

Modelagem de um Sistema Benchmark HVDC Híbrido Para Análise Multi-Infeed

Davison de Oliveira Souza
Departamento de Engenharia Elétrica
Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
(CEFET-RJ)
Rio de Janeiro, Brasil
davisondeoliveira.souza@gmail.com

João Amin Moor Neto
Departamento de Engenharia Elétrica
Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
(CEFET-RJ)
Rio de Janeiro, Brasil
joao.neto@cefet-rj.br

Abstract— Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento e implementação de um sistema *benchmark* no programa PSCAD de uma topologia híbrida para transmissão em corrente contínua em alta tensão (CCAT) em um nível de tensão de ± 500 kV e comparar com um sistema LCC-HVDC, analisando o tempo de recuperação de potência dos sistemas na presença de faltas como prova de conceito. A análise inclui a comparação de uma configuração *Multi-Infeed* contendo conversores LCC com uma rede com a tecnologia híbrida (conversor LCC e VSC-MMC) e a outra contendo apenas conversores LCC.

Keywords— *Benchmark, CCAT, Falha de comutação, LCC-HVDC, MMC, Sistema Híbrido.*

I. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para estudos básicos operacionais de sistemas LCC-HVDC, pode-se fazer uso do modelo de referência HVDC *benchmark system* do CIGRÉ disponibilizados em diferentes plataformas de simulação, tais como, PSCAD, SIMULINK e etc [1]. A tecnologia LCC é considerada madura e confiável devido ao tempo que já está sendo utilizada, há mais de 50 anos, e a vantagem de possuir uma potência e eficiência maior, e o menor custo comparado ao modelo baseado em tecnologia VSC [2]. Porém, o LCC, possui a desvantagem de ser susceptível a falhas de comutação (FC) por faltas do lado CA. Sendo assim, esse sistema deve ser conectado a redes CA suficientemente fortes para que as possíveis FCs não venham a impactar na operação do conversor LCC. Os sistemas LCC-HVDC, ainda se caracterizam pela incapacidade de controlar de forma independente a potência ativa e reativa, necessidade de utilização de filtros passivos para redução de conteúdo harmônico e fornecimento de reativos para a demanda do conversor LCC, incapacidade de inverter o fluxo de corrente, entre outros problemas [3]. A falha de comutação na tecnologia LCC e a recuperação de potência do sistema perante a faltas tem uma grande importância no contexto de estudos de sistemas de transmissão de energia em corrente contínua.

Por outro lado, apensar do custo mais elevado e perdas maiores, a tecnologia VSC possui uma série de vantagens sobre a tecnologia LCC, como a capacidade de desligar suas válvulas através de um pulso elétrico, a capacidade de operar em redes fracas ou desligadas sem suporte de energias reativas, controle independente de potência ativa e reativa, pode operar sem a necessidade de filtragem, e capacidade de partida em *black start* [4]. Para aplicações em CCAT (corrente

contínua em alta tensão), torna-se interessante estudos com a versão da tecnologia de conversores *Voltage Source Converter* (VSC) do tipo modular multinível, o que é conhecido como *Modular Multilevel Converter* (MMC) [5]. Com base nas duas tecnologias, verifica-se a aplicação de sistemas de transmissão em corrente contínua em alta tensão (HVDC) híbridos, que são baseados em conversores LCC e MMC [6], sendo que neste caso em particular, a opção foi direcionada um bipolo LCC-VSC. Este trabalho visa analisar o comportamento de um sistema HVDC multi-infeed [7], que foi baseado na estrutura clássica do CIGRÉ HVDC Benchmark System, bem como, em um outro bipolo desenvolvido com a sistema HVDC híbrido, ou seja, lado retificador baseada na estrutura LCC e com o lado retificador implementado com a topologia MMC. Sendo que esse sistema LCC/VSC HVDC-híbrido benchmark foi desenvolvido mantendo as premissas do sistema original do CIGRÉ HVDC Benchmark System, o qual é baseado em conversores LCC. Na seção II será apresentada a implementação do sistema LCC/VSC HVDC-híbrido benchmark, na seção III aspectos sobre a interação entre conversoras de sistemas HVDC, na seção IV resultados de simulações no programa PSCAD e por fim, na seção V as conclusões sobre este trabalho.

II. SISTEMA HVDC HÍBRIDO BENCHMARK

Foi utilizado um sistema LCC-HVDC bipolar (Bipolar HVDC Transmission System) que é disponibilizado pela página de acesso aos arquivos do programa PSCAD, o qual representa o modelo do CIGRÉ HVDC Benchmark [8]. Também foi adotado um modelo disponibilizado também pela mesma página de acesso, mas com outro caminho final, a partir do qual foi acessado o arquivo um modelo de sistema HVDC baseado na tecnologia MMC [9]. Com base nesses dois modelos de bipolos (LCC-HVDC e MMC-HVDC), foi estruturado um modelo híbrido HVDC bipolar. A estrutura do sistema é apresentada na Figura 1.

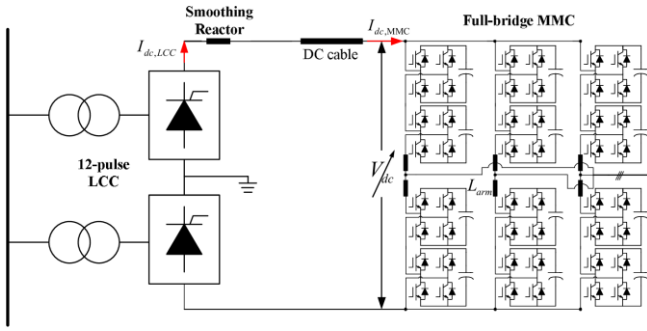


Fig. 1. Sistema de transmissão HVDC híbrido convencional com LCC e FB-MMC (Y. Lee, S. Cui, S. Kim, S. Sul (2014)) [10].

