



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GDS/09
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**ESTUDO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CA SEGMENTADA
ATRAVÉS DE VSC-B2B**

Braulio Chuco

**Edson. H. Watanabe
COPPE/UFRJ**

Alquindar S. Pedroso

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo de aplicação de conversores fonte de tensão conectados em back-to-back (VSC-B2B) para controlar manobras transitórias da linha de transmissão (LT) em CA de longa distância. Após uma breve descrição do sistema de controle dos VSCs, são apresentados resultados de manobras da LT, curto circuito e rejeição de carga.

PALAVRAS-CHAVE

Transmissão CA segmentada, Conversores fonte de tensão, Interligação de redes, Linhas de transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

O sistema VSC-HVDC (*Voltage Source Converter - High Voltage Direct Current*) (1) (2) tem sido aplicado com sucesso no controle de fluxo de potência ativa na interligação de sistemas elétricos de potência; na integração de centros de geração de energia eólica "offshore ou onshore" (3) a sistemas de potência ou a sistemas elétricos isolados. Esta tecnologia também vem sendo aplicada para controlar a potência reativa (ou tensão CA) nos terminais CA do VSC de forma independente de cada lado do sistema.

Mas, O VSC-HVDC, apesar de ainda apresentar algumas desvantagens em relação ao sistema HVDC Clássico (4) tais como: Perdas nos conversores relativamente alta (em torno de 3% por estação conversora), assim como o alto custo e potências limitadas a cerca de 1GW, pode ser uma boa opção para mitigar problemas do tipo transitório durante as manobras das interligações ou linhas de alta tensão de comprimentos longos ou extralongos (acima de 2000 km).

Nesse sentido, neste trabalho foi estudada a aplicação do VSC em B2B (*Back-to-Back*) para interligar dois sistemas elétricos de potência através de linhas de transmissão CA de 1400 km, com compensação fixa e controlada shunt (SVC) (5) e sem compensação série, a fim de:

- Controlar as tensões e correntes durante as manobras de energização da linha, religamento ou durante as defeitos na própria interligação ou nas redes interligadas;
- Maximizar a capacidade de transporte de energia através da linha, sem colocar em risco a operação da interligação diante de contingências programadas ou forçadas, como o desligamento do circuito paralelo por defeito.

Para tal fim, a rede estudada é composta por dois sistemas elétricos de potência denominados de SEP1 e SEP2, interligados através de duas linhas de transmissão paralelas em 500 kV de 1400 km de comprimento e com VSCs em B2Bs (VSC-B2B), tal como mostrado na Figura 1. A linha de transmissão CA tem compensação reativa através de reatores de linha e compensadores controlados (SVC) e não tem compensação série.

Ambos os conversores VSC-B2B são controlados usando a técnica de controle vetorial por corrente, onde as sinais medidos de tensão e corrente CA são transformados em sinais contínuos na referência síncrona d-q, logo, comparadas com sinais de correntes de referências ou desejadas, e desacopladas depois de serem compensadas através de controladores proporcional-integral (PI) a fim de controlar a potência ativa e reativa de forma independente, tal como mostrado na Figura 2.

Após descrever o sistema de controle dos conversores, são apresentados os resultados comparativos de simulação das manobras de energização, religamento e defeitos na LT.

2.0 - DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Tal como foi descrito, o diagrama unifilar mostrado na Figura 1 apresenta o sistema de transmissão composta por duas LTs (Linhas de Transmissão) em paralelo e com dois sistemas VSC-B2B em paralelo, que interliga o SEP1 com SEP2 (equivalente de sistemas elétricos de potência).

Os parâmetros de alguns componentes da rede da Figura 1 são descritos a seguir:

- Reatores de Linha de 275 Mvar/reator;
 - Dois SVCs de -400/+150 Mvar;
 - A característica do sistema VSC-B2B é apresentada na Tabela 1.
- A silhueta da torre da linha de transmissão de 500 kV foi adotado uma silhueta convencional.

