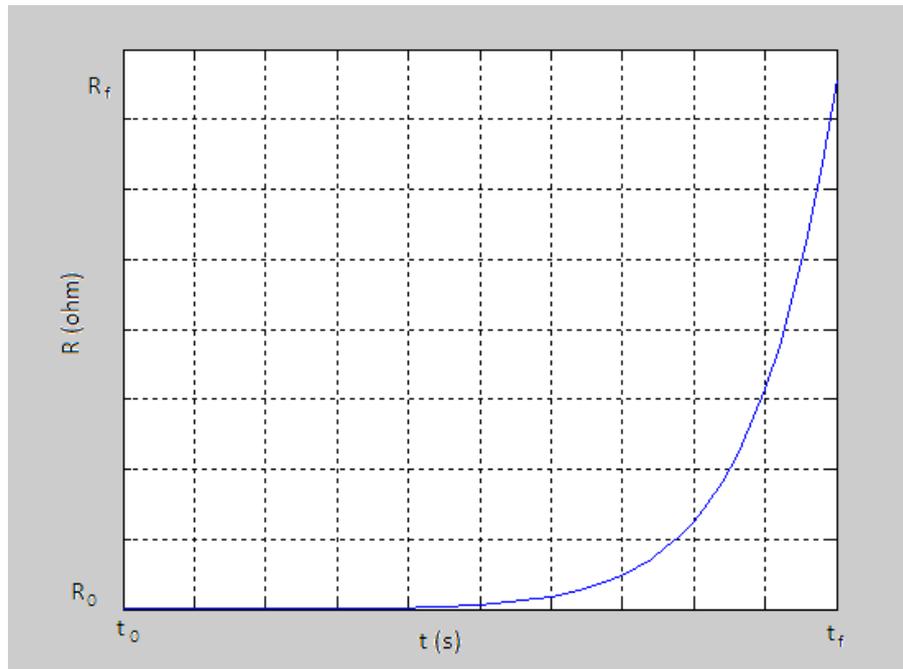


Figura 6.12 – Modelagem Potencial

6.4 – Simulações

Nesta seção serão feitas simulações de limitação de corrente utilizando as modelagens propostas na seção 6.3, que são:

- Modelagem linear
- Modelagem exponencial
- Modelagem por duas retas
- Modelagem potencial

O circuito a ser simulado é o proposto na figura 6.13. Supõe-se que a resistência do supercondutor é de 10^{-14} ohm em seu estado supercondutor e 0,1 ohm em seu estado não-supercondutor (após a transição). O tempo de simulação utilizado foi de 1 segundo e com o instante da ocorrência da falta em 0,5 segundo e a falta foi eliminada após 0,11 segundo.

Vale lembrar que pode-se fazer associações em série e paralelo do DLCCS-R, segundo a conveniência do projeto.

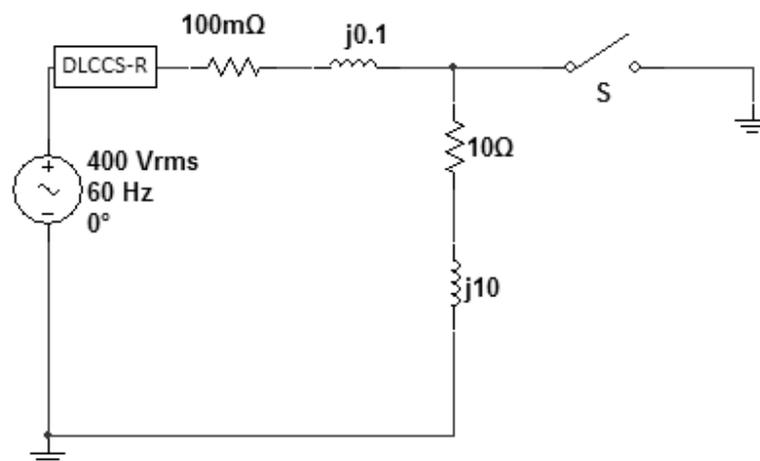


Figura 6.13 - Circuito a ser simulado

Efetuada simulações utilizando as modelagens propostas no item 6.2, e com tempo de transição de 10ms, obtém-se os resultados apresentados nas figuras 6.14 a 6.18.