A. Controle do conversor LCC (Retificador)

A estratégia de controle do retificador LCC foi implementada considerando um controlador PI, com a saída de referência de ângulo de disparo para manipular a tensão contínua no lado do retificador. A estrutura da estratégia de controle do retificador LCC é mostrado na Figura 2. Um limitador de ordem de corrente dependente da tensão (VDCOL) foi utilizado para limitar a corrente de referência. Com o VDCOL, a corrente de referência será reduzida automaticamente, quando a tensão contínua diminuir durante perturbações [11].

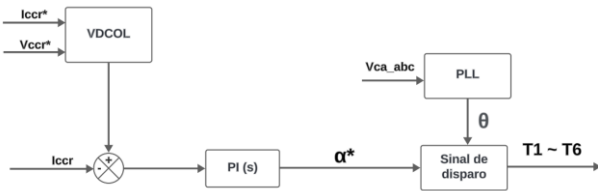


Fig. 2. Estratégia de controle da corrente CC do retificador LCC.

B. Controle do Conversor MMC (Inversor)

O controle do MMC consiste em três blocos, conforme a Figura 3, sendo o controle externo responsável por receber as variáveis de entrada (Potência ativa (P) ou tensão contínua (Vdc), e Potência reativa (Q) ou tensão alternada (Vca) e transformar esses valores em correntes em referências síncronas (eixo q e eixo d) para ser enviado ao bloco de controle interno, onde será obtida a tensão de referência no eixo dq, que será transformada na tensão de referência abc a ser enviada para o PWM, que será responsável por enviar os disparos para o conversor. Neste trabalho adotou-se a técnica PSC-PWM (*phase-shifted carrier PWM*) [12]. Importante ressaltar que associado ao controle de disparos consta um bloco que é responsável pelo balanceamento das tensões nos capacitores dos sub-módulos [13-14]. Para operação correta deste conversor, é necessário que cada célula seja inserida durante cada período de controle corretamente, pois se caso tenha uma diferença de tensão poderá ser gerado uma grande ondulação nas tensões CC, gerando também correntes circulantes de valor elevado [14].

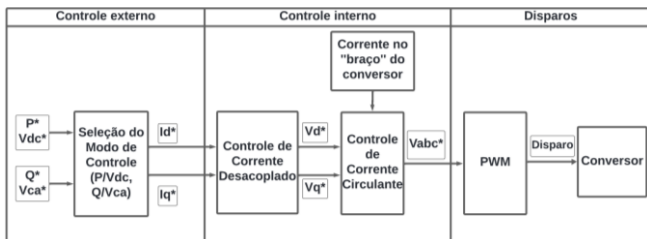


Fig. 3. Estratégia de controle do inversor MMC.

Neste caso, têm-se o controle externo para as tensões CC, CA, e um controle interno para o controle das correntes, para realizar o controle do fluxo de potência. O controle interno recebe os valores de referência do controle externo. Os dois controles atuam em cascata, sendo necessário que o controle interno seja mais rápido que o externo para não perder estabilidade [15]. No controle interno consta ainda a parte reativa relativa à supressão de correntes circulantes que no PSCAD é baseado em um controlador PI. As correntes circulantes caso não sejam controladas podem gerar uma tensão CC e harmônicos de ordem par [13]. A Figura 4 apresenta um exemplo ilustrativo sem indicar os controles de corrente circulante e de balanceamento de tensão nos capacitores dos sub-módulos. Constan a tensão CC (V_{dc}) e tensão CA (V_{ac}), a potência reativa (Q) e a potência ativa (P), com os respectivos valores de referência que serão a entrada do controle externo.

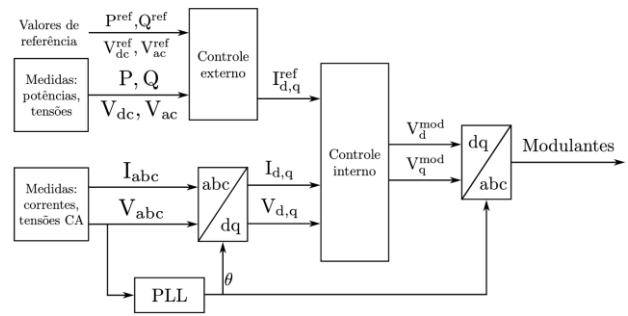


Fig. 4. Estratégia de controle do inversor MMC (N. Y. Suzuki (2018)) [23].

C. Caracterização do Sistema Híbrido LCC-VSC

O conversor LCC do lado retificador mantém as mesmas premissas técnicas do sistema exemplo CIGRÉ HVDC Benchmark [1], o qual está disponível na plataforma do programa PSCAD [8]. Foi mantida a mesma tensão de 500kV e a potência de 1000MVA. Preservou-se o mesmo nível de curto-circuito na fonte trifásica da estação retificadora: *Short Circuit Ratio* (SCR) = 2.5 e *Effective Short Circuit Ratio* (ESCR) = 1.9.