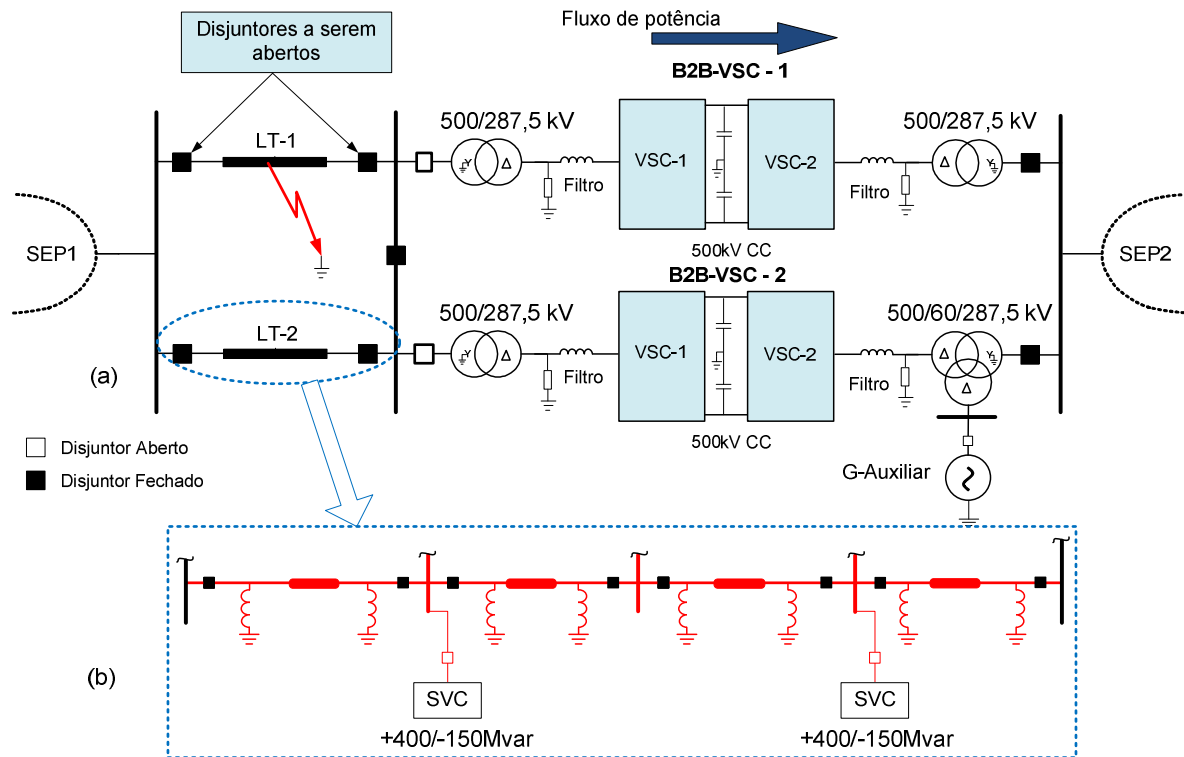


FIGURA 1 – Representação do sistema simulado (a) e detalhe da LT (b).

Tabela 1: Parâmetros do B2B-VSC na Transmissão Segmentada em 500 kV.

Tensão CA do VSC1 $V_{1LL-RMS}$	287,5 kV
Tensão CA do VSC2 $V_{2LL-RMS}$	287,5 kV
V_{CC}	500 kV
$P_{nominal}$	800 MW
Reator do conversor L_C	72,4 mH.
Capacitor do elo C_{CC}	150 μF
Constante de Inércia do VSC (1)	5,8ms
Frequência do PWM	1980 Hz
Níveis	2
MVA Transformadores.	1500 MVA
Transformador VSC-1	500/287,5 kV
Transformador VSC-2	500/287,5/60 kV

2.1 Sistema de Controle dos VSCs

A Figura 2 mostra VSCs em B2B conectados entre duas barras de potência. Também mostra os blocos de controle dos conversores. O sistema de controle dos VSCs de cada conjunto B2B é baseado no controle vetorial de corrente em referência dq para a sequência positiva (6). Em um dos VSCs, a referência da potência ativa é gerada por um compensador PI (proporcional-integral) a partir do erro entre a tensão V_{cc} do elo CC medida e a referência, assim, esse conversor controla a tensão do elo CC. Entretanto, o outro conversor controla o fluxo de potência ativa pelo elo e pela linha de transmissão.

Nos dois conversores, a referência da potência reativa é gerada por um compensador PI a partir do erro entre a tensão CA medida no ponto de conexão e sua respectiva referência, com essas potências, são geradas as correntes de referências aplicando a teoria pq (Teoria de potência instantânea) (7).

A detecção do ângulo de fase da tensão é feita utilizando um bloco PLL (Phase Locked Loop) (8). A frequência de chaveamento do PWM (8) é 33 vezes a frequência da linha. As saídas i_d^* e i_q^* do controle são as referências de corrente nos eixos d e q que entram no controlador. As referências da tensão v_a^* , v_b^* e v_c^* são as referências que entram ao bloco de controle do PWM para serem comparados com um sinal triangular de frequência igual a 1980 Hz.

