



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

ENSAIOS DE LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO À BASE DE BOBINA SUPERCONDUTORA DE BI-2212

**Alexander Polasek (*), Orsino Oliveira Filho, Eduardo T. Serra
CEPEL**

**Fernando C. Rizzo Assunção
DCMM / PUC-Rio**

RESUMO

Os limitadores de corrente supercondutores (LCSC's) estão entre as tecnologias mais promissoras para limitação de correntes de falta. Os LCSC's atuam em poucos milissegundos, através da transição do estado supercondutor para o estado normal. Após a falta, retornam naturalmente ao estado supercondutor. No presente trabalho, são apresentados os resultados de ensaios de limitação de corrente de curto-circuito empregando um dispositivo limitador à base do supercondutor Bi-2212. O dispositivo limitador reduziu picos de corrente assimétricos de até 11 kA (valor de crista) para 4-6 kA no primeiro pico (1/4 de ciclo) e 2-4 kA nos picos subsequentes.

PALAVRAS-CHAVE

Limitador de Corrente de Curto-Circuito, Supercondutor de Alta Temperatura Crítica, Bi-2212

1.0 - INTRODUÇÃO

A descoberta de supercondutores de alta temperatura crítica (T_c) que operam em nitrogênio líquido (77K) aumentou em muito o potencial de aplicação da supercondutividade no setor elétrico de potência, posto que o nitrogênio líquido é muito mais barato, disponível e mais fácil de manusear do que o hélio líquido (4,2K) empregado na refrigeração dos supercondutores de baixa temperatura crítica. Deste modo, avanços consideráveis têm ocorrido no desenvolvimento de protótipos de equipamentos e dispositivos elétricos supercondutores de média e larga escala, tais como: cabos de alta tensão, armazenadores de energia (SMES), motores e geradores, transformadores, condensadores síncronos e limitadores de corrente de curto-circuito (1).

O aumento dos níveis de corrente de curto-circuito tem levado à superação de dispositivos e de equipamentos, elevando os riscos de danos e prejuízos (2). Em face deste problema, dispositivos limitadores de corrente mostram-se como soluções de longo prazo, prolongando a vida útil de disjuntores, barramentos e transformadores, bem como reduzindo significativamente os custos de construção e instalação de novas SE's. Os limitadores de corrente devem reduzir a corrente de curto-circuito a valores suportáveis pelos equipamentos superados. Os limitadores de corrente supercondutores (LCSC's) estão entre as tecnologias emergentes mais promissoras para limitação de corrente de curto-circuito (3). Geralmente, a atuação dos LCSC's baseia-se na rápida transição do estado supercondutor para o estado normal (resistivo), quando da ocorrência de um curto-circuito. Os LCSC's atuam em poucos milissegundos (menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo) e, após o curto-circuito, retornam naturalmente ao estado supercondutor. Outra vantagem é que o LCSC apresenta baixas perdas, praticamente não interferindo no sistema durante a operação normal da rede. Protótipos de LCSC's para distribuição já foram demonstrados com sucesso e protótipos para transmissão encontram-se em pleno desenvolvimento (3). Contudo, os principais desafios técnicos e econômicos para o emprego comercial destes dispositivos estão na otimização dos materiais supercondutores utilizados. Por outro lado, avanços recentes indicam que a relação custo / benefício

(*) Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária – CEP 21941-911 – Rio de Janeiro - RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6069 – Fax: (+55 21) 2280-3537 – Email: polasek@cepel.br

dos chamados fios supercondutores de segunda geração, que se baseiam em supercondutores de alta temperatura crítica, poderá alcançar níveis próximos ao custo / benefício de condutores de cobre (4).

Há vários tipos de LCSC's, podendo-se destacar os limitadores indutivos, os resistivos e os híbridos, que são uma combinação dos dois anteriores. Atualmente, os principais protótipos e projetos de LCSC's são do tipo resistivo, pois este é mais simples e compacto do que os demais, além de causar menos impacto na rede, ao contrário dos indutivos, pois estes últimos afetam o fluxo de potência da rede durante a sua atuação. Os limitadores resistivos são conectados em série com o circuito a ser protegido. Sua atuação baseia-se na rápida transição do estado supercondutor para o estado resistivo, ocasionada por correntes muito acima de sua corrente crítica de transição (I_c). Tal transição deve-se a um comportamento intrínseco dos materiais supercondutores, de modo que os LCSC's não requerem qualquer sistema de acionamento ou de detecção de surtos de corrente. Deste modo, o limitador de corrente resistivo apresenta impedância desprezível durante a operação normal da rede e quando ocorre um curto-circuito eles acrescentam uma impedância resistiva à rede. Após o transitório de sobrecorrente, os LCSC's retornam naturalmente ao estado supercondutor.

