

ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMA VSC-HVDC COM LIMITADORES DE CORRENTE SUPERCONDUTORES

ICARO F. AMARAL RIBEIRO, RONALDO F. RIBEIRO PEREIRA, ANDREI O. MOTA PORFIRO, THIAGO MELO LIMA, EDUARDO C. MARQUES COSTA, SILVIO G. DI SANTO

Depto. Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
E-mails: icaroamaral@usp.br, ronaldoffc93@usp.br, educosta@usp.br

Abstract — This paper proposes an analysis of the voltage and current profiles in VSC-HVDC bipolar systems in steady and transient states, considering the presence of fault current limiters with superconductors during pole-ground and pole-pole-ground faults. In addition, a brief review on the main components applied for power transmission in HVDC is carried out (main protection techniques, converter models and current limiters) in order to study the transmission link behavior with presence of such components, so that the voltage and current values are properly limited to commercially available DC current protection devices. Results are obtained from simulations on a HVDC bipole transmission system composed of two-level VSCs.

Keywords — HVDC transmission system; Superconducting fault current limiter (FCLs); Voltage Sourced Converter (VSC-HVDC).

Resumo — O artigo propõe uma análise do perfil de tensão e corrente em sistemas de transmissão VSC-HVDC bipolares em regime permanente e transitório, considerando-se a presença de limitadores de corrente de falta com supercondutores durante faltas polo-terra e polo-polo-terra. Ademais, uma sucinta revisão é apresentada sobre os principais componentes utilizados na transmissão de energia elétrica em corrente contínua (principais técnicas de proteção, modelos de conversores e limitadores de corrente) com o objetivo de analisar o comportamento da linha de transmissão na presença de tais componentes, de tal forma que os valores de tensão e corrente estejam adequadamente limitados aos valores nominais dos dispositivos de proteção em corrente contínua comercialmente disponíveis. Os resultados analisados neste artigo foram obtidos a partir de simulações de um sistema de transmissão bipolar HVDC composto por conversores do tipo VSC com dois níveis.

Palavras-chave — Sistema de transmissão HVDC; Limitador de corrente de falta com supercondutor (LCFS); Conversor do tipo VSC-HVDC.

1 Introdução

Sabe-se que a energia elétrica é produzida em grandes unidades geradoras, na grande maioria dos casos, em tensão e corrente alternadas. A energia elétrica é transmitida até os grandes centros consumidores por meio de linhas de transmissão e geralmente estão localizados a grandes distâncias das unidades geradoras, especialmente no caso do Brasil, com suas dimensões continentais. O transporte de grandes blocos de energia é geralmente realizado em corrente alternada, no entanto, a transmissão em corrente contínua tem se mostrado tecnicamente e economicamente viável em diversos casos, seja na transmissão por longas distâncias ou em sistemas multiterminais, envolvendo geração distribuída e perfil variado de consumo. Algumas das principais vantagens da transmissão em corrente contínua, em relação a corrente alternada, são (Sari, 2016):

- capaz de transmitir até 40% mais potência que uma linha AC convencional mantendo o mesmo nível de isolamento e seção transversal do condutor;
- capaz de aumentar a capacidade de transmissão de energia a partir da infraestrutura de sistemas AC existentes, ou seja,

fazendo uso da mesma estrutura de linhas de transmissão AC (torres, fundação, condutores etc), podendo aumentando em até 300% a potência natural da linha;

- apresentam menos perdas na transmissão;
- menor faixa de servidão sob a linha de transmissão, reduzindo eventuais impactos ambientais;
- sistemas HVDC podem ser utilizados em aplicações *offshore*;
- menor interferências de rádio e vida útil.

De acordo com a literatura técnica, a transmissão em corrente contínua (*High-Voltage Direct Current* – HVDC) por longas distâncias, torna-se viável quando grandes blocos de energia são transmitidos a partir de 700 km, por meio de linhas de transmissão aéreas, e 40 km para cabos submarinos (Mourinho, 2016).