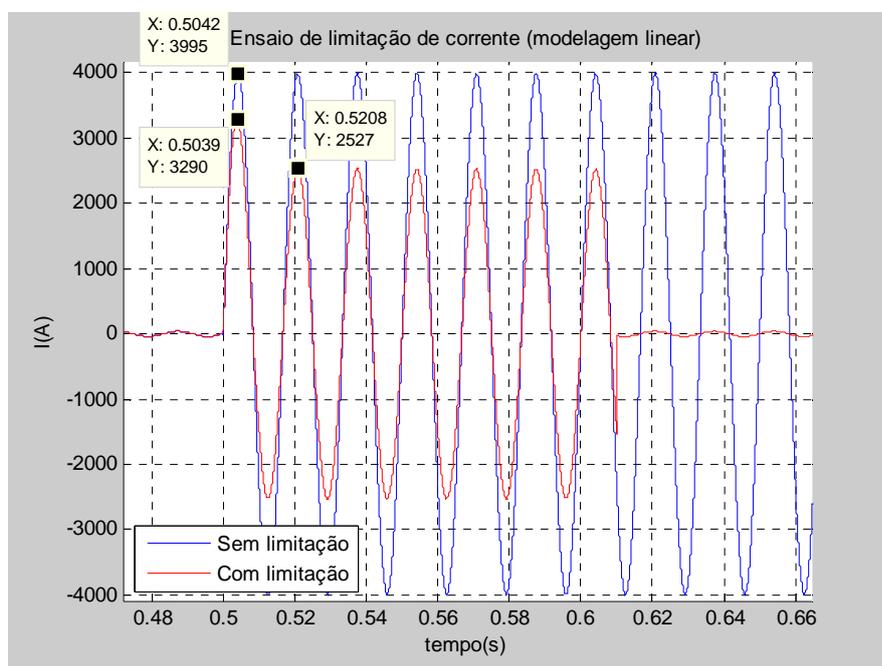


Figura 6.14 - Simulação de limitação de corrente com modelagem linear

Pode-se concluir que a modelagem linear demonstra corretamente a resposta do DLCCS-R em um circuito, sendo assim, pode ser considerada uma boa aproximação.

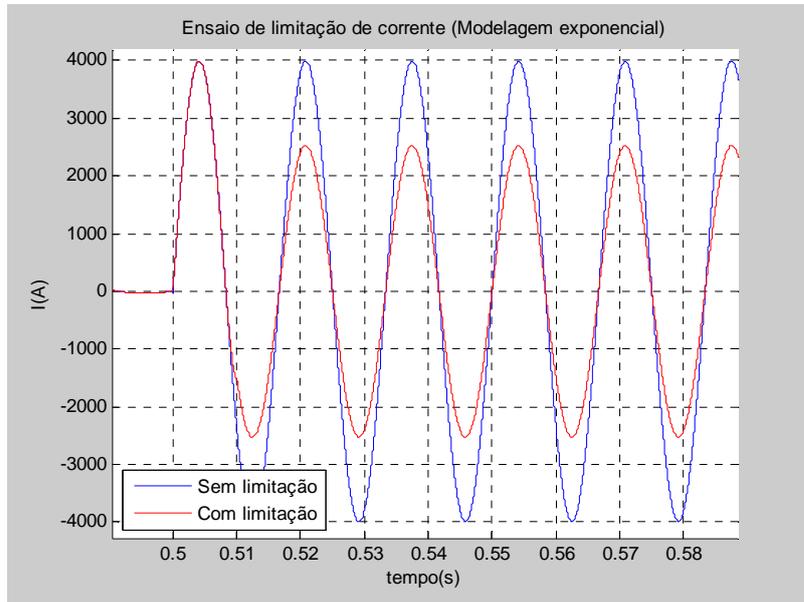


Figura 6.15 - Simulação de limitação de corrente com modelagem exponencial

Conforme é verificado na figura 6.14 a corrente não foi limitada antes do primeiro pico, portanto, a modelagem exponencial não expressa corretamente a resposta de um circuito com um DLCCS-R presente [36], provavelmente devido ao fato de demorar a variar o seu valor de resistência.

