

Avaliação comparativa do desempenho dinâmico de arranjos de transmissão CC com topologias CSC-LCC e CSC-CCC através do simulador RTDS

Thiago Vieira da Silva
José Carlos de Oliveira
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia, UFU
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
tvsilva@gmail.com

Pedro Henrique de Oliveira Adami
Paulo Marcio da Silveira
Instituto de Sistemas Elétricos e Energia
Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI
Itajubá, Minas Gerais, Brasil
pedro.adami@gmail.com

Resumo - A tecnologia da transmissão em CC oferece desafios importantes para pesquisas e estudos de desempenho. Para auxiliar nas investigações relacionados com tais complexo, são empregados modelos experimentais e/ou computacionais e, neste contexto, há um conjunto de ferramentas destinadas aos propósitos da avaliação das condições de funcionamento destes complexos diante de condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente. Dentre estes recursos destaca-se o simulador RTDS, o qual tem se mostrado uma ferramenta com crescente utilização pelo setor elétrico e centros de pesquisa. Baseando em tais recursos, este artigo encontra-se direcionado para o estabelecimento de termos comparativos entre os desempenhos de arranjos em CC com as configurações CSC-LCC e CSC-CCC, focando, sobretudo, seus desempenhos dinâmicos diante da ocorrência de faltas na rede de conexão da estação inversora.

Palavras-Chave -- Transmissão em CC, Current Source Converters, LCC, CCC, simulação, RTDS.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos primeiros elos comerciais de transmissão de energia elétrica utilizando corrente contínua em alta tensão (CCAT) datam do início da década de 30 onde as primeiras válvulas à vapor de mercúrio e os primeiros arranjos topológicos de conversores de potência CA-CC adquiriram características mais robustas e confiáveis. Muito embora exista relatos de sistemas experimentais em CCAT na década acima citada, o marco histórico do considerado primeiro sistema CCAT ocorreu em 1954, quando o então Conselho Sueco de Energia procedeu a favor do comissionamento do complexo de transmissão submarino de 20MW, 110kV, que interliga a ilha de Gotland e o continente sueco. [1]

As vantagens advindas do emprego da tecnologia em pauta foram se tornando conhecidas e, não obstante as particularidades associadas com custos e pouco domínio mundial sobre o tema, o fato é que a difusão dos sistemas em corrente contínua rapidamente foi estendida para diversas outras aplicações no mundo. Também, muito embora o desbravamento da técnica tenha sido iniciada pela conhecida empresa sueca, hoje denominada por ABB, as perspectivas aplicativas da estratégia ora posta para a transmissão da energia foram logo seguidas por outras empresas. Neste particular, empresas, a exemplo da Siemens, Areva e Alston, dentre outras, detêm o conhecimento da matéria e pesquisa continuam sendo realizadas visando o aprimoramento dos processos de conversão e transmissão aqui considerados.

Focando, sobretudo, o contexto atual dos desenvolvimentos, reconhece-se que os processos de conversão CA-CC-CA encontram-se alicerçados nas topologias denominadas por CSC (*Current Source Converter*) [2] e VSC (*Voltage Source Converter*) [2]. Apesar de ambas configurações serem passivas de ser usadas na transmissão de energia elétrica em corrente contínua, os arranjos CSC apresentam propriedades mais atrativas para a transmissão de valores de potência ativa elevados, portanto, esta estratégia de conversão se apresenta como aquela comercialmente mais praticada no mundo. Ainda adentrando nas configurações identificadas por CSC, reconhece-se, ainda, que duas vertentes encontram, na atualidade, aplicação. Uma delas se baseia no que se denomina por topologia LCC (*Line Commutated Converter*) [2], e outra, reconhecidamente denominada por CCC (*Capacitor Commutated Converter*) [2]. As particularidades de cada uma delas serão consideradas em detalhadas nas seções procedentes.

À luz dos aspectos ora postos, o presente artigo visa, sobretudo, tecer considerações sobre as topologias de conversão CSC-LCC e CSC-CCC, visto que estas se apresentarem como opções aplicadas no contexto brasileiro e em franco uso por empresas transmissoras de energia.

