

MODELO PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE UM SSR FCL

LAILA S. RIBEIRO, SOFÍA P. SIMONETTI, DOMINGOS S. L. SIMONETTI, TIARA R. S. FREITAS

Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória - ES - CEP 29075-910.
E-mails: laila.sindra@gmail.com, simonetti.sofiap@gmail.com,
d.simonetti@ele.ufes.br, tiara@ele.ufes.br

Abstract— Fault current limiters (FCL) when inserted into feeders cooperates in increasing the quality of power supply by restricting short-circuit currents to values supported by the system. To evaluate the effect of the use of saturated series reactors (SSR) as fault current limiters, the electrical behavior of an SSR was modelled for use in simulation. The proposed model, emulating an inductor in which the inductance varies with the AC current through the device, was simulated in MATLAB® Simulink®, and the results show its utility applied to the analysis of feeders with SSR protection.

Keywords— Saturated Series Reactor, Fault Current Limiter, Power-system Protection.

Resumo— Limitadores de corrente de falta (FCL) quando inseridos em alimentadores colaboram com o aumento da qualidade do fornecimento de energia ao restringir as correntes de curto-circuito a valores suportados pelo sistema. Para avaliar o efeito do uso de reatores série saturados (SSR) como limitadores de corrente de falta, o comportamento elétrico de um SSR foi modelado para uso em simulação. O modelo proposto, emulando um indutor no qual a indutância varia com o valor da corrente alternada que circula através do dispositivo, foi simulado no MATLAB® Simulink®, e os resultados mostram sua utilidade aplicado à análise de alimentadores com proteção por SSR.

Palavras-chave— Reator Série Saturado, Limitador de Corrente de Falta, Proteção de Sistemas Elétricos.

1 Introdução

Com o constante aumento da potência de linhas de transmissão e distribuição e da geração distribuída no Brasil e no mundo, há um aumento na corrente de curto-circuito em diversos pontos das linhas. Entretanto, os dispositivos de proteção atualmente instalados não são, em geral, dimensionados para suportar esta corrente mais elevada, podendo não atuar de forma adequada, o que coloca em risco equipamentos e a vida de pessoas. Desta forma, é necessário que dispositivos de proteção sejam redimensionados ou que a corrente de curto circuito seja atenuada.

Limitadores de corrente de falta (FCL, do inglês *Fault Current Limiter*) são dispositivos capazes de atenuar correntes de curto-circuito, de modo que a corrente de curto atenuada esteja adequada à corrente suportada pelos outros dispositivos de proteção instalados no sistema (disjuntores, chaves seccionadoras, etc.). Eles são elementos inseridos em série com o circuito a ser protegido e possuem baixa impedância em funcionamento normal, porém inserem uma alta impedância no circuito quando detectam uma corrente alta.

Dentre os FCL existentes podem-se destacar os FCL supercondutores (SFCL), os FCL de estado sólido (SSFCL), os capacitores série controlados por tiristor (TCSC) operando como FCL, e reatores série saturados (SSR). Podem-se usar também fusíveis para limitar a corrente de falta, porém estes possuem o inconveniente de serem de uso único, sendo necessário sua troca após cada curto.

SFCL se utilizam de um elemento supercondutor para inserir uma impedância em série com o circuito.

Para estar no estado supercondutor, três limites físicos não podem ser superados: a temperatura crítica (T_c), o campo magnético crítico (H_c) e a densidade de corrente crítica (J_c), como apresentado na Figura 1. O limitador supercondutor do tipo resistivo é o mais usual, e possui em paralelo com o elemento condutor um resistor ou indutor, como na Figura 2, cujo principal objetivo é evitar a formação de pontos quentes no supercondutor, o que poderia danificá-lo permanentemente. Adicionalmente, seu valor é utilizado para ajustar a corrente a ser limitada, e também evitar sobretensões no sistema (Ganev, 2012). Quando em funcionamento normal, o elemento supercondutor permanece em temperatura abaixo da crítica, apresentando resistência nula. Entretanto, quando ocorre um aumento substancial na corrente que circula sobre ele, o supercondutor transita de estado por corrente e, ao entrar no estado condutor normal, insere uma impedância no circuito (Ganev, 2012). Por estar em estado condutor agora o elemento aquece.