No presente trabalho, são apresentados os resultados de ensaios de limitação de corrente de curto-circuito empregando um dispositivo limitador à base do cerâmico supercondutor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212), fabricados pela NEXANS SuperConductors. Noventa destes dispositivos (trinta para cada fase) foram conectados em série para a montagem de um protótipo de limitador de corrente de 10kV/10MVA, o qual foi demonstrado com sucesso em ensaios laboratoriais e posteriormente instalado em um acoplamento de barras de uma subestação na Alemanha (5). Estes dispositivos consistem em bobinas bifilares de Bi-2212 obtidas a partir da usinagem de tubos do elemento cerâmico supercondutor. A geometria bifilar tem a função de reduzir a indutância ao mínimo possível, de modo que corrente e tensão fiquem em fase. O material supercondutor é recoberto por um shunt metálico e por material isolante (6). O shunt evita a formação de pontos quentes ($T > T_c$), ou seja, a transição de pequenas regiões que passam a dissipar toda a energia de forma concentrada, danificando o material. O ideal é que a transição para o estado normal seja suficientemente rápida e homogênea (todo o supercondutor transitando ao mesmo tempo), evitando a concentração de calor na forma de pontos quentes. O shunt metálico facilita a dissipação de calor dos pontos quentes, promovendo um aquecimento mais homogêneo da bobina supercondutora. O shunt também atua como um caminho alternativo para a corrente, de modo a contornar pontos quentes. Estes dispositivos também incluem um reforço mecânico que confere resistência a choques térmicos e a solicitações provocadas por curtos-circuitos. Os resultados mostram que o dispositivo limitador foi capaz de limitar picos de corrente com eficiência e repetibilidade. Ensaios posteriores realizados propositalmente em condições acima dos limites especificados pelo fabricante levaram à danificação do material supercondutor.

2.0 - DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE

A figura 1 apresenta o dispositivo limitador empregado no presente estudo (MCP Bi-2212 bifilar coil, Nexans SuperConductors GmbH). A Tabela 1 apresenta características dimensionais e construtivas deste dispositivo. De acordo com o fabricante, a corrente nominal de operação é de 200 A, a 77K, elevando-se para 600A em nitrogênio líquido subresfriado (65K). No presente trabalho, a refrigeração foi realizada em banho de nitrogênio líquido a 1 atm (77K). O valor nominal da corrente crítica de transição é de 307A cc, a 77K, e 850A cc, a 65 K (certificado de qualidade do produto). A camada de shunt é composta por uma liga metálica de cobre-níquel com resistividade elétrica de $40 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, ou $0,40 \mu\Omega\cdot\text{m}$ (5), que corresponde a 4,3 % da condutividade elétrica do cobre. O material isolante consiste de resina epóxi "Stycast 2850FT (Blue)", apropriada para baixas temperaturas, com rigidez dielétrica de 15 kV/mm (6). A resistência nominal do dispositivo, à temperatura de 77K, é de $1,0 \mu\Omega$ (certificado de qualidade do produto). Esta resistência deve-se às conexões de cobre na base do dispositivo (Fig. 1).



FIGURA 1 – Dispositivo Limitador de Corrente estudado (esquerda); conexões de cobre com os contatos

de corrente e de tensão

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS E CONSTRUTIVAS DO DISPOSITIVO LIMITADOR

DISPOSITIVO	DIMENSÃO
Comprimento total, com conexões e base	381 mm
Comprimento total do elemento supercondutor (bobina bifilar)	5,4 m
Seção transversal do supercondutor	24 mm ²
Diâmetro externo	58 mm
Diâmetro interno	35 mm
Espessura da camada de shunt	2,9 mm
Seção transversal da camada de shunt	17,4 mm ²
Espessura máxima da camada de solda entre o shunt e o supercondutor	0,2 mm
Espessura de isolante entre as espiras	1,0 mm
Espessura da camada isolante externa	0,9 mm (calculada)
Largura da espira supercondutora	6,0 mm
Espessura da espira supercondutora	4,0 mm
Distância entre as espiras	1,0 mm
Espessura do estabilizador mecânico	2,54 mm
Peso total	3,9kg