Essencialmente, somado a apresentação sumária destas configurações e uma descrição física da sua operação, são então obtidos modelos implementados no simulador RTDS (*Real Time Digital Simulator*) [3] através de seus recursos pré-existent. Partindo de uma configuração típica empregada para diversos estudos correlatos no mundo, são então realizadas investigações sobre o desempenho destes arranjos. Tal complexo compreende o arranjo equivalente de potência e de controle que constitui o sistema Benchmark HVDC desenvolvido pelo CIGRÉ em 1985 [4], o qual se apresenta, originalmente, constituído por conversores CSC-LCC de potência monopolar, 500kV e 1000MW. A partir dos resultados obtidos, que correspondem a operação do complexo sob condições transitórias, dinâmicas e em regime permanente, torna-se então possível correlacionar as grandezas operativas atreladas com as duas configurações, considerando-se uma mesma transmissão de potência, sob condições similares quanto ao arranjo elétrico, níveis de tensão e situações operacionais impostas. Tais estudos se fazem passíveis de realização através de uma plataforma amigável implementada, baseada no *software* RSCAD, o qual é responsável pela interface gráfica do usuário com o *hardware* de processamento dedicado da RTDS.

II. CONFIGURAÇÕES FÍSICAS DOS CONVERSORES CSC-LCC E CSC-CCC

A. Conversor CSC-LCC

A configuração topológica do conversor LCC, mostrada na Fig. 1, parte da premissa da utilização de uma ponte conversora trifásica de seis pulsos convencional, conhecida como ponte de Graetz. Comparativamente com outras topologias de retificação apresentadas na literatura, este arranjo oferece meios para uma melhor utilização da potência das unidades de transformação e baixos picos de tensão nas válvulas tiristorizadas [5]. Estas propriedades motivaram a sua utilização para o primeiro link CCAT-Gotland (1954), respeitado o fato que, àquela época, os dispositivos utilizados eram válvulas à vapor de mercúrio.

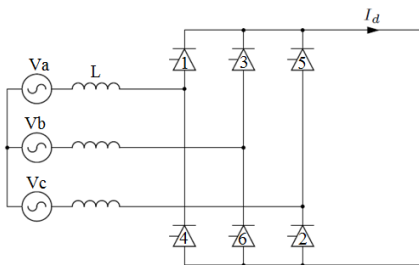


Fig. 1 – Topologia da ponte conversora do arranjo CSC-LCC.

Devido ao fato que a topologia LCC foi desenvolvida considerando uma corrente CC de valor ajustado e constante se estabelecendo pela linha, algumas consequências deste modo de operação são relacionada abaixo [6]:

- As válvulas somente podem ser disparadas quando existir uma tensão anodo-catodo positiva, fato este que implica em correntes alternadas com características indutivas e com valores elevados de distorções harmônicas injetadas no sistema CA

de suprimento, fato deste que determina a utilização de bancos de capacitores e filtros;

- As válvulas não podem ser retiradas de operação instantaneamente, visto a necessidade que a corrente fluindo através destas seja nula e a subsequente tensão anodo-catodo negativa, originando, portanto o conhecido efeito da comutação;
- As tensões requeridas para o disparo e bloqueio das válvulas são originados por um sistema CA existentes - o termo *Line Commutated Converter* (LCC) é originado desta lógica operacional;
- Apesar de se fazer possível a inversão de fluxo de potência pelas linhas, não existe a possibilidade da inversão do sentido da corrente que flui pelo sistema;
- Em sistemas CA com baixos níveis de curto circuito, problemas de instabilidade podem levar a falhas operativas.

Não obstante os pontos ressaltados, é evidente que nenhum deles foi limitador para as demais qualidades que a topologia em pauta apresenta.

B. Conversor CSC-CCC

Como indicado na Fig. 2, a presente topologia se diferencia da tradicional somente pela presença de bancos de capacitores em série com a rede CA convencionalmente utilizada. Entretanto, esta diferença implica em uma série de novas dificuldades de operação do elo, e, apesar de desde a década de 50 se cogitar o uso desta topologia, somente em Garabi (1997), em um link entre Brasil e Argentina, que a mesma se fez operante em escala comercial.

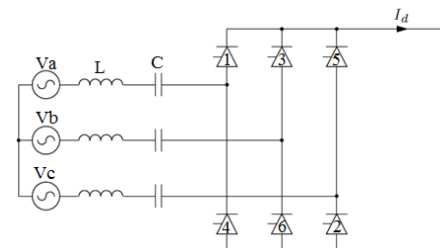


Fig. 2 – Topologia da ponte conversora do arranjo CSC-CCC.