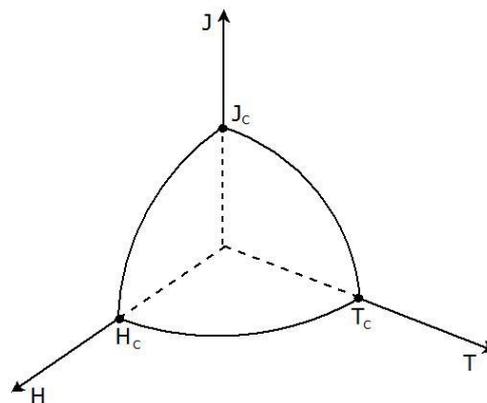


Figura 1. Superfície supercondutora, valores de transição de estado. (Freitas, 2009)

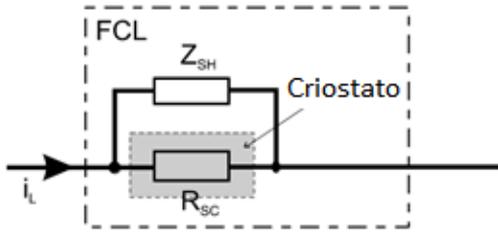


Figura 2. Esquema de um SFCL de tipo resistivo. (Ganev, 2012)

Os SSFCL se utilizam de elementos semicondutores (SCR, GTO, IGBT) para inserir impedância em série com o circuito. Utilizam um circuito de detecção de curto-circuito, para monitorar se a impedância deve ser inserida ou não, e *drivers* para acionar os dispositivos semicondutores que irão alterar o fluxo de corrente, fazendo com que a corrente flua por um caminho de maior impedância (CIGRE, 2003).

Um TCSC consiste em um banco de capacitores série, em paralelo com um reator controlado por tiristores. Assim é possível controlar a impedância do dispositivo, alterando a impedância equivalente do conjunto através do ângulo de disparo dos tiristores. Este dispositivo possui alto custo, portanto é utilizado como FCL quando agrega outros benefícios, como controle de fluxo de potência (Oliveira, 2005). Um esquema do dispositivo está apresentado na Figura 3.

Um SSR, objeto de estudo deste artigo, é um reator inserido em série ao circuito que opera com o núcleo em diferentes níveis de saturação, de acordo com o nível de corrente que circula por ele. Em operação normal, o núcleo fica saturado, com baixíssima indutância, quase não causando queda de tensão no sistema. Quando ocorre um curto, o núcleo é retirado da saturação, inserindo uma reatância expressiva no sistema e limitando a corrente de falta (Fajoni, 2015).

Alguns SSR vêm sendo desenvolvidos e testados em laboratórios (Rozenstein, 2007) e em subestações (Xin, 2009) (Xin, 2013) (Moriconi, 2011).

O estudo por simulação dos dispositivos que atuam como FCL compõem uma etapa prévia da utilização do limitador. Quando o objeto da análise é avaliar o dispositivo em si, compreendendo seu funcionamento, controle, não linearidades e outros aspectos próprios do elemento faz-se necessário o uso de estratégias complexas. Por exemplo, na análise de um TCSC como limitador de corrente de curto, toda a lógica de controle, interações entre indutor e capacitor, acionamento dos semicondutores, etc., deve estar incluída na simulação tornando-a mais lenta devido ao alto custo computacional. Se o limitador for um SSR, a

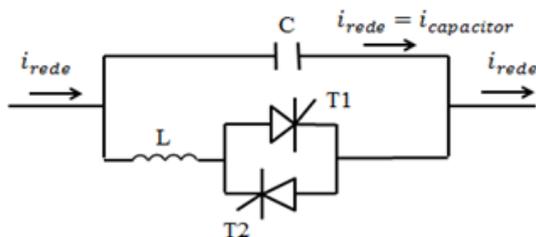


Figura 3. Estrutura básica de um TCSC. (Moraes, 2016)

análise pode incorporar programas de análise de campo magnético em 2D ou 3D para avaliar criteriosamente a distribuição de campo, saturação, níveis de corrente, *hotspots*, etc. Simulações que incorporam o detalhamento de todas as características dos dispositivos acabam consumindo muito tempo de processamento. Entretanto, se o interesse reside na operação do ponto de vista do sistema elétrico, modelos reduzidos são úteis e mais indicados no estudo (Seuss, 2017).

Uma metodologia para modelagem e simulação de um SSR foi proposta por Vilhena (Vilhena, 2015), no qual é utilizado um software de elementos finitos para obter, via simulação, uma curva de fluxo concatenado em função da corrente no dispositivo. A curva obtida foi interpolada para obter uma equação polinomial que descreve a característica magnética do SSR e então utilizada no cômputo da corrente de linha com o SSR.

