

Modelagem e controle de um limitador de corrente de curto-circuito do tipo Ativo

Monique Costa de Lima, Bruno Wanderley França, Guilherme Gonçalves Sotelo

Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica – NITEE

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal Fluminense – UFF

Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

moniquelima@id.uff.br, bwfranca@id.uff.br, gsotelo@id.uff.br

Resumo — A elevação do nível de curto-circuito devido à expansão do sistema de distribuição de energia transformou os limitadores de corrente de curto-circuito (LCCs) em uma solução adequada para adiar a necessidade de reforço do equipamento de proteção e evitar danos graves no sistema de energia. Embora existam muitos tipos de limitadores, este artigo tem como objetivo estudar a modelagem e o controle do LCC tipo Ativo através de simulações PSCAD / EMTDC deste equipamento atuando como fonte de tensão ou fonte de corrente, dependendo do estado do sistema. O modelo e controle desenvolvido do LCC tipo Ativo conseguiu reduzir a corrente de curto em cerca de 80% se comparado à corrente prospectiva (sem LCC).

Palavras-chave— Corrente de curto-circuito, Inversor tipo fonte de tensão e tipo corrente, Limitador de corrente de curto, Modelagem e controle, PSCAD/EMTDC.

I. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos proporcionaram inúmeras melhorias para a população de modo geral, porém ocasionaram um aumento significativo na demanda por energia elétrica [1]. A crescente expansão do sistema elétrico vem acarretando num aumento considerável do nível de curto-circuito [2]. Com a inserção da geração distribuída (GD) esse nível tende a aumentar ainda mais [3], além da possibilidade de alteração do arranjo radial da rede. Por efeito dos níveis de corrente, os equipamentos de proteção empregados no sistema vêm sendo superados ou têm trabalhado com capacidade além de sua máxima, criando assim uma preocupação para as concessionárias de energia com relação a danos aos próprios equipamentos de proteção, além dos transformadores e cabos, e perda de estabilidade do sistema [4]–[6]. Além disso, ainda há riscos a respeito do tempo de abertura dos contatos mecânicos e com a extinção do arco voltaico de disjuntores. Algumas tecnologias de limitação de corrente convencionais já atingiram um elevado grau de maturidade e se encontram no mercado como: reatores de núcleo de ar e dispositivos pirotécnicos [7]–[9].

Tendo em vista o preço e a logística de troca dos equipamentos de proteção, os limitadores de corrente de curto-circuito (LCCs) surgem como dispositivos de proteção auxiliares e importantes [9]–[11]. Ao reduzir a corrente de curto para valores aceitáveis para atuação dos atuais equipamentos de proteção, o emprego dos LCCs vem se tornando um recurso promissor.

Os LCCs são dispositivos instalados geralmente em série com a rede e têm como princípio básico de atuação a inserção de uma elevada impedância no sistema, na ocorrência de falta, para que a corrente seja limitada. Porém, sob condições normais, a impedância vista pela rede deve ser a menor possível [10], [11].

Na literatura, diversos tipos de LCCs podem ser encontrados como os não-supercondutores, os supercondutores e os híbridos [8], [10]–[12]. Os LCCs não-supercondutores envolvem normalmente o uso de chaves semicondutoras como diodos, transistores, MOSFET's, IGBT's e tiristores [10]. Esses tipos têm como exemplos o resistor de frenagem dinâmica em série, tipo ponte normal e modificado, com link CC e o ativo [10]–[12]. Sendo a topologia LCC ativo o foco deste trabalho. Controladores de potência interfases e dispositivos FACTS também podem ser utilizados para limitar a corrente de curto-circuito [13]–[15]. Com relação aos tipos de LCCs supercondutores, estes utilizam o material e propriedades da supercondutividade, dividindo-se nos tipos resistivo puro, indutivo, não-indutivo, transformador, núcleo blindado, híbrido e o de núcleo saturado [10]–[12].