Dentre as vantagens oferecidas pelo arranjo em pauta, vale ressaltar três pontos, que foram determinantes para a definição desta estrutura para o sistema *back-to-back* de Garabi, e que se apresentam como motivadores para que a topologia CCC seja utilizada [2]. São eles:

- A necessidade de bancos de capacitores em paralelo com a rede, para a compensação de reativos anteriormente destacada, não se faz necessária, como na topologia LCC, visto que esta função pode ser realizada pelos capacitores em série. De fato, a drástica diminuição da demanda de potência reativa permite a operação destes arranjos com fator de potência unitário;

- A alternativa CCC possui uma dinâmica de operação mais estável para sistemas CA mais fracos (relação entre nível de curto circuito e potência a ser transmitida pelo elo menor do que 2,5);
- Uma vez que a impedância dos capacitores é tipicamente várias vezes maior do que a impedância do transformador, as magnitudes das correntes de curto circuito são consideravelmente diminuídas quando da ocorrência de falhas do lado CC, permitindo assim a otimização da vida útil dos transformadores e das válvulas;

No que tange ao valor do banco de capacitores em série, vale ressaltar que unidades de pequeno valor resultam em sobretensões nos terminais das válvulas, além do não suprimento da potência reativa necessária à operação do sistema. Por outro lado, o sobre dimensionamento dos mesmos irá resultar em efeitos contrários, podendo até, resultar em solicitação de correntes capacitivas do sistema CA. As recomendações em prática indicam que tais unidades capacitivas não provoquem sobretensões maiores do que 10% nas válvulas, e ainda, que seja almejado um fator de potência unitário para as pontes. Assim procedendo, de acordo com [2], seria atingido uma especificação econômica e adequada à operação do complexo.

Com relação ao comportamento da tensão nos terminais das unidades capacitivas, sabendo que esta grandeza é definida pela corrente Id e o tempo de condução de cada válvula, a tensão no capacitor é maior a medida que a mencionada corrente é incrementada. Isto vai na contramão do que acontece com o arranjo LCC convencional.

III. REAL-TIME DIGITAL SIMULATOR – RTDS

O equipamento intitulado RTDS representa o resultado de pesquisas realizadas pela Manitoba HVDC Research Centre, nos meados da década de 80, cujo propósito inicial era de se obter uma plataforma de tempo real para realização de estudo associados a fenômenos de transitórios eletromagnéticos. Essencialmente o RTDS foi desenvolvido para que fosse factível a implementação de um sistema CC completo (estações conversoras, controle, proteção, filtros) em um conjunto hardware-software confiável para a representação dos fenômenos eletromagnéticos associados a operação do elo de corrente contínua Nelson River (Alstom), e que pudesse, em tempo real, simular as diversas condições operativas deste sistema.

Para o atendimento a tais premissas, o RTDS (*Real-Time Digital Simulator*) foi desenvolvido em uma plataforma DSP (*Digital Signal Processor*) e RICS (*Reduced Instruction Set Computer*), a qual utiliza técnicas avançadas de processamento paralelo com um intuito de atender aos quesitos de velocidade de resposta transitória, mantendo assim a continuidade da operação em tempo real. Portanto, uma grande parte da funcionalidade do RTDS se deve aos cartões de processamento. Naturalmente, com a evolução da tecnologia empregada em processadores, os cartões de

processamento do RTDS foram evoluindo, desde os cartões RPC, ao 3PC, ao GPC e o agora o PB5.

Com relação ao *software*, o RTDS possui uma plataforma amigável intitulada RSCAD, a qual, em sua biblioteca, possui recursos pré-modelados de máquinas elétricas, de equipamentos de controle e proteção, de elementos de circuitos, de linhas de transmissão, cabos, dentre outras. A Fig. 3 ilustra os módulos de um RTDS.