A maior parte dos sistemas de transmissão em corrente contínua existentes é baseada em conversores do tipo fonte de corrente (*Current Source Converters* - CSC). Entretanto, esse tipo de conversor não oferece flexibilidade de controle de fluxo de potência para grandes blocos de energia, o que limita seu

uso em aplicações ponto-a-ponto com altos níveis de capacidade de energia (Niquini, 2009).

Com a evolução da eletrônica de potência, surgiram os sistemas de transmissão baseados na tecnologia VSC (*Voltage Source Converter*). Este tipo de sistema é baseado na utilização de IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e GTOs (*Gate Turn-Off*) que substituem as válvulas baseadas em tiristores, uma vez que o controle destes componentes, se utilizados como VSC, necessitariam de elevada impedância em série para assegurar a rápida transição na geração da tensão CA.

Uma vantagem dos conversores VSC é que o fluxo de potência pode ser revertido instantaneamente sem a necessidade de se reverter a polaridade de tensão em corrente contínua (somente a direção da corrente contínua que é revertida). Como exemplo, sistemas VSC-HVDC podem facilmente operar com o fluxo de potência do continente para o conversor de portos *offshore* (importação de energia) bem como na direção reversa (exportação de energia). Essa versatilidade na reversão do fluxo de potência é uma grande vantagem dos conversores VSC se comparados aos conversores comutados pela linha, os chamados LCC (*Line Commutated Converter*), também conhecidos como CSC (Jovic, 2015).

No caso de sistemas VSC-HVDC multi-terminais, a análise dos limitadores de corrente torna-se ainda mais importante, visto que disjuntores DC são estritamente necessários para proteção desses sistemas. No entanto, os disjuntores DC possuem uma baixa capacidade de curto-circuito, que é em torno de 9 kA, devendo atuar de forma rápida o suficiente para que a corrente não exceda os limites do equipamento.

Neste contexto, o artigo técnico analisa o comportamento das tensões e correntes durante a ocorrência de faltas polo-terra e polo-polo-terra em um sistema bipolar VSC-HVDC, fazendo uso de limitadores de corrente com supercondutores. Tais elementos precisam obedecer a operação normal do sistema, não influenciado nesta e limitar a corrente durante operação faltosa para faixas de valores aceitáveis para o projeto do sistema de proteção (Mourinho, 2016). A filosofia de proteção adotada neste trabalho se dá a partir da proteção da linha DC ou dos cabos DC do sistema adotado, para isto a modelagem por ondas viajantes, como proteção principal, e por sobrecorrente com restrição de tensão, como proteção de retaguarda, estes modelos propostos para as filosofias de proteção podem ser encontrados em (Freitas, 2009) e (Paucar, 2014).

2 Modelagem do Sistema VSC-HVDC

A figura 1 apresenta o diagrama unifilar do sistema de transmissão bipolar HVDC a ser modelado. No caso proposto, as estações retificadoras são os conversores do tipo VSC (Niquini, 2009).



Fig. 1. Diagrama unifilar genérico de um sistema de transmissão HVDC.

A modelagem do sistema VSC-HVDC é desenvolvida fazendo uso de *toolboxes* de sistemas de potência disponíveis no software comercial MatLab.

O sistema VSC-HVDC bipolar é composto basicamente por dois conversores do tipo VSC em cada terminal da linha, sendo que cada par pode atuar tanto como inversor quanto como retificador, dependendo de como se comporta o fluxo de potência do sistema, cada par possui configurações similares. A conexão entre as estações conversoras é estabelecida, no caso estudado, por meio de um bipolo simétrico. No entanto, a interconexão entre as duas estações retificadoras poderia ser estabelecida por meio de cabos subterrâneos ou submarinos (ambos empregados na transmissão ponto-a-ponto) ou fazendo uso da topologia denominada *back-to-back*, amplamente utilizada em aerogeradores (Paucar, 2014).