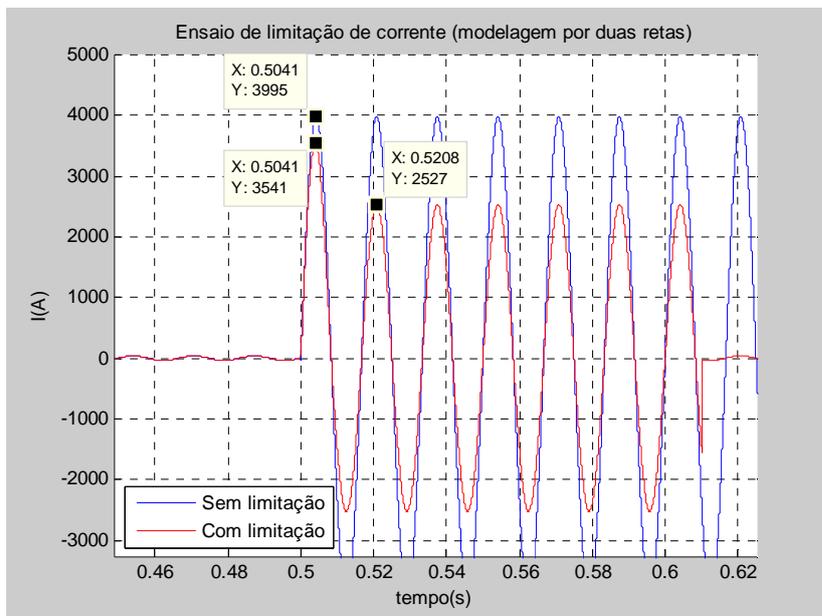


Figura 6.16 - Simulação de limitação de corrente com modelagem por duas retas

Pode-se ver pela figura 6.16 que a modelagem por duas retas representa corretamente [37], a resposta de um circuito com um DLCCS-R inserido, a figura 6.16 mostra as duas retas que modelam a transição do estado supercondutor ao não-supercondutor.

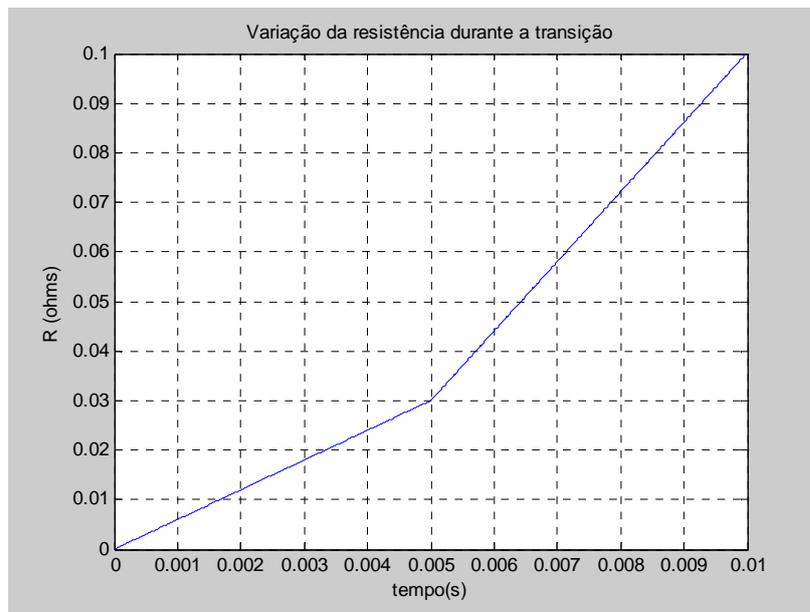


Figura 6.17 - Variação a resistividade durante a transição usando modelagem por duas retas