Fig. 3 - RTDS (Real-Time Digital Simulator)

IV. O SISTEMA CC – “CIGRÉ HVDC BENCHMARK”

O sistema CIGRÉ HVDC Benchmark constitui-se em um arranjo monopolar, de 500kV e 1000MW, 12 pulsos, em que ambas estações conversoras (retificador e inversor) se encontram conectadas a sistemas CA relativamente frágeis, caracterizados por uma razão entre a potência transmitida pelo elo e o nível de curto circuito da rede menor do que 2,5, como destacado em [7] e ilustrado na Fig. 4. Esta propriedade, para fins do sistema de controle, cria graus de dificuldades maiores no que tange ao fenômeno da falha de comutação e outros atrelados com condições dinâmicas de operação. Para tanto, o sistema ora destacado, em sua configuração original (LCC) é utilizado e, na sequência, o arranjo é modificado para a inserção da topologia CCC, o que é feito através da adição de um capacitor série no circuito de comutação das válvulas. Para o atendimento da segunda opção, procedeu-se a retirada do capacitor shunt das barras de retificação e inversão e foram inseridos capacitores série, nos termos indicados na Fig. 2. O valor da capacitância em paralelo de 3,342μF foi então substituído por uma unidade de 186μF, fato este que garantiu a manutenção da potência reativa requerida pela ponte. Esta nova topologia do sistema HVDC Benchmark do Cigré, utilizando o arranjo CCC, se encontra ilustrada na Fig. 5, com seus respectivos dados na Tabela I.

V. ESTUDOS DE CASOS

Por princípio, os estudos aqui apresentados destinam-se a elucidar situações operativas típicas e estabelecer termos comparativos entre os arranjos topológicos LCC e CCC fornecidos pela simulação feita na plataforma de simulação em tempo real do RTDS. Dentre uma diversidade de situações passíveis de estudos e discussões (regimes: permanente, transitório e dinâmico), optou-se, para fins deste trabalho, a apresentação do desempenho do complexo em CC em foco diante das seguintes situações operacionais representativas do comportamento dinâmico do arranjo:

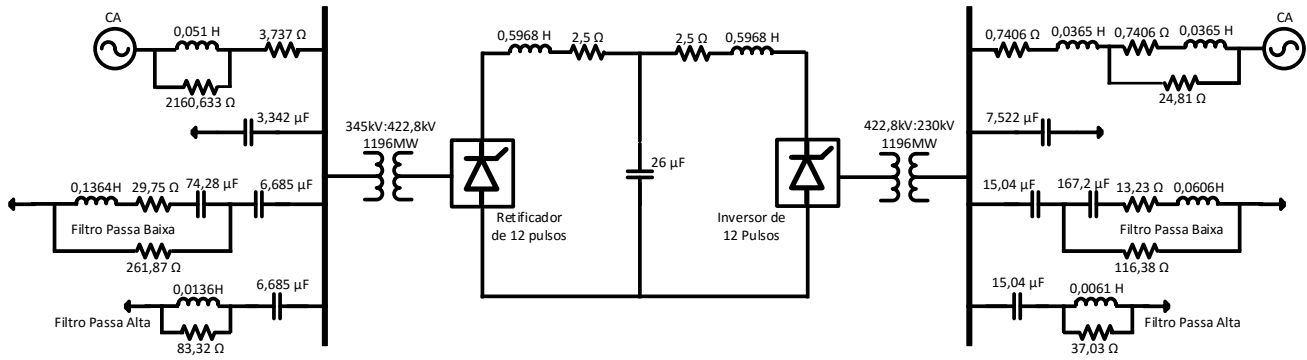


Fig. 4 - Diagrama Unifilar do Sistema HVDC Benchmark do CIGRÉ – Topologia CSC-LCC.

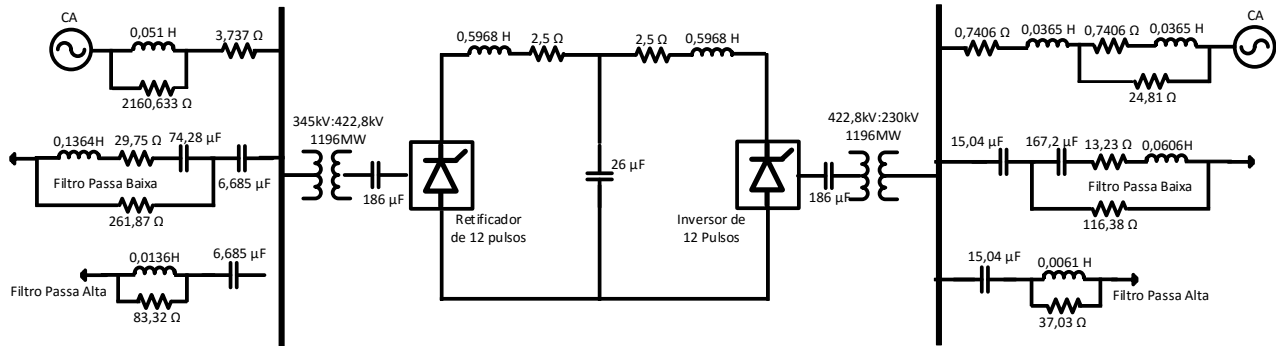


Fig. 5 - Arranjo modificado do Sistema HVDC Benchmark do CIGRÉ – Topologia CSC-CCC.