No que se refere ao bipolo com tecnologia MMC do lado inversor, foi necessário adotar alterações substanciais nos parâmetros do circuito de potência, bem como, modificar os ajustes dos controladores PI utilizados nas malhas de controle. Os principais parâmetros adotados para os componentes do braço do MMC:

- Números de sub-módulos baseados na topologia ponte completa (*Full-Bridge SM*) [16], um total de 100 sub-módulos, com tensão de 5 kV.
- Valor da capacitância em cada sub-módulo foi especificado de acordo com a relação da energia-potência (EP)[17]. O valor obtido foi de $C_{SM} = 4667 \mu F$.
- Valor da indutância do braço foi especificada conforme o critério para evitar a ressonância com o capacitor do braço [16], bem como, considerou-se que o valor da reatância deve ficar próximo a 10% a 15% da impedância base [18]. Assim, adotou-se um valor de $L_{(arm_res)} = 50 \text{ mH}$.

III. SISTEMA MULTI-INFEED

Um sistema *Multi-Infeed* é uma configuração em que o sistema possui múltiplas conexões de fonte de energia. Nesse trabalho será considerado sempre duas redes conectadas através de uma linha de transmissão de corrente alternada.

A. Multi-Infeed Interaction Factor (MIIF)

O Fator de interação *Multi-Infeed* (MIIF) representa o nível de interação entre duas redes CA [19]. O MIIF de uma barra j em relação a uma barra i é a razão entre a variação de tensão na barra j pela variação de tensão na barra i quando se aplica uma variação de tensão na barra i , e objetiva-se verificar a sensibilidade da tensão na barra j em relação a barra i . O MIIF é um índice simples de calcular que fornece uma visão razoável do desempenho do sistema *Multi Infeed*, mas ele não substitui métodos mais avançados e mais detalhados de análise de sobretensão, falha de comutação, estabilidade, dentre outros. É recomendado que o MIIF tenha um valor limite de 0,15, sendo que para valores menores que esse patamar as interações entre dois conversores HVDC podem ser ignoradas [19].

B. Caracterização dos Sistemas Analisados

A potência do sistema utilizado será de cada elo bipolar single-infeed de 500MW transmitida em corrente contínua, sendo a potência total dos dois elos de 1000MW. Além disso, O sistema CC conecta outros dois sistemas CA por meio de uma linha de transmissão (LT) de ± 500 kV_{CC}. Os sistemas CA, por sua vez, são referentes às estações retificadora (345 kV) e inversora (230 kV). Para a obtenção do sistema desejado, duplicou-se o elo de corrente contínua original, passando de um sistema *Single-Infeed* para um sistema *Dual-Infeed*, com um sistema híbrido e o outro LCC. Tanto a potência quanto a tensão mantem-se as mesmas, alterando-se apenas o tipo de conversores. Foi utilizado um modelo PI de LT CA disponível no PSCAD para conectar ambos os elos.

1) Multi-Infeed com Conversores LCC (Caso 1)

Está ilustrado na Figura 5 o sistema benchmark adaptado para um sistema *Multi-Infeed* com conversores LCC. As especificações estão ilustradas na Tabela I e na Tabela II.

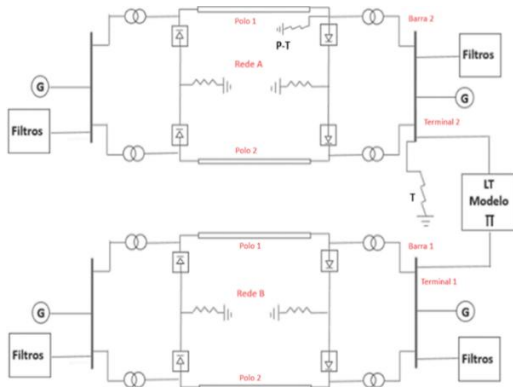


Fig. 5. Rede Multi-infeed com LCC bipolar.

TABLE I. DADOS DO SISTEMA MULTI-INFEED LCC.

Principais parâmetros do sistema Multi-Infeed LCC		
Parâmetros	Retificador	Inversor
Tensão CA Nominal	345kV	230kV
Tensão CC Nominal	500kV	500kV
Potência nominal da Linha CC	1000MW	1000MW
Frequência	50Hz	50Hz
Transformadores	345/213,73kV	230/209.23kV

TABLE II. PARÂMETROS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO CA.

Parâmetros das linhas de transmissão	
Resistência da linha CC	2,5 ohm
Indutância da linha CC	0.5968 H
Sequência positiva	
Resistência da linha CA	4.13844E-5 [ohm/m]
Indutância da linha CA	3.57705E-4 [ohm/m]
Capacitância da linha CA	214.5186 [Mohm*m]
Sequência zero	
Resistência da linha CA	2.63781E-4 [ohm/m]
Indutância da linha CA	1.049003E-3 [ohm/m]
Capacitância da linha CA	420.6247 [Mohm*m]

O MIIF pode ser calculado levando-se em consideração a matriz de impedância do sistema, onde os únicos elementos utilizados na construção da matriz Y_{barra} são as impedâncias da rede CA, sendo desconsiderados os elementos shunt [19]. A partir dos dados do sistema obtidos em PU é determinada a matriz Y_{barra} e depois a sua inversa Z_{barra} , para possibilitar o cálculo do MII relativo ao sistema em questão. A Tabela III resume os valores de MIIF para as barras 1 e 2 que por meio da LT conectam os dois bipolos.

TABLE III. RESUMO DOS CÁLCULOS DO MIIF PARA O CASO 1.