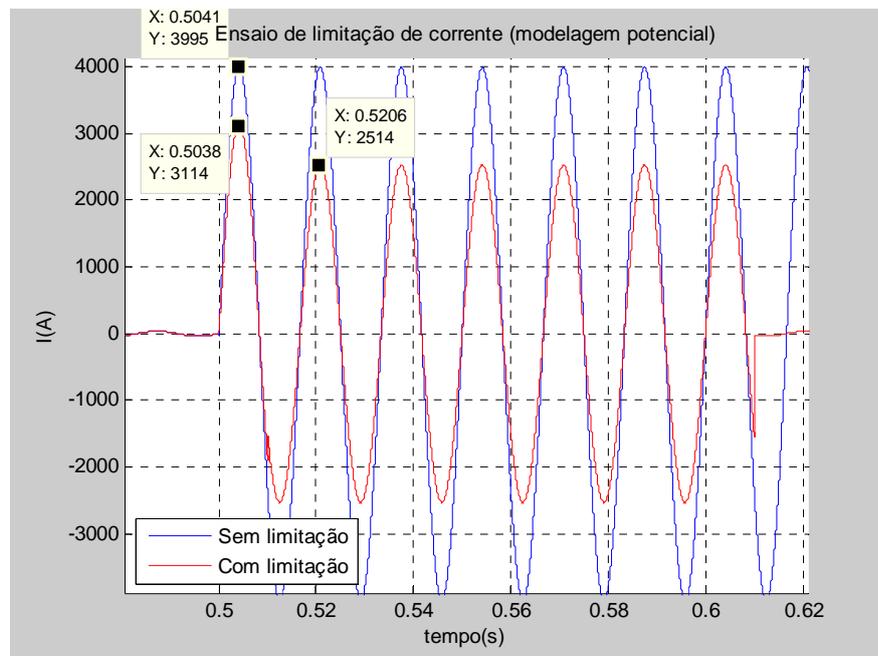


Figura 6.18 - Simulação de limitação de corrente com modelagem potencial.

Confirmando o descrito na literatura [36] e no ensaio realizado pelo CEPEL com o módulo limitador da Nexans, a simulação utilizando a modelagem potencial demonstra corretamente a resposta de um circuito com o DLCCS-R presente e com transição dada pela equação 6.5.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos futuros

7.1 – Conclusões

Este trabalho se propôs a fazer uma introdução ao fenômeno da supercondutividade bem como suas aplicações no setor elétrico com ênfase nos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores, especialmente o tipo resistivo.

Como visto no presente trabalho são muitas as possibilidades de utilização dos materiais supercondutores no setor elétrico e pesquisas estão sendo feitas em todo o mundo para que essas aplicações se tornem confiáveis e atrativas economicamente, de forma a estarem disponíveis ao mercado no menor tempo possível.

Além do estudo dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores, foram feitas simulações da resposta do circuito quando um DLCCS-R estava presente, verificou-se assim, que a utilização dos materiais supercondutores como limitadores de corrente tem grande potencial.

Os DLCCS's se mostram com grandes vantagens aos DLCC's largamente utilizados, como vantagens pode-se destacar: baixa interferência em condições normais de operação, baixo peso, pequeno volume, atuação automática, recuperação automática com o resfriamento e limitação antes do primeiro pico de corrente, podendo evitar a troca de um equipamento de pré-existente no circuito.

As modelagens propostas no capítulo 6 foram condizentes com os ensaios realizados pelo CEPTEL com o módulo limitador da Nexans (figura 6.1), a menos da modelagem exponencial que não teve semelhança com a resposta esperada, essas modelagens possibilitaram uma primeira aproximação para se prever o comportamento da corrente elétrica em um circuito protegido com um DLCCS.

Caso se efetue ensaios para determinar como varia a resistência do material supercondutor em função de um degrau de corrente é possível se determinar exatamente como ocorre essa variação, podendo assim, gerar um modelo mais próximo do real, podendo obter uma resposta mais próxima das obtidas em ensaios.

7.2 - Trabalhos futuros

Uma das dificuldades do presente trabalho foi determinar como varia a resistividade de um material supercondutor em função de um degrau de corrente, dessa forma seria interessante se efetuar ensaios de resposta ao degrau para se determinar corretamente o comportamento do material supercondutor, o que tornaria o resultado das simulações mais próximas da real.

Pode-se ainda se efetuar uma modelagem levando em conta os fatores térmicos, pois não foram tratados neste trabalho.

Outra proposta para futuros trabalhos é a construção de um protótipo de um DLCCS-R que, segundo esse trabalho, se mostrou bastante viável e interessante para o setor elétrico.