- Caso 1 – avaliação da resposta do complexo CC diante da ocorrência de uma falta monofásica na estação inversora;
- Caso 2 – avaliação da resposta do complexo CC diante da ocorrência de uma falta trifásica na estação inversora.

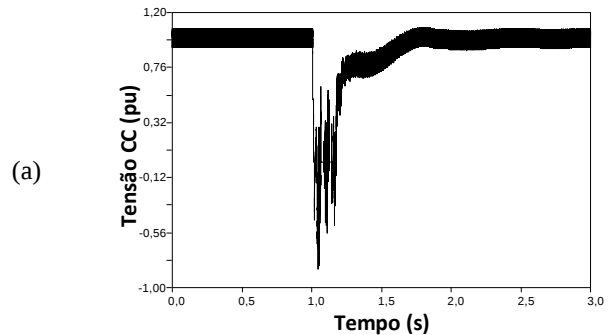
A escolha feita quando ao ponto físico para as investigações, qual seja, estação inversora se fundamenta numa maior fragilidade operacional desta estação diante da manifestação de faltas. Também, vale lembrar que questões associadas com estudos comparativo entre os arranjos CSC-LCC e o CSC-CCC, em regime permanente, se apresentam como temas explorados na literatura, o que justifica, a opção por desempenhos sobre condições dinâmicas, como aqui feito.

TABELA I - PARÂMETROS DO SISTEMA HVDC BENCHMARK DO CIGRÉ

Parâmetros	Retificador	Inversor
Tensão base AC	345 kV	230 kV
Potência base	100 MVA	100 MVA
Tap de Transferência (AT)	1,01 p.u.	0,989 p.u.
Tensão da fonte	$1,088 \angle 22,18^\circ$	$0,935 \angle -23,14^\circ$
Tensão nominal DC	500 kV	500 kV
Corrente nominal DC	2 kA	2 kA
Impedância do transformador	0,18 p.u.	0,18 p.u.
Impedância da fonte	$R=3,737 \Omega$ $L=0 \text{ H}$	$R=0,7406 \Omega$ $L=0,0365 \text{ H}$
Capacitância (Somente para o arranjo CSC-CCC)	186 μF	186 μF
Frequência do sistema	50 Hz	50 Hz
Ângulos nominais	$\alpha=15^\circ$	$\gamma=15^\circ$

A. Caso 1 – regime dinâmico de operação – falta monofásica na estação inversora

Este primeiro estudo visa, sobremaneira, ilustrar as respostas dinâmicas comparativas entre dos arranjos CSC-LCC e CSC-CCC frente a uma falta monofásica, imposta a fase A da rede CA de conexão da inversora. Com relação as características das faltas, estão são aplicadas no instante em que a tensão da fase A passa por seu zero e, sequencialmente, decorridos 0,15s, a mesma é extinta. A resistência de falta foi adotada como 0,1 Ω . A Fig. 6. Ilustra o comparativo entre as tensões CC na entrada da estação inversora para as duas topologias em discussão.



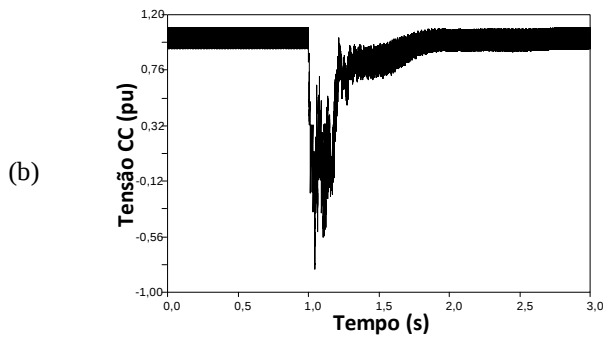


Fig. 6 – Dinâmica das tensões CC na estação inversora diante da ocorrência da falta fase-terra. (a) Arranjo CSC-LCC e (b) Arranjo CSC-CCC.

