



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

Simulação e Análise de uma rede CCAT baseada em conversores comutados pela rede CA (LCC).

TREVOR DOBBIN(1); SERGIO DO ESPIRITO SANTO(2);
Furnas(1); ESP Consultoria(2);

RESUMO

Este informe técnico apresenta os resultados de simulações no PSCAD [1] para um grid CC composto por 4 conversores HVDC (*High Voltage Direct Current*) LCC (*Line Commutated Converter*). O trabalho foi originalmente desenvolvido por solicitação do grupo de trabalho WG B4-72 - *DC Grid Benchmark Models for System Studies* - do CIGRE. São apresentados os aspectos básicos e premissas do sistema de transmissão simulado e os sistemas de controle e proteção modelados. Posteriormente são mostrados os resultados de desempenho perante um conjunto de defeitos aplicados no sistema elétrico através de simulações realizadas utilizando um programa de transitórios eletromagnéticos, i.e., resposta a falta monofásica e trifásica no lado inversor e falta CC no meio da linha.

PALAVRAS-CHAVE

CCAT, HVDC, GRID DC, Sistemas de Controle.

1.0 - INTRODUÇÃO

Estudadas há cerca de 60 anos [2], topologias HVDC LCC diferentes da ponto-a-ponto ainda são raras, em função de suas dificuldades técnicas. Entretanto, com a inserção de elos com tecnologia VSC (*Voltage Source Converter*), tais estruturas ganham crescente interesse, a ponto do surgimento de propostas de redes CC ou grids DC. Um grid CC é um sistema de transmissão de energia que consiste em múltiplos terminais HVDC interligados através de linhas de CC. Estudos de sistema realizados por pesquisadores em todo o mundo mostram que as redes CC apresentam várias vantagens [3]. Visando contribuir no desenvolvimento do conhecimento técnico neste tema, o Comitê de Estudos SC B4 do CIGRÉ criou diversos grupos de estudos sobre este tema.

O grupo de trabalho WG B4-72 - *DC Grid Benchmark Models for System Studies* - propôs vários sistemas de teste de grids CC, no qual em um dos sistemas a rede CC é formada por terminais HVDC LCC. Neste caso, os autores deste IT foram solicitados pelo WG a realizar todo o desenvolvimento necessário para a simulação desta rede HVDC LCC em um programa de transitórios eletromagnéticos (programa PSCAD), inclusive com a proposta de um sistema de controle e proteção para o grid. O sistema de controle empregado baseou-se no *benchmark* proposto pelo CIGRE [4].

Este informe técnico apresenta os resultados obtidos com o grid CC composto por 4 conversores LCC, descrevendo os aspectos básicos e premissas do sistema de transmissão simulado e seus sistemas de controle e proteção modelados. Posteriormente são mostrados os resultados de desempenho perante o conjunto de defeitos aplicados no sistema elétrico através de simulações realizadas no PSCAD (e.g. resposta a faltas

monofásica e trifásica no lado inversor, retificador e falta CC no meio da linha), sendo que nem todos os distúrbios aqui apresentados foram simulados para o grupo de trabalho.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A topologia do Sistema foi definida pelo grupo WG B4-72 considerando que os objetivos do trabalho foram: o estudo de viabilidade e a definição de benchmarks para estudos de interação elétrica entre conversores em uma rede CC. Por conta disto, optou-se por definir redes CC com condições sistêmicas não críticas (i.e. nível de curto-circuito efetivo, ou ESCR, maior que 3). Conforme já citado anteriormente, a liderança pelo trabalho do grid HVDC LCC, ou rede CC LCC, ficou com o Brasil, que teve a responsabilidade da preparação do caso para PSCAD e a simulação dos defeitos.

2.1 Topologia da Rede

A Figura 1 apresenta o sistema modelado, composto por duas redes CA interligadas pela rede CC LCC. No lado esquerdo, há uma rede de 750kV representando usinas de alta potência instalada, cada uma sendo o equivalente de dez máquinas de aproximadamente 850MVA (em rosa). No lado direito há uma rede de 500kV representando um centro consumidor. Ao meio se encontra a rede CC composta por 4 terminais conversores (2 retificadores na esquerda e dois inversores na direita) e 8 barras CC monopolares.