Referência Bibliográfica

- [1] Website: www.superconductors.org acessado em 19/12/08.
- [2] ALEXIADES, V; SOLOMON, A.D.V. , “Mathematical modeling of melting and freezing processes”. Hemisphere Publishing Corporation, 1971.
- [3] OLIVEIRA, F.D.C, “Limitador de corrente de falta supercondutor”, Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, Espírito Santo, 2005.
- [4] FOSSHEIN, K., “Superconductivity : physics and applications”, Ed. John Wiley & Sons, 2004.
- [5] BERLINCOURT, TED G., “Type II Superconductivity: Quest for understanding”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-23, No.2, Maio, 1987.
- [6] OSTERMANN, F., “Supercondutividade – Temas atuais de Física”, 1. a ed. – São Paulo: Editora Livraria de Física, Sociedade brasileira de física, 2005.
- [7] MOYSÉS, A.L., “Aplicações de Supercondutividade”, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1992.
- [8] SOTELO, G.G, “Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos”, Dissertação de Doutorado UFRJ, RJ, 2007.
- [9] TINKHAM – “Introduction to Superconductivity”, 2nd Ed., 1996 – McGraw Hill.
- [10] HASSENZAHN W. et al., “Electric Power Applications of Superconductivity”, Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 10, pp 1655-1674, 2004.

- [11] STEPHAN, R. M ; de ANDRADE Jr., R. ; POLASEK, A. . “Prospective Applications of High Temperature Superconductors in the Electric Power Energy Sector”. Eletroevolução, Rio de Janeiro, v. 40, n. setembro, p. 67-74, 2005.
- [12] J.F. MAGUIRE ET AL, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, submetido em 2008.
- [13] ZUEGER H., “630 kVA High Temperature Superconducting Transformer”, Cryogenics, vol. 38, pp. 1169-1172, 1998.
- [14] ALMEIDA, M. – “Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Natal”, 2000.
- [15] MONTEIRO, A. M., “Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito com Ênfase no IPC (Interphase Power Controller)”, Dissertação de Mestrado, UFRJ, RJ, 2005.
- [16] OLIVEIRA, T. C., DE ABREU, J. P. G., DE C.FILHO, J. M. GOMES, R. P. (2005). “Estimação de parâmetros de afundamentos de tensão”, VI SBQEE, Belém, Pará – Brasil.
- [17] ROBBA, ERNESTO JOÃO – “Introdução a sistemas elétricos de potência – Componentes simétricas”, 2ªEd. São Paulo – Editora Blücher, 2000.
- [18] CLARK, H. K. – “Proteção de sistemas elétricos de potência”, Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1979.
- [19] WEEDY, B. M. – “Sistemas elétricos de potência” – São Paulo, Polígono, Ed. da Universidade de São Paulo, 1973.
- [20] STEVENSON, W.D. – “Elemento de análise de sistemas de potência”, São Paulo, Ed. McGraw-Hill, 1978.

[21] F.P.COSTA, I.M.SANTOS – “Vantagens do protetor por limitação de corrente”, clip.Revista Eletricidade Moderna, 1990.

[22] A D’AJUZ, A. MONTEIRO, O. KASTRUP e F.H. OLIVEIRA, “Dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (DLCC) – Estado da arte e Aplicações nas Redes Elétricas”, Relatório ONS 006/2002].

[23] JÚNIOR, C.M., FUKUOKA, N. ET AL, “Definição dos Requisitos Elétricos dos Equipamentos associados ao Reator Limitador em 550KV na SE Tucuruí, em decorrência das manobras sob curto-circuitos”, XVI SNPEE, Grupo X – GSC, Campinas, 2001.

[24] BROUCHU, J, “Interphase power controllers”. Citeq, Hydro Québec and ABB – Polytechnic International Press, 2001.

[25] CHEN, P.M, LAKNER,M E RHYNER,J. ET AL. “Superconducting fault current limiter applications, technical and economical benefits, simulations and test results”. *CIGRE*, 13-201, Paris 2000.

[26] GROMOLL,B. “Resistive fault current limiters with YBCO films - 100 kva functional model”. *IEEE Applied superconductivity*, vol.9, n.2, junho de 1999.

[27] CHEN, P.M, LAKNER,M E RHYNER,J. ET AL. Fault current limiter based on high temperature superconductors - different concepts, test results, simulations, and applications. *PHYSICA C*, 354:27–33, 2001.