3.0 - ENSAIOS E MEDIÇÕES REALIZADAS

Foi realizado o levantamento da curva $V \times I$ em corrente contínua, para medir o valor de I_c em nitrogênio líquido (77K). O dispositivo foi totalmente imerso em nitrogênio líquido, dentro de um Dewar aberto. Empregou-se o método dos quatro pontos (Fig. 1) e o valor de I_c foi determinado pelo critério de $1\mu\text{V}/\text{cm}$, internacionalmente adotado para supercondutores de alta temperatura crítica. O sistema de medição compõe-se de computador, software de aquisição e controle (em *LabView*), fonte de corrente contínua HP de 1000 A / 10V, décadas resistivas e nanovôltemetro HP. A resistência elétrica do dispositivo foi medida a temperatura do nitrogênio líquido e na temperatura ambiente (23 ± 2) °C pela técnica de quatro terminais e correntes reversíveis (corrente contínua), utilizando-se um micro-ohmímetro digital A.B. *Chance*-UK. A indutância da bobina bifilar foi medida em 1000 Hz, com ponte digital *Wayne Kerr* - UK, na temperatura ambiente (23 ± 2) °C.

A Figura 2 mostra o circuito empregado para os ensaios de limitação de corrente de curto-circuito realizados no Laboratório de Alta Corrente do CEPEL (7). Nesta figura: **T1-1/T1-2/T1-3** – Transformadores 138/4,16 kV $\pm 20\%$, 6,93 MVA permanente e 39,6 MVA curto-circuito; **T1-4/T1-5/T1-6** - Transformadores 4,16/0,138 a 1,650 kV, 6,93 MVA permanente; **X_L** - Reatores limitadores de corrente ajustáveis a cada ensaio; **TC-1** - Transformador de corrente de relação 50000-5 A com derivador de 0,5 Ω ; **O.T.** - Objeto sob ensaio (limitador de corrente); **OSCILÓGRAFO** - Sistema de aquisição de dados.

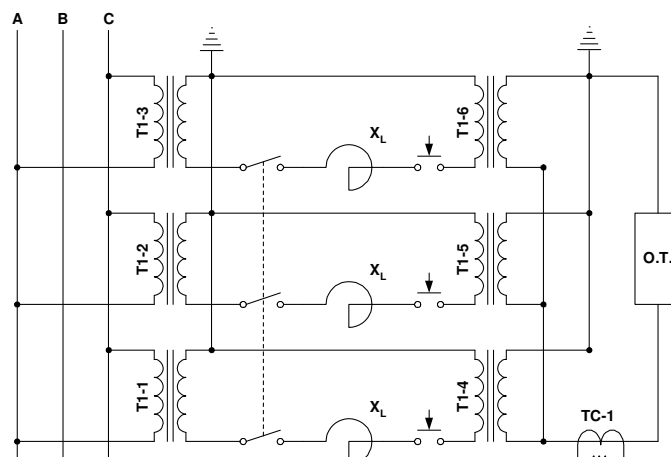


Figura 2 – Circuito empregado nos ensaios de limitação de corrente; **O.T.** – limitador de corrente (7).

4.0- RESULTADOS E DISCUSSÃO

A corrente crítica (I_c) medida a 77 K foi de 299 A (Figura 3), descontando-se a influência dos conectores de cobre ($R=1,0 \mu\Omega$), ao passo que o valor fornecido pelo fabricante era de 307A. Esta diferença poder ser atribuída ao método de medição adotado pelo fabricante, que é o de corrente pulsada (6), ao passo que no CEPEL utilizou-se corrente contínua. O valor de I_c pode variar com o método de medição empregado (8). Uma diferença inferior a 3%, como é o caso, está também dentro do intervalo definido pela incerteza da medição. Por outro lado, a diferença entre o valor de I_c fornecido pelo fabricante e aquele medido no CEPEL não se mostrou relevante para o desempenho do dispositivo quanto a limitação de corrente, como será visto mais adiante.

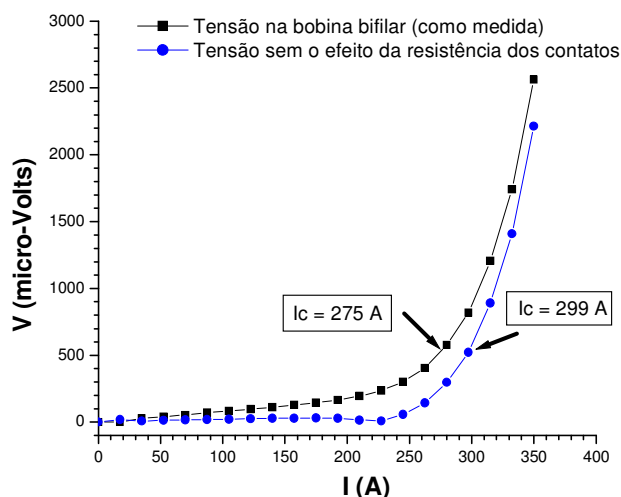


Figura 3 – Curva $V \times I$ do limitador, em corrente contínua ($T=77K$). O valor de I_c é obtido pelo critério de $1 \mu V/cm$. Como o percurso total da corrente na bobina bifilar supercondutora é de 5,4 m, I_c corresponde a uma tensão de $540 \mu V$.