Resumo dos cálculos do MIIF		
	Barra 1	Barra 2
Barra 1	1,00	0,15
Barra 2	0,15	1,00

2) Multi-Infeed com Conversores LCC e MMC (Caso 2)

A Figura 6 apresenta o sistema benchmark adaptado para conversores LCC e Híbrido. A Tabela IV resume os parâmetros a partir da alteração do sistema multi-infeed. A tabela V mostra os valores calculados no MIIF.

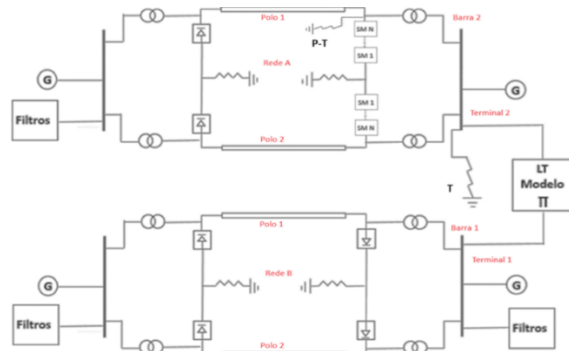


Fig. 6. Rede Multi-infeed com um sistema híbrido e outro LCC.

TABLE IV. DADOS DO SISTEMA MULTI-INFEED COM O MMC INSERIDO.

Principais parâmetros do sistema Multi-Infeed Híbrido		
Parâmetros	Retificador	Inversor
Tensão CA Nominal	345kV	230kV
Tensão CC Nominal	500kV	500kV
Potência nominal da Linha CC	1000MW	1000MW
Frequência	50Hz	50Hz
Transformadores	345/213,73kV	230/209.23kV

TABLE V. RESUMO DOS CÁLCULOS DO MIIF PARA O CASO 2.

Resumo dos cálculos do MIIF		
	Barra 1	Barra 2
Barra 1	1,00	0,10
Barra 2	0,15	1,00

3) Multi-Infeed do Caso 2 com Inserção de Compensador Síncrono na Barra 1 da Inversora LCC (Caso 3)

Um compensador síncrono (CS) de 300 MVA inserido na barra da inversora LCC conforme ilustrado na Figura 7. Os dados do modelo de máquina para o CS constam na Tabela VI [20]. A tabela VII mostra os valores do MIIF neste caso 3.

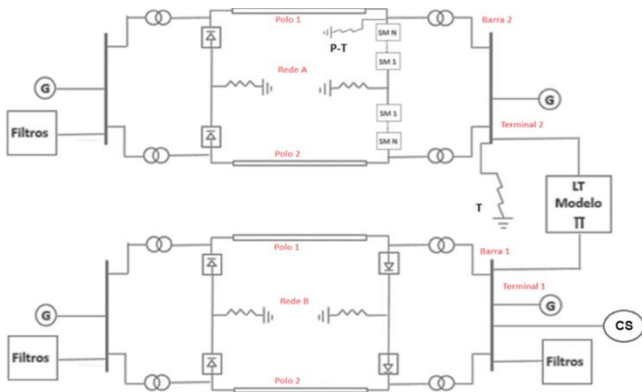


Fig. 7. Rede Multi-infeed do caso 2 com CS acoplado na Barra 1.

TABLE VI. PARÂMETROS DO CS MODELADO.

Compensador Síncrono	
Potência nominal	300MVA
Tensão de fase nominal	11,55kV
Corrente de linha nominal	8,66kA
Frequência	50Hz
Constante de inércia	1,71s
Atrito mecânico e vento	0,01 pu
Resistência de perda no ferro	300 pu
Resistência da armadura (Ra)	0,00258 pu
Reatância (Xd)	1,5 pu
Reatância transitória (Xd)	0,14 pu
Reatância sub-transitória (Xd)	0,1132 pu
Reatância (Xq)	1,48 pu
Reatância sub-transitória (Xq)	0,1164 pu
Transformador do CS	
Relação de transformação	11,5
Reatância	0,12 pu

TABLE VII. RESUMO DOS CÁLCULOS DO MIIF PARA O CASO 3.

Resumo dos cálculos do MIIF		
	Barra 1	Barra 2
Barra 1	1,00	0,10
Barra 2	0,08	1,00

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Serão realizadas análises relativas aos comportamentos dos sistemas mostrados nos casos 1 (Figura 5), 2 (Figura 6) e 3 (Figura 7), considerando aplicações de faltas 3Ø e 1Ø, bem como, uma falta polo-terra no lado CC do inversor.

A. Cenários Considerados

A Tabela VIII resume as faltas e suas características, bem como, os respectivos tempos de recuperações verificados com as aplicações destas faltas.

TABLE VIII. TEMPO DE RECUPERAÇÃO DE 90% DA POTÊNCIA TRANSMITIDA APÓS EXTINÇÃO DE UMA FALTA.