O sistema VSC-HVDC é representado por um bipolo simétrico com capacidade de transmissão 200 MVA. Para o sistema em questão, opera-se com a tensão nominal $+V_{DC} = 230$ kV e $-V_{DC} = -230$ kV, polo positivo e negativo, respectivamente. A linha de transmissão entre os conversores VSC possui 100 km de comprimento e é representada por um modelo de linhas de transmissão levando em conta o efeito da frequência sobre os parâmetros elétricos da impedância longitudinal. Dessa forma, o modelo de linha representa de forma adequada os fenômenos transitórios ao longo da linha e incidentes nos terminais, que se encontram conectados às estações conversoras, tal como descrito na figura 1.

Vale ressaltar que na estação retificadora, o conversor atua de modo a controlar a potência ativa, enquanto na operação, como estação inversora controla a tensão DC. O sistema HVDC, em ambas as extremidades, apresenta tensão nominal de 460 kV entre os polos positivo e negativo. As faltas polo-terra e polo-polo-terra são aplicadas como curto franco em um dos polos para a terra e ambos os polos do link diretamente para a terra, respectivamente, tal como analisado previamente para um sistema HVDC monopolar, de acordo com a literatura técnica (Paucar, 2014). Serão abordadas duas condições distintas do sistema frente a falta aplicada: com e sem a presença de limitadores de corrente de falta com utilização de supercondutores.

2.1 Modelo do Voltage Source Converter (VSC)

Os VSCs utilizam chaves auto comutadas, tais como os GTOs ou IGBTs, os quais podem ser ligados ou desligados de forma controlada. Esses dispositivos operam com chaveamentos em alta frequência utilizando a técnica PWM. A principal característica dessas chaves é a condução

bidirecional de corrente e suportabilidade unidirecional de tensão (Kalitjuka, 2011) e (Pauca, 2014).

O conversor VSC pode ser classificado quanto à disposição das chaves semicondutoras em dois níveis e multi-nível. Com relação ao primeiro, é a topologia mais simples entre os conversores VSC-HVDC, o qual apresenta apenas dois níveis de tensão do lado DC, maiores perdas e maior ripple de saída em relação as outras topologias. No entanto, trata-se de uma tecnologia relativamente simples, confiável e amplamente utilizada em sistemas HVDC. Os conversores multi-nível apresentam perdas reduzidas devido à baixa frequência de chaveamento e são adequados para um maior número de aplicações devido ao nível de potência, que varia de centenas de MW até alguns GW (Pauca, 2014) e (Hamatwi, 2016).

Neste artigo, é proposto uma análise da inserção de limitadores de corrente fazendo uso de supercondutores em sistemas VSC-HVDC com conversores com dois níveis. A arquitetura do conversor do tipo VSC é descrita de forma simplificada na figura 2. Vale destacar a presença dos IGBTs e filtro de saída composto por capacitores (Sari, 2016).

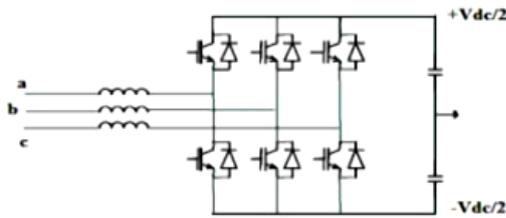


Fig. 2. Conversor VSC dois níveis.

2.2 Características do Limitador de Corrente de Falta

Os Limitadores de Corrente de Falta Supercondutores (LCFS) tem como objetivo limitar a corrente de curto-circuito que por diversas razões circulam pelo sistema. Normalmente, no momento da ocorrência da falta, a corrente atinge valores superiores a capacidade de proteção dos dispositivos instalados. Dessa forma, se faz necessário limitar a corrente em um intervalo de tempo para que não ocorram danos aos equipamentos e componentes nas instalações elétricas, no que diz respeito aos eventuais esforços eletromecânicos e a coordenação de isolamento do sistema como um todo.

Segundo a literatura técnica, um LCFS consiste em uma impedância não linear, que durante a ocorrência de faltas, diminui temporariamente o nível das correntes no sistema, adequando-as a níveis abaixo do limite especificados nos disjuntores (Mourinho, 2016). Em resumo, o LCFS apresenta baixa impedância em condições normais de operação e alta impedância durante a ocorrência de faltas caracterizadas por sobrecorrentes. Entre os tipos de LCFS, o tipo resistivo é o mais utilizado em todo o mundo, devido a sua simplicidade, peso, volume e custo.

