

Comparações das topologias de FCL utilizando supercondutores

Citation for published version (APA):

Carraro, L. O., Oliveira, A. R., Costa, A. R., Carmo, J. E. R., Ribeiro, M. J., & Ribeiro, P. F. (2012). Comparações das topologias de FCL utilizando supercondutores. In *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 15-18 Maio 2012, Goiânia, Brasil* Sociedade Brasileira de Automática (SBA).

Document status and date:

Published: 01/01/2012

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Comparações das Topologias de FCL's Utilizando Supercondutores

Laura. O. Carraro¹, Ângelo. R. Oliveira¹, *Student, IEEE*, Marlon. J. Carmo¹, *Member, IEEE*, José E. R. Costa¹, and Paulo. R. Ribeiro², *Fellow, IEEE*.

Abstract--In this paper is presented a topology of two ideal FCL resonant circuits using YBCO superconducting coils. It is proposed an alternative topology to fault limiter derived from these circuits. It is discussed also a new approach using SMES. The system will operate when a fault is detected, storing the short circuit current in a SMES and returning energy to the power system.

Key-words: FCL, SCFCL, SMES, Superconductivity, YCBO.

I. NOMENCLATURA

FCL – Limitadores de Corrente de Curto Circuito (*Fault Current Limiters*);

SCFCL - Limitadores de Corrente de Curto Circuito Supercondutores (*Superconducting Fault Current Limiters*);

SMES – Armazenagem de Energia no campo magnético de supercondutores (*Superconducting Magnetic Energy Storage*);

YBCO – ítio-bário-cobre ($YBa_2Cu_3O_7$), material supercondutor.

II. INTRODUÇÃO

ATUALMENTE nota-se, em escala mundial, uma crescente demanda por energia elétrica. Sendo assim, é considerável o aumento de novas fontes geradoras [1] (seja fontes alternativas ou fontes baseadas em centrais de hidro e termoeletricas) e a interligação das redes de distribuição [2], a fim de se aumentar a confiabilidade do sistema elétrico de potência.

No que tange a distúrbios de energia, vários projetos e pesquisas têm utilizado supercondutores para limitar correntes de curto circuito. Estes projetos são denominados SCFCL (*Superconducting Fault Current Limiters*). Motivados pela busca por melhorias na qualidade da produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, aumentaram-se significativamente as pesquisas com dispositivos supercondutores FCL (*Fault Current Limiters*), que são

capazes de reduzir os níveis de correntes de curto circuito.

Atualmente, a medida mais comum para reduzir as correntes de curto circuito em sistemas industriais são dispositivos passivos (que não necessitam de sistema de controle para a sua atuação) [3].

Os FCL são dispositivos que necessitam de um sistema de controle para a sua atuação. Para que um FCL seja considerado eficiente, ele deve ter as seguintes características [2]:

- Oferecer uma impedância desprezível durante a operação normal;
- Oferecer uma impedância alta nas condições de falha;
- Dissipar pouca potência;
- Limitar, com rapidez e eficácia, a corrente nas condições de um curto-circuito;
- Apresentar alta confiabilidade durante longos períodos;
- Apresentar baixo peso, baixo volume e baixo custo;
- Não alterar o fator de potência dos circuitos [4];
- Apresentar um curto tempo de recuperação (dentro de 1 a 2 ms) quando ocorrer uma corrente de curto-circuito [5].

Os primeiros experimentos que relatam a tecnologia supercondutora aconteceram em 1911 (em Leiden, na Holanda), quando Heike Kamerlingh Onnes, descobriu que a resistência (à passagem de corrente elétrica) do mercúrio era zero quando este material era submetido à temperatura de 4,2K. Três anos antes, a equipe por ele liderada, havia obtido a liquefação do gás hélio, que ocorre a mesma temperatura, 4,2K (-268,936°C).

Em 1914, Onnes observou que um material deixava de ser supercondutor se fosse submetido a um campo magnético externo superior ao campo crítico (H_c), mesmo se a temperatura tendesse a 0K. Esta descoberta possibilitou verificar que também havia uma densidade de corrente elétrica crítica (J_c) que, caso superado, seria responsável pela transição para o estado normal [6]. Dessa forma, definiram-se alguns parâmetros relacionados à supercondutividade: temperatura crítica (T_c), campo magnético crítico (H_c) e densidade de corrente elétrica crítica (J_c).

No ano de 1986 (em Zurique, na Suíça), J. G. Bednorz e K. A. Müller descobriram a supercondutividade acima de 30 K em um óxido cerâmico contendo lantânio, bário e cobre. Através desta descoberta, deu-se início aos estudos dos chamados supercondutores de alta temperatura crítica (*High temperature superconductors – HTS*) que iriam, mais tarde, superar os até então conhecidos supercondutores de baixa

Este trabalho foi financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e pela FAPEMIG, no Brasil.