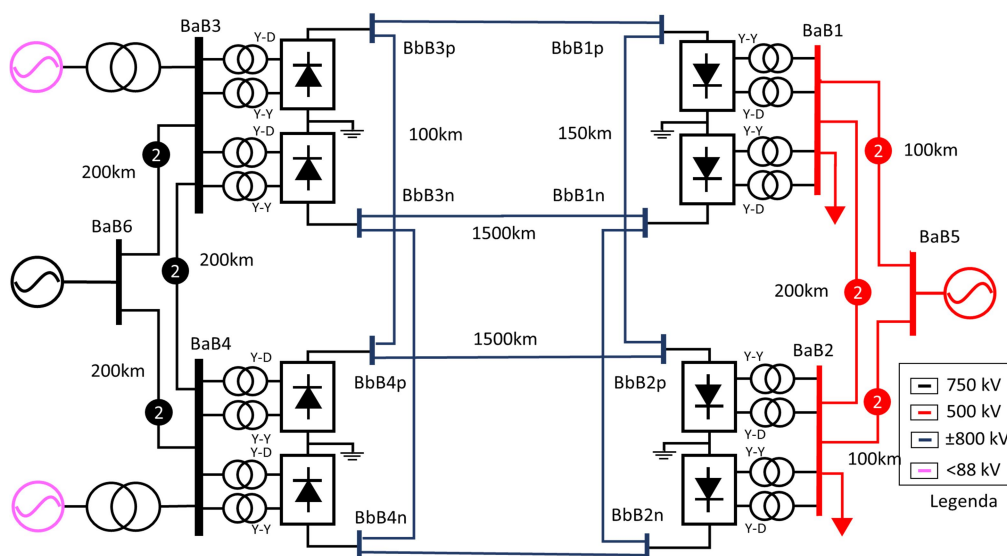


FIGURA 1 – Topologia do grid CC LCC analisado

2.2 Interação CC entre estações conversoras

A Figura 2 ilustra um sistema ponto a ponto convencional de transmissão HVDC LCC. O diagrama unifilar simplificado de um polo encontra-se à esquerda e o diagrama com a característica elétrica dos conversores nos lados CC de ambos conversores está à direita.

O ângulo de disparo do retificador é dado por α_r e o ângulo de disparo complementar, ou ângulo de avanço de ignição, do inversor por $\beta_i = 180^\circ - \alpha_i$. Embora sejam fundamentalmente fontes de tensão (lado CC), a configuração tradicional de controle de ambos conversores é controle de corrente pelo lado retificador e controle de ângulo de extinção (γ_i) de referência no inversor [2].

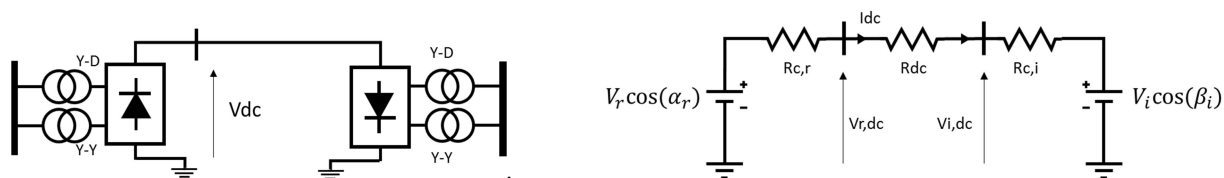
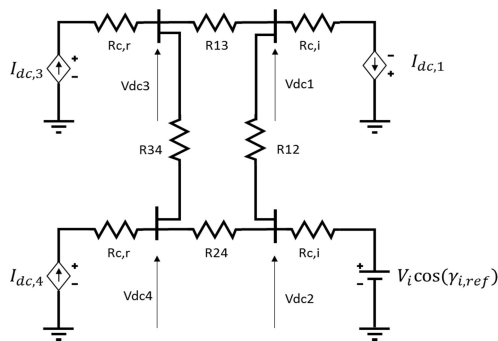


FIGURA 2 – Sistema ponto a ponto, diagramas unifilar e elétrico.

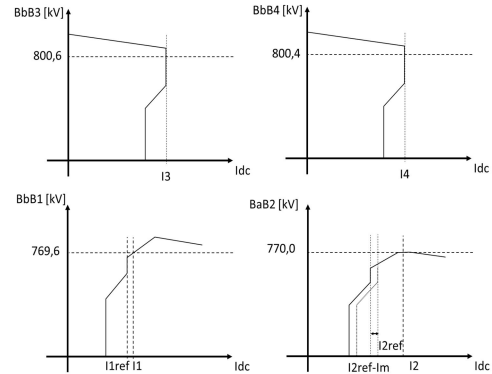
Para traçar a característica de equilíbrio estático deste sistema, utiliza-se o fato que a corrente em regime é a mesma em ambos terminais e adota-se um ponto elétrico como referência, neste caso a tensão CC na estação retificadora. Mais detalhes desta estratégia de controle podem ser encontrados nas referências [2], [3], [5], [6] e [7].

No caso de sistemas multiterminais há uma série de configurações distintas. A configuração adotada estabelece que dentre N estações, N-1 estarão em controle de corrente e a estação remanescente, inversora, em controle de gama associado a um controle lento de tensão.

A Figura 3 apresenta os diagramas elétrico e estático de um sistema multiterminal. Um exemplo do traçado dos pontos de equilíbrio do sistema CC multiterminal é apresentado na direita. Em função de ser uma rede, se torna complicado um traçado preciso. No entanto, é possível ter uma ideia aproximada do ponto de equilíbrio pela superposição direta das curvas.



Circuito elétrico equivalente da rede CC durante operação normal.



Ilustrações de diagramas VxI de sistemas multiterminais

FIGURA 3 – Sistema Multiterminal, diagramas elétrico e estático

3.0 - SISTEMAS DE CONTROLE

O sistema de controle e proteção desenvolvido é composto por controle de corrente, limitador de ordem de corrente dependente de tensão (ou VDCL, em inglês) e regulador de potência. Para estações inversoras há também o regulador de ângulo de extinção (γ) e, como citado no item 2.2, uma das estações possui uma malha lenta de controle de tensão.

Só foram modeladas as proteções necessárias nos distúrbios aplicados. A possibilidade de reversão do fluxo de potência não foi considerada.

3.1 Regulador de corrente do retificador

A estrutura de controle mais simples é o regulador de corrente, que é um controlador proporcional-integral que visa atender a ordem de corrente de camadas de controle superiores (lord). O regulador de corrente controla a ordem de ângulo de disparo (α) e com isto ocasiona a alteração da tensão CC da estação conversora (Figura 4).