Para este trabalho, o tipo ativo de LCC, apresentado na Fig. 1 é modelado. Esta topologia é usualmente composta por um transformador de núcleo de ar onde o secundário apresenta um conversor eletrônico de potência, com um elemento armazenador de energia (capacitor ou indutor) [16]. Este tipo de LCC pode ser considerado tanto não-supercondutor [16], [17] como supercondutor [18]–[21], dependendo do material utilizado nos enrolamentos do transformador e da fonte de energia do lado CC.

Para a modelagem e extração dos resultados deste limitador é utilizado o programa PSCAD/EMTDC. A escolha pelo uso desse software se baseou no seu amplo emprego para solucionar problemas de transitórios eletromagnéticos, além de contar com o modelo de chaves semicondutoras e seu controle, a grande gama de ferramentas para simulações de sistemas de distribuição e de equipamentos baseados em eletrônica de potência.

Este trabalho tem como contribuição desenvolver o controle do inversor de modo que este funcione como fonte de corrente em operação normal e como fonte de tensão sob condição de falta.

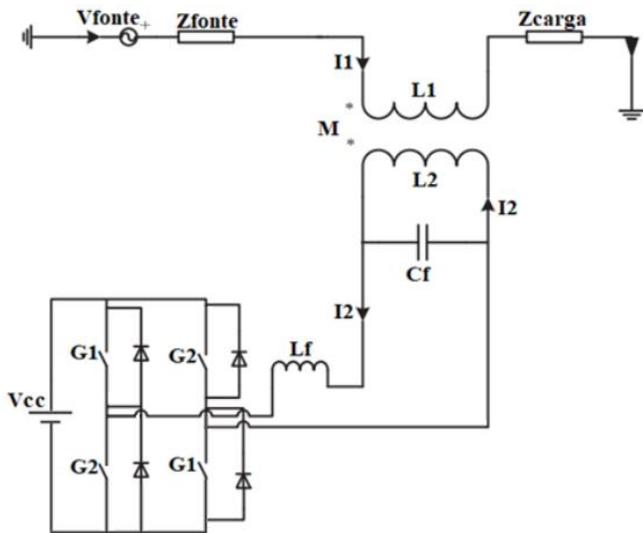


Fig. 1. LCC do tipo Ativo.

O artigo encontra-se dividido da seguinte maneira: uma metodologia onde é explicado acerca da topologia do LCC tipo Ativo; já a seção III apresenta os circuitos de controle e do sistema implementados nas simulações com seus resultados e análises e a última seção corresponde às conclusões obtidas com a realização deste trabalho.

II. LCC TIPO ATIVO

Como o estudo desta topologia e seu controle que vêm sendo desenvolvidos e encontram-se em estágio inicial, o modelo de LCC do tipo Ativo adotado preliminarmente é monofásico. De modo que a presente modelagem de LCC é empregada de uma forma mais ideal, a fim de se realizar uma prova de conceito. Isto se obteve por meio da utilização de um transformador ideal no software PSCAD/EMTDC e do uso de uma fonte de tensão de corrente contínua (CC) ao contrário de se usar um capacitor como fonte de energia no inversor.

Segundo [5], [6], [16], [19], ao regular a corrente do secundário pode-se obter 3 modos diferentes de operação. O primeiro corresponde na permanência da corrente do secundário de operação normal para ocorrência de curto-circuito em conjunto com uma impedância no secundário.

No segundo modo, a corrente do secundário é levada a zero e há uma impedância infinita no secundário. Com relação ao terceiro modo de operação, o valor da corrente no secundário fica igual ao do primeiro modo, porém com o ângulo de 90° e uma impedância calculada dada essa corrente.

A proposta do estudo realizado para o trabalho tem como base o primeiro modo de operação. No entanto, ao invés de manter a corrente do secundário igual a de antes do curto, essa atinge um valor 1,5 vezes maior (em seu valor e). Assim, devido à relação de transformação, a corrente no primário, sob curto-circuito, seria limitada em um valor 50% maior do que a corrente do primário em operação normal.

A. Controle

O controle desenvolvido para o inversor e a modelagem do LCC foram implementados no programa PSCAD/EMTDC. O inversor localizado no secundário do transformador pode representar tanto uma fonte de tensão como de corrente, dependendo somente do controle empregado.