A. R. Oliveira, M. J. Carmo e a J. E. Costa trabalham no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, Brasil (e-mail: a.oliveira@ieee.org, jercosta@leopoldina.cefetmg.br, marloncarmo@ieee.org)

P.R. Ribeiro trabalha no Departamento de Engenharia Elétrica, Calvin College, Grand Rapids, MIUSA, e também no CAPS, Florida State University, Tallahassee, FLUSA (e-mail: pribeiro@calvin.edu).

L.O. Carraro é estudante de Engenharia de controle e automação no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, Brasil (e-mail: laura.o.carraro@oi.com.br).

temperatura crítica (*Low temperature superconductors - LTS*).

Antes do final de 1986, os cientistas tinham verificado o começo da supercondutividade a 93 K no óxido de ítrio-bário-cobre ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Com o desenvolvimento das pesquisas nessa área, novos materiais supercondutores de alta temperatura crítica (*HTS*) foram descobertos, como por exemplo, os compostos à base de bismuto (Bi-Sr-Ca-Cu-O), de tálio (Tl-Ba-Ca-Cu-O) e mercúrio (Hg-Ba-Ca-Cu-O). Estes materiais apresentam as mais elevadas temperaturas críticas conhecidas [7].

Com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica, a aplicação da supercondutividade se tornou economicamente viável quando se pode usar nitrogênio líquido como refrigerante, lembrando que hélio líquido (utilizado nos LTS) possui um preço muito mais alto [6].

Os materiais supercondutores são divididos em dois grupos: Tipo I e Tipo II. Esta divisão tem a ver com as diferentes respostas dos materiais supercondutores quando estes são submetidos a campos magnéticos. Nos materiais supercondutores do Tipo I quando o valor do campo magnético crítico (H_c) é atingido, a magnetização vai a zero e o material passa para a fase normal, deixando de ser um supercondutor, a Fig. 1 (linha pontilhada) exemplifica esse comportamento.

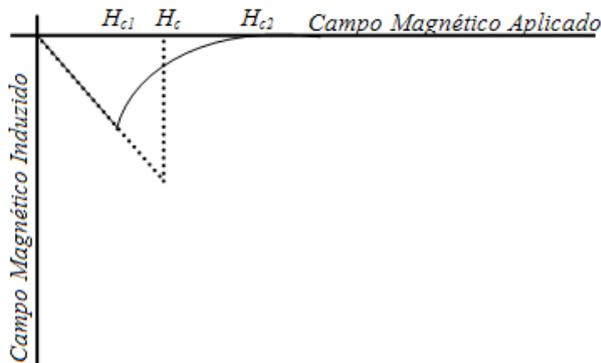


Fig. 1. Comportamento magnético de um supercondutor do Tipo I (linha pontilhada) e do Tipo II (linha contínua).

Nos materiais supercondutores do Tipo II, nota-se a presença de um estado misto, que na Fig. 1 (linha contínua) compreende a região que vai de H_{c1} até H_{c2} . O estado misto é caracterizado pela existência de regiões normais e supercondutoras no interior do material supercondutor. Nesse tipo de material, quando $H_{c1} < H_c$, ocorre o Efeito Meissner, caracterizado pela exclusão do fluxo magnético do interior de um material supercondutor. Na região de H_{c1} até H_{c2} o fluxo magnético não está totalmente expulso do material e penetra, parcialmente, no interior do material. Quando $H > H_{c2}$ a magnetização se anula e o material perde as características de um supercondutor [6].

Por enquanto, não há uma teoria definitiva que explique o fenômeno da supercondutividade. Por este motivo, existem vários físicos que propõem modelos que definem o fenômeno, tais como: Modelo de London, Modelo de London –Pippard,

Modelo de 2 Fluidos etc.

O presente trabalho tem o objetivo de mostrar algumas topologias de FCL que são difundidas na literatura, bem como utilizadas de forma factível nos sistemas elétricos de potência; demonstra-se ainda no trabalho derivações dos limitadores de curto-circuito ressonantes para apresentar melhorias nestes utilizando bobinas supercondutoras. Por último, apresenta-se outra topologia com objetivo de absorver a corrente de curto-circuito e devolvê-la posteriormente para a rede quando houver algum distúrbio em que o SMES se faça necessário.

III. DISPOSITIVOS FCL CONVENCIONAIS

A. RLC

O RLC (Reator Limitador de Corrente de Curto Circuito de Núcleo a Ar) é um dos mais antigos e com os menores custos (de aquisição) entre os dispositivos de limitação de correntes de curto circuito. Por ficar instalado permanentemente no circuito, provoca significativa queda de tensão e perdas no sistema (ver fig 2 -b). O RLC pode ser instalado em série com as linhas de transmissão, conforme apresentado na Fig. 2(a), ou através do seccionamento de um barramento, conforme apresentado na Fig. 2(b), [8].