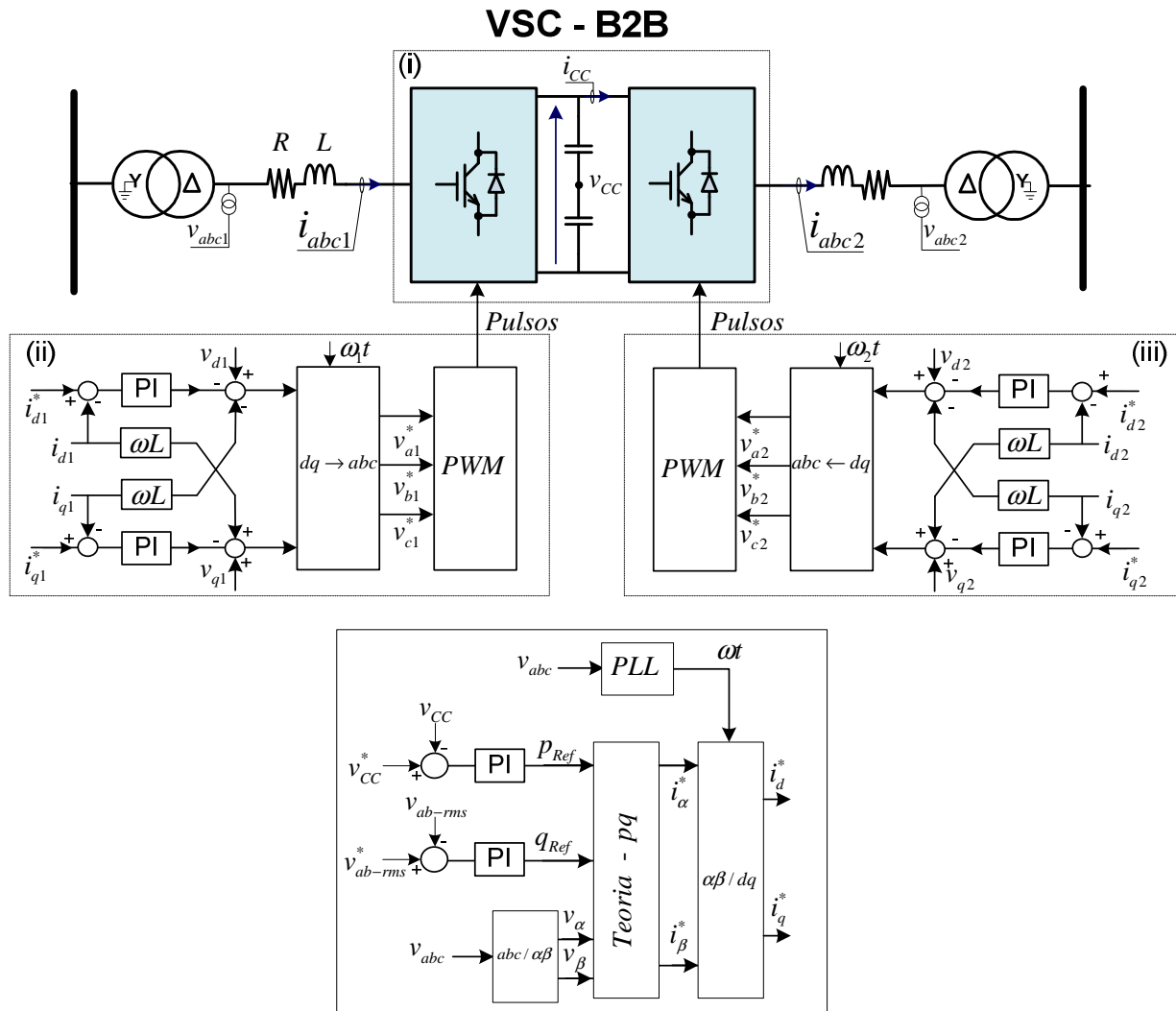


FIGURA 2 – Diagrama de blocos do sistema de controle dos VSCs

3.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

3.1 **CASO 1:** Energização da Linha de Transmissão iniciando pelo lado do SEP1 sem Compensadores Estáticos (Caso convencional)

A energização da LT foi realizada por trechos de 350 km de forma sequencial e iniciando pelo lado do SEP1. A linha tem compensação feita através dos reatores de linha. Neste ensaio, os SVCs não foram utilizados.

O perfil da tensão registrada nas extremidades de cada trecho da linha durante a energização é mostrado na Figura 3. Observa-se que o maior valor de pico da tensão transitória atingiu o valor de 3,3 pu, e, a tensão sustentada na linha em vazio resultou em 2,4 pu no final da linha e 1,34 pu no lado da fonte. A energização da linha nestas condições resultou impraticável devido à superação da suportabilidade do isolamento da linha convencional de 500 kV, que normalmente é limitado a 2,3 pu de sobtensão por manobra e em regime a 1,1 pu.