Curto aplicado		Tempo de duração da falta (ms)		Tempo de recuperação (ms)	
Local	Tipo				
Bipolar Single-Infeed LCC HVDC					
Lado CA (230kV)					
Curto franco - 0,01 ohms					
Barra	1Ø	150	446 ms		
	3Ø	150	403 ms		
Bipolar Single-Infeed Híbrido HVDC					
Lado CA (230kV)					
Barra	1Ø	150	3 ms		
	3Ø	150	63 ms		
Bipolar Multi-Infeed LCC HVDC					
Lado CA (230kV)					
Barra 2	1Ø	150	Rede A	292 ms	
	3Ø	150	Rede B	197 ms	
Lado CC (500kV)					
Polo 1 - Rede A	Polo-Terra	100	Rede A	231 ms	
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC					
Lado CA (230kV)					
Barra 2	1Ø	150	Rede A	368 ms	
	3Ø	150	Rede B	441 ms	
Lado CC (500kV)					
Polo 1 - Rede A	Polo-Terra	100	Rede A	330 ms	
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC com Compensador Síncrono					
Lado CA (230kV)					
Barra 2	1Ø	150	Rede A	365 ms	
	3Ø	150	Rede B	263 ms	
Curto - 15 ohms					
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC					
Lado CA (230kV)					
Barra 2	1Ø	150	Rede A	50 ms	
	3Ø	150	Rede B	24 ms	
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC com Compensador Síncrono					
Lado CA (230kV)					
Barra 2	1Ø	150	Rede A	00 ms	
	3Ø	150	Rede B	20 ms	

As faltas serão aplicadas em 2,2 segundos (regime permanente) e terão duração de 100ms [21] para faltas na linha CC de 500kV e 150ms [97] para faltas na linha CA de 230kV. Será considerado o procedimento de rede do ONS que determina a recuperação da potência para o valor de 90% da potência em regime permanente em até 200ms [22]. A Tabela IV e Tabela X, respectivamente, juntamente com a Tabela VIII, complementam os resultados encontrados.

TABLE IX. DADOS DE RECUPERAÇÃO DA TENSÃO APÓS EXTINÇÃO DE UMA FALTA FRANCA.

Análise da tensão do sistema Multi-Infeed híbrido				
Curto aplicado	Local	Tipo	Tempo de duração da falta (ms)	Rede B (LCC)
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC sem Compensador Síncrono				
Lado CA (230kV)				
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	V _{mín} (pu)	V _k (pu)
	3Ø	150	0,436	0,863
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	0,257	0,809
	3Ø	150	0,257	0,809
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC com Compensador Síncrono				
Lado CA (230kV)				
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	V _{mín} (pu)	V _k (pu)
	3Ø	150	0,552	0,896
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	0,406	0,94
	3Ø	150	0,406	0,94
Ganho - Compensador Síncrono (%)				
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	26,60550459	3,82387022
	3Ø	150	57,9766537	16,19283066

Sendo que V_k representa a tensão na barra do inversor 200ms após a extinção da falta e V_{mín} representa a tensão mínima na barra do inversor.

TABLE X. DADOS DE RECUPERAÇÃO DA TENSÃO APÓS EXTINÇÃO DE UMA FALTA DE 15 OHMS.

Análise da tensão do sistema Multi-Infeed híbrido				
Curto aplicado	Local	Tipo	Tempo de duração da falta (ms)	Rede B (LCC)
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC sem Compensador Síncrono				
Lado CA (230kV)				
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	V _{mín} (pu)	V _k (pu)
	3Ø	150	0,528	0,969
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	0,46	0,977
	3Ø	150	0,46	0,977
Bipolar Multi-Infeed Híbrido HVDC com Compensador Síncrono				
Lado CA (230kV)				
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	V _{mín} (pu)	V _k (pu)
	3Ø	150	0,806	0,986
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	0,538	0,9811
	3Ø	150	0,538	0,9811
Ganho - Compensador Síncrono (%)				
Barra 2 - Rede A	1Ø	150	52,65151515	1,754385965
	3Ø	150	16,95652174	0,419651996

B. Curto-circuito monofásico com impedância de $10m\Omega$ no lado CA do inversor da rede A do sistema de transmissão Multi-infeed bipolar LCC HVDC.

Rede A

Foi verificado que a potência transmitida para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência foi de cerca de 2,792s, aproximadamente 442ms após a extinção da falta conforme indicado na Figura 8. Na Figura 9 constam as formas de ondas das correntes nos tiristores indicando a ocorrência de falha de comutação (FC) com a imposição desta falta.

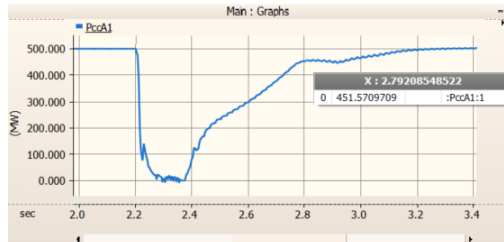


Fig. 8. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede A.

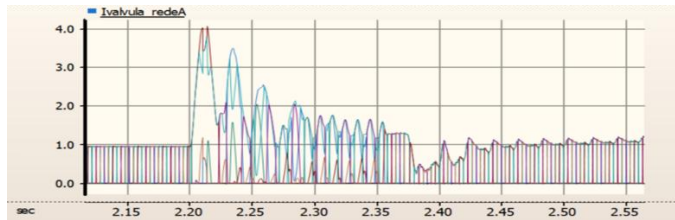


Fig. 9. Correntes nos tiristores de um polo do inversor LCC da rede A indicando FC.

Rede B Vizinha

Para o mesmo curto-circuito $1\emptyset$ franco na barra CA do inversor LCC da rede A, foi verificado por meio da Figura 10, que no sistema LCC da rede B a potência transmitida para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência foi em aproximadamente 2,642s, que é cerca de 292ms após a extinção da falta. A Figura 11 indica a ocorrência de falha de comutação (FC) para este caso de falta.

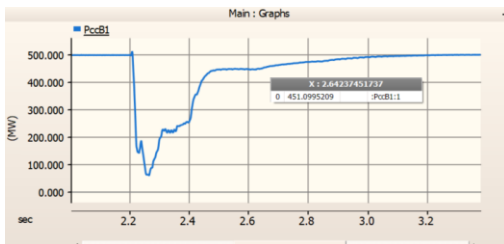


Fig. 10. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede B.