Outra metodologia para desenvolvimento de modelos para simulação foi proposta por Kazerooni (Kazerooni, 2017), no qual são utilizados valores de impedância em função da corrente para simular e comparar o efeito de um SFCL do tipo resistivo e de um FCL pré-saturado (SSR). Os valores de impedância em função de corrente utilizados foram obtidos de um fabricante de FCL. Entretanto, utilizar valores de reatância permite apenas acompanhar as variações no valor eficaz da corrente, sem agregar informações do comportamento instantâneo.

Neste artigo será apresentada uma modelagem do comportamento de um SSR conectado a um sistema elétrico para estudo de sua influência durante operação normal e situações de curto. Será considerado a variação na indutância que o dispositivo apresenta com os valores instantâneos de corrente alternada circulando no sistema elétrico. Com isso, é possível observar a variação temporal da corrente no circuito. Para a análise será utilizado o programa Simulink®, mas a metodologia pode ser adaptada a outros simuladores.

2 SSR: Princípio de Funcionamento

Os SSR são constituídos por um núcleo ferromagnético, que opera saturado em funcionamento normal, e na região linear durante um curto circuito. Um esquema que pode ser adotado para construção de um SSR está na Figura 4. No enrolamento central circula uma corrente CC, que produz um fluxo elevado, utilizado para levar o núcleo à saturação desejada. Alguns modelos de SSR estudados utilizam ímãs permanentes para conseguir o fluxo desejado (Mukhopadhyay, 1998).

Em operação, a corrente CA produz em uma perna lateral um fluxo inverso ao fluxo CC, e na outra lateral um fluxo concordante. No semiciclo positivo, os fluxos encontram-se como na Figura 4, enquanto que no semiciclo negativo os sentidos destes fluxos se invertem, de modo que o fluxo CA inverso circula no lado esquerdo do esquema e o fluxo concordante no lado direito.

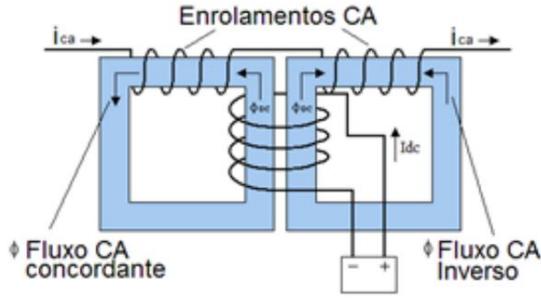


Figura 4. Esquema de funcionamento de um SSR. (Fajoni, 2015)

A indutância observada pela linha é

$$L = L_{esq} + L_{dir} \quad (1)$$

onde L_{esq} representa a indutância do núcleo esquerdo e L_{dir} representa a indutância do núcleo direito. Por sua vez,

$$L_{esq} = N_{ac}^2 / \mathcal{R}_{esq} \quad (2)$$

$$L_{dir} = N_{ac}^2 / \mathcal{R}_{dir} \quad (3)$$

onde N_{ac} é o número de espiras em cada bobina alternada, \mathcal{R}_{esq} e \mathcal{R}_{dir} é a relutância do núcleo esquerdo e direito, respectivamente, e temos que

$$\mathcal{R}_{esq} = l_{med} / (\mu_{esq} \cdot S) \quad (4)$$

$$\mathcal{R}_{dir} = l_{med} / (\mu_{dir} \cdot S) \quad (5)$$

onde l_{med} é o comprimento médio do núcleo, S é a área de seção reta do núcleo e μ_{esq} e μ_{dir} são a permeabilidade magnética apresentada pelos núcleos esquerdo e direito, respectivamente.