O comportamento da curva $V \times I$ da bobina bifilar supercondutora (Fig. 3), descontada a influência dos terminais de cobre, é muito similar ao da curva apresentada pelo fabricante (Certificado de Qualidade), bem como à curva mostrada por Baldan et al. (9) em medições independentes realizadas com um limitador de corrente do mesmo fabricante e do mesmo modelo que o aqui estudado. A curva acima pode ser representada pela equação empírica (8):

$$V = 0, \quad I < I_c$$

$$V = E_c (I / I_c)^n, \quad I > I_c; \quad E_c - \text{campo elétrico crítico } (1 \mu V/cm), \quad n = \text{índice de transição resistiva} \quad [1]$$

Pelo ajuste da curva corrigida (Figura 3) à equação [1] verificou-se que $n = 9$, mesmo expoente observado por Elschner et al. (6) e Baldan et al. (9), em dispositivos limitadores com bobina bifilar de Bi-2212 do mesmo fabricante. Esta equação é válida para a região de “flux creep”, onde ocorre o movimento dos vórtices de fluxo magnético¹ devido à ação da força de Lorentz ($I \times B$), o que provoca dissipação de energia e conseqüente aumento da temperatura do material, levando à transição para o estado normal (8). O expoente n está relacionado ao mecanismo de ancoramento dos vórtices de fluxo magnético presentes no material supercondutor. Quanto maior o valor de n , mais bem definido são os valores de I_c e de J_c e mais homogêneo é o material, o que é importante para evitar a formação dos chamados pontos quentes (“hot spots”) que podem danificar o elemento supercondutor (seção 2.0).

Atenção especial deve ser dada ao valor da indutância da bobina bifilar, cuja medição revelou um valor de $500 \mu H$, correspondendo a uma reatância de $188,5 m\Omega$ (60 Hz), ao passo que Baldan et al. (9) obtiveram uma

¹ O material supercondutor do limitador é um supercondutor do tipo II. Supercondutores do tipo II apresentam um estado misto no qual o estado supercondutor coexiste com vórtices de fluxo magnético, quando o campo magnético está situado entre o campo crítico H_{c1} e o campo crítico H_{c2} . Para $H < H_{c1}$, o material expulsa todo campo magnético de seu interior ($B = 0$) e para $H > H_{c2}$ ocorre a penetração total do campo magnético ($B = B_c$), levando a transição do estado supercondutor para o estado normal. No estado misto, $H_{c1} < H < H_{c2}$, que é a faixa de interesse para aplicações, o campo magnético penetra parcialmente na forma de vórtices magnéticos quantizados. Tais vórtices ficam ancorados em impurezas e defeitos nanométricos do material supercondutor.

indutância de 2,6 μH na bobina bifilar Bi-2212 NEXANS por eles estudada, correspondendo a uma reatância de $0,98\text{m}\Omega$ (60 Hz). Como se verá mais adiante, os resultados dos ensaios de limitação de corrente realizados no CEPEL mostraram uma defasagem de natureza indutiva entre a corrente e a tensão ao passo que em (5), (6), (9), (10) observou-se que a corrente e a tensão estavam em fase, como era de se esperar para este limitador resistivo. A arquitetura bifilar destas bobinas foi projetada para que o valor de indutância fosse o mínimo possível. Portanto, acreditamos que o espécime por nós investigado estivesse com algum defeito de fabricação. Entretanto, esta reatância indutiva não prejudicou a capacidade de limitação de corrente de curto-circuito do dispositivo limitador. Por outro lado, tal reatância levou a um o fator de potência da ordem de 0,84 (11), valor este inadequado para a aplicação de um limitador resistivo.

A limitação de corrente ocorre para valores de corrente presumida bem superiores ao valor de I_c e quanto maior for o valor da corrente, mais rápida será a transição do supercondutor ao estado normal, o que se traduz em maior eficácia da limitação (6). Isto se deve ao fato de que quanto maior a corrente, maior o valor da Força de Lorentz que arrasta os vórtices magnéticos e, por conseguinte, maior a dissipação de energia e o aumento de temperatura do supercondutor, provocando a transição quando a temperatura do material excede sua temperatura crítica de transição, que é da ordem de 90 K para o cerâmico Bi-2212. A figura 4 mostra o resultado de uma simulação da variação da resistência da bobina bifilar Bi-2212 com a razão entre a densidade de corrente e a densidade de corrente crítica (J/J_c) (12). Como a seção transversal da bobina é constante, esta razão é igual à razão I/I_c . Esta simulação baseou-se na equação [1] de acordo com Duron et al. (13).

