

Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em uma Rede Real com a Aplicação de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor Resistivo

Yan R. D. Rangel.* André T. Queiroz.* Flavio G.R. Martins.*
Daniel H.N. Dias.* Guilherme G. Sotelo.*

*Fluminense Federal University, PPGEET, Engineering School, Niteroi, RJ 22790-340,
Brazil, (e-mail: yan_damasceno@id.uff.br, andre_queiroz@id.uff.br,
flaviogdrm@id.uff.br, dhndias@id.uff.br, gsotelo@id.uff.br)

Abstract: With the growing demand for electricity, there is an expansion of the distribution network, with the insertion of new elements (capacitor bank, motors, etc.) and even energy sources such as distributed generation. Such insertions can intensify transient electromagnetic current phenomena in these networks, such as short circuits, motor starting and energizing of transformers and capacitor banks, being necessary analyzes to evaluate these events, as well as take action to mitigate/eliminate high currents. One of the promising alternatives is the use of resistive type superconductor fault current limiter (r-SFCL), due to its robustness and the intrinsic of material characteristic for such an application. In this context, this work analyzes the application of an r-SFCL in a real distribution network, by using ATPDraw program, and considering the electrothermal analogy for modeling the fault current limiter. The analyses were based on the 4 phenomena mentioned above, considering the performance of the r-SFCL against them. The results demonstrated the ability to reduce short-circuit currents by the proposed device, and selectivity against other events.

Resumo: Com a crescente demanda por energia elétrica, existe uma expansão da rede de distribuição, com a inserção de novos elementos (banco de capacitores, motores, etc.) e até fontes de energia como a geração distribuída. Tais inserções podem intensificar fenômenos transitórios eletromagnéticos de corrente nessas redes, como curtos-circuitos, partida de motores e energização de transformadores e banco de capacitores, sendo necessárias análises para avaliar estes eventos, assim como medidas para mitigar/eliminar correntes elevadas. Uma das alternativas promissoras é o uso de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores do tipo resistivo (r-LCCS), devido sua robustez e característica intrínseca do material para tal aplicação. Neste contexto, este trabalho analisa a aplicação de um r-LCCS em uma rede de distribuição real de uma concessionária, por meio de simulações no programa *Alternative Transient Program* (ATP), considerando a analogia eletrotérmica para modelagem do limitador. As análises tiveram como base os 4 fenômenos supracitados, considerando a atuação do r-LCCS frente aos mesmos. Os resultados demonstraram a capacidade de redução de correntes de curto-circuito pelo dispositivo proposto, e de seletividade frente aos demais eventos.

Keywords: Superconductor Fault Current Limiter; Electrical Systems Protection; Distribution Networks; Electrothermal Analogy; Electromagnetic Transients.

Palavras-chaves: Limitador De Corrente De Curto-Circuito Supercondutor; Proteção De Sistemas Elétricos; Distribuição De Energias; Analogia Eletrotérmica; Transitórios Eletromagnéticos.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda/consumo de energia elétrica, bem como a expansão da rede elétrica (novas linhas de transmissão, distribuição, instalação de equipamentos, inserção de geração distribuída, etc.) ao longo dos anos, resulta em uma maior frequência e magnitude de transitórios eletromagnéticos, como curto-circuito, corrente de *inrush* de transformadores e banco de capacitores, dentre outros. (Sousa et al. 2012)

Deste modo, as empresas fornecedoras de energia enfrentam um dilema com as seguintes opções:

- Realizar manutenções e substituições de equipamentos, com orçamentos altos e prazos de conclusão por vezes inviáveis (Esta opção é frequentemente realizada com OPEX, consequentemente reduzindo o valor do EBITDA da empresa); (Radmanesh et al. 2015)
- Usar equipamentos para limitar estas correntes. Sendo um novo ativo, poderá ser tratado como investimento (CAPEX), de acordo com as definições regulamentadas pelas ANEEL.