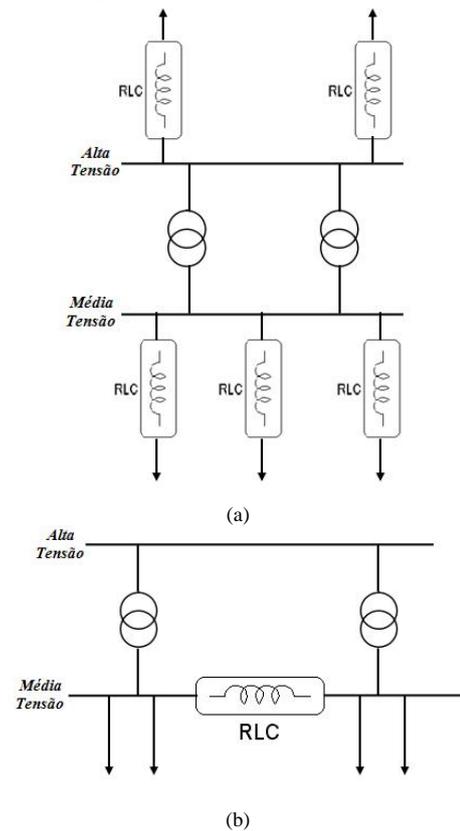


Fig. 2. Formas de instalação do RLC nas subestações.

Como esses dispositivos produzem um elevado campo magnético, deve-se assegurar certa distância ao redor do RLC, ocasionando outra desvantagem, uma vez que o espaço físico pode ser limitado em certas subestações, usinas, empresas etc.

Antes de investir em uma tecnologia RLC deve-se analisar

a viabilidade econômica e o custo-benefício do equipamento. Uma vez que os reatores ocasionam perdas nos sistemas, estas perdas teriam um custo relevante com o passar dos anos? Deve-se levar em conta, também, a substituição dos equipamentos superados.

Hoje, no Brasil, existem RLC instalados em [9]:

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

B. Dispositivos Pirotécnicos

Os dispositivos pirotécnicos são circuitos ativos utilizados com a finalidade de interromper elevadas correntes de curto circuito em tempos extremamente pequenos (menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo [8]).

Estes dispositivos foram difundidos no Brasil a partir dos anos 90, apesar de serem utilizados no mundo desde a década de 50. Atualmente, diversas empresas nacionais como, CENIBRA, ARACRUZ, ACESITA, CST Steel utilizam essa tecnologia [1]. Tais dispositivos devem ser instalados juntamente com os equipamentos de manobra convencionais (disjuntores e chaves seccionadoras). Uma vez que os disjuntores e as chaves seccionadoras, entre outros, continuam agindo na interrupção de pequenas correntes de curto circuito, os dispositivos pirotécnicos atuam somente quando o sistema está exposto a correntes superiores à capacidade de disjuntores.

As principais aplicações deste dispositivo estão relacionadas com as ampliações de subestações existentes devido à entrada de novos geradores ou transformadores. A entrada de novos geradores ocasiona uma elevação natural (contribuição das novas máquinas) do nível de curto-circuito na subestação. Como já comentado, esta elevação pode acarretar na superação de equipamentos já existentes. Para se evitar, portanto, a troca completa das instalações desta subestação, pode-se instalar o dispositivo pirotécnico evitando assim a contribuição desta nova fonte geradora na hora do defeito.

Uma desvantagem desta solução está na necessidade de se retirar toda a geração, após a interrupção do defeito, até a substituição do elemento fusível e da câmara do barramento de cobre.

Para minimizar este efeito, pode-se utilizar o dispositivo pirotécnico em paralelo com reatores limitadores de curto-circuito. Neste caso, durante a ocorrência de um defeito, a atuação do dispositivo pirotécnico faz com que o reator seja inserido no circuito, reduzindo o valor da corrente de curto-circuito dentro dos limites de interrupção do disjuntor do circuito onde ocorreu a falta.

A Fig. 3 ilustra as principais partes de um dispositivo pirotécnico.

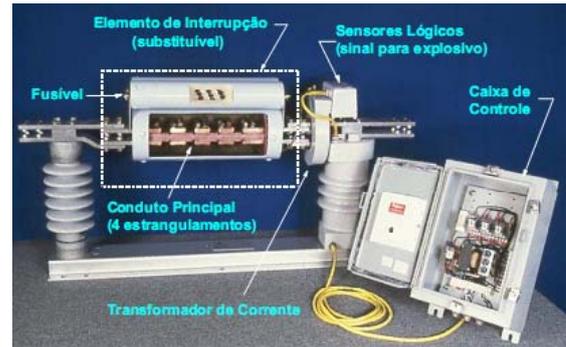


Fig. 3. Principais partes de um dispositivo pirotécnico.