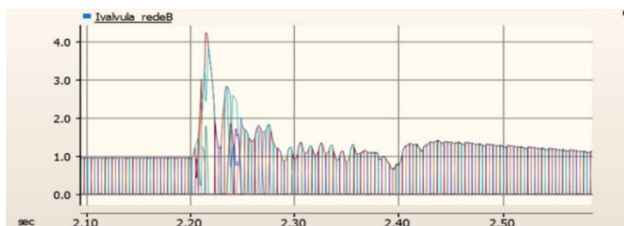


Fig. 11. Correntes nos tiristores em polo do inversor LCC da rede B indicando FC.

C. Curto-circuito polo-terra com impedância de $10m\Omega$ no polo 1 do inversor LCC da Rede A do sistema de transmissão Multi-infeed bipolar LCC HVDC.

Rede A

Na presença de um curto-circuito polo-terra no polo 1, no lado CC do inversor LCC da rede A, aplicada em 2,2 segundos e extinta em 2,30 segundos (100ms), verificou-se que a potência transmitida no polo 1 para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência em aproximadamente 2,865s, algo em torno de 565ms após a extinção da falta conforme pode ser verificado por meio da Figura 12.

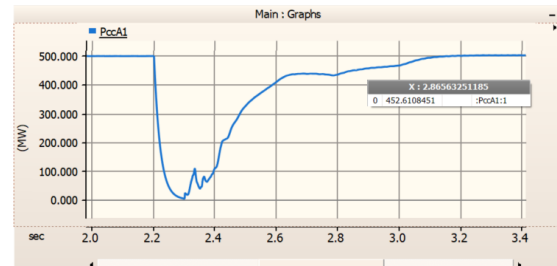


Fig. 12. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede A.

Rede B Vizinha

Na presença de um curto-circuito polo-terra no Polo 1 do bipolo, no lado CC do inversor LCC da rede A, aplicada em 2,2 segundos e extinta em 2,30 segundos (100ms), foi verificado na Figura 13 que no sistema LCC da rede B a potência transmitida para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência em aproximadamente 2,531s, ou seja, aproximadamente 231ms após a extinção da falta.

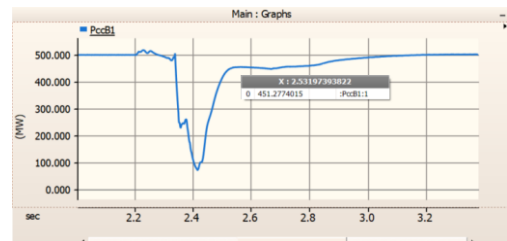


Fig. 13. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede B.

D. Curto-circuito monofásico com impedância de $10m\Omega$ no lado CA do inversor da rede A do sistema de transmissão Multi-infeed bipolar híbrido (LCC e VSC-MMC) HVDC.

Rede A

Neste cenário, com um mesmo curto-circuito $1\emptyset$ na barra 2 da rede A, verificou-se que a potência transmitida no polo 1 para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência foi em aproximadamente 2,359s, ou seja, aproximadamente 9ms após a extinção da falta conforme mostrado na Figura 14.

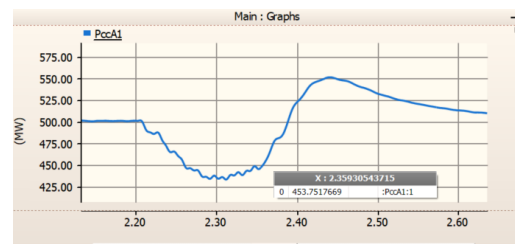


Fig. 14. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede A.

Rede B Vizinha

Com um curto-circuito 1Ω na barra CA da barra 2 da rede A, foi verificado por intermédio da Figura 15 que no sistema LCC da rede B a potência transmitida para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência em aproximadamente 2,715s, ou seja, aproximadamente 365ms após a extinção da falta. A ocorrência de FC é confirmada por meio da Figura 16.

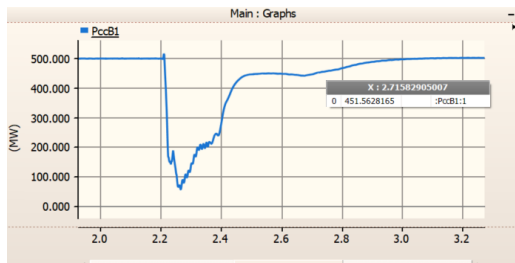


Fig. 15. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede B.

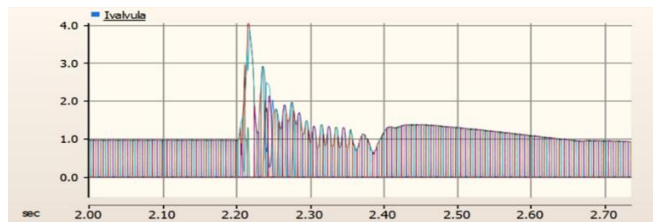


Fig. 16. Correntes nos tiristores de um polo do inversor LCC da rede B indicando FC.