Considerando operação normal, a corrente CA é pequena e o fluxo produzido nas bobinas CA exerce pouca influência no fluxo que circula devido à bobina CC. A indução B em cada núcleo é alta, próxima ao ponto 1 da Figura 5, que mostra a curva BxH típica para um núcleo de ferro-silício. Deste modo, μ_{esq} e μ_{dir}

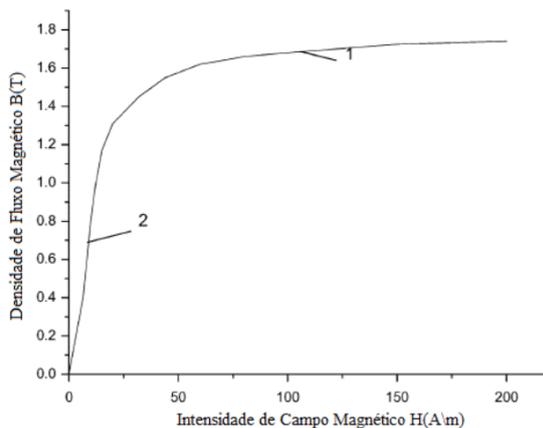


Figura 5. Curva BxH típica para um núcleo de ferro-silício. (Fajoni, 2015)

possuem valor baixo, o que provoca \mathcal{R}_{esq} e \mathcal{R}_{dir} altos, L_{esq} e L_{dir} baixos e, conseqüentemente, L baixo.

Na operação em curto, a alta corrente que circula nas bobinas CA produz um fluxo bem mais forte, o que faz com que o núcleo cujo fluxo CA é inverso ao fluxo CC seja desmagnetizado e opere na região linear da curva BxH, próximo ao ponto 2 da Figura 5, enquanto que no núcleo cujo fluxo é concordante a operação é um pouco a direita do ponto 1 da Figura 5. Para o semiciclo positivo, isto implica em μ_{esq} baixo e μ_{dir} alto, o que provoca \mathcal{R}_{esq} alto e \mathcal{R}_{dir} baixo, resultando em L_{esq} baixo e L_{dir} alto e, conseqüentemente, L alto.

Para o semiciclo negativo, a análise é análoga, porém com o fluxo inverso no lado esquerdo e o fluxo concordante no lado direito.

Desta forma, observa-se que a indutância L aumenta conforme a corrente da linha na qual o SSR está conectado aumenta. Assim, a reatância do SSR passa a limitar a corrente de curto.

3 Modelo do comportamento elétrico

3.1 Modelo do SSR

Como L varia conforme a corrente que circula na linha, o comportamento elétrico do SSR foi modelado como um indutor cuja indutância é função da corrente que circula na linha ao qual ele está conectado. Para avaliar o modelo do funcionamento do dispositivo, utilizou-se o Matlab/Simulink®. Foi criado um bloco *subsystem* no Simulink®, que está representado na Figura 6.

O bloco é constituído por uma entrada e duas saídas, caracterizando uma fonte de tensão controlada por corrente. A entrada é um sensor de corrente da fase em que o dispositivo está conectado, e as saídas representam a diferença de potencial no SSR, dada por $V_{SSR} = L di/dt$ e conectado em série com a linha. Os valores escolhidos para L_{SSR} como função do módulo da corrente i na linha foram calculados de modo a obter uma baixa queda de tensão no dispositivo durante funcionamento normal e alta queda de tensão durante o curto, sendo incluídos na simulação através de uma tabela que relaciona corrente e indutância. Comportamento similar pode ser implementado em outros programas de simulação.

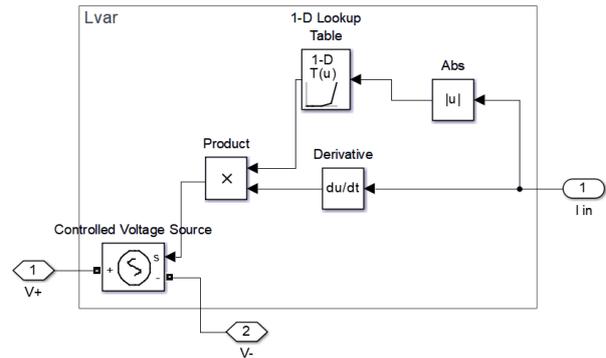


Figura 6. Esquema utilizado para modelar o comportamento elétrico do SSR.