Fonte: G&W Eletric®

C. Limitadores de Corrente de Curto Circuito baseados em Circuito Ressonante controlado por dispositivos Semicondutores de Potência

Como nos demais tipos FCL, esse limitador também deve oferecer uma impedância desprezível durante a operação normal e deve oferecer uma impedância alta nas condições de falha. A transição do dispositivo, passando da operação normal para a operação como um limitador, é conseguida variando-se a frequência de ressonância do FCL [1]. A partir do chaveamento de dispositivos semicondutores de potência (por exemplo, tiristores de potência que são os de maior capacidade disponíveis no mercado) consegue-se controlar os elementos reativos variáveis, sintetizados com indutores e capacitores.

As Fig. 4(a) e Fig. 4(b) apresentam dois circuitos LC ressonantes, um paralelo e outro série. Nestes circuitos, a conexão de uma impedância muito baixa nos terminais da carga representa a ocorrência de uma falha ou curto-circuito, sendo assim, a corrente I_s que flui pela fonte senoidal atinge valores elevados.

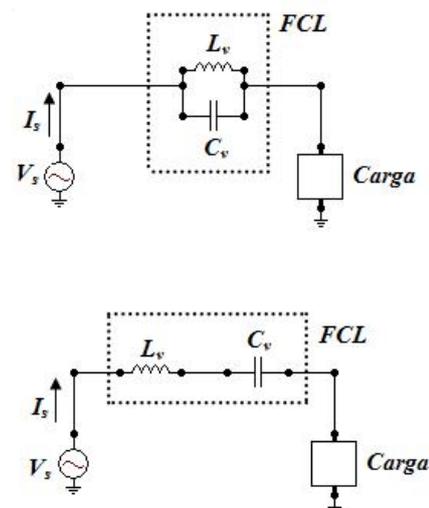


Fig. 4. Topologias de FCL baseados em circuitos ressonantes.

Os resultados obtidos permitem afirmar que o limitador

proposto constitui uma poderosa ferramenta para aumentar a confiabilidade das redes elétricas submetidas a curto circuitos.

IV. SCFCL

Vários projetos e pesquisas têm utilizado supercondutores para limitar correntes de curto circuito. Esses dispositivos são os chamados SCFCL. Os SCFCL ainda não estão disponíveis para comercialização e são tecnicamente viáveis apenas para aplicações em níveis de média tensão. Entretanto, há pesquisas que prometem viabilizar a aplicação de SCFCL para níveis superiores a 100kV. Na Coreia, está sendo desenvolvido um limitador de 154 kV e na Alemanha há pesquisas para o desenvolvimento de um demonstrador SCFCL monofásico resistivo de 110 kV. Há dois protótipos previstos para serem instalados no sistema de potência [3].

A. SCFCL Resistivo

Os SCFCL resistivos representam a maioria dos projetos devido a sua simplicidade, baixo volume e peso. Nestes dispositivos (que são montados em série com o circuito a ser protegido) a corrente passa no supercondutor e o limitador é praticamente invisível para o circuito. Eles possuem baixa impedância em condições de correntes nominais, não influenciando, consideravelmente, no sistema elétrico. Porém, quando ocorre o curto circuito um dos três parâmetros que evidencia a supercondutividade – temperatura crítica (T_c), campo magnético crítico (H_c) e densidade de corrente elétrica crítica (J_c) – é alterado e então o elemento supercondutor aumenta, consideravelmente, sua resistividade (perdendo a sua característica de supercondutor) limitando assim essa falha, como uma chave que habilita ou desabilita uma impedância conectada em série com o circuito [4]. A Fig. 5 apresenta um SCFCL resistivo.

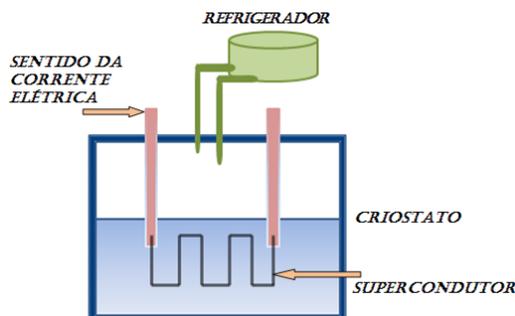


Fig. 5. Estrutura básica de um SCFCL resistivo.

B. SCFCL Indutivo

O SCFCL indutivo é semelhante a um transformador convencional. Possui um enrolamento primário (conforme um enrolamento convencional) e um enrolamento secundário (com material supercondutor), os dois enrolamentos são acoplados magneticamente ao circuito a ser protegido. Esse dispositivo utiliza uma das propriedades da supercondutividade, o campo magnético crítico H_c , para limitar a corrente de curto circuito. A corrente do circuito, que

circula pelo enrolamento primário, induz um campo magnético que, durante a operação normal (ou seja, enquanto o campo magnético não ultrapassa um valor crítico H_c) é impedido pelo supercondutor de circular pelo núcleo de ferro. Quando ocorre a corrente de falta, no enrolamento primário, o campo magnético crítico H_c é superado e o enrolamento secundário (que é um supercondutor) perde suas características supercondutoras, então a impedância total aumenta, limitando a corrente de curto circuito.