A propriedade física mais importante acerca do comportamento dos LCFS é a relação do campo elétrico pela densidade de corrente, também conhecida por Característica E-J de materiais supercondutores de alta temperatura, como

pode observado na figura 3 (Manohar, 2015). Neste sentido, a relação entre campo elétrico e densidade de corrente do material pode ser subdividida em três equações físicas, as quais representam o estado supercondutor, o estado de transição e o estado condutor. A equação 1 descreve o comportamento para cada estado.

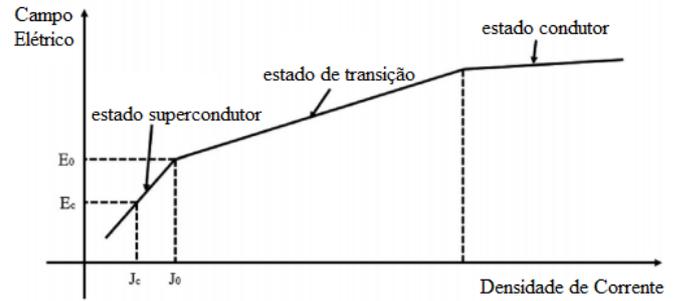


Figura 3: Característica E-J de materiais supercondutores de alta temperatura.

$$E = \begin{cases} 0 & \text{"Estado supercondutor"} \\ E_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^{n(T)} & T < T_c \text{ e } J \leq J_c \\ \sigma(T_c) \left(\frac{T}{T_c}\right) J & \text{"Estado de transição"} \\ & T < T_c \text{ e } J > J_c \\ & \text{"Estado condutor"} \\ & T \geq T_c \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo E e J o campo elétrico atual e a densidade de corrente atual, respectivamente, E_c e J_c são o campo elétrico crítico e a densidade de corrente crítica, respectivamente, σ é a resistividade específica do material, T a temperatura atual do material supercondutor e T_c é a temperatura crítica do material supercondutor.

Sob a hipótese de condição adiabática, o calor dissipado no supercondutor não é transferido para o líquido nitrogênio, de modo que o processo de resfriamento pode ser negligenciado. Desta forma, a expressão do aumento de temperatura em relação ao tempo é dada pela seguinte equação:

$$T = T_0 + \frac{1}{C_k} \int E(J, T) J(t) dt \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo T_0 é a temperatura do nitrogênio líquido e C_k é a capacidade térmica por volume. A relação entre a resistência do supercondutor em função do campo elétrico e densidade de corrente pode ser escrita de maneira aproximada por meio da equação 3.

$$R = \frac{E}{J} \frac{\ell}{A} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo ℓ e A , respectivamente, o comprimento e área do supercondutor.

3 Simulações e discussões

O sistema simulado baseia-se na tecnologia VSC-HVDC dois níveis e foi modelada no software comercial *Simulink/Mathworks*, levando em conta um link DC bipolar, tal como descrito na figura 4. No sistema em questão, tem-se uma fonte em corrente alternada de 230 kV-60 Hz, conectada a duas estações retificadoras por meio de uma linha de transmissão bipolar de 100 km de comprimento, conforme apresentado no modelo descrito na seção 2.

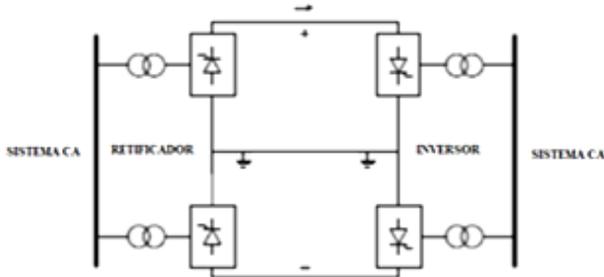


Fig. 4. Sistema VSC-HVDC bipolar simétrico.

Para efeito de avaliação do modelo apresentado em (Mourinho, 2016), foram realizadas simulações de operação do sistema com carga plena durante três segundos, sendo então aplicadas faltas polo-terra e polo-polo-terra para avaliação do comportamento das correntes DC nos dois polos.