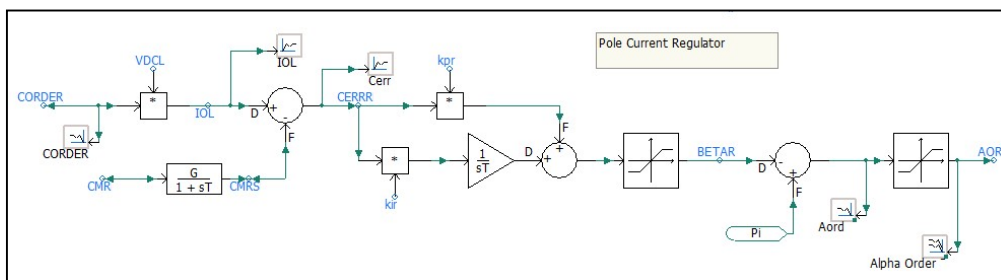


FIGURA 4 – Diagrama do regulador de corrente.

3.2 Limitador de Ordem de Corrente Dependente de Tensão (VDCL)

Além do regulador dinâmico de corrente, há uma estrutura adicional que protege o sistema durante quedas abruptas da tensão, o VDCL. Ele está presente no controle de polo de todas as estações (Figura 5a) e pode ser separado em duas partes, uma dinâmica e outra estática.

A parte dinâmica é composta pela normalização da tensão CC e por um filtro com constantes de tempo distintas para subida e descida da tensão CC medida. A característica estática consiste em um limitador da ordem de

corrente para uma queda brusca de tensão. A saída deste bloco é um percentual da ordem de corrente (0-100%). Há também um estatismo de 1% e um limitador dinâmico de surtos (destaque em vermelho) de corrente com um “wash-out” de forma que este atue apenas no momento inicial de curtos-circuitos CC.

A característica estática de cada estação é basicamente um ganho não-linear dependente da tensão, a Figura 5 ilustra um exemplo de limites em termos de relações tensão CC versus corrente CC para cada estação. Comparando com a Figura 4, é possível notar que é o VDCL o responsável pela forma dos diagramas em baixas tensões. Observamos que, para este sistema de controle, os parâmetros do VDCL foram ajustados de acordo com o nível de curto da rede.

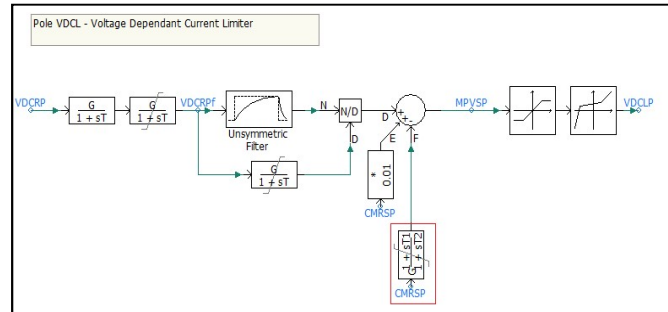
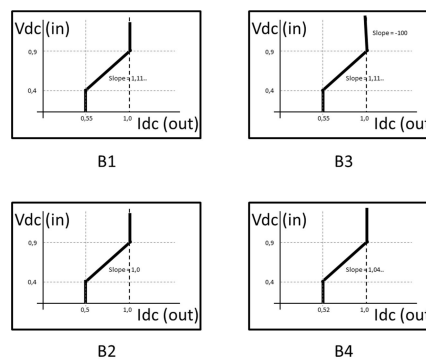


Diagrama de blocos do VDCL.



Características estáticas do VDCL de cada estação.

FIGURA 5 – Limitador de Corrente dependente de tensão.

3.3 Regulador de potência

O regulador de potência do polo é também um regulador proporcional integral, mas com um limitador de taxa de 1000W/s na ordem de potência. A saída do regulador é a ordem de corrente, positiva e limitada em 1,1 p.u.

3.4 Sistemas de controle das estações inversoras

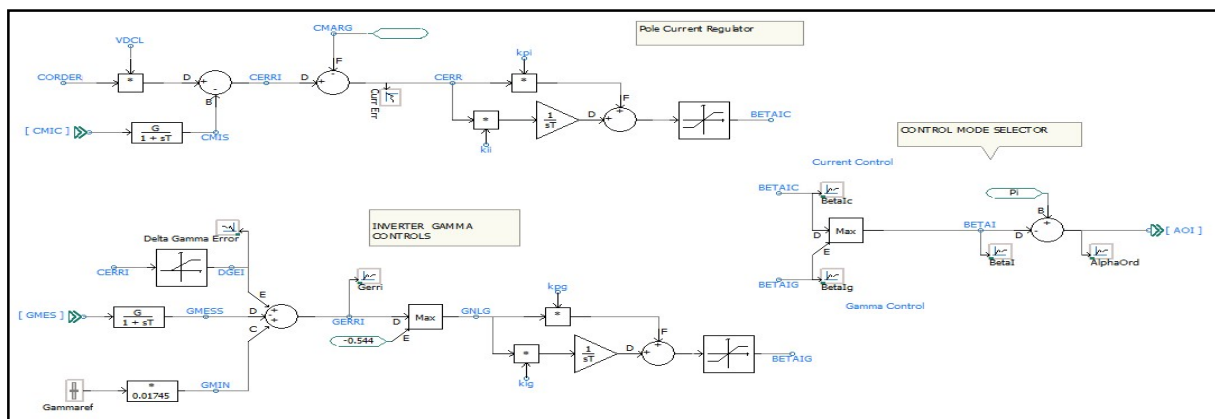


FIGURA 6 – Diagrama de blocos do sistema de controle de uma estação inversora.

