



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

FI/GAT/23
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO-IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA- GAT

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA CCAT HÍBRIDO COMPOSTO POR CONVERSORES FONTE DE CORRENTE E TENSÃO

**PAULO MAX M. PORTUGAL(*)
COPPE-UFRJ/ELETRONBRAS**

**EDSON H. WATANABE
COPPE-UFRJ**

**NILO JOSÉ P. DE MACEDO
CONSULTOR**

RESUMO

Neste trabalho está sendo proposto um novo sistema de transmissão em corrente contínua, chamado de H²VDC (Hybrid HVDC), que utiliza os dois tipos de conversores (CSC e VSC) no mesmo circuito. Nesse artigo é analisada uma evolução desse sistema na topologia com um CSC e três VSCs conectados a partir de um ponto de acoplamento comum em configuração multiterminal, conectando vários pontos do sistema brasileiro. Esse sistema foi apresentado inicialmente em (1) e (2). A análise desse sistema é feita através de simulações em regime permanente e algumas emergências mais importantes para a operação desse sistema, na ferramenta computacional PSCAD/EMTDC.

PALAVRAS-CHAVE

Multiterminal, CSC, VSC, H²VDC, Lógica de proteção

1.0 - INTRODUÇÃO

Em alguns países como Brasil, China e Índia, que apresentam dimensões continentais, novas usinas hidrelétricas estão sendo construídas longe dos principais centros de carga em distâncias que podem chegar a 2000 ou 3000 km. Este motivo, associado ao montante de energia a ser transportado, torna os sistemas de transmissão em corrente contínua mais atrativos em relação aos sistemas de corrente alternada. Atualmente, existem duas tecnologias para o processo de conversão CA/CC e CC/CA: CSC (conversores fonte de corrente baseados em tiristores) e o VSC (conversores fonte de tensão baseados em IGBTs ou IGCTs). A grande maioria dos projetos dos sistemas de transmissão CCAT utiliza a tecnologia CSC que é capaz de converter montantes de potência de até 2 GW por conversores de 12 pulsos (3). O sistema de transmissão VSC é relativamente novo e portanto ainda apresenta poucas aplicações em sistemas de transmissão CCAT, assim como a sua capacidade de transmissão de potência é bem menor (4).

A partir dos pontos citados acima, um novo sistema de transmissão em corrente contínua baseado em CSC e VSC no mesmo circuito, chamado de H²VDC, é proposto nesse artigo. Essa nova topologia adiciona, no mesmo circuito, os benefícios existentes no CSC e no VSC. Na sua concepção, em um dos terminais, é usado o conversor fonte de corrente operando preferencialmente como retificador e nos outros terminais são usados os conversores fonte de tensão numa configuração multiterminal, operando, preferencialmente, como inversores a partir de um ponto de acoplamento em comum chamado de PCC. Esse sistema aglutina os pontos fortes de cada conversor num único sistema de transmissão CCAT. A principal finalidade do uso do conversor fonte de corrente em um lado da linha de transmissão CC é que o seu estado da arte permite a conversão de altas potências (na faixa de 2 GW por ponte de 12 pulsos). O uso de conversores fonte de tensão em configuração multiterminal, no outro lado da linha CC, é para utilizar os benefícios operativos intrínsecos ao VSC que serão mostrados com mais detalhes à frente (não há falhas de comutação, não há necessidade de nível mínimo de SCR, etc), assim como entregar potência diretamente para

(*) Rua do Ouvidor, n° 107 – 8º andar – CEP 99.999-999 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2514-5437 – Fax: (+55 21) 2514-5210 – Email: portugal@eletrobras.com.br

várias redes CA receptoras. A aplicação do sistema de transmissão H^2VDC é viabilizada para sistemas de potência com características de grandes blocos de geração, principalmente do tipo hidrelétrica, distantes dos principais centros de carga. A concepção desse sistema também pode ser aplicada ao conceito de “supergrids”. A pesquisa e o desenvolvimento do sistema de transmissão H^2VDC podem trazer grandes benefícios à operação dos sistemas de potência reais, assim como redução de custo global. O sistema H^2VDC contém várias características que podem ser usadas para facilitar e melhorar a operação dos sistemas de potência, as quais são citadas:

- O CSC baseado em tiristores possui capacidade de conversão de altas potências, na ordem dos GW a baixo custo;
- O VSC pode operar tanto na faixa capacitiva quanto na indutiva em termos de potência reativa, o que pode reduzir a necessidade de inserção de equipamentos para compensação de potência reativa nos terminais do VSC e consequentemente o seu custo;
- O controle das potências ativa e reativa de cada VSC é feito independentemente, limitado apenas pela capacidade (rating) do VSC, ou seja, esse controle de potência reativa somente será feito se o conversor não estiver ainda operando na sua capacidade máxima;
- O VSC não necessita de nível mínimo de curto-circuito (SCR- Short Circuit Ratio) na sua rede receptora CA para a sua operação, o que dispensa a inserção de compensadores síncronos nos seus terminais ocasionando uma redução de custos;
- O VSC pode ser conectado a redes CA passivas (esta situação não é estudada nesse trabalho);
- Uma rede CA receptora colapsada pode ser restaurada pela capacidade de black-start dos VSCs (essa operação não é estudada nesse trabalho);
- Podem ser usados VSCs em configurações MMC (conversores multimodulares) que dispensam o uso de filtros CA na rede receptora pois podem modular uma senóide muito próxima da fundamental;
- A potência total do sistema pode ser entregue, diretamente, em diferentes centros de carga de um determinado sistema de potência;
- É possível haver intercâmbio de potência entre os próprios VSCs que estão conectados em configuração multiterminal, quando houver necessidade de aumento de potência em um dos VSCs e o retificador já está na sua potência máxima.

Maiores detalhes sobre o estudo, desenvolvimento e operação do sistema H^2VDC podem ser vistos em (5).

2.0 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO H^2VDC ANALISADO

2.1 Principais Características

O sistema H^2VDC , na sua concepção, é formado por um CSC e n VSCs em configuração multiterminal fornecendo potência ativa para diferentes centros de carga de um sistema elétrico. Para o estudo do comportamento desse sistema e demonstração da sua aplicação prática é analisada uma configuração monopolar com um CSC em ponte de 12 pulsos operando como retificador e três VSCs que normalmente operam como inversores e fornecem potência para 3 centros de carga. A conexão desses conversores é feita através de trechos de linhas de transmissão CC aérea. Esses centros de carga podem ser, hipoteticamente, os estados brasileiros de São Paulo (conexão na SE Araraquara), Rio de Janeiro (conexão na SE Adrianópolis) e Minas Gerais (conexão na SE Bom Despacho). O CSC está conectado, hipoteticamente, na SE Porto Velho, no estado de Rondônia, onde está localizada a usina hidrelétrica de Santo Antônio. A Figura 1 mostra com mais detalhes a configuração do sistema de transmissão H^2VDC estudado com os seus respectivos pontos de medição de interesse.

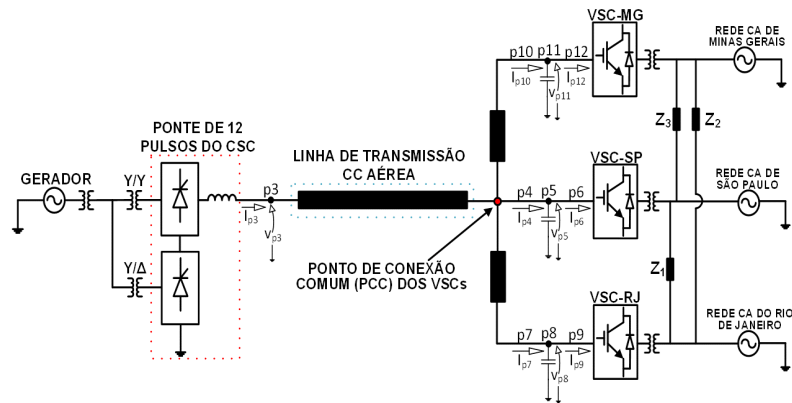


Figura 1 - Sistema de transmissão H²VDC com um CSC e n terminais VSCs em configuração multiterminal

Na Figura 1, **Z₁** representa a impedância equivalente entre as redes CA do Rio de Janeiro e São Paulo, **Z₂** representa a impedância equivalente entre as redes do Rio de Janeiro e Minas Gerais e **Z₃** a impedância equivalente entre as redes de São Paulo e Minas Gerais. O ponto de conexão comum (PCC) dos VSCs é o ponto a partir do qual ocorre a ramificação da configuração multiterminal dos VSCs pelo sistema elétrico brasileiro.