E. *Curto-circuito polo-terra com impedância de $10m\Omega$ no polo 1 no lado CC do inversor da rede A do sistema de transmissão Multi-infeed bipolar híbrida (LCC e VSC-MMC) HVDC.*

Rede A

Com uma falta polo-terra no Polo 1, no lado CC do inversor VSC-MMC da rede A, aplicada em 2,2 segundos e extinta em 2,30 segundos, foi verificado na Figura 17 que a potência transmitida no polo 1 para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência em aproximadamente 2,643s, cerca de 343ms após a extinção da falta.

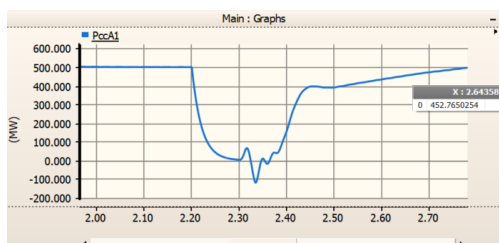


Fig. 17. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede A.

Rede B Vizinha

Impondo um curto-circuito polo-terra no Polo 1, no lado CC do inversor VSC-MMC da rede A, foi verificado por meio da Figura 18 que no sistema LCC da rede B, a potência transmitida para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência próximo a 2,630s, cerca de 330ms após a extinção da falta.

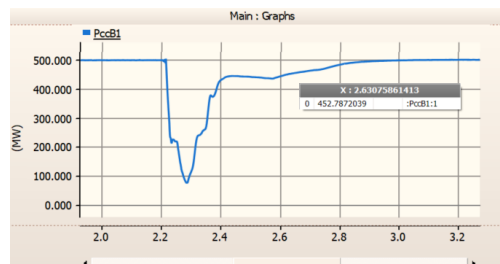


Fig. 18. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede B.

F. *Curto-circuito monofásico com impedância de 15Ω no lado CA do inversor da rede A do sistema de transmissão Multi-infeed bipolar híbrida (LCC e VSC-MMC) HVDC, com um CS no lado CA do inversor LCC.*

REDE A

A potência transmitida para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência em cerca de 2,356s, algo em torno de 06ms após a extinção da falta. A Figura 19 mostra o comportamento da potência ativa.

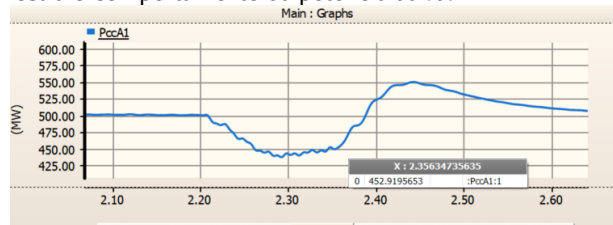


Fig. 19. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede A.

REDE B Vizinha

Para este cenário, de acordo com a Figura 20, a potência transmitida para a rede teve sua recuperação a 90% do valor inicial de potência em aproximadamente 2,716s, ou seja, aproximadamente 366ms após a extinção da falta. Conforme mostrado na Figura 21, também para este cenário a FC novamente ocorreu.

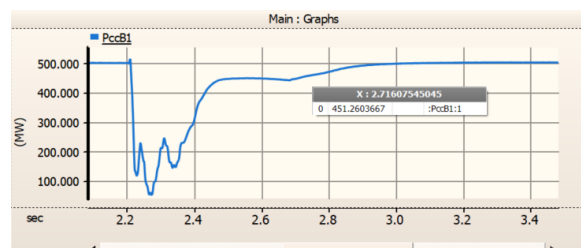


Fig. 20. Recuperação de potência transmitida no polo 1 da rede B.

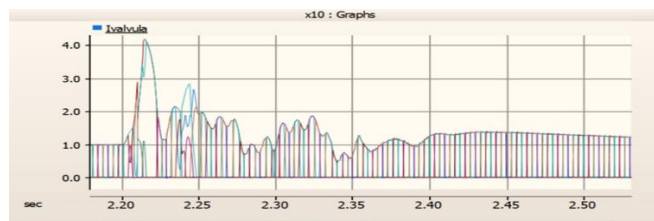


Fig. 21. Correntes nos tiristores em polo do inversor LCC da rede B indicando falha de comutação.

V. CONCLUSÕES

Por meio da implementação de um modelo benchmark HVDC híbrido bipolar foram realizados estudos simplificados

de provas de conceito no programa PSCAD/EMTDC. O sistema HVDC híbrido foi desenvolvido para manter as características operacionais do sistema do CIGRÉ HVDC Benchmark original, que é um bipolo com conversores LCC. A partir deste modelo HVDC híbrido e do modelo CIGRÉ Benchmark original, foram estabelecidos três casos simples de sistemas interligados conforme foi detalhado na seção III. Um aspecto importante a ser ressaltado é que devido a limitação do número de nós elétricos da versão universitária do PSCAD utilizada, o comprimento total da linha de transmissão CA, somente pode ser modelada por meio de uma única seção de modelo PI. Este foi um fator decisivo para considerar um comprimento de LT menor, visto que ao aumentar a distância do trecho de linha seria necessário segmentar a distância total via vários blocos de modelo PI.

A análise de interação das redes CA das conversoras nos três casos considerando o fator de interação *Multi-Infeed* (MIIF), indicou a melhorias com o uso do sistema Híbrido HVDC e ainda mais quando foi inserido um compensador síncrono na inversora LCC do caso 3. Os valores mostrados nas Tabelas III, V e VII, respectivamente, retratam a redução nas interações entre os sistemas. As análises de desempenhos dos três casos de sistemas HVDC conectados consideraram faltas monofásicas, trifásicas e falta CC. Um resumo de resultados constam nas Tabelas VIII, IX e X, e alguns resultados de simulações, dentre vários obtidos, constam na seção IV. Salienta-se que somente em um caso específico analisado, no qual se tratava de uma falta 1Ø com uma impedância de $15\ \Omega$ no lado CA da rede A no caso 3, sendo que a atuação transitória do CS contribuiu sobremaneira para que evitar a FC. Sendo que a distância relativamente curta entre as conversoras foi decisivo para que isto fosse estabelecido. Sendo que o fator imposto pelo uso de seção única de modelo PI motivou essa limitação.