Pode-se dizer que os limitadores de corrente de curto-circuito (LCC) são dispositivos que possuem a capacidade de atenuar ou bloquear os picos de corrente (que podem atingir até cem vezes o valor da corrente nominal), durante os eventos de falta, a uma velocidade satisfatória para que os disjuntores possam operar com segurança. (Sousa et al. 2012)

O desenvolvimento de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor (LCCS) torna-se uma vantagem econômica e operacional devido ao aumento dos níveis de curto-circuito nos sistemas de potência. Ao longo dos anos, a literatura apresentou diferentes tipos de LCCS, os quais podem ser vistos na Fig. 1. (Sousa et al. 2014)

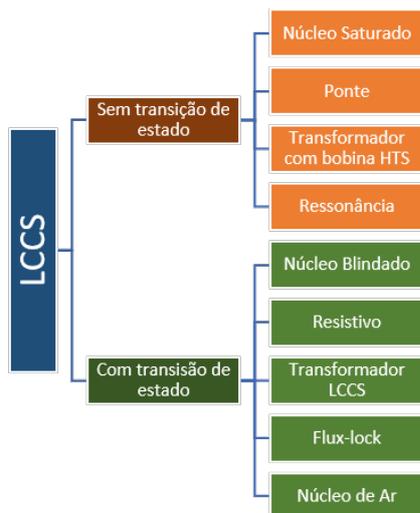


Fig. 1 Tipos de LCCS.

Atualmente, o limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo (r-LCCS) mostra-se uma alternativa viável, com tamanho e peso reduzidos e não necessitando de sensores e atuadores para responder à falta, atuando devido a uma propriedade intrínseca do material e apresentando uma falha segura. Além de subestações primárias no sistema elétrico, este dispositivo pode ser utilizado em demais pontos do sistema.

O r-LCCS (ver Fig. 2) é um tipo de dispositivo supercondutor que opera em série com o sistema a ser protegido. Em condições normais de operação (quando a corrente é nominal) o r-LCCS se comporta em um estado supercondutor, quase sem resistência em sistemas de corrente alternada. Em uma condição de curto-circuito (ou seja, quando a corrente do sistema tem um aumento drástico e muito rápido devido a uma anomalia, por exemplo, um condutor que caiu no chão ou uma árvore que tocou a rede) o r-LCCS transita do estado supercondutor para o estado normal em menos de 4 ms, apresentando então uma resistência no circuito, sendo responsável por limitar a corrente em um primeiro instante. (Sousa et al. 2012; Xue et al. 2015; Lee et al. 2018)

Com base nas características supracitadas do r-LCCS, este trabalho aborda sua aplicação em uma rede real de distribuição de energia elétrica de 11,95 kV, localizada no Brasil – Rio de Janeiro – São Gonçalo, utilizando um limitador projetado com fitas supercondutoras da empresa

SuNAN, simulado através do programa *Alternative Transient Program* (ATP) por meio de uma analogia eletrotérmica. Esta subestação tem uma carga elevada, possui um barramento seccionado (compartilhando 3 transformadores no barramento) em uma área central da cidade, com níveis de curtos-circuitos em valores elevados (superiores a 30 kA_{pico} na condição de maior magnitude de corrente). Ao longo do trabalho, serão apresentados os detalhes da fita supercondutora, a rede utilizada, os eventos de transitórios eletromagnéticos considerados, o dimensionamento do r-LCCS e os resultados obtidos na simulação.

2. MODELO DE r-LCCS

O r-LCCS foi modelado conforme mostrado em (Queiroz et al. 2012), utilizando uma fita supercondutora de segunda geração feita pela empresa SuNAN, modelo SANn12500, ilustrada na Fig. 2. Esta fita é composta por determinadas camadas, sendo consideradas para modelagem as 4 principais: cobre (Cu), camadas externas responsáveis pela estabilização térmica da fita; substrato (non-magnetic stainless steel), usado para sustentação mecânica da fita; camada supercondutora composta pelo cerâmico GdBCO com 1 µm de espessura.