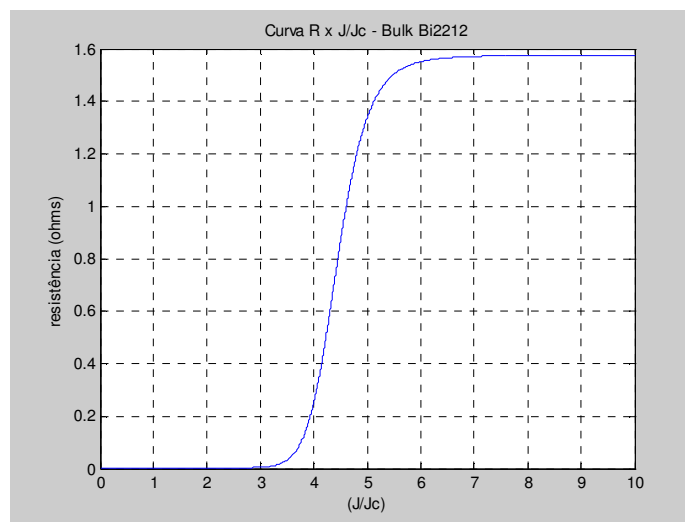


Figura 4 – Simulação da variação da resistência da bobina bifilar de Bi-2212 em função do aumento de densidade de corrente normalizada (J/J_c). Observa-se que R só alcança o valor de saturação quando $J \sim 7 \times J_c$ (12).

Ensaio preliminares de limitação de corrente de curto-circuito foram realizados no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do CEPEL (11). Nestes ensaios verificou-se que a limitação de corrente só começava a ser significativa a partir de correntes da ordem de 2-3 kA, o que é coerente com a curva simulada mostrada na figura 4. Quanto maior a diferença entre I e I_c , menor será o tempo para a propagação de pontos quentes. Vale observar que esta transição do estado supercondutor para o estado normal (*quenching*) leva alguns milissegundos, sendo função não apenas da magnitude da corrente de curto-circuito, como também da velocidade de propagação de calor no material supercondutor (*quenching propagation velocity*), a qual depende de fatores como os valores de calor específico do material supercondutor e do shunt, a seção reta e o comprimento total do supercondutor, a geometria do dispositivo limitador, dentre outros (8). Após os ensaios preliminares de limitação de corrente de curto-circuito, a corrente crítica foi novamente medida e o valor obtido foi novamente de 299 A, conforme a medição anterior mostrada na Fig. 3. Logo, os ensaios preliminares não causaram danos à bobina supercondutora.

A Figura 5 apresenta um resultado de ensaio de limitação de curto-circuito realizado no CEPEL (7), (11). Ao todo foram realizados 16 ensaios com correntes presumidas assimétricas variando de 5,68 kA a 11,16 kA (valor de pico), dos quais 11 ensaios foram realizados com a corrente presumida de 11,16 kA. O dispositivo limitador foi capaz de limitar a corrente de curto-circuito a valores de 4-6 kA (valor de crista), no primeiro quarto de ciclo, e de 2-4 kA (valor de crista) nos picos subsequentes (7), (11).