Os circuitos equivalentes com a representação do sistema em conjunto com o inversor representado pelas possíveis fontes controladas, de tensão e de corrente, podem ser observados na Fig. 2 e Fig. 3 respectivamente.

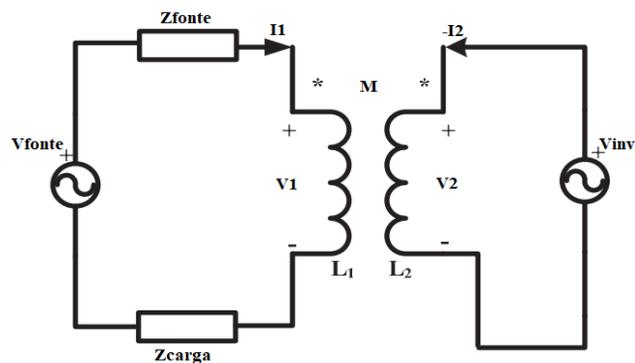


Fig. 2. Circuito equivalente com o inversor operando como fonte de tensão.

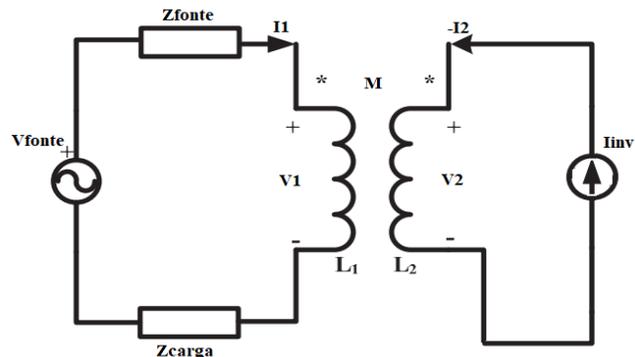


Fig. 3. Circuito equivalente com o inversor operando como fonte de corrente.

As variáveis dos circuitos são dadas por:

V_{fonte} – tensão AC do sistema

V_{inv} – tensão produzida pelo inversor como fonte de tensão

I_{inv} – corrente produzida pelo inversor como fonte de corrente

V_1 – tensão do primário do transformador

V_2 – tensão do secundário do transformador

Z_{fonte} – impedância da fonte

Z_{carga} – impedância da carga

I_1 – corrente do primário do transformador

I_2 – corrente do secundário do transformador

L_1 – indutância própria do enrolamento primário do transformador

L_2 – indutância própria do enrolamento secundário do transformador

M – indutância mútua entre os enrolamentos do transformador

B. Modelagem no PSCAD

De modo a validar a prova de conceito da modelagem do LCC estudado, é utilizado o programa PSCAD/EMTDC para a realização das simulações e obtenção dos resultados. Os parâmetros utilizados no circuito de teste estão presentes na Tabela 1. Vale ressaltar que como esse estudo encontra-se em estágio inicial e tem base na literatura, a frequência escolhida para o sistema em questão é diferente de 60 Hz. O tempo de simulação foi de 1,0 s e a falta é aplicada no sistema em 0,2 s, dura até 0,7 s e assim, o sistema volta a operação normal.

Tabela 1. Parâmetros

$V_{\text{fonte}} \text{ (V)}$	$325 \cdot \text{sen}(\omega t)$ $\omega = 2\pi \cdot f$
$f \text{ (Hz)}$	50
$Z_{\text{fonte}} \text{ (\Omega)}$	$3,4 + j1,822$
$Z_{\text{carga}} \text{ (\Omega)}$	$24 + j0,9424$
$L_1 = L_2 \text{ (mH)}$	20
$M \text{ (mH)}$	19,6
$C_f \text{ (\mu F)}$	20
$L_f \text{ (mH)}$	3

III. RESULTADOS

Nesse item os modelos dos circuitos e do controle implementados no PSCAD/EMTDC e os gráficos de resultados obtidos são expostos e discutidos. De modo a verificar a eficácia da modelagem, é estudado o sistema em questão, porém sem a presença do limitador, tendo em vista observar a corrente prospectiva da falta. A Fig. 4 apresenta o sistema sem a presença do LCC.