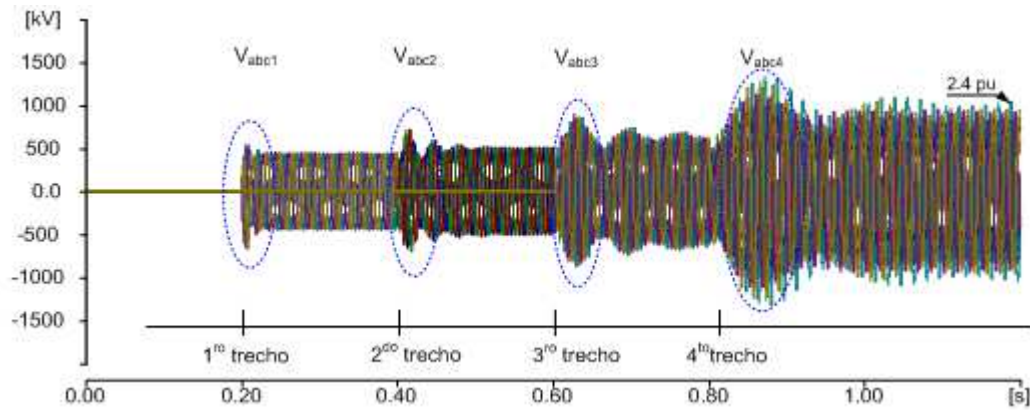


FIGURA 3 – Tensão ao longo da linha de transmissão, Caso 1.

3.2 **CASO 2:** Energização da Linha de Transmissão pelo lado do SEP1 com Compensadores Estáticos

Neste caso, a energização da linha de transmissão também é realizada pelo lado do SEP1, seguindo o mesmo procedimento do caso anterior. A diferença é que, além dos reatores de linha, a tensão é controlada por dois SVCs conectados no final do primeiro trecho e no início do último trecho da LT.

A fim de reduzir o pico da tensão no instante do fechamento do disjuntor do primeiro e o terceiro trecho, os SVCs são configurados para operar com 100% de potência reativo (TCR operando com ângulo de disparo igual a 90 graus).

O perfil da tensão é mostrado na figura 6, com tensões registradas nos extremos de cada trecho da LT. A Figura também mostra uma ampliação dos instantes de fechamento dos disjuntores de energização dos respectivos trechos. Por efeito dos SVCs, os resultados são diferentes do caso anterior. Nesta situação, o pico da tensão atingiu a 1,42 pu durante a energização do segundo e o quarto trecho da LT, mas esta é controlada rapidamente pelos SVCs. Em regime permanente, o pico da tensão ficou em 1,08 pu, tal como mostrado na Figura 4.

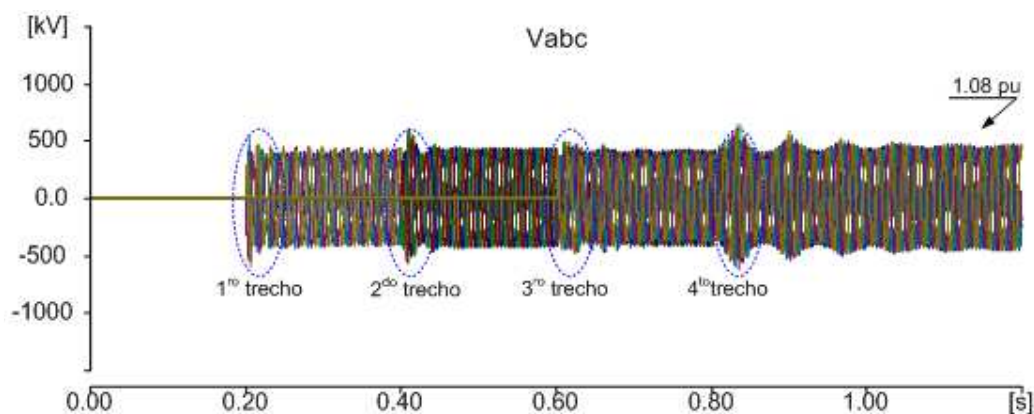


FIGURA 4 –Tensão na LT compensados por SVCs durante a energização pelo lado do SEP1.

3.3 **CASO 3:** Energização da Linha de Transmissão através do B2B-VSC sem Compensadores Estáticos

Neste caso, a LT é energizada através do VSC-B2B, em sequência contrária aos casos anteriores. A LT é energizada junto com os reatores da linha e com os SVCs desligados.

Supondo defeito de energia no SEP1 e no SEP2, o elo CC do VSC-B2B é energizado com fonte auxiliar (grupo

gerador) ligado no lado do terciário do transformador de 500/287,5/60 kV, conforme mostrado na Figura 1.

A energização segue a seguinte sequência de manobras:

- O Capacitor do elo CC do VSC-B2B é carregado usando apenas o retificador em ponte formada pelos diodos do VSC do lado do SEP2, com os IGBTs bloqueados por alguns segundos;
- Em seguida, a tensão no elo CC é regulada pela ação do controle PWM sobre os IGBTs;
- O controle PWM do conversor VSC-1 é ativado a fim de energizar o seu respectivo transformador em vazio;
- Em seguida, o primeiro trecho da LT é energizado com a tensão controlada pelo VSC-1;
- Após alguns segundos, quando a tensão do primeiro trecho da LT é regulada, o próximo trecho da LT é energizado. Os trechos restantes são energizados seguindo a mesma sequência.