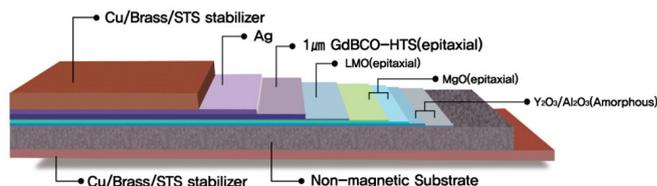


Fig. 2 Ilustração da fita SuNAN. Adaptado de (SuNAN, 2022).

O modelo do r-LCCS foi construído considerando 5 módulos de fitas supercondutoras em paralelo, conforme dimensionamento a ser apresentado na seção 3, sendo este arranjo de fitas refrigerado por um sistema criogênico e conectado em paralelo a um reator de núcleo de ar (elemento responsável pela limitação efetiva da corrente), mostrado na Fig. 3 e mais detalhadamente descrito em (Queiroz et al. 2012).

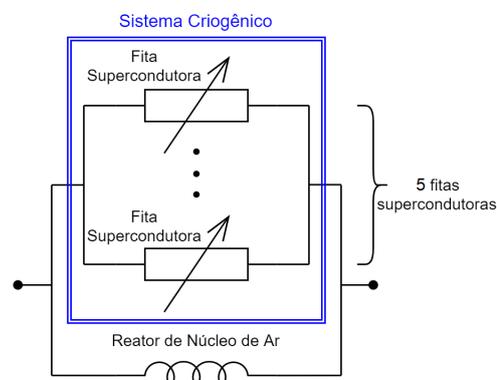


Fig. 3 Circuito Equivalente do r-LCCS.

A modelagem da fita supercondutora para o r-LCCS considerou a analogia eletrotérmica detalhada em (Queiroz et al. 2012), para representar a variação de temperatura no

interior de cada camada, assim como a variação da resistência das mesmas. A Fig. 4 mostra o circuito equivalente, composta pelas 4 camadas consideradas para o modelo (camadas de cobre, substrato e supercondutora), que representa a analogia eletrotérmica entre a equação de condução de calor transiente unidirecional e a equação de linha de transmissão com parâmetros distribuídos.

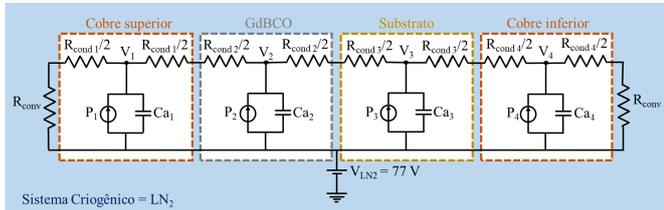


Fig. 4 Circuito equivalente da analogia eletrotérmica da fita supercondutora.

Nessa Fig. 4, os seguintes parâmetros existentes são: V_{LN2} é a fonte de tensão em corrente contínua com o valor de 77 V, que representa a temperatura do ambiente externo das fitas supercondutoras, refrigeradas por nitrogênio líquido (LN_2) a 77 K; V_n é a fonte de tensão de cada camada, que equivale à temperatura no interior das mesmas; $R_{cond\ n}$ é a resistência de condução de cada camada, correspondente ao inverso da condutância térmica; R_{conv} é a resistência de convecção das camadas externas, representando o inverso da transferência convectiva; C_n é a capacitância de cada camada, que reproduz a capacidade de armazenamento de calor e; P é a fonte de corrente de cada camada, equivalente à taxa de fluxo de calor responsável pela geração interna de calor.

3. MODELO DA REDE E DIMENSIONAMENTO DO R-LCCS

Para o presente trabalho, foi utilizada a rede alimentada pela Subestação Galo Branco (GBA), ilustrada na Fig. 5, que possui as seguintes características: 2 barramentos de 138 kV; 3 transformadores de potência (T1, T2 e T3) de 33 MVA, 138 kV / 11,95 kV; 3 barramentos de 11,95 kV (Barra 1, 2 e 3) interligados por 2 disjuntores normalmente abertos (destacados em vermelho na Fig. 5); 14 alimentadores primários em 11,95 kV; potência instalada (transformadores de distribuição) de 110 MVA e; fator de demanda de 0,6.