Cada estação inversora é composta por um regulador de corrente com margem de corrente [2,8] e um regulador de ângulo de extinção (γ) [9], como ilustrado na Figura 6.

Na estação conversora B2 foi adicionada uma malha de controle adicional para um controle de tensão CC da barra BbB2 por meio de uma mudança lenta no valor do ângulo de extinção (γ). Essa malha foi implementada por meio de um regulador proporcional-integral, conforme ilustrado na Figura 7.

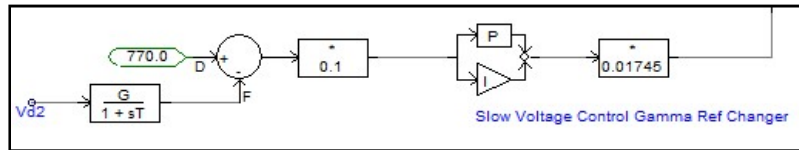


FIGURA 7 – Diagrama de blocos do laço de controle de tensão de uma estação inversora.

3.5 Sistemas de controle especiais para proteção

A proteção de falta CC foi modelada apenas no polo positivo de cada estação conversora. Os inversores deste polo possuem uma lógica de retardo de ângulo por meio de uma estrutura de controle especial (Figura 8), com o intuito de reduzir a probabilidade de ocorrência de uma falha de comutação durante a recuperação.

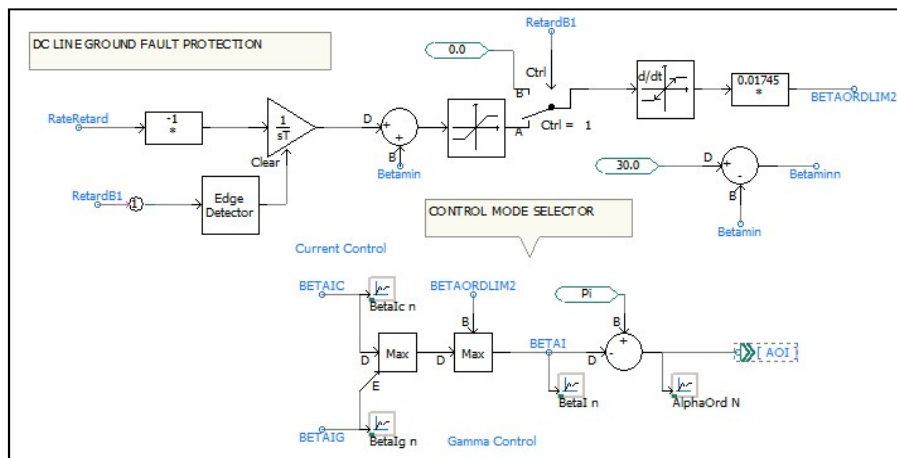


FIGURA 8 – Diagrama de blocos do sistema de proteção por limitação do alfa máximo.

4.0 - INICIALIZAÇÃO E PONTOS DE OPERAÇÃO

A inicialização de uma rede CC requer alguns procedimentos, descritos a seguir.

4.1 Sequência de Inicialização do sistema

Inicialmente as estações conversoras B2 e B3 são desbloqueadas com potências em torno de um terço da potência máxima de cada conversor ($P_{max} = 7000\text{MW}$). Como a estação B2 está configurada como controle de gama/tensão, esta opera com margem de corrente e sempre absorve a potência líquida restante definida pelas demais estações. A fim de evitar distúrbios na rede foi implementado um regulador de corrente de partida, assim o evento seguinte é o desbloqueio da estação B1 com potência mínima (10%), seguido do desbloqueio da estação B4 também com potência mínima (10%). Uma vez com as quatro estações presentes na rede sua operação se torna simples desde que a margem de corrente não seja violada.

Um ponto crucial para a partida é a escolha adequada dos tapes dos transformadores conversores, para evitar que não haja ponto de operação (equilíbrio) CC. Também é necessário forçar que uma das estações definida como “slack” assim o permaneça.

4.2 Fluxo de Carga

Os valores de tensão nas barras e fluxos de potência nas linhas são apresentados na Figura 10. A possibilidade de reversão do fluxo de potência não foi considerada neste estudo.