O modelo elaborado do LCC no software PSCAD/EMTDC pode ser observado na Fig. 5. Nota-se que as chaves semicondutoras utilizadas são IGBTs devido a sua facilidade de acionamento e comutação de carga em corrente elevada.

O controle desenvolvido para o LCC do tipo Ativo é apresentado na Fig. 6. Para operação normal do LCC, o inversor se comporta como fonte de corrente com referência de tensão nula (zero), a fim de reproduzir no primário a menor queda de tensão possível, de modo que o LCC não interfira no sistema, além de se ter uma impedância mais baixa possível. O controle desse modo de atuação é simples. É realizado o controle em malha aberta ao comparar a referência zero da tensão com uma onda portadora e assim enviar os sinais para disparo dos IGBTs. A frequência da portadora foi estipulada

em 8,55 kHz na onda triangular a fim de que os harmônicos de chaveamento existentes fiquem em ordens superiores, longe da frequência nominal.

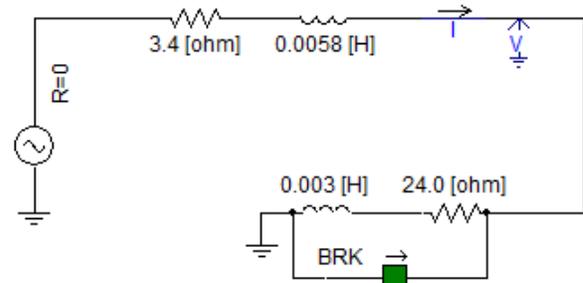


Fig. 4. Circuito sem LCC no PSCAD/EMTDC.

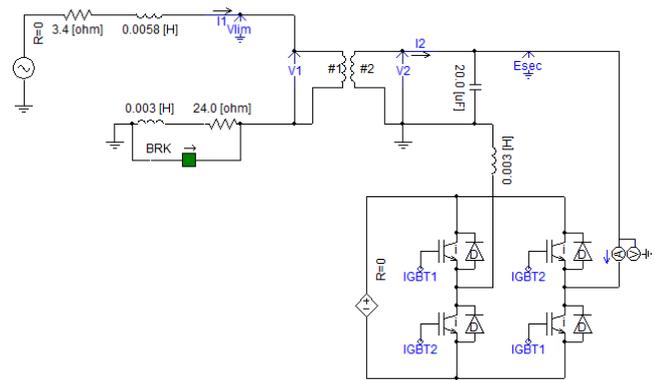


Fig. 5. Circuito com LCC do tipo Ativo no PSCAD/EMTDC.

Sob curto-circuito, o inversor é controlado para representar uma fonte de tensão. A corrente do secundário é calculada com base na corrente eficaz pré-falta do primário comparada com a própria I_2 e, se utiliza um controlador do tipo Proporcional-Integrador com o intuito de mitigar o erro entre elas. De modo que o erro presente entre a corrente medida em contraposta com a calculada seja o menor possível, utiliza-se outro Proporcional-Integrador e sua resposta é comparado com a portadora de modo a se chavear o inversor para um valor de corrente 1,5 vezes a corrente de operação normal.

Da Fig. 7 a Fig. 12 pode-se observar as correntes e tensões do primário e secundário do transformador na presença do LCC, assim como a tensão e corrente do sistema com e sem o LCC.

O gráfico da corrente do sistema (I) e seu valor eficaz (I_{rms}) sem a presença de limitador (prospectiva) é exposto na Fig. 7. Em operação normal, o valor da corrente é de $8,35 A_{rms}$, enquanto na presença da falta, o primeiro pico da corrente atinge $60,4 A_{rms}$ e chega a $59,56 A_{rms}$ no regime de curto.

A tensão eficaz do sistema sem o LCC (V_{rms}) é mostrada na Fig. 8. Um ponto notório é que na presença do curto-circuito, a tensão vai a 0, enquanto em operação normal, a tensão no sistema é de $200,6 V_{rms}$.