[28] CHEN, P.M, “Superconducting Control for Surge Currents”,*IEEE SPECTRUM*, *IEEE Applied superconductivity*, Vol. 35, Issue 5, Maio 1998.

[29] FISHER, S., SCHMITT,H., VOLKMAR, R., BRISSETTE,Y., “System Requirements and Test of Super-Conducting Fault Current Limiters”, 38^o CIGRÉ, artigo 13-207, Paris, 2000.

[30] Website: www.slimformer.info acessado em 19/12/08

[31] NOE, M., STEURER, M., “High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications and development status”, Institute of Physics Publishing - Superconductor Science and Thecnology, UK 2007.

[32] KIM, H. ET AL, “Quench Development in Bi-2212 Bulk Coils During Quenches”, IEEE Applied superconductivity, vol.17, n.2, junho de 2007.

[33] DURON, J., DUTOIT, B., “Computer Modeling of YBCO Fault Current Limiter Strips Lines in Over-Critical Regime With Temperature Dependent Parameters”, IEEE Applied superconductivity, vol.17, n.2, junho de 2007.

[34] Website: www.superpower-inc.com acessado em 19/12/08

[35] ELSCHNNER,S., NOE, M. ET AL., “Characterization of BSCCO 2212 Bulk Material for resistive Current Limiters”, IEEE Applied superconductivity, vol.11, n.1, março de 2001.

[36] ELSCHNNER,S., NOE, M. ET AL., “Manufacturing ans Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10MVA Fault Current Limiter”, IEEE Applied superconductivity, vol.13, n.2, junho de 2003.

Apêndice A

Listagem do programa para plotagem da tabela 6.1

```
clear all
clc;
display('1 = Fita 2G, 2 = Bulk Bi2212');
opcao=input('Entre com a opcao desejada = ');

if opcao==1 %Fita 2G

Jc=1;
E0=1.6;
n1=2.8;
a=2;
n2=27;
ro0=10^-8;
rosat=90;

J=0:0.0005:10;

for i=1:length(J)

if abs(J(i))<Jc
    roL1(i)=0;
else
    roL1(i)=(E0/abs(J(i)))*((abs(J(i))/Jc)-1)^n1;
end

if abs(J(i))<a*Jc
    roL2(i)=0;
else
    roL2(i)=(E0/abs(J(i)))*((abs(J(i))/Jc)-a)^n2;
end

ro(i)=((roL1(i)+roL2(i)+ro0)*rosat)/(roL1(i)+roL2(i)+ro0+rosat);

end
%Comprimento do material supercondutor em cm
l=540;
%Área do material supercondutor em cm2
A=1.2*10^-4;
%Cálculo da resistência
R=(ro*l)/A;
```

```

plot(J/Jc,R*10^-6);
title('Curva R x J/Jc - Fita 2G');
xlabel('(J/Jc)');
ylabel('resistência (ohms)');
grid;
end

if opcao==2 %Bulk

Jc=1;
E0=1;
n1=2.8;
a=2;
n2=9;
ro0=10^-8;
rosat=700;

J=0:0.0005:10;

for i=1:length(J)

if abs(J(i))<Jc
    roL1(i)=0;
else
    roL1(i)=(E0/abs(J(i)))*((abs(J(i))/Jc)-1)^n1;
end

if abs(J(i))<a*Jc
    roL2(i)=0;
else
    roL2(i)=(E0/abs(J(i)))*((abs(J(i))/Jc)-a)^n2;
end

ro(i)=((roL1(i)+roL2(i)+ro0)*rosat)/(roL1(i)+roL2(i)+ro0+rosat);

end
%Comprimento do material supercondutor em cm
l=540;
%Área do material supercondutor em cm2
A=0.24;
%Cálculo da resistência
R=(ro*l)/A;

plot(J/Jc,R*10^-6);
title('Curva R x J/Jc - Bulk Bi2212');
xlabel('(J/Jc)');