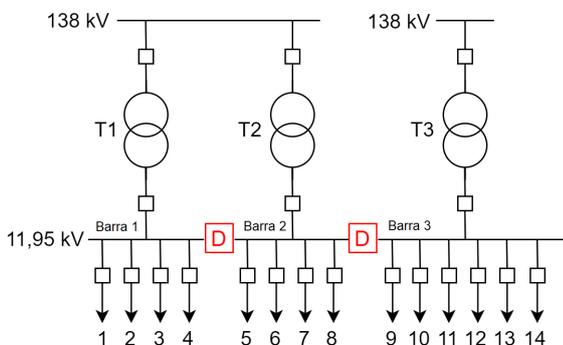


Fig. 5 Diagrama unifilar simplificado da subestação GBA.

Para a análise da aplicação do equipamento proposto, foi escolhido o disjuntor entre as barras 2 e 3 a ser substituído

pelos r-LCCS, destacado em azul na Fig. 6, sendo o outro disjuntor restante fechado, de forma que os 3 barramentos de 11,95 kV permaneçam completamente interligados. Com a instalação do r-LCCS, é possível conectar as três barras e melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia, distribuir as cargas entre os transformadores uniformemente (sem sobrecarregá-los), mantendo os níveis de curto-circuito abaixo da suportabilidade especificada.

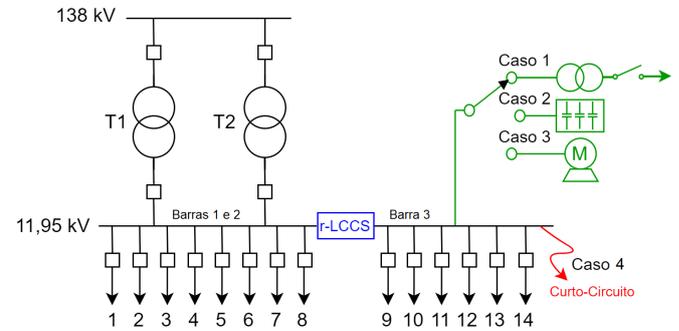


Fig. 6 Diagrama unifilar do cenário mais crítico para avaliação do r-LCCS.

Para dimensionamento do r-LCCS, foi considerado o cenário mais crítico em que o transformador T3 é desconectado da rede, sendo a Barra 3 alimentada por T1 e T2, de forma que a corrente que circula pelo limitador é igual a máxima permitida pelo sistema (I_{max}). Além disso, foram simulados 4 possíveis casos de fenômenos eletromagnéticos de corrente na Barra 3, indicados na Fig. 5, em que o r-LCCS poderá ser submetido:

- Caso 1: energização de um transformador de potência (industrial) de 11 MVA, 11,95 kV / 440 V;
- Caso 2: energização de um banco de capacitores de 4,8 MVar, 11,95 kV, conectado em estrela com o neutro isolado;
- Caso 3: partida direta de um motor de indução de 12 MVA, 11,95 kV, fator de potência de 0,87, com um carregamento de 75%;
- Caso 4: aplicação de 4 tipos de curtos-circuitos francos (trifásico, bifásico com retorno à terra, bifásico e monofásico) na barra de 11,95 kV (destacado em vermelho na Fig. 6), que representam os maiores níveis de correntes possíveis na Barra 3.

Os casos 1 e 3 representam cenários fictícios, sendo seus valores de potência extrapolados (cerca de um terço da potência de um transformador de 33 MVA) com o intuito de avaliar a seletividade do r-LCCS diante a fenômenos não classificados como falha do sistema como, por exemplo, os curtos-circuitos. Já os casos 2 e 4 retratam possíveis eventos reais, devido a existência do banco de capacitores na Barra 3 e dos níveis de curto-circuito definidos na mesma, respectivamente, sendo que o caso 2 também não é classificado como falha da rede.