Complementarmente, a Fig. 7 ilustra as correntes na linha CC, em valores pu, para ambos os arranjos. Nestas é possível estabelecer termos comparativos entre os valores de pico decorrentes da falta sob consideração.

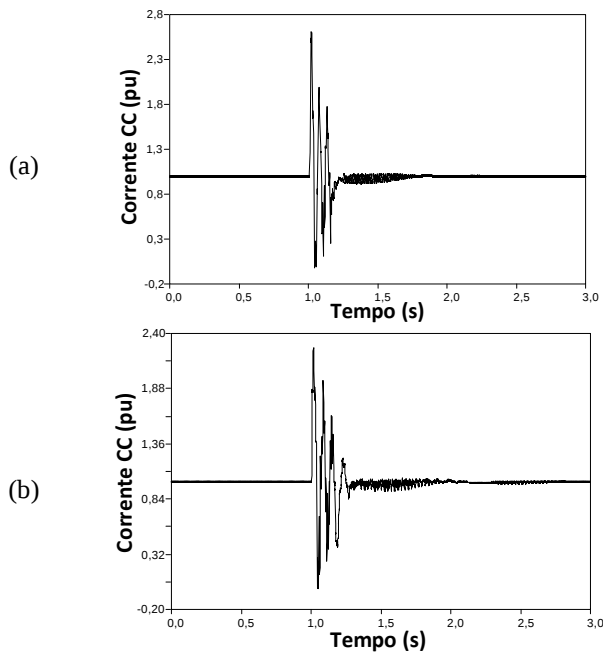


Fig. 7 - Dinâmica das correntes CC diante da ocorrência da falta fase-terra. (a) Arranjo CSC-LCC e (b) Arranjo CSC-CCC.

Por fim, a Fig. 8 contempla as correntes CA da fase A ao longo do processo.

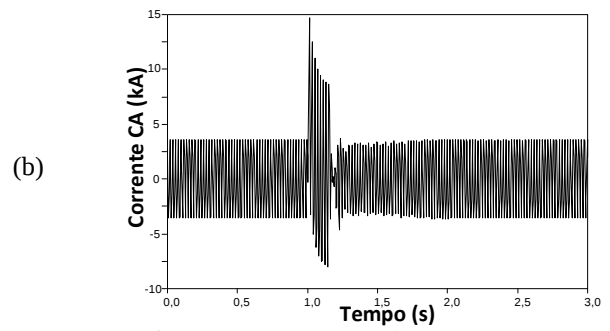
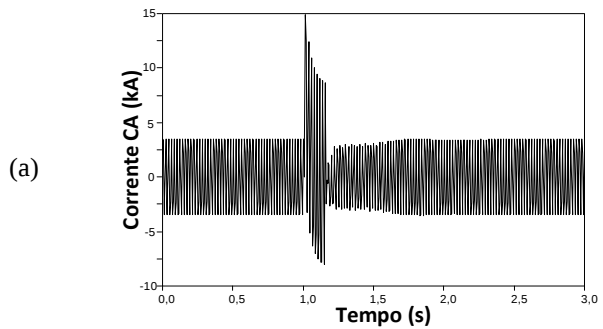


Fig. 8 - Dinâmica das correntes CA, da fase A, na estação inversora diante da ocorrência da falta fase-terra. (a) Arranjo CSC-LCC e (b) Arranjo CSC-CCC.

A tabela II sintetiza os valores e permite uma pronta correlação comparativa entre as topologias CSC-LCC e a CSC-CCC no tocantes às tensões CC, as correntes CC e as correntes CA.

TABELA II – VALORES COMPARATIVOS ENTRE AS GRANDEZAS REPRESENTATIVAS DO DESEMPENHO DINÂMICO DOS ARRANJOS LCC E CCC DIANTE DE UMA FALTA FASE-TERRA.

Simulador	Tempo de assentamento da tensão CC (s)	Valor de pico da Corrente CC (pu)	Corrente de pico CA Inversor (kA)
Topologia CSC-LCC	1,34	2,61	14,7
Topologia CSC-CCC	1,03	2,23	14,5

B. Caso 2 – regime dinâmico de operação – falta trifásica na estação inversora

Prosseguindo com os estudos comparativos de desempenho do complexo CC procede-se, nesta seção, ao processo avaliativo do comportamento do sistema diante da ocorrência de uma falta trifásica aplicada do lado CA da estação inversora. A Fig. 9 mostra o desempenho da tensão CC ao longo do período de estudos.