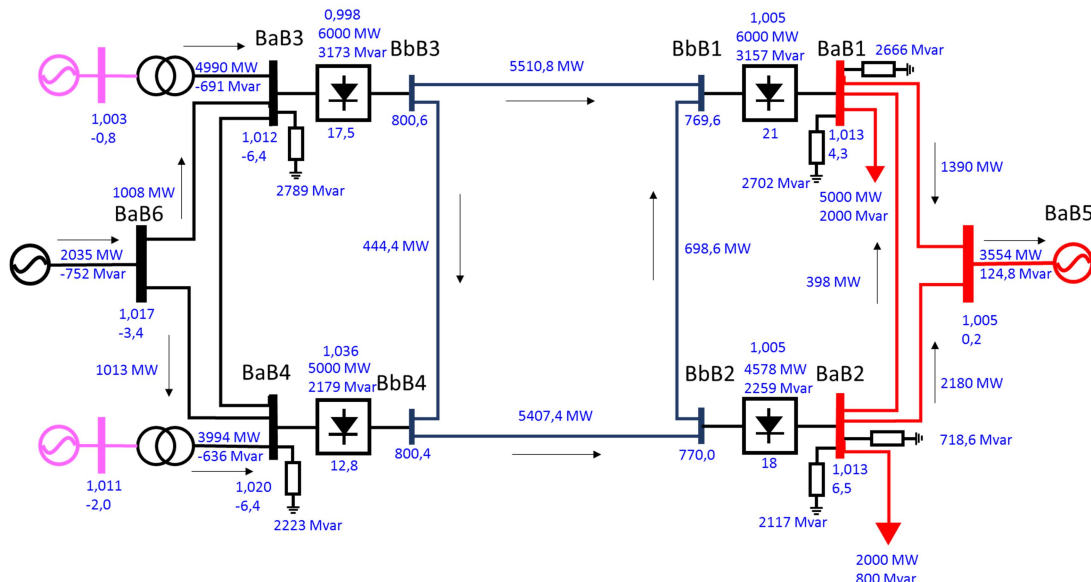


FIGURA 10 – Fluxo de carga para o sistema de transmissão.

5.0 - SIMULAÇÕES

A fim de avaliar o desempenho dinâmico da rede CC com conversores LCC foram realizadas diversas simulações com contingências utilizando o programa PSCAD/EMTDC. Para cada contingência serão discutidos os resultados e o desempenho dos sistemas de controle e proteção atuantes.

5.1 Faltas nas redes CA

5.1.1 Falta Monofásica no lado Inversor (linha BaB1-BaB5)

A Figura 11 ilustra o comportamento do sistema após uma falta monofásica com 100ms de duração no lado inversor, em um dos circuitos da linha que liga as estações B1 e B5 no terminal mais próximo da estação B1. Os resultados mostram a recuperação das tensões e das potências. A recuperação ocorre sem falhas de comutação nas inversoras ou colapsos de tensão.

Por característica do sistema de controle implementado, o inversor em controle de gama/tensão recupera a potência lentamente.

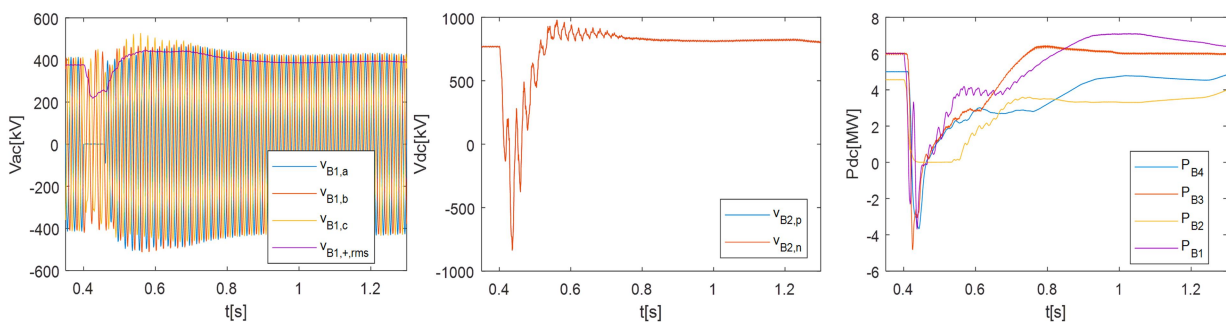


FIGURA 11 – Tensões CA da barra B1 sobrepostas com o valor rms da sequência positiva, tensão CC (centro) e potências das estações conversoras (direita).

5.1.2 Falta Trifásica no lado Inversor (linha BaB1-BaB5)

De maneira análoga, foi aplicada uma falta trifásica com 100ms de duração em um dos circuitos da linha que liga as estações B1 e B5 na barra próxima do inversor B1.

O sistema CC teve um comportamento semelhante ao da falta monofásica, mostrando que o tipo de falta CA (monofásica ou trifásica) impacta a rede CC da mesma maneira.

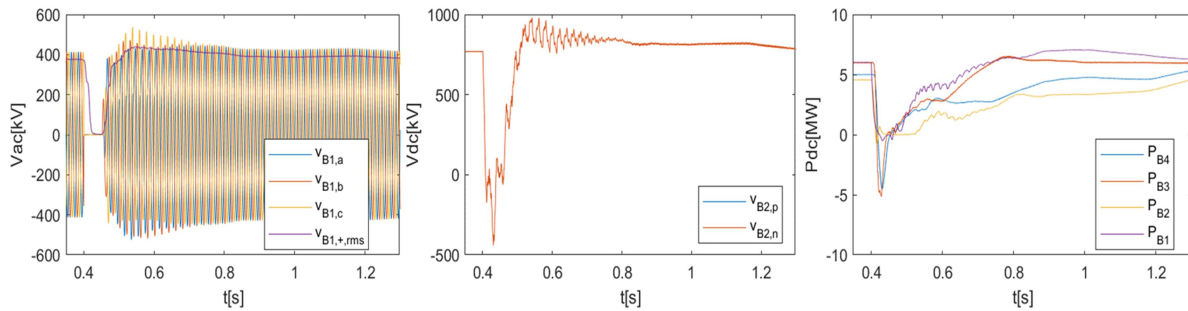
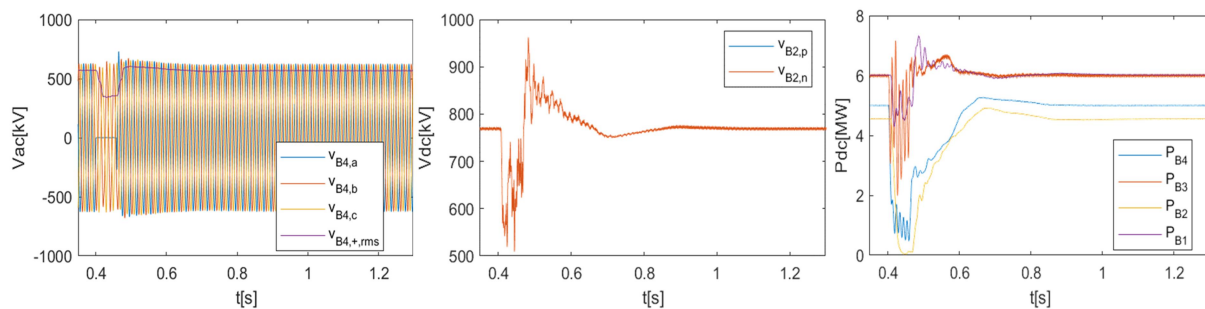