Para o estudo do comportamento do sistema H²VDC mostrado na Figura 1, foram adotados, inicialmente, com algumas adaptações, os mesmos parâmetros de um polo do sistema de transmissão CC usado para o escoamento da potência gerada pelas usinas hidrelétricas do Rio Madeira (Santo Antônio e Jirau). Esse aproveitamento hidrelétrico (AHE) terá uma potência total de 6900 MW quando todas as máquinas tipo Kaplan-Bulbo estiverem em operação, no ano de 2016. A Tabela 1 descreve os principais parâmetros que serão adotados no sistema H²VDC estudado nesse trabalho.

Tabela 1- Parâmetros do sistema de transmissão H²VDC

Parâmetros	Valores
Potência nominal do retificador CSC	1860 MW
Tensão CC nominal no retificador CSC	600 kV
Corrente CC nominal no retificador CSC	3100 A
Potência aparente nominal dos VSCs	1800 MVA
Potência ativa nominal dos VSCs	1800 MW
Tensão CC nominal dos VSCs	520 kV
Corrente nominal dos VSCs	3461 A
Tensão nominal da rede CA receptora dos VSCs	500 kV
Capacitância dos VSCs	400 µF
Constante de inércia dos VSCs ($H = (1/2 CV^2)/S$)	30 ms

Em relação aos dados apresentados na Tabela 1, algumas análises técnicas podem ser feitas em relação à potência nominal considerada para todos os VSCs do sistema H²VDC. Para cada VSC foi considerada a potência de 1800 MVA, que é um valor bem próximo da potência nominal do CSC. Como não está sendo considerada nenhuma análise de custo nesse trabalho, e foi estabelecido que apenas um VSC poderia despachar toda a potência transmitida pelo retificador, a relação entre a potência do retificador e potência de um inversor será igual a 1. Num sistema de potência real, uma análise mais detalhada do custo x potência a ser transmitida x capacidade de sobrecarga aplicada em cada VSC x critério aplicado deve ser feita para seja estabelecido um ponto ótimo na operação do sistema H²VDC.

2.2 Modos de controle

2.2.1 Conversor Fonte de Corrente

Inicialmente, para o processo de carga dos capacitores, o controle do CSC está operando em modo de controle de tensão, como destacado na linha azul da Figura 2. Durante esse processo, a referência da tensão CC do CSC é ajustada em 530 kV numa rampa de subida de 100 kV/s. Quando a tensão no capacitor do VSC de São Paulo atinge o seu valor nominal (520 kV), é enviado um sinal de comando para que o controle do retificador troque a sua

filosofia de controle de tensão CC para corrente CC e a partir desse instante, comece a transmissão normal de potência no sistema H²VDC. Esse sinal, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 2, é representado pela letra α . Apesar do sinal ser gerado instantaneamente quando a tensão CC no capacitor do VSC-SP atinge o seu valor nominal, o segundo estágio do controle do retificador (corrente CC) somente será habilitado depois de 16 ms que é o tempo utilizado para que o sinal trafegue os 2450 km entre as subestações do VSC-SP ou PCC para o retificador em Porto Velho.

Logo após o controle do retificador ser comutado de modo de tensão CC para corrente CC, somente o VSC-SP está habilitado para transmitir potência e os outros VSCs permanecem bloqueados. A ordem de corrente (I_{ORD}) é fornecida ao controle através da aplicação de uma rampa de 0,035 kA/s, que em termos de potência CC no retificador equivale a 19 MW/s. Esse rampeamento da ordem de corrente é somado ao sinal do controle de frequência, stab60, dado por ΔPFC . Esse valor é multiplicado por 3,1 para se ter esse sinal em kA.

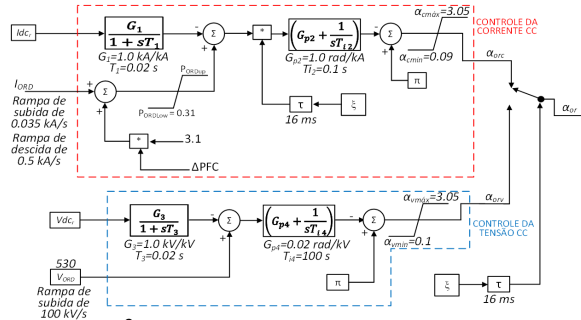


Figura 2 – Sistema de transmissão H²VDC com um CSC e n terminais VSCs em configuração multiterminal

2.2.2 Conversor Fonte de Tensão

As filosofias de controle desenvolvidas para os VSCs do sistema H²VDC foram baseadas na aplicação da teoria do controle vetorial, juntamente com a estratégia de modulação por largura de pulso senoidal (SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation). O controle vetorial desenvolvido nesse trabalho teve como base a referência (6).