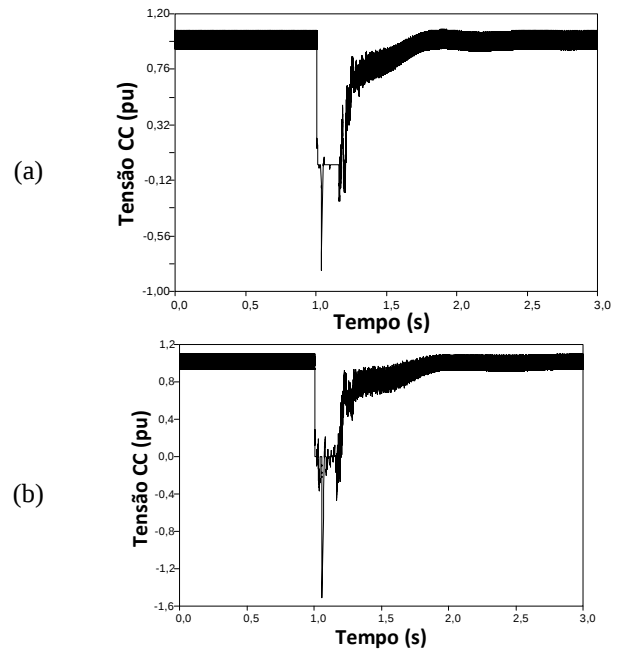


Fig. 9 - Dinâmica das tensões CC na estação inversora diante da ocorrência da falta trifásica. (a) Arranjo CSC-LCC e (b) Arranjo CSC-CCC.

A Fig. 10 mostra o desempenho das correntes CC registradas quando da ocorrência de uma falta trifásica na estação inversora para os arranjos CSC-LCC e CSC-CCC.

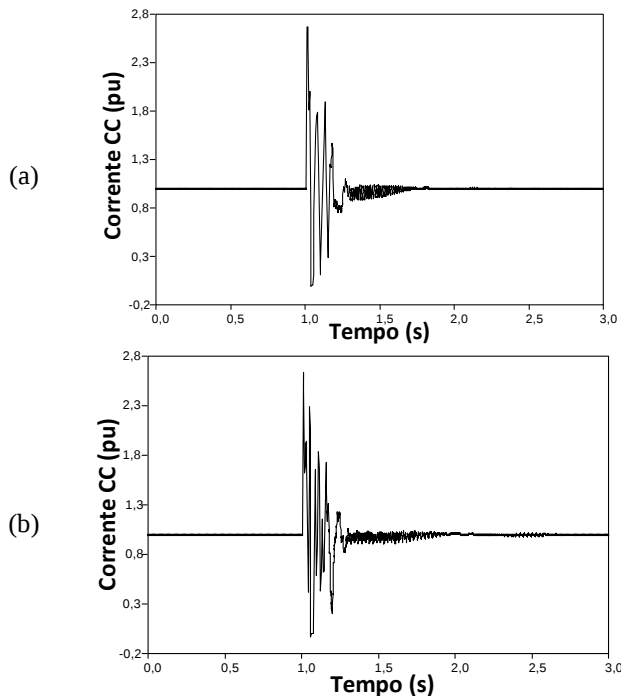


Fig. 10 - Dinâmica das correntes CC diante da ocorrência de falta trifásica. (a) Arranjo CSC-LCC e (b) Arranjo CSC-CCC.

Finalmente, a Fig. 11 ilustra a dinâmica da corrente CA da fase A para a situação em pauta, para de falta trifásica na estação inversora.