Uma das vantagens deste dispositivo é que não há muito calor produzido pelo fluxo de corrente no supercondutor e uma das desvantagens é o grande volume de ferro que é necessário para a construção do núcleo magnético, deixando o equipamento muito robusto e pesado [4]. A Fig. 6 apresenta um SCFCL indutivo.

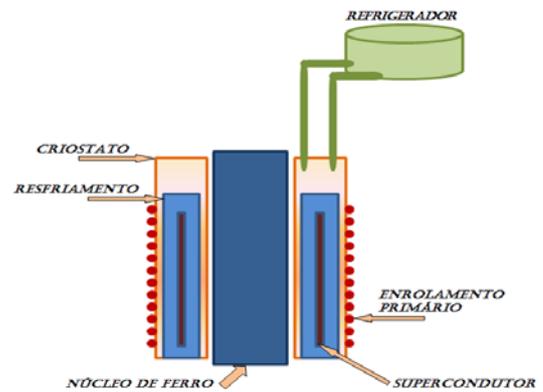


Fig. 6. Estrutura básica de um SCFCL indutivo.

V. STATUS DOS PROJETOS SCFCL

A. CURLIO®

O CURLIO® é um dispositivo SCFCL resistivo (com um material de estrutura BSCCO-2212), trifásico, de 10 kV / 10 MVA [10]. Foi o primeiro SCFCL com esse nível de tensão e potência. Sua temperatura de operação é de 66K. O projeto foi estabelecido pelo ministério alemão de pesquisa e educação, com envolvimento de várias empresas (ACCEL Instruments®, GmbH®, Nexans SuperConductors®, entre outras) para projetar, construir e testar o dispositivo.

A fim de confirmar alguns parâmetros de desempenho do SCFCL, a empresa Nexans SuperConductors® realizou alguns testes no material BSCCO-2212, antes de começar a produção em série deste. Depois destes pré-testes, foram realizados testes laboratoriais e testes de campo. Primeiramente, o equipamento foi transportado para o laboratório de FGH Engineering® and Test GmbH at Mannheim®, na Alemanha, onde foram testados o comportamento de limitações de falhas (primeiramente com o sistema monofásico e em seguida com o sistema trifásico). O SCFCL respondeu limitando de forma eficaz um curto circuito de 18kA durante 60ms. A corrente foi limitada em 7,2 kA (o valor de limitação esperado era de 8,7 kA).

Para realizar os testes de campo, o CURL10[®] foi instalado (em março de 2004) no barramento de 10 kV na subestação da RWE[®], na Alemanha. Nos primeiros meses de teste alguns problemas, referentes ao sistema criogênico, foram detectados e solucionados. Durante o primeiro período de operação não ocorreram falhas de corrente, porém os testes de campo, ainda são efetuados para que se possa verificar a eficiência para limitação de correntes de faltas na rede. Os resultados foram satisfatórios e se pretende evoluir o sistema para um maior nível de tensão, 110 kV.

B. SuperLimiter™[®]

A empresa AMSC[®] é a principal fornecedora mundial de fios HTS. Esta empresa, aliada a parceiros como a Siemens[®], Nexans[®], LIPA[®] (Long Island Power Authority) e DOE[®] (U.S. Department of Energy) está desenvolvendo e testando um FCL HTS 2G resistivo (fio da segunda geração dos HTS), chamado de SuperLimiter™[®] [11], trifásico, para operação em níveis de tensão de 138kV. Espera-se que seja um dispositivo mais simples e compacto. No atual estágio de desenvolvimento do projeto, as seguintes características estão sendo testadas:

- Tensão Nominal de 115 kV;
- 900 A, com previsões futuras para 63 kA;
- Limitação de corrente de 40 kA;
- O módulo compreende de 21 subconjuntos (com três bobinas paralelas em cada subconjunto), totalizando 63, conforme apresentado na Fig. 9;
- A corrente extinta é de $3 \times 2 \times 260 \text{ A} \times 1.3 = 2028 \text{ A}$ à 74 K (a corrente crítica de um tape = 260 A);
- A tensão por comprimento do aço inoxidável é de $56 \text{ V}_{\text{rms}}/\text{m}$;
- A tensão total é $56 \text{ V}_{\text{rms}}/\text{m} \times 26 \text{ m}/\text{bobina} \times 21 \text{ bobinas} = 30.6 \text{ kV}_{\text{rms}}$.