FIGURA 12 – Tensões CA da barra B1 sobrepostas com o valor rms da sequência positiva, tensão CC e potências das estações conversoras (da esquerda para direita).

5.1.3 Falta Monofásica no lado Retificador (linha BaB4-BaB6)

Neste caso, aplicou-se uma falta com 100ms de duração em um dos circuitos da linha que liga as estações B4 e B6, na barra mais próxima do Retificador B4. Observando a Figura 13, nota-se que foi possível continuar transmitindo uma parcela da potência entre as conversoras mesmo durante a falta, mesmo com falhas de comutação durante a falta. O sistema atingiu os valores de tensão e potência pré-falta 300ms após eliminação da



falta.

FIGURA 13 – Tensões CA da barra B4 sobrepostas com o valor rms da sequência positiva, tensão CC e potências das estações conversoras (da esquerda para a direita).

5.1.4 Falta Trifásica no lado Retificador (linha BaB4-BaB6)

A falta trifásica no retificador B4 se mostrou muito mais severa que sua contrapartida monofásica, tendo a potência transmitida se recuperado de forma muito mais lenta, atingindo valores de potência e tensão pré-falta cerca de 700ms após a eliminação do curto (Figura 14). No entanto tal valor elevado de recuperação se deve ao ajuste das malhas de controle de potência e da ausência de um controle centralizado hierárquico superior, como denominado em alguns projetos de *Master Control*.

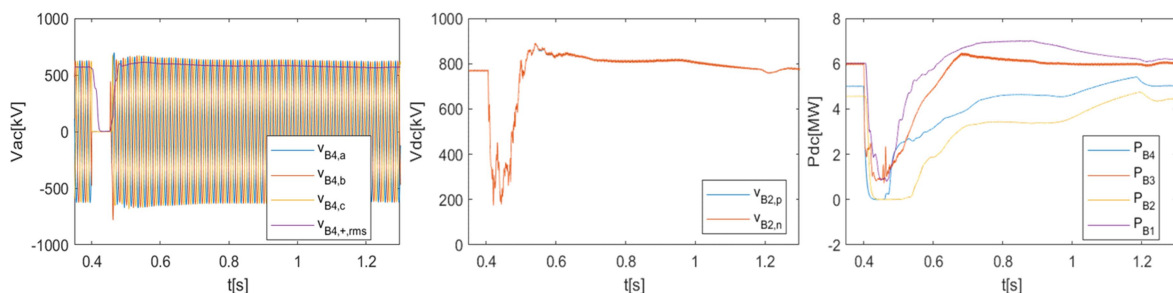


FIGURA 14 – Tensões CA da barra B4 sobrepostas com o valor rms da sequência positiva, tensão CC, potências das estações conversoras (da esquerda para a direita).

5.2 Faltas na rede CC

5.2.1 Falta CC com religamento bem-sucedido

Foi aplicada uma falta no meio da linha CC B1-B3 por 100ms, apenas no polo positivo. Nos instantes iniciais da falta, os valores das tensões CC de ambos os polos caem abruptamente (Figura 15). Após 50ms foi considerado que as proteções de faltas na linha CC atuam e geram sinais de retardo de ângulo de disparo (α).

A elevação do ângulo de disparo faz com que a tensão do polo positivo fique momentaneamente negativa, descarregando a linha e os filtros CC. A potência transmitida pelas estações retificadoras reduz cerca de 50%, exceto pelas estações B2 (*slack*) e B1, ambas inversoras, já que nestas não houve redução equipolente, pois nos primeiros 150ms a estação B2 reduz sua potência transmitida a zero e a estação B1 toda potência fornecida pelas estações retificadoras.

A Figura 15 apresenta o comportamento durante a falta de diversas variáveis, incluindo os sinais digitais.