Os perfis da tensão registrados nos extremos de cada trecho da LT são mostrados na Figura 5. A potência reativa nos terminais do VSC-1 é capacitiva para o carregamento da LT, sendo controlada e incrementada até 600Mvar de forma gradual conforme foram energizados os trechos da LT. Na Figura 6 são mostrados a tensão no elo CC, as correntes no VSC, a potência ativa e reativa e a tensão rms do lado da LT. Na Tabela 2 foram resumidos os resultados dos três casos analisados.

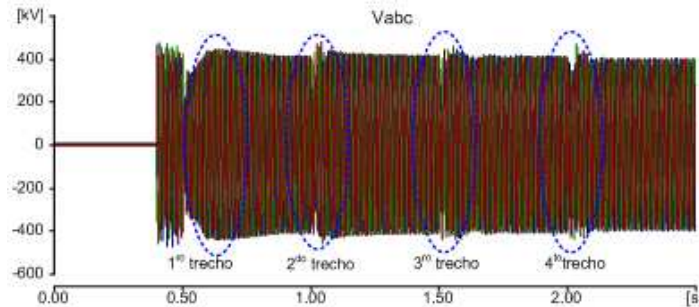


FIGURA 5 – Tensão na LT sem SVCs durante a energização a partir do B2B-VSC.

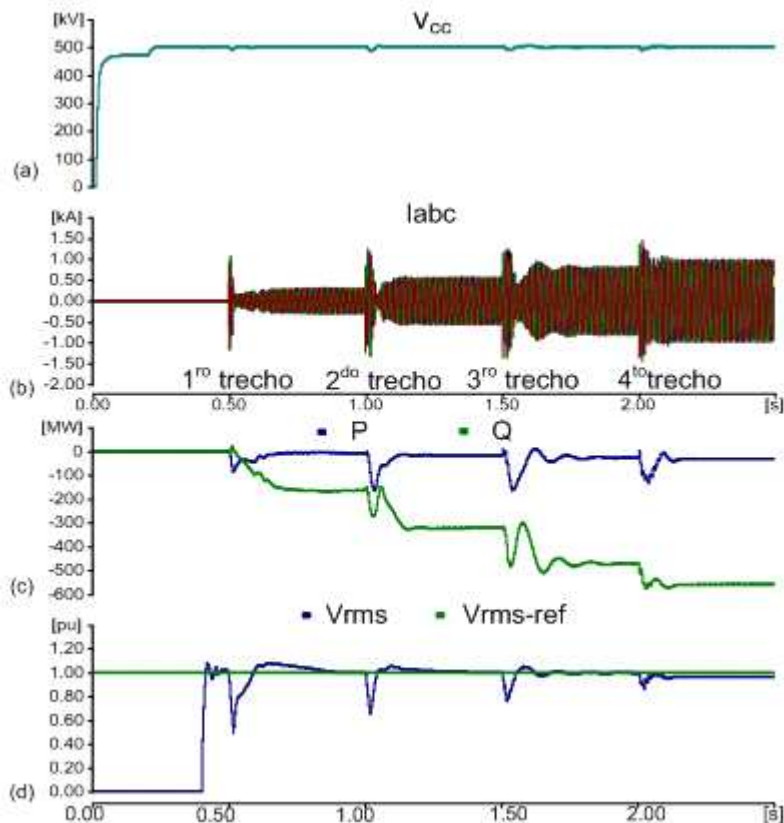


FIGURA 6 – Variação de grandezas no VSC durante a energização da LT: (a) tensão no elo CC; (b) corrente CA nos terminais do conversor; (c) potência ativa e reativa; (d) tensão CA em pu. na saída do VSC-1.

Tabela 2: Resumo das tensões máximas em pu obtidas durante a energização dos trechos da LT de 500 kV nos três casos analisados

Trechos de 350 km	Energização a partir de SEP1, sem SVC	Energização a partir de SEP1, com SVC	Energização a partir de VSC-B2B sem SVC
1 ^{ro} trecho	1,30 pu.	1,27 pu.	1,04 pu.
2 ^{do} trecho	1,70 pu.	1,42 pu.	1,08 pu.
3 ^{ro} trecho	2,20 pu.	1,13 pu.	1,40 pu.
4 ^{to} trecho	3,30 pu.	1,40 pu.	1,22 pu.
R. Permanente	2,40 pu.	1,08 pu.	0,95 pu.

3.4 CASO 4: Curto Circuito Trifásico e Monofásico

Tendo em vista a necessidade de proteção das chaves (IGBTs) dos VSCs contra sobrecorrentes, neste trabalho são avaliados dois mecanismos de proteção diante de correntes de curto-circuito. Assim, deseja-se limitar essa corrente a um valor menor ou igual à máxima capacidade de corrente dos IGBTs e também limitar a contribuição do VSC-B2B ao ponto de defeito durante curto-circuito na linha ou rede.

Um destes dois mecanismos consiste em bloquear os IGBTs após a detecção da sobrecorrente ou queda de tensão durante o defeito.