Durante a simulação, o curto-circuito polo-terra ocorre em 1,5 segundos de simulação, conforme mostra as figuras 5 a 8. Para a figura 5, tem-se as correntes no polo 1 (curva vermelha) e no polo 2 (curva azul) para a condição de operação sem a presença do modelo de limitador de corrente com supercondutor. Conforme pode ser visto, a corrente nominal de operação do sistema se mantém com valor médio de 1 kA nos dois terminais. No entanto, após aplicação da falta o sistema apresenta pico transitório na ordem de 10 kA e decaimento gradativo para o polo em que a falta ocorre, conforme mostra a figura 5. A partir da figura 6, tem-se as tensões polo-terra do polo 1 (curva vermelha) e do polo 2 (curva azul), que para condição de regime, as tensões se mantêm em torno de 200 kV e 230 kV, para ambos os terminais. Vale ressaltar que a tensão, no polo onde ocorreu a falta, torna-se nula logo após o curto-circuito.

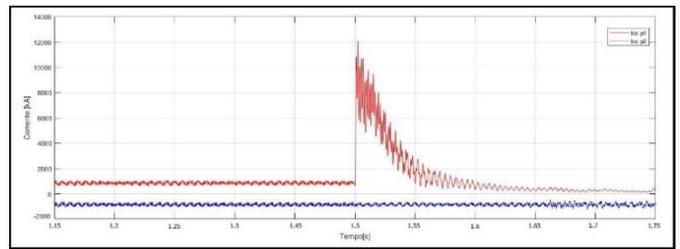
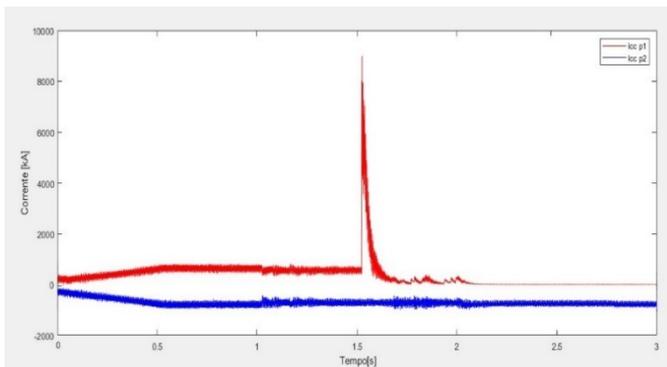


Fig. 5. Correntes nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, sem limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-terra.

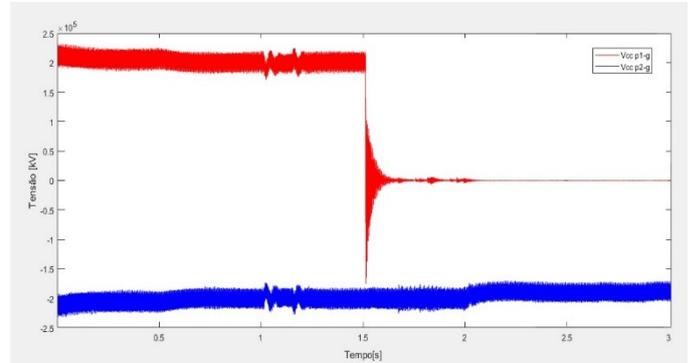
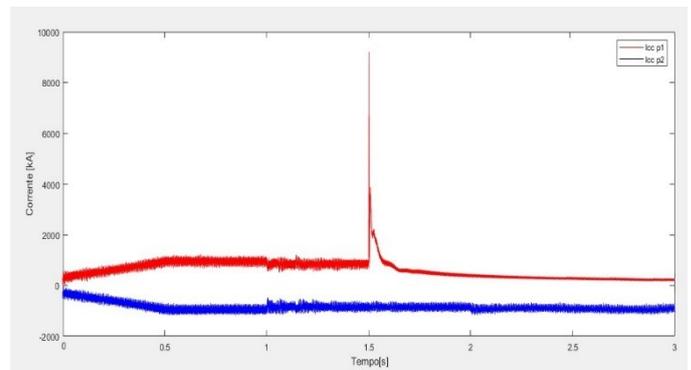


Fig. 6. Tensão nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, sem limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-terra.