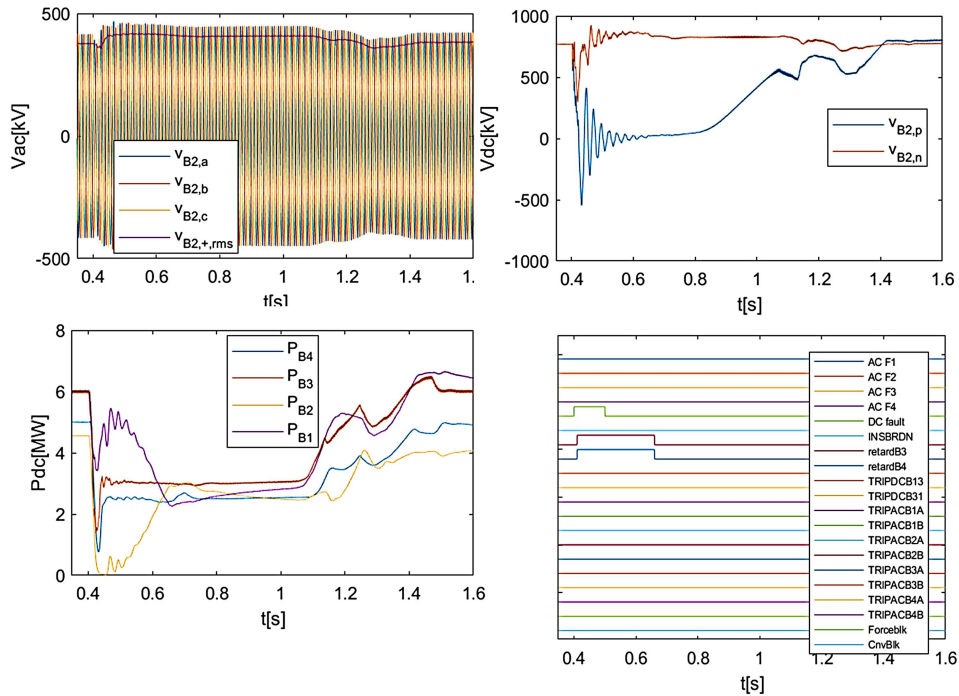


FIGURA 15 – Tensões CA da barra B4 sobrepostas com o valor rms da sequência positiva, tensão CC (direita superior), potências das estações conversoras (esquerda inferior) e sinais digitais

Quando os sinais de retardo de ângulo são desabilitados, a tensão CC do polo faltoso é aumentada por taxa constante de aumento de (α) e ocorre o consequente aumento da corrente CC. Após atingir um certo valor de tensão, o controle começa a aumentar a tensão na linha CC. Em torno de 1,1s, a potência transmitida pela rede CC começa a ser restabelecida. A partir deste instante ocorre um período de transferência entre o modo de controle de retardo de ângulo e o modo controle de corrente. Em 1,4s após a falta o sistema atinge o regime. Há diferentes estratégias para que esta transição seja suave e evite falhas de comutação na recuperação.

5.2.2 Falta CC com religamento malsucedido

Com a proteção de falta CC ajustada para 1 religamento em tensão plena, foi aplicada uma nova falta no meio da linha CC B1-B3 por 100ms, apenas no polo positivo. Entretanto, neste caso foi considerado que houve uma ruptura de isolamento durante a reenergização da linha (religamento). O sinal "INSBRDN", no quadro inferior direito na Figura 16, identifica o momento desta ruptura do isolamento. Após 50ms da tentativa malsucedida de religamento ocorre trip do polo faltoso da linha (sinais "TRIPDCB13" e "TRIPDCB31").

Nota-se que não há mudança qualitativa do comportamento do sistema nos períodos da falta e ruptura de isolamento. No quadro inferior esquerdo da Figura 16 observa-se que o grid consegue retomar as potências quase que integralmente para os valores iniciais, mesmo após a perda de um polo positivo da linha CC. No entanto, observa-se no quadro superior direito da Figura 16 que há uma queda na tensão CC deste polo que implica no aumento das perdas na transmissão. A tensão CA também cai e, com isto, há a redução de tensão dos polos saudáveis e a redução da margem do ângulo de extinção dos conversores das estações inversoras.

Não houve falhas de comutação, mas existe um risco alto de falha para este tipo de evento

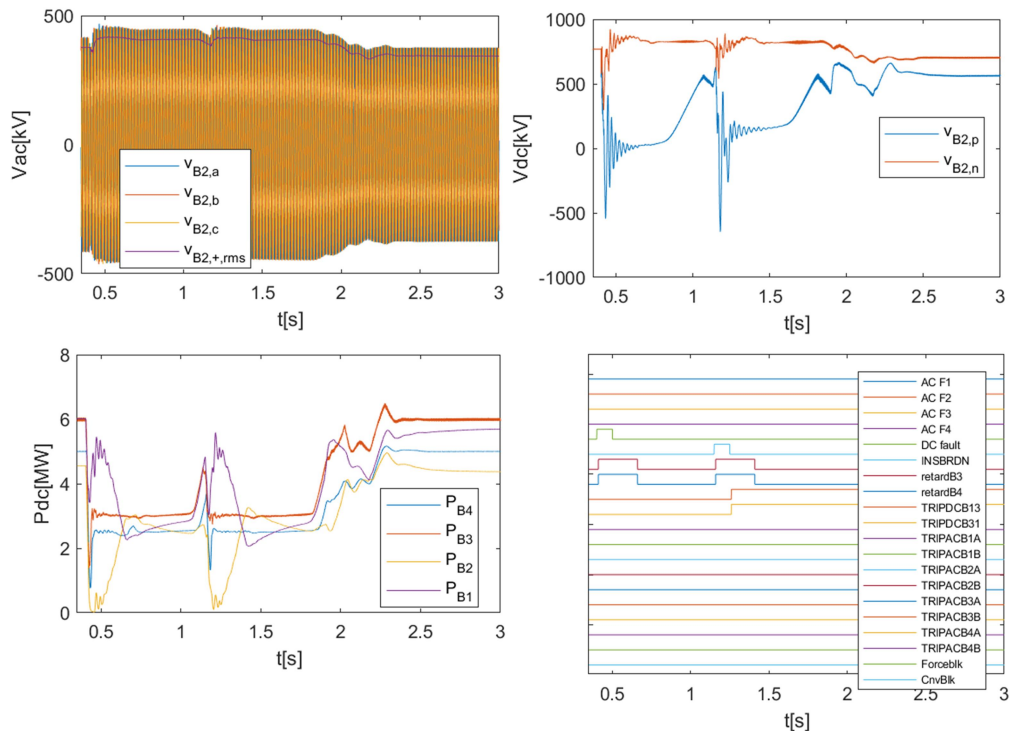


FIGURA 16 – Tensões CA da barra B4 sobrepostas com o valor rms da sequência positiva, tensão CC (direita superior), potências das estações conversoras (esquerda inferior) e sinais digitais