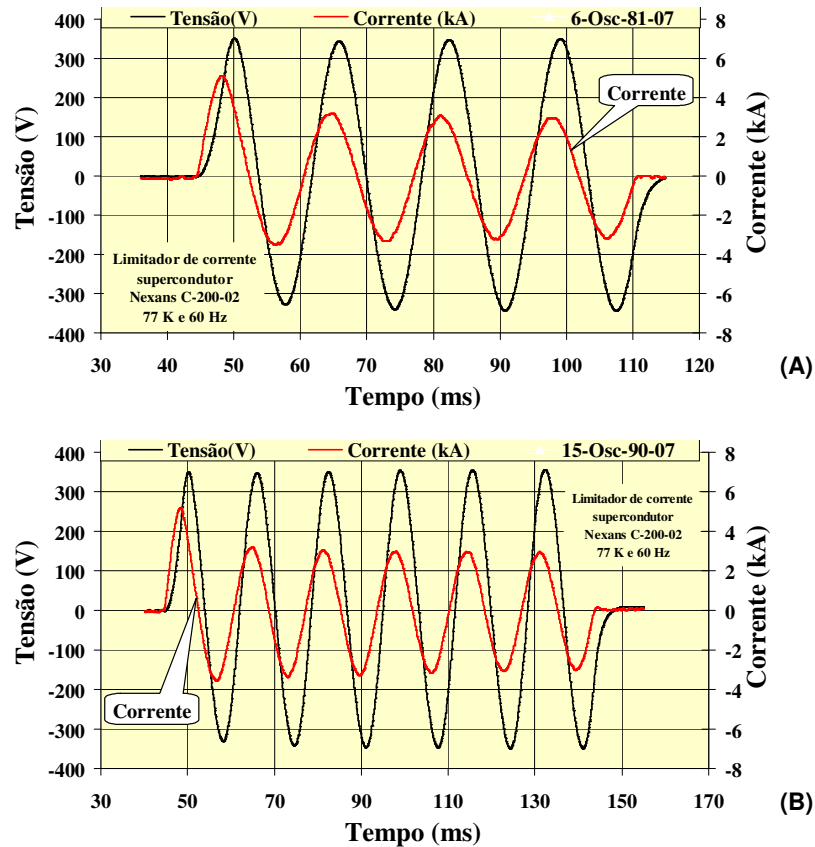


Figura 5 – Ensaio de limitação de corrente com corrente presumida assimétrica de 11 kA (valor de pico) com diferentes durações: (A) 66 ms; (B) 100 ms. (7), (11)

O primeiro pico sempre é consideravelmente maior do que os picos subseqüentes devido ao fato de a transição de toda a bobina supercondutora só completar-se na segunda passagem por zero de corrente, quando o material supercondutor torna-se bem mais resistivo do que o shunt metálico, de modo que cerca de 95% da corrente passa a circular pelo shunt (6). Isto explica o fato de os picos subseqüentes terem praticamente o mesmo valor, sendo que este valor diminui levemente devido ao progressivo aquecimento do shunt. Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados na literatura para dispositivos limitadores à base de bobina bifilar Bi-2212 NEXANS (5), (6), (9), (10), excetuando-se a defasagem entre as curvas de corrente e tensão observada no presente trabalho, cujo motivo já foi explicado anteriormente. É interessante mencionar que o valor da corrente limitada tem pouca dependência em relação ao valor da corrente presumida. O valor da corrente limitada depende da impedância total do circuito de ensaio empregado, dentre outros fatores. O valor da corrente limitada depende dos seguintes fatores (14): área da seção transversal do supercondutor; resistividade do material supercondutor após a transição para o estado normal; calor específico do supercondutor e do shunt; aumento da temperatura durante o curto-circuito e duração do curto-circuito. A tensão eficaz entre os terminais do dispositivo limitador (Fig. 1) atingiu 276 V, valor correspondente a um campo elétrico de 0,51V/cm, abaixo do limite de 0,55 V/cm suportável por este dispositivo limitador, conforme informações do fabricante. Valores de campo elétrico acima deste limite podem provocar um superaquecimento do shunt metálico, danificando o dispositivo (6). Outra restrição importante é o tempo máximo em que o limitador pode ficar submetido ao curto-circuito. De acordo com o fabricante, tempos superiores a 100-120 ms também podem provocar danos por superaquecimento. Deste modo, em cerca de 4 ms, o limitador reduz a sobrecorrente a um valor aceitável para o circuito que está protegendo, dando tempo suficiente para que o disjuntor atue com segurança. O dispositivo exibiu boa repetibilidade do desempenho, com o primeiro pico variando entre 4 e 6 kA e os picos subseqüentes entre 2 a 4 kA. Conforme descrito anteriormente, o valor da corrente limitada depende de fatores como a temperatura alcançada durante o aquecimento do material supercondutor, bem como da duração do curto-circuito. Estes parâmetros podem variar de um ensaio a outro. Como a temperatura do dispositivo limitador não foi monitorada durante os ensaios, não se sabe ao certo qual temperatura foi alcançada em cada ensaio. Já a duração dos curtos-circuitos foi controlada, tendo variado de 50 a 100 ms. A análise dos dados indicou que não ocorreu uma correlação forte entre a duração dos ensaios e os valores de corrente limitada (valor de pico e eficaz), donde se conclui que as diferenças entre os valores de corrente limitada entre um ensaio e outro podem ser atribuídas a variações do aumento de temperatura da bobina supercondutora. Outro fator importante é o intervalo entre um