Para o projeto do r-LCCS, o valor de limitação do reator núcleo de ar, o número e comprimento de fitas

supercondutoras, são as principais informações necessárias para seu dimensionamento. Em relação ao reator, foi considerado o maior valor de corrente obtido nos 4 casos avaliados, sendo o curto-circuito sem limitação (corrente prospectiva - I_{pro}), do tipo monofásico, a maior magnitude verificada, com um primeiro pico assimétrico (I_p) igual a 58,48 kA_{pico} e 37,38 kA_{rms} para a corrente simétrica (I_s). Neste projeto, o reator foi projetado para reduzir I_p em 60% ($0,4 \times I_p$). Os cálculos para obter o valor da reatância indutiva do reator (X_L), bem como sua indutância (L), estão descritos nas equações (1) e (2), respectivamente (Seiver et al. 1999):

$$X_L = \frac{u_n k}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{I_{lim}} - \frac{1}{I_{pro}} \right) \quad (1)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2)$$

nas quais u_n é a tensão de linha à qual o reator está conectado (11,95 kV), k é o fator de sobretensão (1,05 conforme ANSI C 57.16), I_{lim} é a corrente de curto-circuito após a inserção do reator (corrente limitada), e f é a rede frequência (60 Hz). Neste projeto, o valor de X_L e L são iguais a 0,27 Ω e 0,72 mH, respectivamente.

Para a especificação da fita supercondutora, foi considerada o modelo SANn12500 da empresa SuNAN (Queiroz et al. 2012), com uma corrente crítica (I_C) de 500 A, já apresentada na Seção 2. O comprimento mínimo é baseado em (Elschner et al. 2011), que considera uma queda de tensão máxima de 50 V_{rms}/m durante a limitação da corrente de curto-circuito (quando o material supercondutor está no estado normal), em um tempo máximo de 120 ms. Para sistemas trifásicos, o r-LCCS é composto por 3 módulos limitadores conectados a cada fase, com tensão do barramento igual a 11,95 kV (tensão de fase igual a 6,9 kV). Portanto, o comprimento mínimo da fita 2G deve ser de 138 m.

Para evitar que o r-LCCS atue incorretamente durante a passagem de I_{max} , é necessário construir um arranjo de fitas supercondutoras em paralelo, baseado em I_C informado pelo fabricante. Como os valores de I_C são determinados através de testes em corrente contínua, deve-se considerar o valor de pico I_{max} para sistemas de corrente alternada, quantificando o número mínimo de fitas paralelas (n° de fitas) necessárias para que o r-LCCS não atue de forma espúria, conforme descrito em (3):

$$n^\circ_{fitas} \cong \frac{I_{max}[A_{rms}]}{I_C} \sqrt{2} \quad (3)$$

Considerando que I_{max} é igual a corrente nominal no secundário de T3 (1609 A), o número mínimo de fitas deve ser igual a 5. Portanto, para um sistema trifásico, serão necessários 690 m de fita 2G para cada fase, totalizando 2,07 km para o r-LCCS trifásico.

4. RESULTADOS

A Fig. 7 apresenta o resultado do caso 1 para as correntes de *inrush* do transformador de 11 MVA, em que ocorrem no

instante em que a tensão na fase C está próxima de seu valor de pico (situação em que apresenta valores de correntes nesta mesma fase próxima da máxima). É possível verificar que o maior pico dentre as correntes prospectivas foi na fase C de 7,71 kA_{pico}, enquanto que para a mesma fase, usando o r-LCCS (limitada), foi de 6,20 kA_{pico}, apresentando uma redução de 20%.