O princípio básico do controle vetorial é a transformação das grandezas elétricas referenciadas aos eixos estacionários abc para um sistema de referências ortogonais rotacionais dq, através da aplicação da Transformada de Park, que giram sincronizadas com a frequência da rede CA. Esse tipo de controle permite que as potências ativa e reativa do sistema sejam controladas de forma desacoplada uma da outra. Para o desenvolvimento do controle vetorial, considerou-se, inicialmente, um sistema trifásico a três fios com as três fases balanceadas. As variáveis de tensão ou corrente no eixo de referência estacionário abc são dados por:

$$\begin{aligned} x_a &= X_a \sin(\theta) \\ x_b &= X_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ x_c &= X_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

onde $\theta = \omega t$ e ω é a frequência angular da rede CA.

A Transformada de Park dos eixos estacionários abc para os rotacionais síncronos dq é dada por:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Em (6) são apresentados alguns modos de controle que podem ser utilizados no controle dos conversores fonte de tensão. A partir desses modos são aplicados os seguintes controles para os VSCs do sistema H²VDC:

- VSC-SP (São Paulo) – Tensão CC e Tensão CA;
- VSC-RJ (Rio de Janeiro) – Potência CA e Tensão CA;
- VSC-MG (Minas Gerais) – Potência CA e Tensão CA.

Os diagramas de bloco apresentados na Figura 3 são referentes aos modos de controle aplicados aos VSCs do sistema H²VDC e descritos anteriormente. Nessas figuras também são mostrados os ajustes aplicados em cada bloco do controle. Vale ressaltar que os parâmetros desses controles foram ajustados somente através do método de tentativa e erro, sem nenhum método mais específico de ajuste.

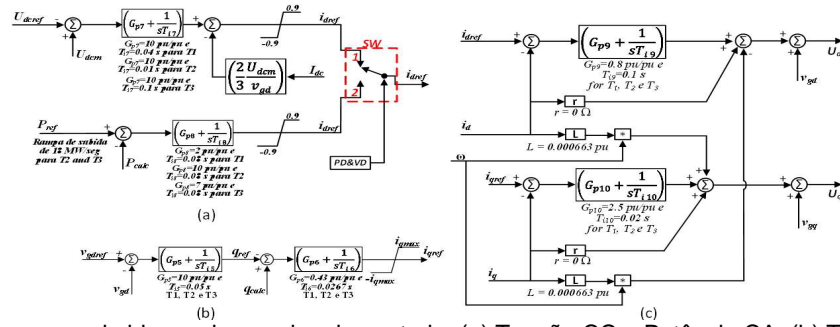


Figura 3 – Diagramas de blocos dos modos de controle: (a) Tensão CC e Potência CA, (b) Tensão CA e (c) Controle de corrente.

O VSC-SP controla a tensão CC do sistema H²VDC na configuração multiterminal. A Figura 3-(a) mostra a malha de controle da tensão CC usada no VSC-SP, quando a chave **SW** opera na posição 1 e uma outra malha, para uma eventual necessidade de controle da potência CA, fica na posição 2. O VSC-RJ e o VSC-MG controlam a potência CA e consequentemente o VSC-SP é o “slack” de potência do sistema. A malha de controle de potência usada no VSC-RJ e VSC-MG é mostrada na Figura 3-(a), sendo, essa malha, nos VSCs de RJ e MG, usada na posição 1 da chave **SW** e uma outra malha, para uma eventual necessidade de controle da tensão CC, fica na posição 2. O termo P_{calc} no bloco soma da malha de potência mostrada na Figura 3-(a) é a potência ativa calculada nos eixos de referência dq como mostrado em (6). A Figura 3-(b) mostra o controle da tensão CA aplicado para todos os VSCs (SP, RJ e MG).

As malhas de controle da Figura 3-(a) e (b) geram os sinais de referência de corrente nos eixos dq, i_{dref} e i_{qref} , respectivamente, a partir do controle de potência e tensão CA. Esses sinais de referência de corrente são as entradas do controle de corrente mostrado na Figura 3-(c), que fornece os sinais de referência de tensão nos eixos dq.