O outro mecanismo consiste em reduzir (de forma automática pela ação do sistema de controle dos VSCs) o fluxo de potência pelo VSC-B2B durante o defeito. O controle por corrente dos VSCs permite limitar a contribuição da corrente no ponto de defeito, para isso, a tensão no lado CA do conversor é medida e se esta for menor que 0,5 pu, o mecanismo de bloqueio ou de redução de fluxo de potência é ativado.

A Figura 7 mostra as variações das potências durante o defeito. Observa-se que, antes do defeito, a potência vindo do SEP2 é negativa e de magnitude equivalente à potência injetada pelo VSC-2, que opera como inversor. Durante o defeito, essa potência se torna positiva e sem controle, característico da rede equivalente. Entretanto, a potência vinda do lado do SEP1 e pelo VSC-B2B é limitada a zero pela ação do mecanismo de controle. Ou seja, a corrente ativa é limitada a zero, e apenas a corrente reativa circula pelo conversor (não mostrada na figura). Após a eliminação do defeito o sistema volta à operação normal.

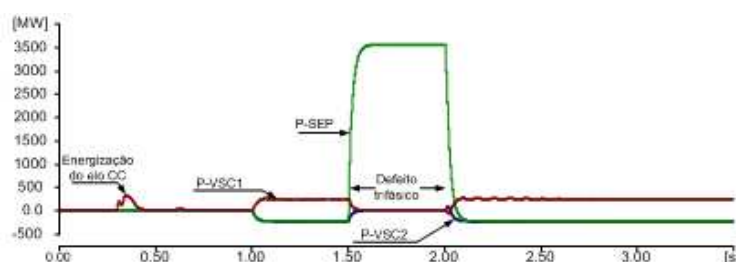


FIGURA 7 – Potências ativas no VSC1, VSC2 e do SEP2 durante o defeito trifásico

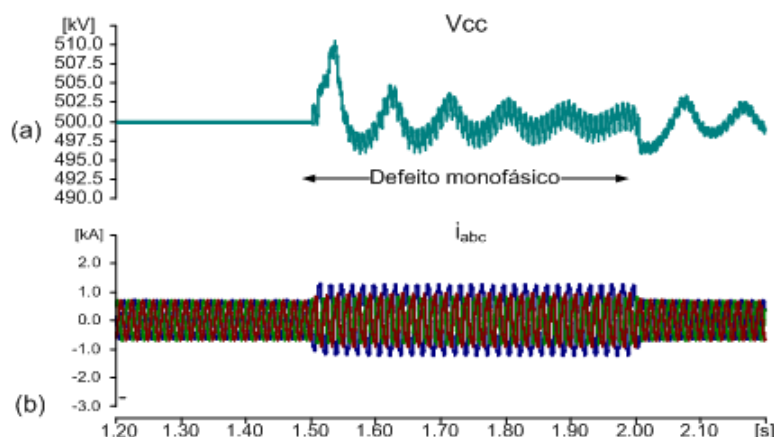


FIGURA 8 – (a) Tensão no elo CC; (b) corrente no conversor durante o curto-circuito monofásico.

O defeito monofásico é produzido conectando uma fase à terra através de uma resistência de 10 ohms durante 5ms (este tempo de defeito pode ser 100ms a fim de cumprir com o procedimento de rede).

As Figuras 8 (a) e (b) mostram a variação da tensão no elo CC e a corrente no conversor durante o

defeito, respectivamente. Fica evidente neste estudo que o conversor controla a corrente, não permitindo que esta ultrapasse os limites das chaves semicondutoras.

3.5 CASO 5: Religamento Monopolar

Durante a operação de um sistema de transmissão, a probabilidade de ocorrer um defeito monofásico é alta. Realizar manobras sob estas condições é um trabalho que deve seguir critérios mediante estudos de contingências. Para eliminar um defeito, é necessária a abertura dos disjuntores correspondentes à fase defeituosa. O tempo que esta fase deve ficar aberta depende do tempo que tarda a extinção do arco secundário e das características do SEP em termos de estabilidade. Segundo o procedimento de rede, o tempo morto deve ser igual a 500ms, portanto, é importante que o sistema de conversores do B2B-VSC se mantenha operando e controlando a potência ativa e a tensão em terminais CA, mesmo que alimentado por duas fases apenas.