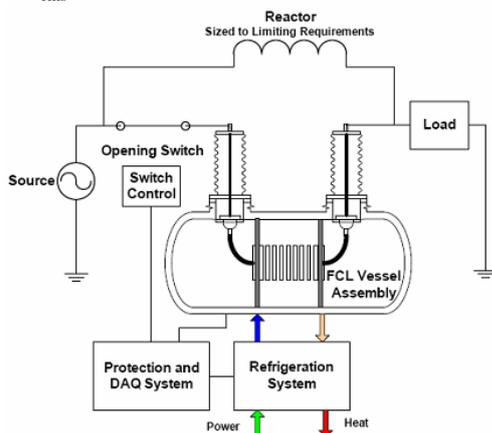


Fig. 7. Estrutura geral do SuperLimiter™[®].

Fonte: AMSC[®]

C. HTS SCFCL – SuperPower[®]

A SuperPower[®] é uma companhia líder mundial no desenvolvimento e produção de fios supercondutores de alta temperatura crítica de segunda geração (HTS 2G). Esta empresa, aliada a parceiros como a Universidade de Houston,

Universidade do Estado da Flórida, Laboratório Nacional Oak Ridge[®] e Instituto Politécnico Rensselaer[®] está projetando um dispositivo modular HTS SCFCL resistivo para linhas de distribuição e transmissão de energia [11]. As especificações do HTS SCFCL para Distribuição de energia elétrica são:

- Tensão = 11 a 15 kV / fase;
- Carga = 800 a 2 kA_{rms};
- Corrente que será limitada, aproximadamente, 65 a 75% quando montado com os três módulos SCFCL.

As especificações do HTS SCFCL para Transmissão de energia elétrica são:

- Tensão = 138 kV / fase;
- Carga = 1700 A_{rms};
- 40 kA de corrente que será limitada, aproximadamente, 65 a 75% quando montado com os 14 módulos SCFCL.

D. Considerações referentes aos custos dos FCLs

Como ainda não existe mercado para as novas tecnologias SCFCL, os custos de dispositivos SCFCL ainda são muito difíceis de se obter. Estimativas razoáveis de custo para diversos sistemas da classe de FCL de 15 kV estão resumidas na Tabela I. Para efeito de comparação, o custo de um disjuntor de circuito gerador padrão com maior capacidade de interromper correntes também é dada. Note que os custos são dados em US\$ / Ampère.

TABELA I
CUSTOS ESTIMADOS DE SISTEMAS SCFCL.

Tipo	Custo (US\$ /A)
Sistema híbrido de comutação	20...90
HTSCFCL Resistivo	>60
Triggered (explosivo)	20
Disjuntor padrão	3...6

VI. PERSPECTIVAS FUTURAS PARA OS SCFCL

A. Proposta de um SCFCL baseado em circuito ressonante com indutor supercondutor de fita YBCO controlado por dispositivos Semicondutores de Potência

A análise dos circuitos mostrados anteriormente será usada para derivar uma topologia alternativa apresentada por [1] para o limitador, baseada na conexão de um circuito ressonante e outro paralelo. O grande problema é que as topologias a serem investigadas utilizam indutores com alto valor de indutância, o que torna essas aplicações comercialmente desinteressantes. Pretende-se substituir o indutor comum por uma bobina supercondutora, sendo a mesma confeccionada por fita supercondutora YBCO (ítrio-bário-cobre) de segunda geração, conforme apresentado na Fig. 8.

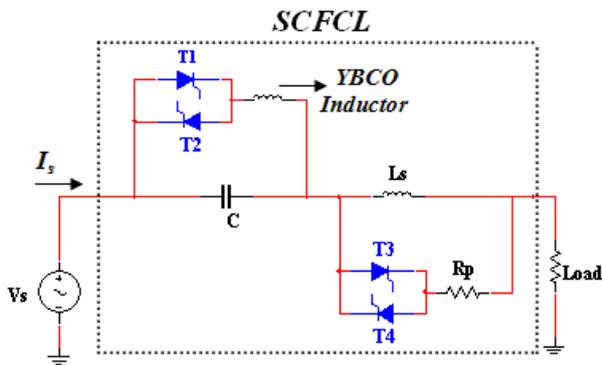


Fig. 8. Estrutura básica de um SCFCL baseado em circuito ressonante com indutor supercondutor de fita YBCO controlado por dispositivos Semicondutores de Potência.

B. Proposta de um SCFCL utilizando SMES

A tecnologia SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) é baseada na habilidade dos supercondutores de transportar elevadas correntes DC (corrente contínua), com perdas resistivas próximas de zero, na presença de significativos campos magnéticos, não armazenando diretamente a energia elétrica. A bobina supercondutora atua armazenando energia no campo magnético gerado pela circulação de corrente. Sendo a bobina um indutor L , a energia armazenada E é proporcional ao quadrado da corrente I que circula na bobina, conforme (1).