ensaio e o subsequente, que variou de 10 a 30 minutos. Durante este intervalo ocorre a chamada recuperação do material supercondutor através do resfriamento do dispositivo até a temperatura do banho de nitrogênio líquido (77 K). O dispositivo aqui estudado apresenta considerável inércia térmica devido ao seu volume, massa e ao fato de a bobina supercondutora ficar encapsulada entre o reforço polimérico e o shunt eletricamente isolado. A eficiência do sistema de refrigeração empregado também é fundamental. O tempo de recuperação do presente dispositivo é da ordem de pelo menos 5 a 10 minutos (5), (6). Como a temperatura do dispositivo não foi monitorada, não se sabe qual a temperatura exata da bobina supercondutora no início de cada ensaio realizado. Contudo, após cada ensaio esperou-se que o banho de nitrogênio líquido voltasse ao equilíbrio, deixando de borbulhar intensivamente. Durante cada ensaio de curto-circuito, ocorria forte e rápida ebulição no banho de nitrogênio líquido devido à energia dissipada pelo limitador. Esta energia variou de 17,9 a 51,3 kJ, correspondendo a potências de 223 a 646 kW (11). Logo após cada ensaio, havia reposição de nitrogênio líquido, sendo que o módulo limitador sempre permanecia completamente imerso em nitrogênio líquido, mesmo após cada aplicação de curto-circuito. Ainda que a temperatura de equilíbrio do nitrogênio líquido a 1 atm (77K) seja bem inferior à temperatura crítica da bobina supercondutora empregada (92K), é possível que nem sempre a bobina supercondutora tenha alcançado a temperatura do banho durante o intervalo entre um ensaio e o subsequente. Como as propriedades supercondutoras são bastante sensíveis a variações térmicas, estas poderiam explicar as variações ocorridas entre os valores de pico de corrente de um ensaio para outro. Por outro lado, os oscilogramas dos diversos ensaios mantiveram um mesmo comportamento, com o primeiro pico cerca de 50-60% maior do que os subsequentes, o mesmo padrão de comportamento relatado na literatura (5), (6), (9). Isto sugere que o dispositivo continuou atuando como limitador supercondutor em todos os ensaios realizados, mesmo quando o intervalo de tempo entre um ensaio e outro era de 30-60 segundos, insuficiente para a completa recuperação de toda a bobina supercondutora. Esses intervalos curtos foram propositalmente empregados entre o sexto e o sétimo ensaios (1 min), entre o oitavo e o nono, o décimo e o décimo primeiro e entre este e o décimo segundo (30 s). Contudo, o limitador continuou apresentando o mesmo desempenho observado anteriormente. Após esta série de ensaios em condições extremas, mais dois ensaios foram realizados, sendo que os intervalos para resfriamento do dispositivo limitador foram de 15 minutos antes de cada nova aplicação de curto-circuito. Após o último ensaio, o limitador foi retirado do banho de nitrogênio líquido e transportado para o Laboratório de Supercondutividade do CEPEL, onde foi novamente resfriado em nitrogênio líquido para medição de corrente crítica. Contudo, desta vez o dispositivo apresentou corrente crítica praticamente nula, o que foi confirmado por repetidas medições. Isto indicou que o dispositivo estava irreversivelmente danificado. Possivelmente, este dano ocorreu durante os ensaios de curto-circuito realizados com curto intervalo entre si. Como o tempo de recuperação desta bobina supercondutora é da ordem de minutos, provavelmente tais intervalos não foram suficientes para que a mesma voltasse ao estado supercondutor em toda sua extensão e volume, o que pode ter gerado a formação de pontos quentes com alta densidade de energia. Por outro lado, durante os ensaios de limitação de corrente, o dispositivo havia repetido seu desempenho, mesmo após os referidos ensaios realizados em condições extremas. Logo, duas hipóteses poderiam explicar este comportamento: 1) o dispositivo teria ficado apenas parcialmente danificado durante os ensaios e o dano poderia ter sido aumentado devido à ciclagem térmica subsequente; 2) O dispositivo teria ficado totalmente danificado durante os ensaios e continuou limitando correntes simplesmente devido à resistência do shunt, ou seja, o limitador não estaria mais atuando como um limitador supercondutor. O dispositivo limitador danificado foi então novamente submetido a ensaios de curto-circuito. Desta vez contudo, o primeiro pico de corrente tinha o mesmo valor que os subsequentes, ou seja, não mostraram o padrão de comportamento anterior, no qual o primeiro pico era de 50-60% maior que os seguintes. Conforme já explicado, o fato de o primeiro pico ser significativamente maior que os demais se deve ao tempo necessário para que todo o volume de material supercondutor transite para o estado normal e a corrente passe a circular apenas pelo shunt metálico. Portanto, a primeira hipótese acima é a mais provável.