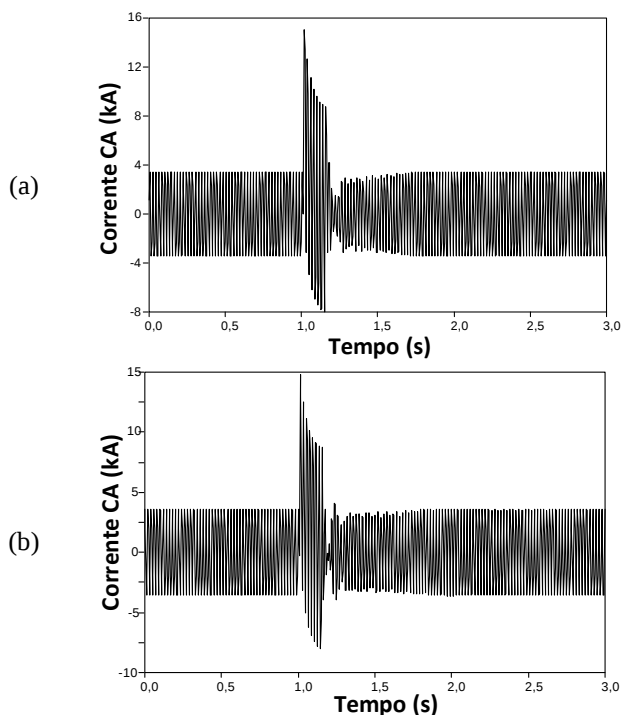


Fig. 11 - Dinâmica das correntes CA, da fase A, na estação inversora diante da ocorrência da falta trifásica. (a) Arranjo CSC-LCC e (b) Arranjo CSC-CCC.

Concluindo, a Tabela III sintetiza os valores e permite uma correlação numérica entre os desempenhos das topologias CSC-LCC e a CSC-CCC quando da manifestação de uma falta trifásica, nos termos postos.

TABELA III - VALORES COMPARATIVOS ENTRE AS GRANDEZAS REPRESENTATIVAS DO DESEMPENHO DINÂMICO DOS ARRANJOS LCC E CCC DIANTE DE UMA FALTA TRIFÁSICA

Simulador	Tempo de assentamento da tensão CC (s)	Valor de pico da Corrente CC (pu)	Corrente de pico CA Inversor (kA)
Topologia CSC-LCC	1,37	2,67	15
Topologia CSC-CCC	0,94	2,62	14,8

VI. CONCLUSÃO

Em consonância com os propósitos estabelecidos para o presente artigo, qual seja, o emprego do RTDS como ferramenta para estudos de desempenho de sistemas integrados CA-CC visando o conhecimento de suas condições operativas sob situações de regime transitório, dinâmico e de regime permanente. Neste contexto, o trabalho buscou, de forma pontual, apresentar as características físicas que perfazem as estações conversoras CSC-LCC e CSC-CCC e, a partir de um arranjo típico mundialmente utilizado, proceder a um conjunto de análises de condições operativas objetivando uma comparação do desempenho das duas topologias supra postas.

Visando uma correlação entre o desempenho, foram então simuladas duas situações operativas factíveis de manifestação em campo. Uma atrelada com a incidência de um curto-circuito fase-terra, e outra, com uma falta trifásica franca. Os resultados destacaram, de forma clara, que os comportamentos dinâmicos destes arranjos se mostraram extremamente próximos, fato este que aponta, à luz do caso investigado, que ambas configurações não se mostram significativamente diferentes quanto a este quesito.

Por fim, fica aqui registrado o reconhecimento dos autores que o trabalho ora apresentado se constituiu como uma experiência no emprego do simulador RTDS para os fins explorados, sem a pretensão de afirmar que o comportamento obtido possa ser prontamente estendido a outras configurações outras que a aqui empregada.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] E. W. Kimbark. "Direct Current Transmission – Volume 1". Wiley-Interscience, Nova Iorque, 1971.
- [2] V. K. Sood. "HVDC and FACTS Controllers – Applications of Static Converters in Power Systems". Klumer Academic Publishers, Nova Iorque, 2004.
- [3] Kuffel, R., et.al., "RTDS - A fully digital power system simulator operating in real-time", Proc. of the ICDS 95, College Station, Texas, EUA, Abril 1995, pp. 19-24.
- [4] M. Szechtman, T. Wess, and C. V. Thio, "First benchmark model for HVDC control studies," Electra, no. 135, pp. 54–67, Abril 1991.
- [5] C. Kim, V. K. Sood, G. Jang, S. Lim, S. Lee. "HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power System". IEEE Press – John Wiley & Sons, 2009.
- [6] J. Arrillaga, Y. H. Liu, N. R. Watson. "Flexible Power Transmission – The HVDC Options". John Wiley & Sons, Inglaterra , 2007.
- [7] T. V. Silva, P. H. O. Adami, P. M. da Silveira, J. C. de Oliveira. "Estudos de desempenho de complexos de transmissão CA-CC sob condições transitórias, dinâmicas e permanentes utilizando o RTDS". XI CBQEE, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2015.