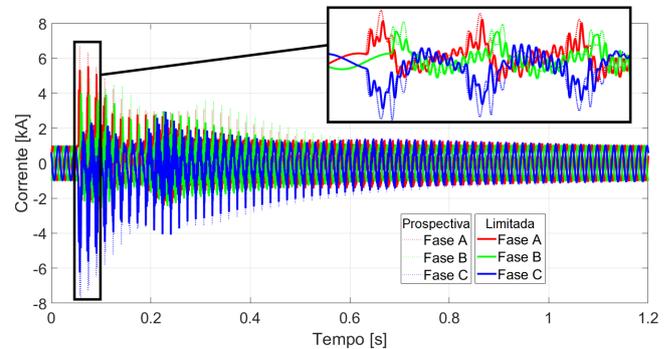


Fig. 7 Correntes de inrush do transformador de 11 MVA (caso 1), sem e com o r-LCCS.

A Fig. 8 mostra os resultados do caso 2 para as correntes de energização do banco de capacitores de 4,8 MVar, na qual a corrente prospectiva da fase A alcançou um valor máximo de 3,08 kA_{pico} (no instante em que a tensão nesta mesma fase é igual a a máxima), enquanto que a corrente limitada foi de 2,70 kA_{pico}, representando uma redução de 12,3%.

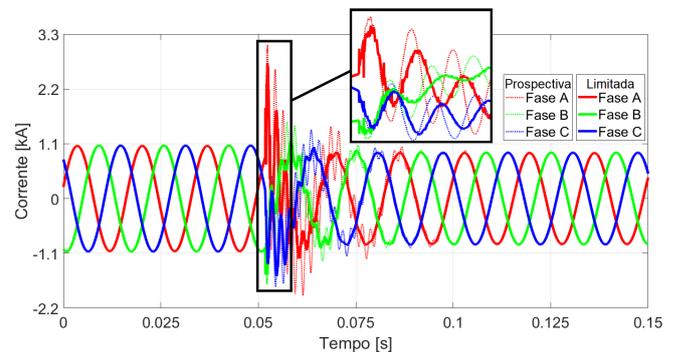


Fig. 8 Corrente de energização do banco de capacitores de 4,8 MVar (caso 2), sem e com o r-LCCS.

A Fig. 9 exibe os resultados do caso 3 para as correntes de partida do motor de indução de 12 MVA, considerando um carregamento de 75%. De acordo com os resultados, a corrente prospectiva de maior valor foi de 3,91 kA_{pico} na fase C, enquanto que a corrente limitada foi de 3,66 kA_{pico} para a mesma fase, exibindo uma redução de 6,4%. Tal redução baixa contribui para a seletividade do limitador, permitindo o acionamento do motor, sem que o r-LCCS cause afundamento de tensão no barramento.

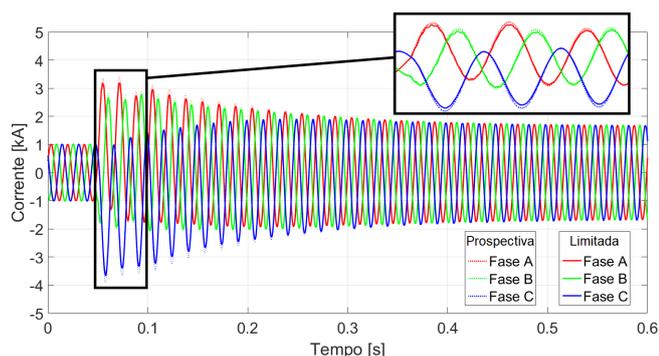


Fig. 9 Corrente de partida direta do motor de indução de 12 MVA (caso 3), sem e com o r-LCCS.

As Figs. 10, 11 e 12 apresentam os resultados do caso 4 para o evento de maior nível de curto-circuito obtido no ponto de instalação do r-LCCS (monofásico), na fase A. A Fig. 10 mostra a corrente de curto-circuito prospectiva e limitada, considerando o instante em que o ângulo da tensão nesta na fase A é igual a 0 (condição em que o valor da componente contínua é próximo do máximo, considerando circuitos com fator de potência predominantemente indutivo). Houve redução de 57,9% no primeiro pico assimétrico e de 56,4% no estado estacionário, conforme especificado no projeto do limitador.