Com relação a atuação do LCC no sistema, tem-se os resultados da Fig. 9 a Fig. 12. As correntes do sistema com a presença do LCC, I_1 e seu valor eficaz (I_{rms1}), são apresentadas na Fig. 9 juntamente com a corrente prospectiva eficaz obtida anteriormente.

O emprego do LCC no sistema acarretou uma limitação de 79,4% uma vez que a corrente limitada atingiu o valor de $12,3 A_{rms}$ em regime de curto. Vale ressaltar que em operação normal a corrente eficaz do sistema com LCC apresentou o valor de $8,18 A_{rms}$, um pouco inferior ao obtido sem a presença do LCC tendo em vista a adição de uma pequena impedância ocasionada pela inserção do LCC. Fica notório a atuação do controle uma vez que a corrente limitada do sistema atingiu um valor eficaz 1,5 vezes maior que a corrente de regime permanente, onde o tempo de atuação do LCC foi de 40 ms.

A Fig. 10 apresenta a comparação entre a tensão eficaz do sistema sem e com a presença do LCC (V_{limrms}). É possível observar uma das vantagens da inserção do limitador no sistema, não há interrupção do sistema e sim apenas um afundamento da tensão na presença de curto-circuito. Em operação normal, com o LCC a tensão é de $199,7 V_{rms}$ e sob curto, a redução sofrida é de 4,66%.

As correntes do primário (I_1) e secundário (I_2) do transformador e seus valores eficazes podem ser observadas na Fig. 11. Tendo em vista que essa topologia de LCC apresenta este componente, ele foi dimensionado para que as correntes I_1 e I_2 tanto antes como depois da falta apresentassem o mesmo valor, o que fica notório na Fig. 11. Em operação normal as correntes apresentam com o valor de $8,18 A_{rms}$ e a corrente I_1 é a corrente limitada do sistema. Já na ocorrência da falta, I_1 e I_2 atingem $12,3 A_{rms}$.