Nas simulações considerando a presença de LCFS, foram utilizados modelos descritos na literatura técnica, previamente abordados nas seções anteriores (Mourinho, 2016). Os LCFS são inseridos em série no link DC, nos polos 1 e 2, tanto para faltas polo-terra como para polo-polo-terra.

Realizando-se novas simulações com a presença dos LCFS, observa-se que não há variações significativas na operação do sistema em regime permanente. No entanto, logo após a ocorrência da falta, observa-se na figura 7 que a supressão da sobrecorrente é praticamente instantânea, se comparada com a corrente de falta descrita na figura 5. Dessa forma, equipamentos de proteção (disjuntores) e o sistema como um todo permanece durante um breve período exposto a sobrecorrente, evitando assim maiores falhas na proteção e otimizando dos recursos técnicos e financeiros para o desenvolvimento da proteção do sistema como um todo.



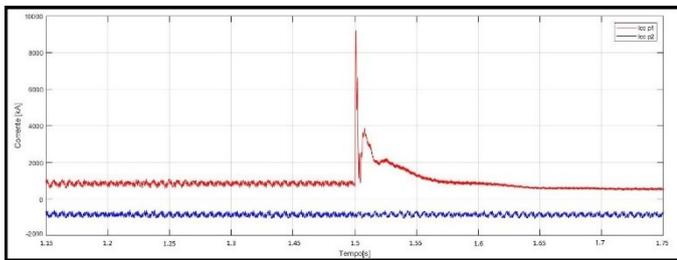


Fig. 7. Correntes nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, com limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-terra.

A figura 8 descreve a tensão entre o polo e terra, antes e após a ocorrência da falta, com a presença do LCFS. Como esperado, o comportamento das tensões nos polos não é afetado com a presença do limitador de corrente.

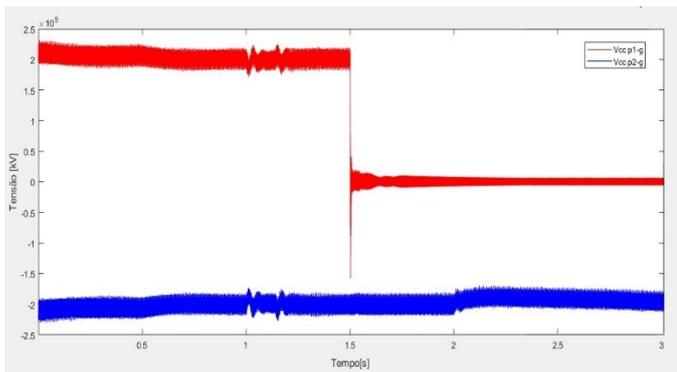


Fig. 8. Tensão nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, com limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-terra.

As figuras de 9 a 12 descrevem o comportamento do sistema VSC-HVDC frente um curto polo-polo-terra, com e sem a presença de LCFS. Assim como nas simulações anteriores, a falta é aplicada no instante 1,5 segundos.

A figura 9 descreve a corrente no polo 1 (curva vermelha) e no polo 2 (curva azul) sem a presença do LCFS. Conforme pode ser visto, a corrente nominal de operação do sistema se mantém com valor médio de 1 kA para os dois terminais. No entanto, após aplicação da falta o sistema apresenta pico de corrente na ordem de 10 kA.