Conforme citado anteriormente, o VSC-SP opera em modo de controle de tensão CC e fornece a referência de tensão CC para o sistema H²VDC. Assim, quando há o bloqueio do VSC-SP, o controle da tensão CC é perdido e o sistema não consegue mais transmitir potência numa forma estável. Uma das formas de resolver esse problema seria colocar dois ou mais VSCs em controle de “droop” de tensão (6) para que na perda de um conversor com esse controle ainda existam outros no sistema. Como outra alternativa para solucionar esse problema foi desenvolvido, nesse trabalho, um controle chamado de lógica de proteção. Esse controle detecta, através do comportamento da tensão CC e tensão CA do seu próprio VSC, o bloqueio de algum VSC na configuração multiterminal e gera um sinal para que o modo de controle do VSC no qual essa lógica está conectada seja mudado. A Figura 4 mostra o diagrama de blocos da lógica de proteção aplicada somente aos VSCs do RJ e MG. Outra funcionalidade aplicada à lógica de proteção mostrada na Figura 4 é a mesma atuação quando ocorre um curto-circuito trifásico na rede CA equivalente do VSC-SP. Nesse caso, quando há um curto-trifásico na rede CA equivalente do VSC-SP, há um excesso de potência, transitoriamente, na rede CC do sistema H²VDC que causa sobretensões nos terminais dos capacitores dos VSCs. Assim, quando a lógica de proteção detecta esse curto-circuito ela envia um sinal para que o modo de controle do VSC ao qual ela está conectada seja trocado. Essas são as duas funções básicas de operação dessa lógica.

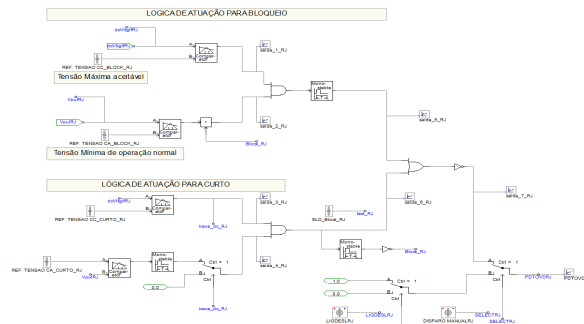


Figura 4 – Diagrama de blocos da lógica de proteção aplicada aos VSCs RJ e MG.

3.0 - SIMULAÇÕES

A principal finalidade das simulações desenvolvidas aqui é analisar o comportamento do sistema H²VDC em condição de operação normal e em algumas condições de emergência. As simulações desenvolvidas são mostradas a seguir:

3.1 Processo de partida

Neste trabalho está sendo considerado que o gerador equivalente da usina hidrelétrica está, inicialmente, desconectado do sistema H^2VDC e opera, inicialmente, como fonte de tensão. Em 0,05 s ele passa a operar como gerador equivalente de frequência constante e igual a 1 pu. Quando $t=2,0$ s é enviado um sinal de controle para que o gerador equivalente passe a operar como máquina com dinâmica mecânica (com frequência variável). Em $t=2,1$ s é enviado um sinal para o fechamento do disjuntor da usina que acopla o gerador equivalente ao lado CA do retificador. Após o acoplamento do gerador no retificador há o processo de carga dos capacitores dos VSCs. Durante esse processo, a referência da tensão CC do CSC é ajustada em 530 kV numa rampa de subida de 100 kV/s. Quando a tensão no capacitor do VSC de São Paulo atinge o seu valor nominal (520 kV), é enviado um sinal de comando para que o controle do retificador troque o seu modo de controle de tensão CC para corrente CC e a partir desse instante, comece a transmissão normal de potência no sistema H^2VDC .