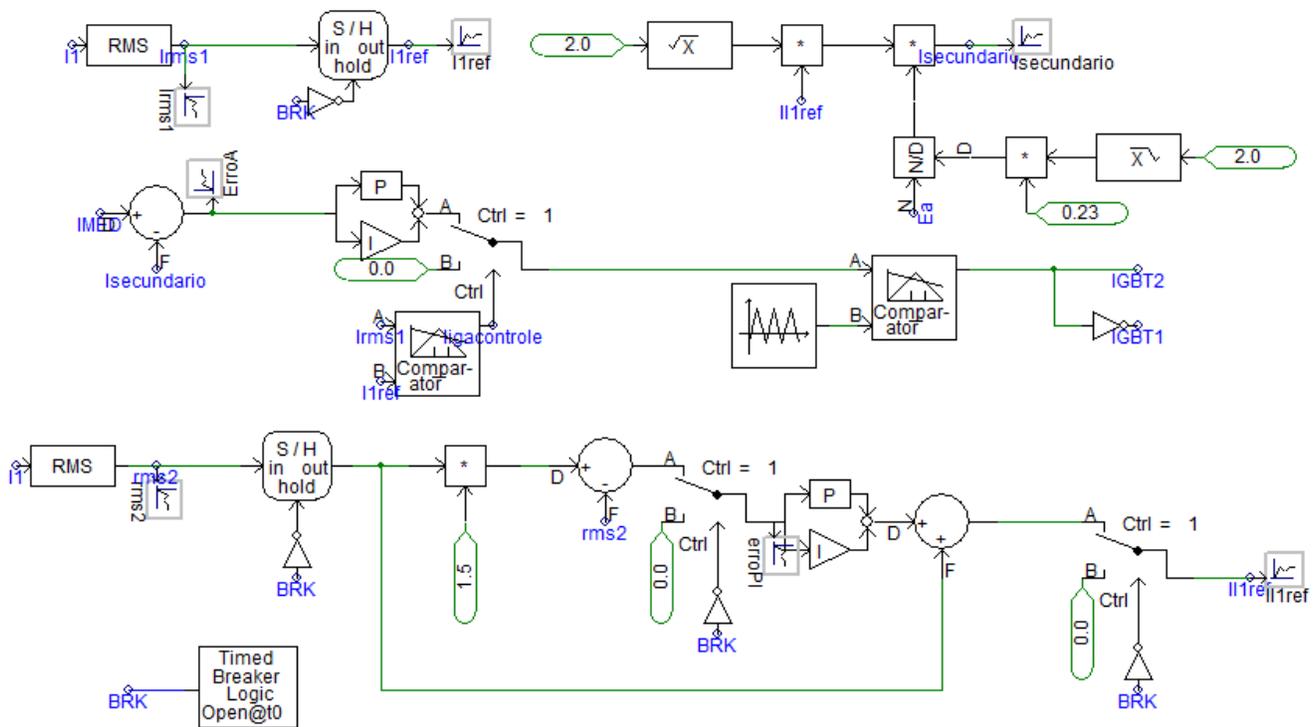


Fig. 6. Circuito de controle.

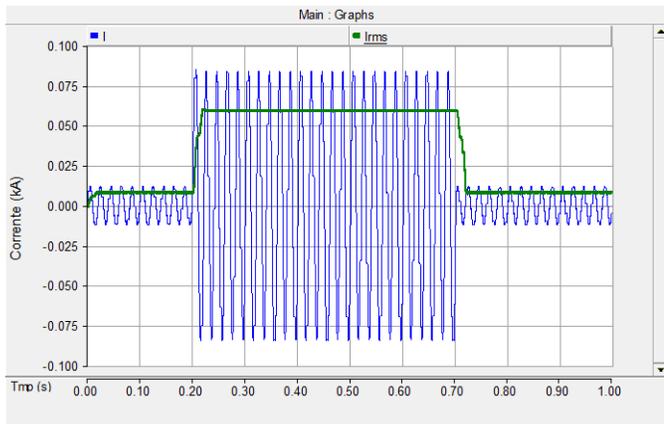


Fig. 7. Corrente do sistema sem LCC.

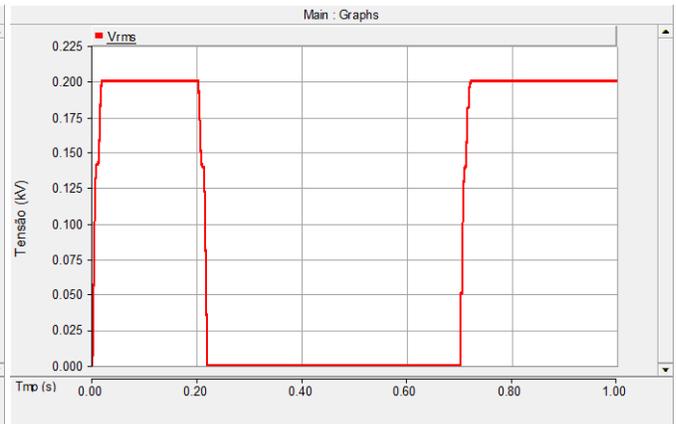


Fig. 8. Tensão do sistema sem LCC.

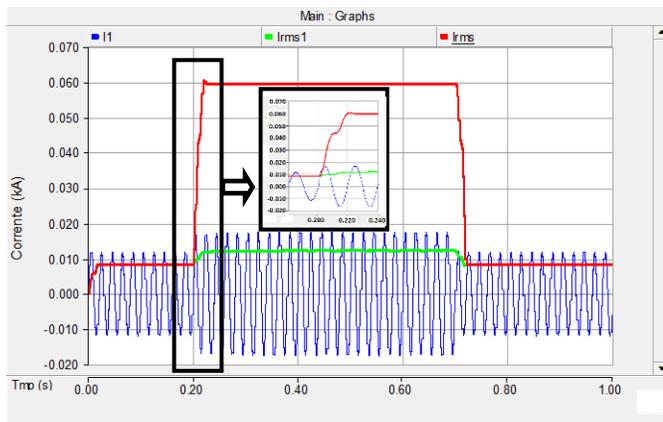


Fig. 9. Corrente do sistema com e sem LCC.



Fig. 10. Tensão limitada e prospectiva.