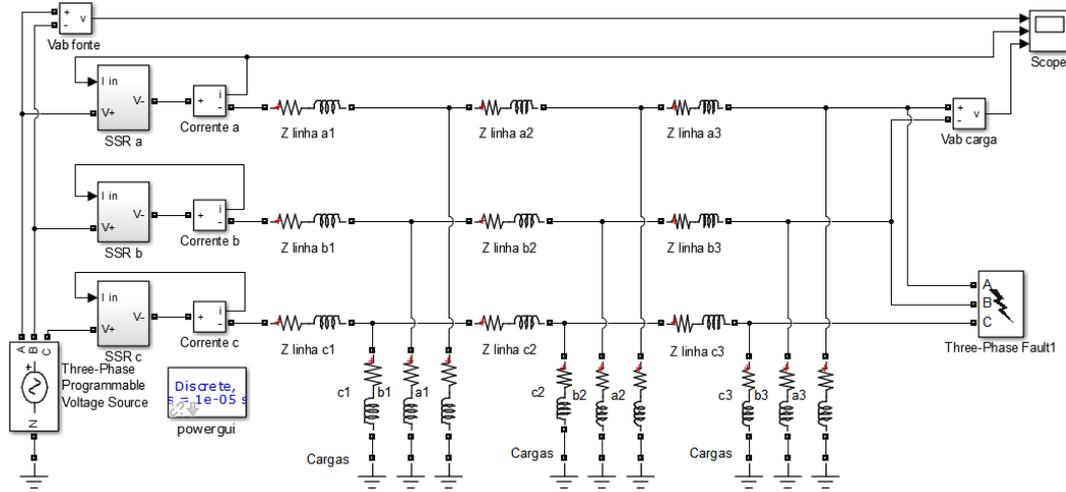


Figura 7. Linha de distribuição utilizada na simulação.

3.2 Linha de Distribuição

O comportamento do dispositivo foi simulado em uma linha de distribuição secundária simplificada, mostrada na Figura 7. A impedância da linha utilizada em cada trecho é $Z_{linha 1} = 0,5 \cdot 10^{-3} + j0,679 \Omega$ e $Z_{linha 2} = Z_{linha 3} = 0,3 \cdot 10^{-3} + j0,226 \Omega$. As impedâncias das cargas em cada trecho foram iguais, $Z_{carga} = 16 + j11,310 \Omega$. Para a fonte CA trifásica, foi utilizado 220 Vrms, 60 Hz. O tempo de simulação foi de 1,5 segundos, com um curto-circuito trifásico ocorrendo em 0,5 segundo e terminando em 0,8 segundo. No bloco *Three-Phase Fault* há uma resistência R_{curto} de 0,5 Ω . O cálculo da indutância do limitador foi feito como segue.

Para um circuito cuja corrente limite para operação sem limitação vale $I_{limite} = 50$ A eficazes, e impondo que o dispositivo deve apresentar queda de 0,5 V, durante o funcionamento normal, utilizando Lei de Ohm, tem-se:

$$V = 2\pi fLI \quad (6)$$

$$L_{SSR\ limite} = 26,5 \mu\text{H} \quad (7)$$

Durante um curto, desejando diminuir a corrente no dispositivo de 150 A para 100 A temos que a impedância da fase deve aumentar de um valor $Z_{eq} = 127/150 = 0,85 \Omega$ para uma impedância de valor $Z_{eq\ novo} = 127/100 = 1,27 \Omega$. Como a carga conectada ao circuito pode ser tanto predominantemente resistiva quanto reativa, temos que o valor de impedância do dispositivo deve estar entre os seguintes valores:

$$Z_{min} = 1,27 - 0,85 = 0,42 \Omega \quad (8)$$

$$Z_{max} = \sqrt{1,27^2 - 0,85^2} = 0,94 \Omega \quad (9)$$

onde Z_{min} é obtido para o caso no qual a impedância do circuito é puramente indutiva e Z_{max} é obtido para a impedância do circuito puramente resistiva.

Para obter uma impedância dentro da faixa limitada por Z_{min} e Z_{max} , temos que a indutância não saturada deve estar na faixa $1,11 \text{ mH} \leq L_{SSR} \leq 2,49 \text{ mH}$.

Deste modo, os valores utilizados para indutância do SSR em função do módulo da corrente que passa por ele estão apresentados na Tabela 1, e o gráfico obtido para a indutância está na Figura 8. Os valores de indutância na transição do funcionamento saturado ao não saturado, foram escolhidos de modo que a curva possua formato compatível ao comportamento da saturação do núcleo.

O circuito utilizado para simulação possui corrente em funcionamento menor, com o valor de 18,06 A eficaz. A corrente utilizada para os cálculos corresponde à corrente limite a partir da qual o SSR começa a atenuar de forma mais expressiva a corrente de linha, apresentando queda de tensão maior que 0,5 V. Deste modo, para evitar que o dispositivo atue em partidas de motores, ou variações de corrente comuns à manobra de cargas, a corrente utilizada para os cálculos (50 A) foi escolhida para ser maior que a corrente de funcionamento normal que o sistema simulado apresenta (18,06 A).