Logo após o controle do retificador ser comutado de modo de controle de tensão CC para corrente CC, e começar o rampeamento de corrente na taxa de 0,035 kA/s, somente o VSC-SP está habilitado para transmitir potência e os outros VSCs permanecem bloqueados. Inicialmente, o primeiro VSC a ser rampeado é o de São Paulo, juntamente com o retificador, até a potência de 300 MW. Depois, o VSC do Rio de Janeiro é disparado e começa a rampear potência na ordem de 19 MW/s até o seu valor de ajuste em regime permanente que é de **486 MW**. Quando o VSC do Rio de Janeiro atinge o seu valor de regime permanente, o VSC de Minas Gerais é disparado e começa a rampear potência na ordem de 19 MW/s até o seu valor de regime permanente em **308 MW**. A partir desse ponto, o aumento de potência no retificador ocasiona aumento somente na potência transmitida pelo VSC-SP ("slack" de potência) enquanto o VSC-SP e VSC-RJ ficam estabilizados nos seus valores de regime permanente (controle de potência). O valor de regime para o VSC-SP fica em **840 MW**. O valor do rampeamento da potência do VSC-RJ e do VSC-MG, 19 MW/s, foi adotado considerando a premissa na qual a derivada de potência do VSC de São Paulo deve ser igual a zero durante o rampeamento de potência do VSC-RJ ou VSC-MG. Os pontos de medição utilizados em cada figura das simulações podem ser analisados com mais detalhes na Figura 1. A Figura 5 e a Figura 6 mostram o comportamento da tensão CC e da potência CC, respectivamente, do sistema H^2VDC durante o seu processo de partida.

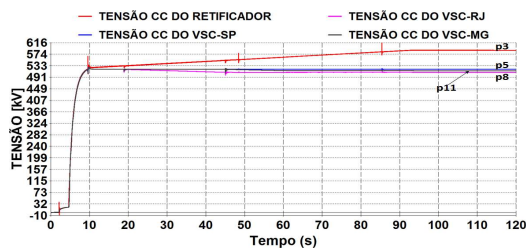


Figura 5 – Tensão CC do retificador CSC, VSC-SP, VSC-RJ e VSC-MG

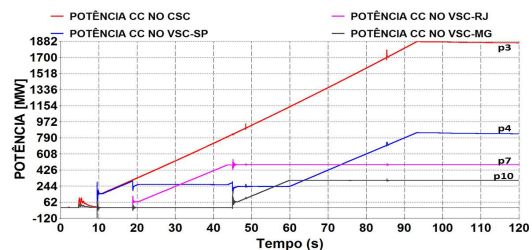


Figura 6 – Potência CC no retificador CSC, VSC-SP, VSC-RJ e VSC-MG

3.2 Bloqueio do VSC-SP

O bloqueio permanente do VSC-SP traz problemas à operação normal do sistema H^2VDC , pois no bloqueio desse conversor, pelo fato dele operar em modo de controle de tensão CC, o lado CC do sistema perde esse controle e, consequentemente, o balanço de potência fica comprometido levando o sistema ao colapso. Outra característica visualizada nessa emergência é que a potência transmitida pelo VSC-SP é interrompida e nenhum outro VSC está habilitado a transmitir a potência do VSC-SP pois eles estão em modo de controle de potência e não recebem nenhum comando para alterar a sua ordem de potência. A ordem para o bloqueio permanente do VSC-SP é dada em $t=2$ segundos de simulação e continua durante todo o tempo de simulação. A Figura 7 e a Figura 8 mostram o comportamento da potência CC no sistema H^2VDC , considerando o bloqueio permanente do VSC-SP, sem e com, respectivamente, a ação da lógica de proteção no VSC-RJ para a troca do seu modo de controle de potência CA para tensão CC. Maiores detalhes sobre o desenvolvimento e a operação dessa lógica de proteção desenvolvida para ser aplicada em sistemas CCAT-VSC, com características de multiterminais, podem ser estudados em (5).

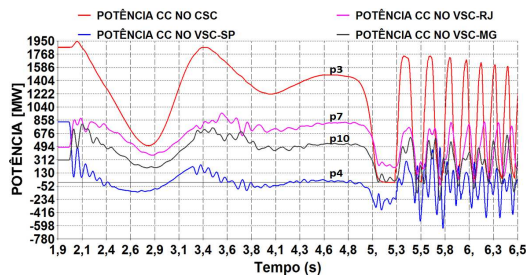


Figura 7 – Potência CC no retificador CSC, VSC-SP, VSC-RJ e VSC-MG sem a atuação da lógica de proteção no VSC-RJ