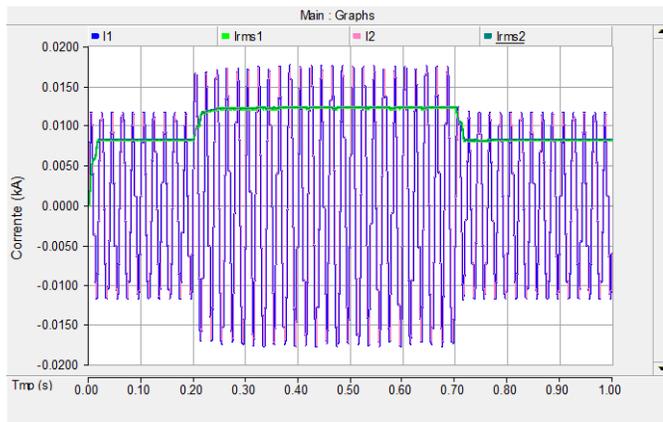


Fig. 11. Corrente do primário e secundário do transformador.

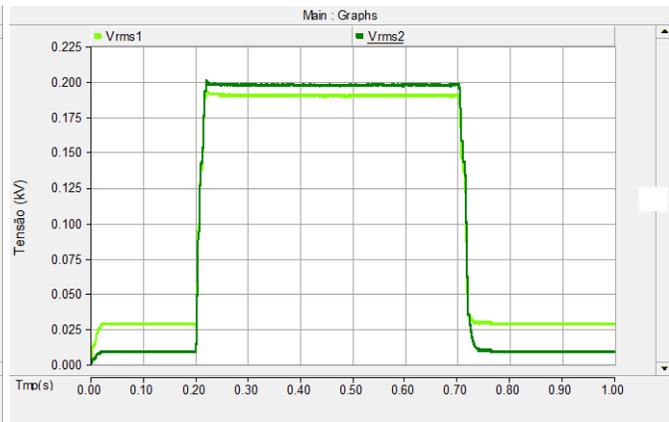


Fig. 12. Tensão do primário e secundário do transformador.

Pode-se observar as tensões eficazes do primário (V_{rms1}) e secundário (V_{rms2}) do transformador na Fig. 12. Em operação normal, a tensão do secundário é controlada pelo inversor a fim de permanecer com menor valor possível de modo a não interferir no sistema no primário. Já sob curto, como o inversor atua para controlar a corrente do secundário, a sua tensão é baseada na tensão do sistema, porém limitada.

IV. CONCLUSÕES

Em virtude da elevação do nível de curto-circuito pela expansão do sistema elétrico e aumento da demanda, o emprego dos limitadores de correntes de falta tem se tornado promissor. Este trabalho teve como foco a modelagem e controle inicial de um LCC do tipo Ativo. Através da modelagem e controle desenvolvidos foi possível controlar o inversor para operar tanto como uma fonte de tensão como uma fonte de corrente dependendo do estado do sistema (com ou sem curto-circuito).

Através dos resultados obtidos neste trabalho com a implementação do LCC no PSCAD/EMTDC, foi possível constatar que o emprego do LCC limita notavelmente a corrente na presença de falta, cerca de 80%. Uma das principais contribuições deste trabalho é que quando comparada a corrente prospectiva, a corrente do primário alcança somente um valor eficaz 1,5 vezes maior que a corrente pré-falta do primário e secundário do transformador

e, o uso do LCC no sistema reduziu a tensão em apenas 4,66% em contrapartida com a interrupção da tensão no caso sem o LCC. O controle desenvolvido proporcionou ao LCC um tempo de atuação de 40 ms. Como esse trabalho ainda é preliminar, há previsão de melhora do controle do inversor atuando como fonte de corrente, em operação normal, a fim de possibilitar a compensação de potência reativa e, o modelo computacional para implementação desse LCC em um sistema real.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao P&D ANEEL – LIGHT S.A. "Limitador de Corrente de Curto-Circuito Híbrido para Sistemas de Distribuição" pelo apoio financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] "Conjuntura energética global – Insights em demanda de energia", 07-mar-2018. .
- [2] S. S. Sahu e J. Shrivastava, "Simulation of Active Superconducting Fault Current Limiter and Its Performance Analysis in Three Phase Systems", International Journal of Engineering Science and Computing, p. 3138–3141.