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

O sistema de conversão de energia proporciona algumas formas de conversão AC em DC e vice-versa, já que os sistemas SMES (que são dispositivos DC) estão quase sempre conectados a um sistema de energia AC. O sistema de refrigeração criogênico mantém a bobina supercondutora na temperatura de operação apropriada para o material supercondutor utilizado. O sistema de controle estabelece uma ligação entre a demanda de energia da rede e o fluxo de energia que chega ou sai da bobina supercondutora, além de informar o status da mesma, do refrigerador e dos outros equipamentos do sistema.

Uma nova tecnologia está sendo discutida: trata-se de um SCFCL utilizando SMES. O dispositivo proposto será composto de um circuito de detecção de falhas, um sistema de conversão de energia (Chopper + VSI), uma bobina supercondutora, um sistema de refrigeração criogênico e um sistema de controle.

O sistema, basicamente, atuará da seguinte forma: quando uma falha for detectada, o dispositivo SCFCL atuará (limitando a corrente na rede e evitando maiores danos), porém, o ponto-chave é que esta corrente não será dissipada (ou será dissipada o mínimo possível). Como a ideia crucial é o aproveitamento de energia (a fim de aumentar a eficiência do sistema) a corrente de falta "limitada" será, logo após a

limitação, armazenada na bobina supercondutora SMES e, tão logo o sistema de controle ordenar, esta energia será devolvida para o sistema. A Fig. 9 apresenta uma ideia geral do dispositivo proposto.

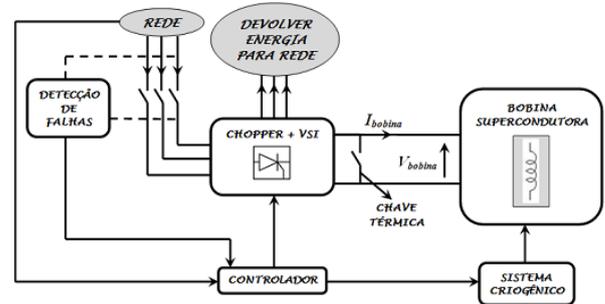


Fig. 9. Estrutura básica de um SCFCL utilizando SMES.

C. Sistema de Controle do SMES

Normalmente, o controle de um sistema SMES é realizado considerando-se a potência ativa [12]. A malha de controle pode ser observada pela Fig. 10.

A função de transferência de um SMES é aproximadamente de primeira ordem. A constante de tempo T_1 do compensador é tipicamente 0,5s. O Valor de K é ajustado em função da capacidade de armazenamento do SMES e da oscilação da potência ativa.

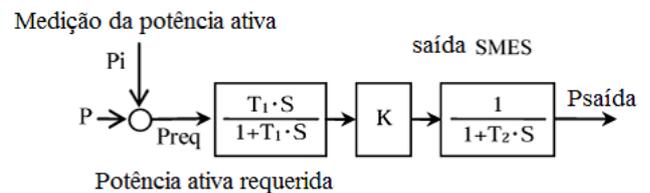


Fig. 10. Sistema típico de controle de um SMES.

O sistema típico para o controle de um SMES, normalmente é realizado pela potência ativa ou reativa. Como pode-se observar pela Fig. 10, tem-se a potência ativa medida que é comparada com a potência de referência. O sinal de erro é injetado em um compensador com um zero na origem e um pólo, ajustado pelo valor de T_1 . O valor de K ajusta a sobre-elevação e tempo de resposta à variação da potência. Tem-se ainda, representativamente um sistema de primeira ordem com constante de tempo T_2 que representa o SMES.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou duas perspectivas de utilização da tecnologia supercondutora em limitadores de corrente de curto-circuito. A análise da viabilidade econômica (dos SCFCL) se torna muito difícil uma vez que os mesmos ainda estão em fase de desenvolvimento e testes (ainda não estão disponíveis no mercado).

Entretanto, a matéria-prima (fita ou fio 2G HTS) para a construção das bobinas supercondutoras já está sendo produzida e comercializada pelas empresas líderes mundiais.

Sabe-se que esta matéria-prima possui um preço muito elevado (\$300-400/kA-m [13]). Entretanto, através dos significativos avanços tecnológicos, estão previstas melhorias significativas, as quais podem ser a chave para disseminação de novas tecnologias baseadas em supercondutividade.