Desse modo, também foi simulado o circuito com partida de um motor de indução, para verificar a influência do dispositivo durante a partida do motor, já que é interessante que o SSR não limite esta corrente de partida. Neste caso, o motor foi adicionado em paralelo com o grupo de cargas 3, ao final do sistema de distribuição.

Tabela 1. Valores de Indutância em função da Corrente.

Indutância (H)	$2,65 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^{-5}$	0,0015	0,003	0,02	0,2
Corrente (A)	0	10	30	50	100	150	200	500

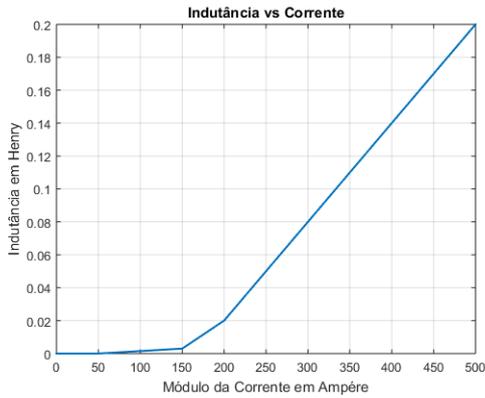


Figura 8. Gráfico da Indutância em função da corrente de linha.

4 Resultados obtidos

As correntes obtidas na fase a com e sem o SSR estão apresentadas no gráfico da Figura 9. No gráfico está apresentada a forma de onda de 0,47 até 0,6 s, para facilitar a visualização da onda.

O pico da corrente sem o limitador foi de 187,7 A., todavia com o SSR o pico de corrente foi de 150,8 A. Portanto, na simulação realizada houve uma redução na corrente de curto de 19,66%.

O valor da corrente durante o curto após o transitório foi de 104,93 A_{rms} sem o SSR e de 87,33 A_{rms} com o limitador, representando uma redução de 16,77%. Durante o funcionamento normal observou-se que as correntes com e sem o limitador são praticamente coincidentes, sendo a corrente sem SSR igual a 18,06 A_{rms} e com o SSR sendo 18,04 A_{rms}.

A tensão de linha na carga 3 (carga mais distante da fonte) durante o curto, com e sem o SSR, estão apresentados na Figura 10. Tem-se que a tensão nesta carga durante operação normal foi de 202,66 V_{rms} sem o limitador e 202,44 V_{rms} com o limitador, ou seja, o limitador apresentou queda de tensão em operação normal de apenas 0,22 V, correspondendo a 0,1%. Durante o curto, a tensão na carga teve um pico de 146,3 V sem o limitador, e um pico de 122,8 V com o SSR. Passado o transitório do curto, a tensão na carga durante o curto

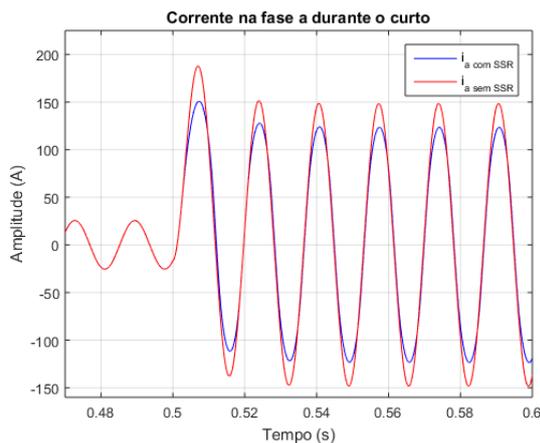


Figura 9. Corrente na fase a durante o curto-circuito trifásico.

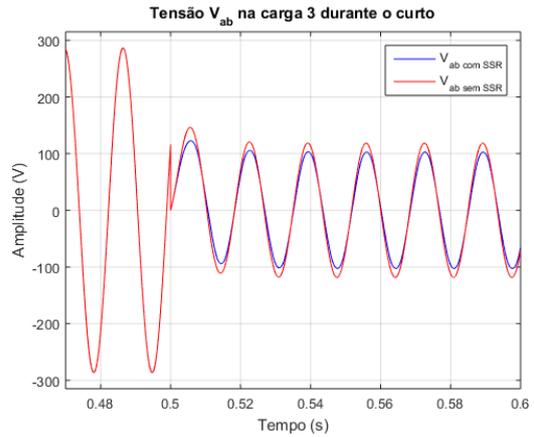


Figura 10. Tensão na carga 3 durante o curto-circuito.

sem o limitador foi de 83,86 V_{rms} e com o SSR a tensão foi de 72,69 V_{rms}. Portanto, o SSR apresentou queda de tensão de 11,17 V (5,08%) durante o curto. Na Figura 11 observa-se o comportamento da tensão na carga após a retirada do curto-circuito. É possível observar que a tensão volta a apresentar o mesmo comportamento que apresentava antes do curto, após um transitório de cerca de 0,003 segundos.