6.0 - CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram a viabilidade de uma rede CC formada com conversores LCC. Entretanto, só foi dado o primeiro passo. Diversas etapas ainda precisam ser cumpridas para garantir que este tipo de rede pode ser implementado na prática. Uma das etapas necessárias consiste no aumento da robustez do sistema de controle.

O sistema de controle foi desenvolvido a partir do *Benchmark* do Cigre para sistemas CCAT [4]. Foram feitas pequenas adaptações para permitir o funcionamento da rede CC LCC. O ajuste do sistema de controle não se mostrou trivial. A análise de pequenos sinais ou de sistemas filtrados (e.g. *averaging*, fasores dinâmicos, etc. [10]) não se mostraram suficientes para a obtenção dos parâmetros adequados. Até esta data sendo o método mais adequado e confiável simulações em programas do tipo EMTP.

De uma maneira geral, o grid CC LCC apresentou comportamento semelhante ao sistema ponto-a-ponto para faltas na rede CA, porém faltas na rede CC são críticas por sensibilizar todas as estações conversoras simultaneamente. Entretanto, o sistema se mostrou capaz de lidar com faltas CC e retomar a operação em regime sem falhas de comutação.

O grid CC foi capaz de transmitir potência entre estações mesmo com a perda de um polo positivo de uma linha CC.

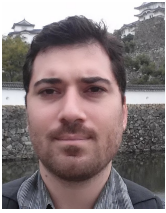
Mesmo não sendo o foco deste estudo, os tempos de recuperação estão um pouco elevados e seria adequado um esforço para a melhora dos valores.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Manitoba HVDC Research Centre, C, 'PSCAD TM Power Systems Computer Aided Design', de .2018
- (2) Kimbark, E. W., Direct Current Transmission, *Volume 1*, Wiley de 1971.
- (3) Jovcic, D. & Ahmed, K., High-Voltage Direct-Current Transmission, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK de 2015
- (4) M.Szechtman, T. Wess, C.V. Thio, "First benchmark model for HVDC control studies", ELECTRA, No 135, Abril, 1991, pp 55-73
- (5) Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Education – Europe de 1994.
- (6) Kim, C.-K.; Sood, V. K.; Jang, G.-S. & Lee, S.-J., *Hvdc Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems* de 2009.
- (7) C. D. Barker, R. S. Whitehouse, R. Gupta, and M. Li, "Static characteristics of LCC converters in a multi-terminal configuration," p. 47(5), de 2017.
- (8) Uhlmann, E., *Power Transmission by Direct Current*, Springer Berlin Heidelberg de 1975

- (9) Manitoba HVDC Research Centre, C, 'USER'S GUIDE A Comprehensive Resource for EMTDC EMTDC Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation' de 2010.
 (10) Khalil, H. K., *Nonlinear Systems*; Pearson de 2001.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Trevor Vilella do Carmo Dobbin, recebeu os títulos de M. Sc. e B. Sc em Engenharia Elétrica (2014) e em Engenharia Eletrônica e de Computação (2011), respectivamente, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Desde 2012 trabalha na Gerência de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação de Furnas Centrais Elétricas S.A. Atualmente é encarregado do Simulador de Sistemas Elétricos em tempo real de Furnas, local da réplica do Elo CC de Furnas (Itaipu) e participou de algumas atividades do Bipolo 2 do Projeto Madeira e do Bipolo 1 de Belo Monte. É membro do CIGRE desde 2012, sendo membro do CE-B4 a partir de 2017. Sua área de interesse inclui: teoria de controle, sistemas não-lineares, estudos e simulações em tempo real de sistemas de potência, operação e controles de sistemas HVDC e FACTS, geração renovável e controle aplicado em sistemas de potência.



Sérgio do Espírito Santo graduou-se em Engenharia Elétrica em 1982 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e concluiu a pós-graduação em Sistemas de Potência na COPPE/UFRJ em 1984. Trabalhou em Furnas entre 1984 e 2018, atuando principalmente nas áreas de corrente contínua e simulações de sistemas de potência em tempo real. Atualmente está na ESP Consultoria. Participou do comissionamento e acompanhamento e análise da operação do Elo CC de Furnas (Itaipu); no leilão, projeto e testes de fábrica do Bipolo 2 do Projeto Rio Madeira; em algumas atividades do Bipolo 1 de Belo Monte; e em simulações em tempo real usando o RTDS envolvendo sistemas CC, estáticos, compensadores série e sistemas de proteção. Participa no CIGRE desde 1997, tendo sido coordenador e secretário do CE-B4, *Special Report* na Sessão Bial e diretor e conselheiro do CIGRE-Brasil. As principais áreas de atuação são: desempenho, confiabilidade, controle e operação de sistemas HVDC e FACTS; estudos e simulações em tempo real de sistemas de potência e controle aplicado em sistemas de potência.