Os elevados custos podem ser compensados pelos grandes benefícios que as novas tecnologias propostas constituem, aumentando a confiabilidade das redes elétricas, que são suscetíveis a curto circuitos. Ademais, há a necessidade de se verificar questões relacionadas a tempos de resposta dos dispositivos a perturbações no sistema.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao MEC/SESu, FNDE, CAPES, CNPq, FAPEMIG, Fundação CEFETMINAS e CEFET-MG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] M. M. Lanes, B. A. H. Carvalho, and B. P. Gomes, "Fault Current Limiter Based on Resonant Circuit Controlled by Power Semiconductor Devices," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 5, pp. 311-320, 2007.
- [2] J. Bock, M. Bludau, R. Dommerque, A. Hobl, S. Kraemer, M. O. Rikel, and S. Elschner, "HTS Fault Current Limiters—First Commercial Devices for Distribution Level Grids in Europe," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1, 2010.
- [3] M. Noe, and M. Steurer, "R&D status of fault current limiters for utility applications," *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, vol. PP, pp. 2, 2006.
- [4] C. A. Baldan, J. S. Lamas, C. Y. Shigue, and E. R. Filho, "Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor - The Limiting Factor and Its Recovery Time," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1810-1813, 2009.
- [5] M. Steurer, P. F. Ribeiro, and M. Noe, "Superconducting magnetic energy storage and fault current limiters-projects, considerations, and outlook," *Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES*, vol. 3, pp. 1102-1107, 2003.
- [6] D. H. N. Dias, E. S. Motta, G. G. Sotelo, R. Andrade, R. M. Stephan, L. Kuehn, O. Haas, and L. Schultz, "Simulations and Tests of Superconducting Linear Bearings for a MAGLEV Prototype," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 2120-2123, 2009.
- [7] M. Irjala, H. Huhtinen, R. Jha, V. P. S. Awana, and P. Paturi, "Optimization of the BaCeO₃ Concentration in YBCO Films Prepared by Pulsed Laser Deposition," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. PP, 2011.
- [8] H. G. Sarmiento, "A fault current limiter based on an LC resonant circuit: Design, scale model and prototype field tests," *Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability. iREP Symposium*, vol. no, pp. 1-5, 19-24, 2007.
- [9] M. Noe, and M. Steurer, "R&D status of fault current limiters for utility applications," *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, vol. PP, pp. 2, 2006.
- [10] R. Kreutz, J. Bock, F. Breuer, K. P. Juengst, M. Kleimaier, H. U. Klein, D. Krischel, M. Noe, R. Steingass, and K. H. Weck, "System technology and test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high -T_c superconducting fault current limiter," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 1961-1964, 2005.
- [11] SuperPower®, "Recent Development of SFCL in the USA," *23rd International Superconductivity Symposium - ISS -*, pp. 1-44, 2010.
- [12] H. Hayashi, Y. Hatabe, T. Nagafuchi, A. Taguchi, K. Terazono, T. Ishii, S. Taniguchi, "Test Results of Power System Control by Experimental SMES," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol.16, no.2, pp.598-601, June 2006.
- [13] SuperPower®, "Second Generation HTS Wire for Wind Energy Applications," *Symposium on Superconducting Devices for Wind Energy*, pp. 1-43, 2011.

X. BIOGRAFIAS



Laura de Oliveira Carraro é estudante de Engenharia de Controle e Automação no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET - MG. Ela é formada no curso Técnico de Mecânica Industrial pelo CEFET - MG (2004). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos.



Ângelo Rocha de Oliveira possui graduação (2003) e mestrado (2005) pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Brasil, e é doutorando pela UFJF, Brasil. Atualmente trabalha no Departamento de Controle e Automação/Eletrotécnica do Centro Federal de Educação tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Campus III – Leopoldina. Possui interesse nas seguintes linhas de pesquisa: otimização, operação e proteção de sistemas de potência e energia, redes neurais artificiais e automação industrial.



Marlon José do Carmo atualmente está cursando doutorado em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ. Possui Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFJF (2006), graduação em Ciências e Matemática pela Faculdades Integradas de Cataguases (2002), é Técnico em Eletrotécnica pelo CEFET - MG (1995) e Técnico em Eletrônica Industrial pelo CETEL/SENAITEC (1997). É professor do CEFET - MG e no curso de Engenharia de Controle e Automação, em disciplinas de Controle de Processos Industriais. Tem experiência na área de Automação e Controle de processos e Eletrônica Industrial, Supercondutividade simulação de supercondutores pelo método de estado crítico, elementos finitos, dispositivos supercondutores.



José Evaristo Rodrigues Costa possui graduação em Física pela UFJF (1990), mestrado em Física pela UFMG (1993) e doutorado em Física pela UFMG (1997). Atualmente é do CEFET-MG. Tem experiência na área de Física, com ênfase em Física da Matéria Condensada, Heisenberg, bidimensional, anisotrópico, vórtices, dinâmica e magnética.



Paulo F. Ribeiro (M'79, SM'88, F'03) Ph.D. pela Universidade de Manchester, Manchester, Reino Unido. É Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Técnica de Eindhoven, Eindhoven, Holanda. Possui interesse nas seguintes linhas de pesquisa: Eletrônica de potência, qualidade de energia e modelagem e simulação de sistemas.