```

```
ylabel('resistência (ohms)');  
grid;  
end
```

Apêndice B

Listagem do programa para as simulações da seção 6.4

```
clear all
clc
Vpico=input('Qual o valor de pico da tensão da fonte? (sugestão 565V) = ');
ts=input('Qual o tempo de simulação? (sugestão 1s) = ');

%Sinal de tensão do circuito
t=0:1/60000:ts;
v=Vpico*sin(2*pi*60*t);

%plot(t,v); %Forma de onda da tensão

%Resistividade do material supercondutor
display(' ');
display('Resistência do supercondutor');
R0=input('Entre com o valor da resistência inicial(sugestão 10^-14) = ');
Rf=input('Entre com o valor da resistência final(sugestão 0.1) = ');
display(' ');

%Circuito utilizado
Zline=input('Entre com a impedância da linha? (sugestão 0.1+j*0.1) = ');
Zcarga=input('Entre com a impedância da carga? (sugestão 10+j*10) = ');

%Cálculo da Corrente

tc=input('Instante de tempo que ocorre o curto? = ');

%Cálculo da Corrente sem o DLCC

for i=1:length(1/60000:1/60000:tc)-1
    Z(i)=Zline+Zcarga;
end

for i=length(1/60000:1/60000:tc):length(1/60000:1/60000:ts)+1;
    Z(i)=Zline;
end

Imax=max(v./abs(Z))/sqrt(2);

%Cálculo da Corrente com o DLCC

%Sem curto
```

```

for i=1:length(0:1/60000:tc)+1
    Req1(i)=abs(Zline+Zcarga+R0); %Com supercondutor

end
%Com curto

%Transição
display(' ');
ttr=input('Tempo de transição? = ');
display(' ');
display('|-----|');
display('| 1 = Transição linear      |')
display('| 2 = Transição exponencial  |')
display('| 3 = Transição duas lineares |')
display('| 4 = Transição potencial     |')
display('|-----|');
display(' ');
opcao=input('Qual o tipo de transição deseja analisar (1, 2, 3 ou 4)? = ');
t1=length(0:1/60000:tc)+2;
t2=t1+length(0:1/60000:ttr);
t3=length(0:1/60000:0.1); %Permanencia do curto

tp=ceil(1.01*t1); %Ajuste por duas retas %ceil arredonda para o inteiro superior
Rp=0.3*Rf; %Ajuste por duas retas

if opcao==1 %Linear
for i=t1:t2
    k=polyfit([t1 t2], [R0 Rf],1);
    Req1(i)=abs(Zline+k(1)*(i)+k(2)); %Com supercondutor

end
end

if opcao==2 %Exponencial
for i=t1:t2
B=(log((R0)/(Rf)))/(t1-t2);
Req1(i)=abs(Zline+((R0/exp(B*t1)))*exp(B*i));

end
end

if opcao==3 %Duas Lineares
for i=t1:tp
k2=polyfit([t1 tp], [R0 Rp],1);
Req1(i)=abs(Zline+(k2(1)*(i)+k2(2))); %Com supercondutor

```

```

end
for i=tp:t2
    k3=polyfit([tp t2], [Rp Rf],1);
    Req1(i)=abs(Zline+(k3(1)*i)+k3(2)); %Com supercondutor
end
end

if opcao==4 %potencial

for i=t1:t2
Ec=0.1*10^-6;
l=10*10^-2;
Ic=100;
n=9;
%I2(i)=abs((v(i)./abs(Z(i))))*sin(2*pi*60*(i));
I(t1:t2)=100:((Imax-100)/length(0:1/60000:ttr)):Imax;
R(i)=((Ec*I)/Ic)*(I(i)/Ic)^(n-1);
if R(i)>0.1
    R(i)=0.1;
end
Req1(i)=abs(Zline+R(i));

end
end

%Eliminação da falta
for i=t2+1:t2+1+t3
    Req1(i)=abs(Zline+Rf); %Com supercondutor

end
%Após o curto
t4=t2+t3+2;
for i=t4:length(0:1/60000:ts)
    Req1(i)=abs(Zline+Zcarga+R0); %Com supercondutor
end

hold on
plot(t,v./abs(Z)); %Corrente Prospectiva sem DLCC
plot(t,v./abs(Req1),'r'); %Corrente Limitada pelo DLCC
legend('Sem limitação','Com limitação','Location','SouthWest');
xlabel('tempo(s));
ylabel('I(A)');
title('Ensaio de limitação de corrente')
grid;

```