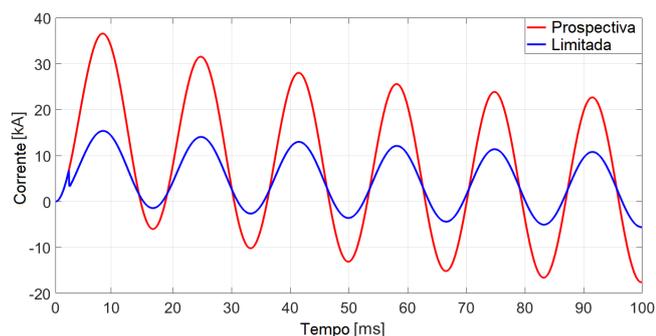


Fig. 10 Correntes da falta fase-terra (caso 4), sem e com r-LCCS, na fase A.

A Fig. 11 mostra a variação da resistência equivalente das fitas supercondutoras na fase A, antes e durante a corrente de curto-circuito monofásico. Observe que inicialmente a resistência é igual a zero, pois a corrente do sistema é menor que a corrente crítica da fita (I_C), e a camada supercondutora está no estado supercondutor. Durante a falta, o r-LCCS é submetido a uma corrente maior que I_C , fazendo com que a camada supercondutora passe do estado supercondutor para o estado normal, aumentando seu valor em até 36 Ω , em 100 ms.

A Fig. 12 ilustra a variação de temperatura na fita supercondutora, antes e durante a corrente de curto-circuito monofásico. Antes da falta, a temperatura está em equilíbrio com o refrigerante (LN_2 a 77 K). Durante a falta, a temperatura sobe de 77 K para um valor máximo de 270 K, ficando abaixo da temperatura limite de 473 K (Barth et al. 2015), sem indicar a possibilidade de danos às fitas.

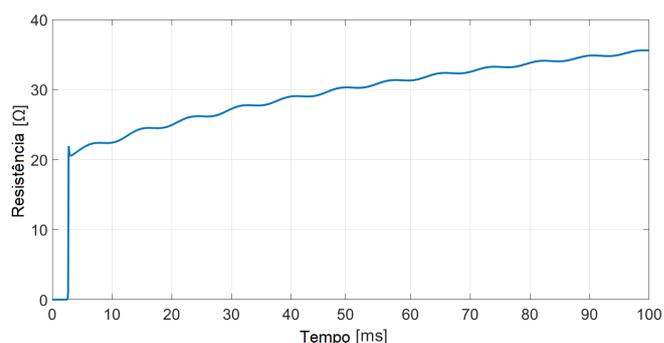


Fig. 11 A resistência equivalente do r-LCCS (fase A).

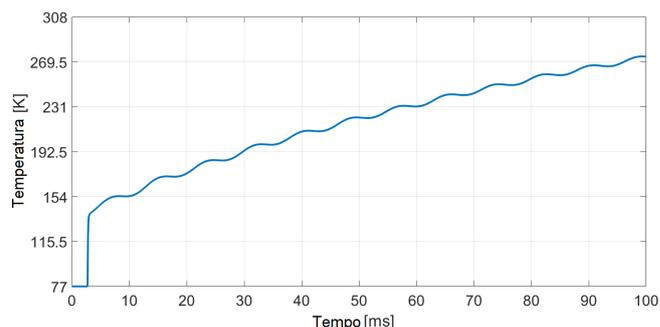


Fig. 12 A temperatura em uma das fitas supercondutoras na fase A.

A Tab. 1 resume os resultados obtidos para os 4 tipos de curto-circuito, no ponto de instalação do r-LCCS, considerando as correntes de curto-circuito prospectiva e limitada para I_p e I_s , bem como as porcentagens de redução, sendo que o caso de menor limitação foi de 55,8% (próximo ao valor estipulado em projeto de 60%).