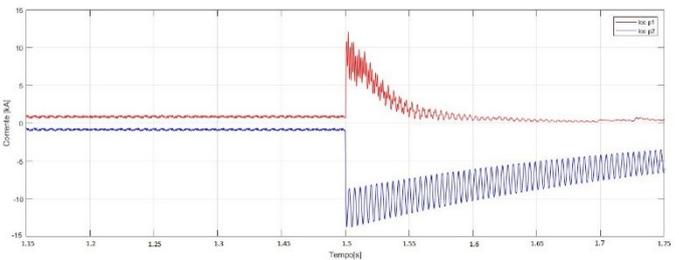
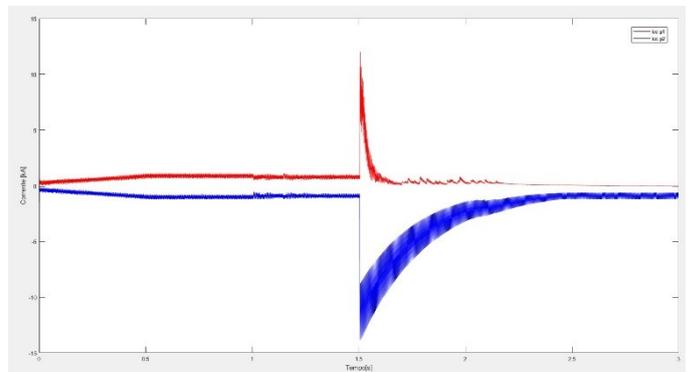


Fig. 9. Correntes nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, sem limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-polo-terra.

As tensões nos dois polos do sistema sem LCFS, antes e após a falta polo-polo-terra, são descritas na figura 10.

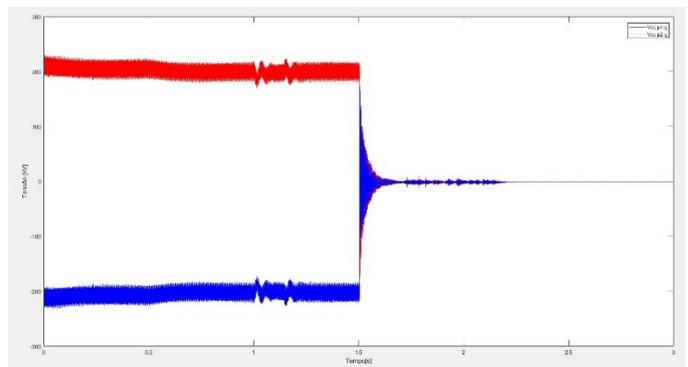


Fig. 10. Tensão nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, sem limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-polo-terra.

As correntes nos polos do sistema VSC-HVDC com LCFS, antes e após a falta polo-polo-terra, são descritas na figura 11.

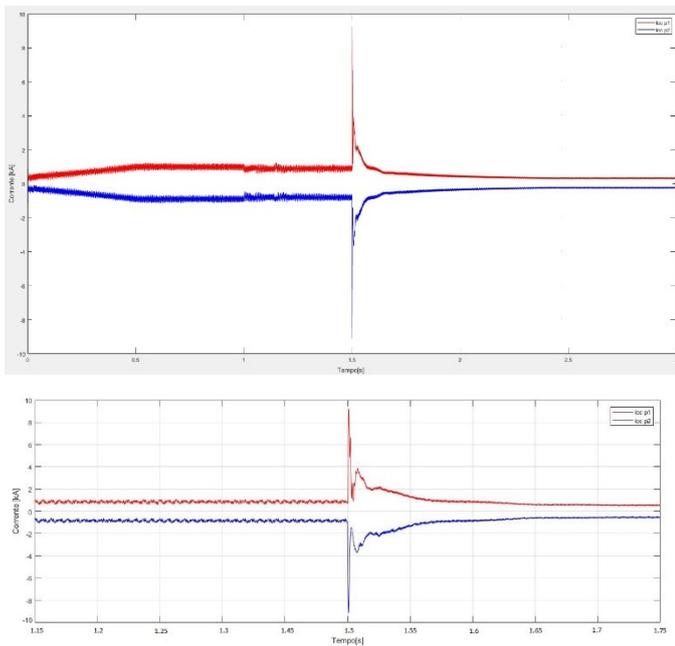


Fig. 11 Correntes nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, com limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-polo-terra.