Para comparação de tensões ao longo da linha, a Figura 12 apresenta os valores eficazes na fonte, e nas cargas 1, 2 e 3 durante o curto. Pode-se observar que a presença do SSR quase não altera o valor de tensão

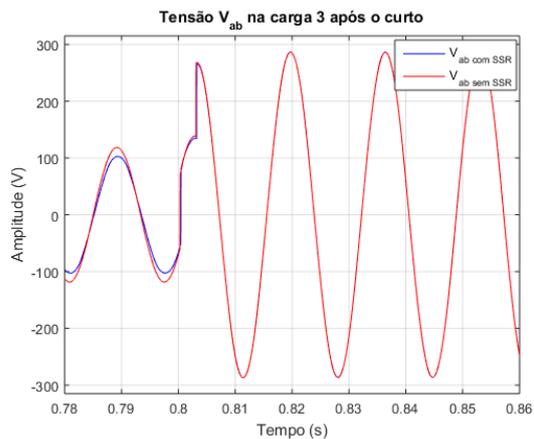


Figura 11. Tensão na carga 3 ao retirar o curto-circuito.

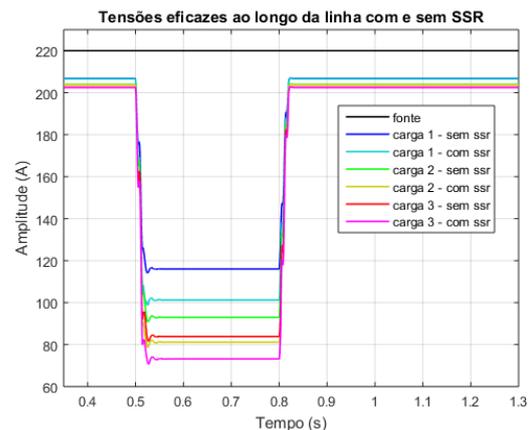


Figura 12. Tensões ao longo da linha (V_{ab}) durante o curto.

Tabela 2. Comparação dos resultados obtidos.

	I_a máxima no curto	I_a após transi-tório no curto	V_{carga} após tran-sitório no curto	I_a antes do curto	V_{carga} antes do curto	I_a máxima na partida do motor
Sem o SSR	187,7 A	104,93 A _{rms}	83,86 V _{rms}	18,06 A _{rms}	202,6 V _{rms}	85,79 A
Com o SSR	150,8 A	87,33 A _{rms}	72,69 V _{rms}	18,04 A _{rms}	202,4 V _{rms}	83,95 A
Redução (%)	19,66%	16,77%	13,32%	0,11%	0,10%	2,14%

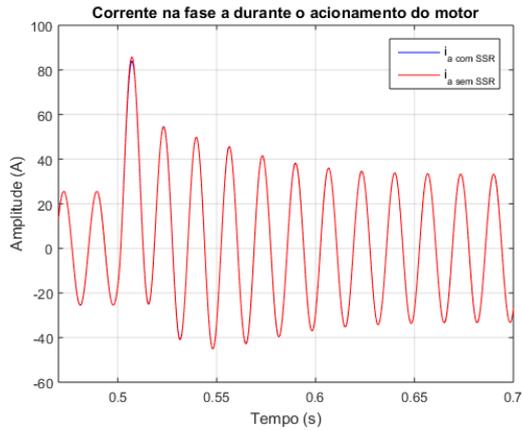


Figura 13. Corrente na fase a durante a partida do motor.

aplicado às cargas durante o funcionamento normal, porém o reduz durante o curto circuito.

É desejável que o limitador de correntes não interfira no funcionamento de equipamentos que necessitem de alta corrente transitória, como motores de indução durante a partida, por exemplo. A corrente na fase a durante a partida de um motor de indução em paralelo com o grupo de cargas 3 do circuito da Figura 7, está apresentada na Figura 13.