Tabela 1 – Valores das correntes de curto-circuito, sem e com a aplicação de r-LCCS.

Tipo De Curto-Circuito	I_p [kA _{pico}]			I_s [kA _{rms}]		
	Sem r-LCCS	Com r-LCCS	Redução [%]	Sem r-LCCS	Com r-LCCS	Redução [%]
Trifásico (ABC)	32,76	13,95	57,4	18,29	8,08	55,8
Bifásico com retorno a terra (ABT)	35,64	14,86	58,3	19,49	8,46	56,6
Bifásico (AB)	28,15	11,06	60,7	17,05	7,40	56,6
Monofásico (AT)	37,45	15,77	57,9	20,39	8,88	56,4

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a simulação da aplicação de um r-LCCS em uma rede real de distribuição de energia no Brasil. Foi utilizado um limitador baseado em uma fita supercondutora da SuNAN, modelada no *software* ATP, no qual também foi realizada toda a simulação da rede. Durante a simulação, verificou-se que o r-LCCS agiu rapidamente (passando do estado supercondutor para o estado normal em menos de um quarto de ciclo) resultando em uma redução de mais de 57,9% na corrente de curto-circuito no pico assimétrico e acima de 56,4% no regime permanente,

conservando satisfatoriamente a forma da onda e mantendo as variações térmicas dentro dos parâmetros operacionais. Além disso, foi verificado também a seletividade do r-LCCS frente a demais fenômenos eletromagnéticos não considerados como falha do sistema, uma vez que as reduções não apresentaram valores significativos.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Universidade Federal Fluminense e ao NITEE pelo apoio na realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Barth, C., Mondonico, G., & Senatore, C. (2015). Electro-mechanical properties of REBCO coated conductors from various industrial manufacturers at 77 K, self-field and 4.2 K, 19 T. *Superconductor Science and Technology*, 28(4), 045011.
- Bucher, M. K., Walter, M. M., Pfeiffer, M., & Franck, C. M. (2012, September). Options for ground fault clearance in HVDC offshore networks. In *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 2880-2887). IEEE.
- De Sousa, W. T. B., Polasek, A., Dias, R., & Andrade Jr, R. D. (2012). Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores: principais conceitos e testes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 34.
- De Sousa, W. T. B., Polasek, A., Dias, R., Matt, C. F. T., & de Andrade Jr, R. (2014). Thermal–electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters. *Cryogenics*, 62, 97-109.
- De Sousa, W. T. B. (2015). Transient simulations of superconducting fault current limiters. Diss. Ph. D. dissertation, Dept. Elect. Eng, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil.
- Elschner, S., Kudymow, A., Fink, S., Goldacker, W., Grilli, F., Schacherer, C., ... & Noe, M. (2011). ENSYSTROB—Resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 21(3), 1209-1212.
- Lee, H. Y., Asif, M., Park, K. H., & Lee, B. W. (2018). Feasible application study of several types of superconducting fault current limiters in HVDC grids. *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, 28(4), 1-5.
- Lee, J. G., Khan, U. A., Lee, H. Y., & Lee, B. W. (2016). Impact of SFCL on the four types of HVDC circuit breakers by simulation. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 26(4), 1-6.
- Light, S. E. S. A. Modelagem de r-LCCS e aplicação na melhoria da qualidade de energia.
- Radmanesh, H., Fathi, S. H., Gharehpetian, G. B., & Heidary, A. (2015). A novel solid-state fault current-limiting circuit breaker for medium-voltage network applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(1), 236-244.
- Seiver, J. R.; et. al. *Short Circuit Calculations: The Easy Way*. Intertec Publishing, 1999.
- SuNAN, "SuNAN, 2G HTS Wire Specification.," [Online]. Available: <http://www.i-sunam.com>. [Accessed 13/01/2022]
- Xue, S., Gao, F., Sun, W., & Li, B. (2015). Protection principle for a DC distribution system with a resistive superconductive fault current limiter. *Energies*, 8(6), 4839-4852.