- [3] Lei Chen, Changhong Deng, Fang Guo, Yuejin Tang, Jing Shi, e Li Ren, "Reducing the Fault Current and Overvoltage in a Distribution System With Distributed Generation Units Through an Active Type SFCL", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, n° 3, p. 1–5, jun. 2014.
- [4] M. Yagami e J. Tamura, "Enhancement of Transient Stability Using Fault Current Limiter and Thyristor Controlled Braking Resistor", in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, Switzerland, 2007, p. 238–243.
- [5] L. Chen, Y. Tang, J. Shi, e Z. Sun, "Simulations and experimental analyses of the active superconducting fault current limiter", *Phys. C Supercond.*, vol. 459, n° 1–2, p. 27–32, ago. 2007.
- [6] L. Chen *et al.*, "Influence of a voltage compensation type active superconducting fault current limiter on the transient stability of power system", *Phys. C Supercond.*, vol. 469, n° 15–20, p. 1760–1764, out. 2009.
- [7] G. GANEV, K. HINOV, e N. KARADZHOV, "FAULT CURRENT LIMITERS – PRINCIPLES AND APPLICATION", 2012.
- [8] S. Yadav, G. K. Choudhary, e R. K. Mandal, "Review on Fault Current Limiters", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, p. 1595–1603, abr-2014.
- [9] S. P. J. Priyadarshna e T. Venkatesan, "A Review on Development and Operational Strategy of Fault Current Limiters", *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 1, n° 1, p. 1, jan. 2016.
- [10] S. Patil e A. Thorat, "Development of fault current limiters: A review", in *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI)*, Pune, India, 2017, p. 122–126.
- [11] M. Alam, M. Abido, e I. El-Amin, "Fault Current Limiters in Power Systems: A Comprehensive Review", *Energies*, vol. 11, n° 5, p. 1025, abr. 2018.
- [12] E. P. R. I. EPRI, "Superconducting Fault Current Limiters". 2009.
- [13] A. M. Monteiro, "Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com Ênfase no ipc (interphase power controller)", Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005.
- [14] W. T. B. de Souza, "Simulações e Ensaios com Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores do Tipo Resistivo", Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [15] L. P. Kalinin, D. A. Zaitsev, M. S. Tirsu, e D. N. Kaloshin, "The new variant of adaptive interphase power controller with a wide range of controllability", in *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania, 2017, p. 1–5.
- [16] P. R. Raut, N. R. Patne, e A. R. Singh, "Application and simulation of the active fault current limiter", in *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, Kozhikode, India, 2015, p. 1–5.
- [17] M. Zafari, E. Gholipour, e S. M. Madani, "Active fault current limiter and comparison of its performance with SFCL", in *The 9th Power Systems Protection and Control Conference (PSPC2015)*, Tehran, Iran, 2015, p. 31–35.
- [18] Meng Song, Yuejin Tang, Yusheng Zhou, Li Ren, Lei Chen, e Shijie Cheng, "Electromagnetic Characteristics Analysis of Air-Core Transformer Used in Voltage Compensation Type Active SFCL", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, n° 3, p. 1194–1198, jun. 2010.
- [19] Lei Chen, Feng Zheng, Changhong Deng, Zhe Li, e Fang Guo, "Fault Ride-Through Capability Improvement of DFIG-Based Wind Turbine by Employing a Voltage-Compensation-Type Active SFCL", *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 38, n° 2, p. 132–142, 2015.
- [20] S. Kumari e A. Sinha, "Comparative Study of Active SFCL and Resistive type SFCL on a Nine Bus System", in *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Greater Noida, Uttar Pradesh, India, 2018, p. 780–785.
- [21] J. Shi, M. Liao, X. Zhou, Z. Xia, e L. Zhang, "Integrated Control Method for the Active Superconducting Current Controller", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, n° 2, p. 1–6, mar. 2019.