Pode-se observar pelo gráfico que no maior pico de corrente, que aparece ao partir o motor, há uma leve atenuação da corrente. Sem o SSR, o pico de corrente foi de 85,79 A, enquanto que com o SSR a corrente foi de 83,95 A. Apresenta, portanto, uma diminuição de corrente durante a partida de 2,14% que não prejudica a partida do equipamento. Durante o funcionamento, o efeito do limitador também não é perceptível.

Uma comparação dos valores obtidos na simulação com e sem o SSR está apresentado na Tabela 2. Na última linha referente ao campo redução, temos a redução percentual da grandeza na presença do SSR.

5 Conclusão

Foi apresentado um modelo para emulação de limitadores de corrente de falta empregando reator série saturado. O modelo foi desenvolvido baseado no comportamento do reator com a corrente que circula pelo mesmo. O ponto de polarização do reator é altamente saturado, o que significa uma indutância equivalente de baixo valor. Correntes de alto valor retiram o reator da polarização saturada, e a indutância equivalente que apresenta é bem mais alta. Assim, optou-se por representar o limitador pela indutância equivalente, o que permite acompanhar em simulação o comportamento instantâneo da corrente.

Conforme é possível observar nos resultados apresentados na Tabela 2, o SSR conforme modelado apresenta baixa queda de tensão durante o funcionamento regular do sistema, praticamente não interferindo em seu funcionamento. Entretanto, ao aumentar a corrente no dispositivo, por exemplo na ocorrência de um curto-circuito trifásico, este apresenta uma queda de tensão significativa em seus terminais e provoca uma redução da corrente que circula por ele, conforme desejado que se comportasse.

Verificou-se, então, que o modelo apresentado emula com boa representatividade o comportamento não só em regime permanente como também transitório da operação do limitador tipo reator série saturado. A abordagem pode ser aplicada a outros programas de simulação, e seu uso simplifica o estudo de sistemas em que o foco é o sistema e não o dispositivo.

Agradecimentos

À UFES pelo suporte de infraestrutura, à CAPES pelo acesso a publicações (portal periódicos). À PRPPG/PIIC/UFES pelas BIC e VIC.

Referências Bibliográficas

- CIGRE (2003). Report on the CIGRE WG A3.10 “Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems”.
- Fajoni, F. C. (2015). “Estudos, desenvolvimento e construção de um limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado”. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- Freitas, T. R. S. (2009). “Modelo para Simulação de Supercondutor HgRe-1223 para Aplicações como Limitador de Corrente Resistivo”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- Ganev, G., Hinov, K., Karadzhov, N. (2012). “Fault Current Limiters – Principles and Applications”.
- Kazerooni, A., Berry, J., Tsigara, G., Murdoch, N. (2017). “Developing static model of fault current limiter technologies”. CIGRE - Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp 2223-2227.
- Moraes, I. J. (2016). “Aplicação de TSCS na distribuição primária: estudo de caso”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- Moriconi, F., De La Rosa, F., Darmann, F., Nelson, A., Masur, L. (2011). “Development and Deployment of Saturated-Core Fault Current

- Limiters in Distribution and Transmission Substations". IEEE transactions on applied Superconductivity, vol. 21, no. 3, pp. 1288-1293.
- Mukhopadhyay, S. C., Iwahara, M., Yaniada, S. (1998) "Investigation on the performances of a permanent magnet biased fault current limiting reactor with a steel core". IEEE transactions on Magnetics, vol. 34, no. 4, pp. 2150-2152.
- Oliveira, F. D. C. (2005). "Limitador de Correntes de Falta Supercondutor". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- Rozenshtein, V., et al (2007). "Saturated Cores F CL— A New Approach", IEEE transactions on applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, pp. 1756-1759.
- Seuss, J., Reno, M. J., Broderick, R. J., Grijalva, S. (2017). Determining the Impact of Steady-State PV Fault Current Injections on Distribution Protection (No. SAND2017-4955). Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- Vilhena, N, Arsénio, P., Pina, J. M., Pronto, A., Álvarez, A. (2015). "A Methodology for Modeling and Simulation of Saturated Cores Fault Current Limiters", IEEE transactions on applied Superconductivity, vol. 25, no. 3.
- Xin, Y., et al (2009). "Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation". IEEE transactions on applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 1934-1937.
- Xin, Y., et al (2013). "Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter". IEEE transactions on applied Superconductivity, vol. 23, no. 3.