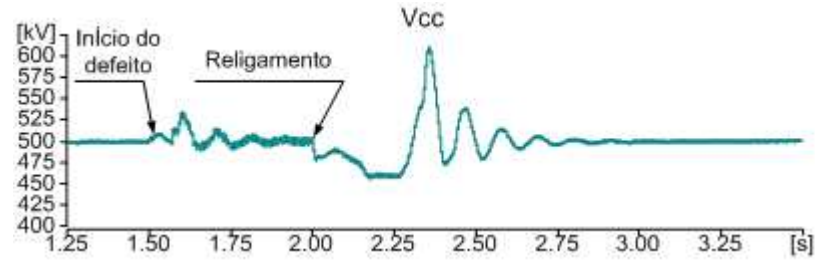


FIGURA 9 – Tensão no elo CC

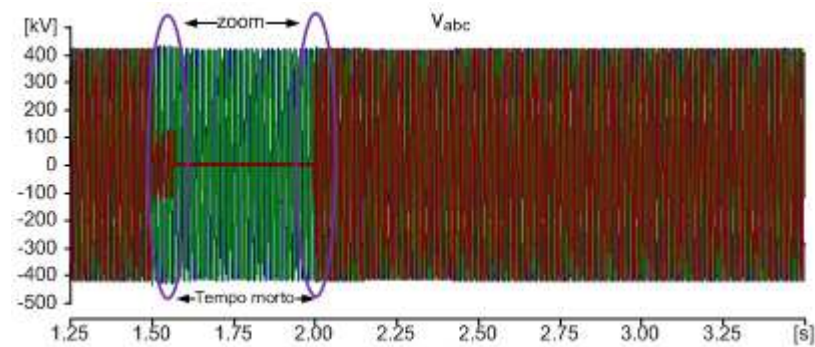


FIGURA 10 – Tensão na LT

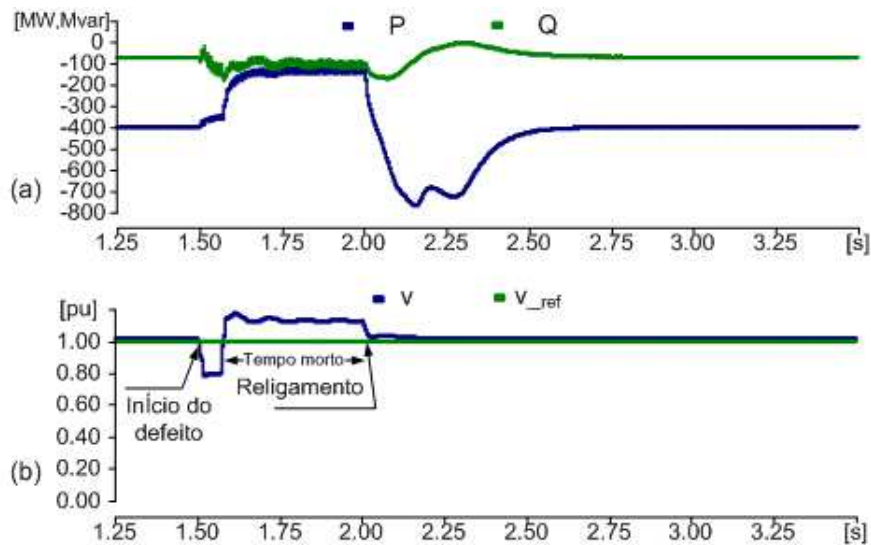


FIGURA 11 – (a) potência ativa e reativa; (b) tensão no LT

A Figura 9 e 10 mostram a variação da tensão no elo CC e a corrente CA no conversor. Apesar da variação da tensão CC, esta se encontra dentro de limites seguros para o conversor.

A Figura 11 mostra a variação da potência ativa, reativa e a tensão rms em pu na barra do lado da LT.

Dos resultados mostrados, pode-se observar que, durante a manobra de liberação do defeito e durante o tempo morto, o sistema de controle dos VSCs mantém controladas as potências e tensões CC e CA. Porém,

durante a manobra de religamento, as respostas do sistema de controle dos VSCs são mais lentas. Com isso, produz-se um incremento da corrente e oscilações de potência, mas em poucos segundos estas variáveis voltam a ser controladas. É notável como o sistema de conversores ajuda a manter a estabilidade do sistema de potência.

3.6 CASO 6: Rejeição de carga

A fim de testar o desempenho destes conversores em paralelo, foram implementados modelos idênticos de B2Bs, mostrados na Figura 1. Isso foi feito com o objetivo de distribuir o fluxo de potência em partes iguais e de assumir o controle da tensão com a mesma hierarquia. Durante a operação em regime permanente, o sistema da Figura 1 não apresenta interações entre eles nem com o sistema de transmissão.

Um dos cenários de operação de uma rede elétrica básica é a operação em condição de n-1. Neste caso, pode ser considerado que uma linha foi desligada por defeito ou por manutenção. Se o desligamento for por defeito, pode se tornar em uma condição crítica para a rede, principalmente se por ela estiver fluindo grandes blocos de potência.

No sistema estudado, um dos objetivos é manter o controle do fluxo de potência através da linha e dos VSC-B2Bs e ajudar a estabilidade da rede interligada.

A Figura 12 mostra a potência ativa e reativa registradas no fim da linha, onde se pode observar que, antes do defeito, a potência ativa é 1,6 GW. Após o desligamento da linha 2, a potência fica próxima à potência nominal da linha 1. Nota-se também que a oscilação é amortecida pelos VSCs em B2B em paralelo. Um comportamento similar acontece com a potência reativa.