Comparando-se as correntes nos polos com e sem a presença de LCFS, verifica-se que a corrente de falta é rapidamente suprimida na figura 11, se comparada à figura 9. Vale ressaltar ainda, que as tensões não sofrem influência dos LCFS, tanto nos instantes pré e pós falta, tal como descrito nas figuras 10 e 12.

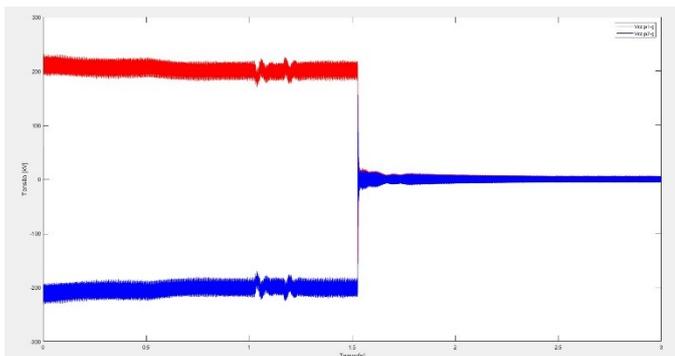


Fig. 12. Tensão nos polos 1 e 2 do sistema VSC-HVDC, com limitador de corrente, na ocorrência da falta polo-polo-terra.

4 Conclusão

Verificou-se a eficácia na utilização de Limitadores de Corrente de Falta com Supercondutores – LCFS em sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua com conversores por fonte de corrente VSC-HVDC. O bipolo utilizado nas simulações de faltas polo-terra e polo-polo-terra mostrou-se estável com a presença de LCFS, que atuou de forma robusta e precisa na supressão das correntes de falta e sem influenciar nos níveis de tensão no período pré-falta,

durante a operação nominal do sistema em regime permanente.

Dessa forma, a utilização de limitadores de corrente em sistemas VSC-HVDC mostra-se uma estratégia alternativa para minimizar as possíveis correntes de curto-circuito e consequentemente diminuir o custo e dimensionamento de todo aparato de proteção da linha de transmissão em corrente contínua, visto que o nível de proteção dos equipamentos, tal como os disjuntores, pode ser diminuído devido a rápida supressão da corrente de falta oferecida pelos LCFS.

O estudo realizado mostra informações válidas para um sistema compostos por conversores VSC com dois níveis. No entanto, propõem-se análises complementares da utilização de LCFS em sistemas com conversores multiníveis, a fim de comprovar a eficiência dessa técnica de proteção para todos os tipos e topologias de sistemas VSC-HVDC.

Referências Bibliográficas

- Mourinho, F. A. (2016). Proteção de linhas de transmissão de sistemas VSC-HVDC utilizando limitadores de corrente de falta. Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Niquini, F. M. M. (2009). Modelagem do Elo de Corrente Contínua para Análise Harmônica Utilizando o Método de Injeção de Correntes Trifásico Harmônico com Solução Iterativa. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Hamatwi, E.; Davidson, M. N.; Gitau, I. E. e Adam, G. P. (2016). Modeling and Control of Voltage Source Converters for Grid Integration of a Wind Turbine System. IEEE PES PowerAfrica, pp. 98–106.
- Sari H. I. (2016). DC/DC Converters for Multi-terminal HVDC Systems: Based on Modular Multilevel Converter. European Wind Energy Master – EWEN, Norwegian University of Science and Technology, Delf University of Tecnology.
- Jovic, D.; Ahmed, K. (2015). VSC HVDC Applications and Topologies, Performance and Cost Comparison with LCC HVDC. 1st ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Kalitjuka, T. (2011). Control of Voltage Source Converters for Power System Applications. pp 1–69.
- Paucar, B. C. (2014). Sistema HVDC Baseado em Conversores Multinível Modulares. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Manohar P., Ahmed W. (2015). Application of Superconducting Fault Current Limiter in Multi-terminal HVDC Systems. CIGRE SC B4 Meeting and International Tutorials and Colloquium on HVDC and Power Electronics, India.
- Freitas T. R. S. (2009). Modelo para Simulação de Supercondutor HgRe-1223 para Aplicações como Limitador de Corrente Resistivo. Universidade Federal do Espírito Santo.