O dispositivo limitador foi então usinado para retirada do isolamento e do shunt metálico e exposição da bobina supercondutora. O shunt metálico não apresentava danos aparentes. Contudo, observou-se a presença de algumas trincas transversais na bobina supercondutora. É possível que estas trincas tenham se formado durante os ensaios, bloqueando parcialmente a passagem de corrente e depois tenham aumentado por causa dos choques térmicos devidos à retirada do banho de nitrogênio líquido para a temperatura ambiente e novo resfriamento em nitrogênio líquido para medição de corrente crítica. Vale notar que anteriormente à realização dos ensaios de limitação de corrente o dispositivo fora resfriado, aquecido a temperatura ambiente e novamente resfriado por diversas vezes sem que isso reduzisse o valor de corrente crítica (medindo-se a I_c após cada ciclagem térmica). Portanto, o dispositivo em questão mostrou-se resistente a choques térmicos, de modo que a ciclagem térmica não foi uma causa primária para o surgimento de danos, tendo contudo intensificado a degradação previamente iniciada, de modo a torná-la irreversível.

5.0 - CONCLUSÕES

O dispositivo limitador estudado mostrou-se capaz de limitar correntes de curto-circuito com desempenho adequado, quando operado dentro dos limites especificados pelo fabricante. No entanto, o tempo de recuperação é relativamente alto, da ordem de vários minutos. Isto não impede a sua aplicação em acoplamentos de barra,

aplicação esta de grande interesse para o setor elétrico (2). Os resultados sugerem que ensaios realizados com curtos intervalos de tempo entre si danificaram o limitador parcialmente e que tais danos teriam sido intensificados por choques térmicos subseqüentes. Contudo, vale ressaltar que a corrente crítica não foi monitorada entre os sucessivos ensaios de limitação de corrente. Do mesmo modo, a temperatura do dispositivo limitador e/ou do banho de nitrogênio líquido deveria ser monitorada durante os ensaios. Portanto, a monitoração da corrente crítica após cada ensaio e a medição da temperatura ao longo dos mesmos devem ser realizadas em ensaios futuros com limitadores de corrente supercondutores.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) W. Hassenzahl et al., Electric Power Applications of Superconductivity, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 10, pp. 1655-1674, OCTOBER 2004.
- (2) CIGRÈ WG A3.10, Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems - Technical Brochure - CIGRÈ A3-03 (SC) 13 IWD, June 2003.
- (3) M. NOE, M. STEURER, High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications and development status, Superconductor Science and Technology, NO. 20, R15–R29, 2007.
- (4) Yi-Yuan Xie, K. Tekletsadik, and V. Selvamanickam, 2G HTS Conductors for Fault Current Limiter Applications, presented at Superconductivity for Electric Systems, DOE 2006 Wire Development Workshop, St. Petersburg, Florida, Jan. 31- Feb. 1, 2006.
- (5) J. Bock et al., CURL 10 Development and Field Test of a 10kV-10MVA Resistive Current Limiter based on Bulk MCP BSCCO 2212, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, NO. 2, JUNE 2005, pp. 1955-1960
- (6) S. Elschner et al., Manufacturing and Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiter, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL. 13, NO. 2, pp. 1980- 1983, JUNE 2003.
- (7) D.B. Niedu, Ensaios de Curto-Circuito, Relatório de Ensaio DVLA – 8208/07-C – CEPEL.
- (8) T.P. Sheahen, Introduction to High-Temperature Superconductivity, Plenum Press, New York, 1994.
- (9) C. A. Baldan, C. Y. Shigue, E. R. Filho, Fault Current Test of a Bifilar Bi-2212 Bulk Coil, presented at MT-20, 20th Biennial Conference on Magnet Technology, August 27 - 31, 2007, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- (10) M. Noe et al., High Voltage Design, Requirements and Tests of a 10 MVA Superconducting Fault Current Limiter, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, NO. 2, JUNE 2005, pp. 2082-2085.
- (11) C.V. de Sena, A. Polasek, M.A. Sens, AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE COM MÓDULO SUPERCONDUTOR MCP BSCCO - 2212 - NEXANS-ALEMANHA, Relatório Técnico, DTE-CEPEL, Janeiro de 2009.
- (12) F. da Silva Lázaro, ESTUDO E SIMULAÇÕES DO DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO CIRCUITO SUPERCONDUTOR (DLCCS), Projeto de Graduação, DEE/UFRJ, Janeiro de 2009.
- (13) 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, JUNE 2007.
- (14) S.S. Kalsi and A. Malozemoff, HTS Fault Current Limiter Concept, PROCEEDINGS OF IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY MEETING, JUNE 6-10, 2004.

DADOS BIOGRÁFICOS

Alexander Polasek

DSc. em Engenharia de Materiais e Metalurgia pelo DCMM/PUC-Rio, 2002;

Pesquisador do CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde 2002;

Atua no Laboratório de Supercondutividade – Departamento de Tecnologias Especiais – DTE / CEPEL

Áreas: Materiais supercondutores e suas aplicações. Gestão de projetos de P&D em supercondutividade aplicada.