Pode ser concluído que o sistema HVDC híbrido, com conversores LCC no lado do retificador e VSC-MMC no lado do inversor, possui uma infinidade de vantagens, e uma delas é a recuperação de potência quando comparado ao sistema LCC puro. A presença de uma rede híbrida, em uma configuração *Multi-Infeed* com outra rede utilizando a tecnologia LCC, é capaz de melhorar o tempo de recuperação da rede com tecnologia LCC. A inclusão de um CS para propiciar suporte na tensão contribui para limitar de certa forma as ocorrências de FCs nos inversores LCC da rede. O sistema HVDC híbrido benchmark apresentado possibilita realizar estudos simplificados e mostrar provas de conceitos relativas ao tema da transmissão em corrente contínua em alta tensão (CCAT).

REFERENCES

- [1] M. O. Faruque, Yuyan Zhang, and Venkata Dinavahi, "Detailed Modeling of CIGRÉ HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 1, pp. 378-387, JANUARY 2006.
- [2] J. Burr, S. Finney and C. Booth, "Comparison of Different Technologies for Improving Commutation Failure Immunity Index for LCC HVDC in Weak AC Systems," 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, 2015, pp. 1-7.
- [3] Dragan Jovcic, High voltage direct current transmission: converters, systems and DC grids. John Wiley & Sons, 2019.
- [4] G. Reed, R. Pape and M. Takeda, "Advantages of voltage sourced converter (VSC) based design concepts for FACTS and HVDC-link applications," 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491), Toronto, ON, Canada, 2003, pp. 1816-1821 Vol. 3.
- [5] K. Li and C. Zhao, "New Technologies of Modular Multilevel Converter for VSC-HVDC Application," 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, 2010, pp. 1-4.
- [6] H. Rao et al., "Design aspects of hybrid HVDC system," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 7, no. 3, pp. 644-653, May 2021.
- [7] P. F. de Toledo, J. Pan, K. Srivastava, W. Wang and C. Hong, "Case Study of a Multi-Infeed HVDC System," 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, India, 2008, pp. 1-7.
- [8] Bipolar HVDC Transmission System created from our monopole Cigre Benchmark example <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/190>
- [9] Webinar MMC Technologies, Manitoba HvdC Research Centre, <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/234>
- [10] Y. Lee, S. Cui, S. Kim and S. -K. Sul, "Control of hybrid HVDC transmission system with LCC and FB-MMC," 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, 2014, pp. 475-482.
- [11] M. H. Nguyen, T. K. Saha, and M. Eghbal, "Master self-tuning VDCOL function for hybrid multi-terminal HVDC connecting renewable resources to a large power system," IET Gener. Transm. Distrib., 2017.
- [12] M. Zhang, L. Huang, W. Yao, and Z. Lu, "Circulating Harmonic Current Elimination of a CPS-PWM-Based Modular Multilevel Converter With a Plug-In Repetitive Controller," IEEE Trans. Power Electron, 2014.
- [13] D. Jovcic et al, High Voltage Direct Current Transmission : Converters, Systems, and DC Grids. John Wiley & Sons, 2011.
- [14] C. Bajracharya, M. Molinas, J. A. Suul, T. M. Undeland, "Understanding of tuning techniques of converter controllers for VSC-HVDC", NORPIE/2008, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 9-11, 2008, pp. 1-8.
- [15] S. Debnath et al., "Operation, Control, and applications of the Modular Multilevel Converter: A review," IEEE Trans Power Electron, vol. 30, pp. 37-53, 2015.
- [16] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-bus-applications". In: 2010 International Power Electronics Conference - ECCE Asia -, IPEC 2010, pp. 502-507, 2010.
- [17] M. Zygmanowski, B. Grzesik and R. Nalepa, "Capacitance and inductance selection of the modular multilevel converter," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-10.
- [18] J. Kang, D. -W. Kang, J. -P. Lee, D. W. Yoo and J. W. Shim, "Design Procedure of MMC-HVDC System: Comprehensive Consideration of Internal and External Dynamics," in IEEE Access, vol. 8, pp. 157437-157450, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018597.
- [19] SOUZA, Y. R. de. Mestrado em Engenharia Elétrica, Análise da Interação entre Elos de Corrente Contínua em Redes Eletricamente Próximas. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.
- [20] Z. Guo, L. Hao, and J. Wu, "Application of the New Generation Large Capacity Synchronous Condenser in HVDC System," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 342, 2019 the 3rd International Conference on Sustainable Energy Engineering 24-26 May 2019, Shanghai, China, pp. 1-11.
- [21] "Submódulo 23.3 Diretrizes e critérios para estudos elétricos." [Online]. Available: <http://www.ons.org.br>.
- [22] "Submódulo 2.5 Requisitos mínimos para elos de corrente contínua." [Online]. Available: <http://www.ons.org.br>.
- [23] N. Y. Suzuki, "Estudo de controle e proteção para sistemas de transmissão HVDC multiterminais baseados em conversores modulares multiníveis".