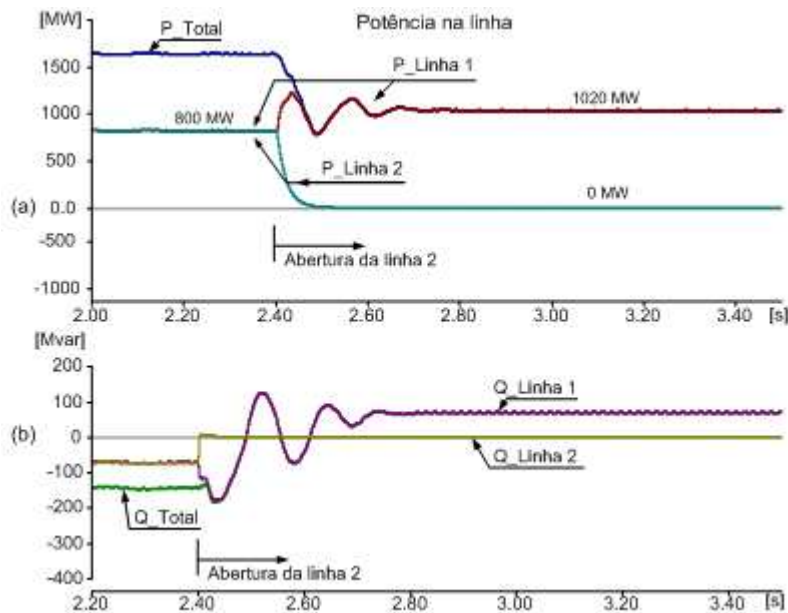


FIGURA 12 –

4.0 - CONCLUSÃO

Conforme os resultados mostrados, pode-se concluir que: é viável energizar uma linha de transmissão de longa distância e de forma controlada a partir dos VSCs em B2B; além de controlar a corrente e tensão no LT durante as manobras transitórias; o VSC-B2B mostrou-se versátil para limitar a contribuição da corrente de curto-circuito, mantendo a conexão dos sistemas elétricos de potência e com isso, melhorando a estabilidade das redes; a aplicação dos conversores em B2Bs para segmentar longas LTs, permitem que esta pode ser sobrecarregada em situações de operação em emergência, sem comprometer a estabilidade da interligação.

5.0 - AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro de um projeto de P&D ANEEL envolvendo as empresas Eletronorte, Furnas, CEMIG, AET e CTEEP.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Cigre-B4.37, "VSC transmission," CIGRE, Paris, Final Report 269, April 2005.

- (2) C. L. M. R. D. de Oliveira, A.L.P.; Tiburcio, "Prospects of voltage-sourced converters (vsc) applications in power transmission systems," ANDESCON, 2010 IEEE, pp. 1-4, 2010.
- (3) CIGRE SC-B4 WG 39, "Integration of large scale wind generation using hvdc and power electronics," in Cigre SC-4, vol. Final Document, Paris, 2009.
- (4) G. Gelda, Schneider, L. E. Zaffanella, "HVDC Transmission Line Reference Book", Electric Power Research Institute Technical Report TR-I02764, (1993)
- (5) E. H. Watanabe, M. Aredes, P. Barbosa, G. Santos Jr., F. K. de Araújo Lima, and R. F. da Silva Dias, Power Electronics Handbook - Devices, Circuits, and Applications. Elsevier, 2007, ch. Flexible AC Transmission System, pp. 797-822.
- (6) CAVALIERE, C.A.C. Análise de STATCOM operando em sistemas desbalanceados. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, jul/ 2001.
- (7). Akagi-H, E. H. Watanabe, and M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, IEEE Press/Wiley., 2007.
- (8) D. G. Holmes and T. A. Lipo, Pulse Width Modulation For Power Converters - Principles and Practice, ser. IEEE Series on Power Engineering. USA: Wiley-Interscience, Inc., 2003.
- (9) P. M. Anderson, Analysis of Faulted Power Systems, IEEE Press power engineering series. New York: IEEE Press, 1995.
- (10) G. Asplund, K. Eriksson, and K. Svensson, "*Dc transmission based on voltage source converters*," in CIGRE SC-14 Colloquium, Johannesburg, 1997.
- (11) CIGRE SC-B14 WG 07, "Guide for planning dc links terminating at ac system locations having low short-circuit capacities. part II : Planning guidelines," in Cigre SC-14, 1997.
- (12) M. R. I. F. I. Houshang Karimi, Masoud Karimi-Ghartemani and A. R. Bakhshai, "An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions," IEEE, USA, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 4, OCTOBER 2003 pp, 1350-1357, April 2003.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Braulio Chuco: Engenheiro eletricista, formado pela Universidade Nacional del Callao em Perú em 2002, mestrado na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - MS em 2007, Doutorado em andamento na COPPE/UFRJ-RJ. Atua na área de transitórios eletromagnéticos e aplicação de eletrônica de potência em sistemas elétricos de potência (FACTS e HVDC).