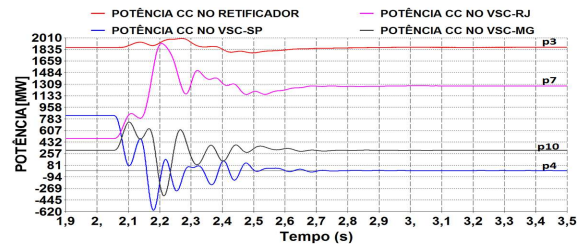


Figura 8 – Potência CC no retificador CSC, VSC-SP, VSC-RJ e VSC-MG com a atuação da lógica de proteção do VSC-RJ

A Figura 7 e a Figura 8 mostram o comportamento da potência CC do sistema H^2VDC , considerando o bloqueio permanente do VSC-SP, sem e com a atuação da lógica de proteção no VSC-RJ, respectivamente. A análise da Figura 7 mostra que o sistema H^2VDC entrou em colapso pelo fato do controle de tensão CC ter sido eliminado com o bloqueio do VSC-SP. A lógica de proteção desenvolvida, conforme mostrada na Figura 4, comuta somente o modo de controle do VSC-RJ de potência CA para controle de tensão CC. Com isso, o controle da tensão do lado CC do sistema é reestabelecido e o sistema volta a transmitir potência normalmente. A Figura 8 mostra a potência CC no sistema H^2VDC com a atuação da lógica de proteção no VSC-RJ. Nessa figura é observado que há tensão transitória com valor elevado, porém o sistema não entrou em colapso e é capaz de transmitir potência normalmente em regime permanente diferentemente do caso quando não há essa troca de filosofia de controle. Os valores das sobretensões podem ser reduzidos através de otimizações nos ajustes dos parâmetros da malha de controle de tensão do VSC-RJ. O valor máximo observado de tensão CC foi no VSC-MG, que chegou a aproximadamente 1,24 pu (645 kV) no pico do transitório apenas e não sendo sustentada durante o regime permanente.

3.3 Curto-Circuito trifásico do VSC-SP

Essa emergência é aplicada em $t=2$ s. de simulação com duração de 100 ms, ou seja, é retirada em $t=2,1$ s.

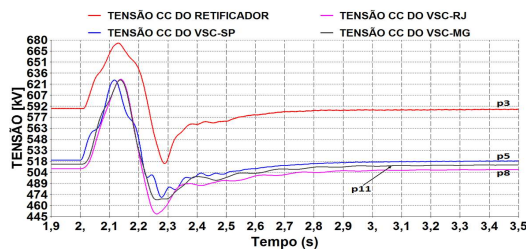


Figura 9 – Tensão CC do retificador CSC, VSC-SP, VSC-RJ e VSC-MG, sem a lógica de proteção.

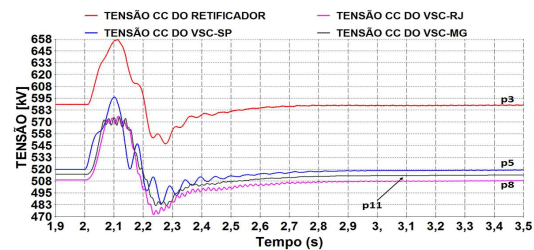


Figura 10 – Tensão CC do retificador CSC, VSC-SP, VSC-RJ e VSC-MG, com a lógica de proteção

As tensões CC do sistema, considerando a inserção das lógicas de proteção no VSC-RJ e VSC-MG, para um curto-circuito trifásico no VSC-SP, são mostradas na Figura 10. Com a atuação dessa lógica, o valor máximo das tensões foi reduzido de 623 kV (Figura 9) para 570 kV. Apesar de ser usada nesse trabalho uma configuração com duas lógicas de proteção para análise do sistema H^2VDC , essa característica do número de lógicas a ser aplicada deve ser decidida através de estudos específicos para sobretensões, máxima suportabilidade do equipamento e critérios de operação.

3.4 Curto-Circuito no meio da linha CC

Como a transmissão de energia elétrica entre as subestações do sistema H^2VDC está sendo feita por linhas de transmissão CC aérea, esse sistema está sujeito à ocorrência de curto-circuitos por causa de descargas atmosféricas (raios), quedas de árvores ou queimadas embaixo da sua faixa de passagem. Assim, por esses motivos, é de grande importância a análise do comportamento do sistema H^2VDC considerando um curto-circuito na linha CC. No caso desse evento é esperado que o retificador CSC seja transitoriamente bloqueado e os VSCs de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas gerais continuem alimentando esse curto pelos diodos em antiparalelo dos IGBTs pelo fato de ser um VSC convencional de dois níveis. Para essa análise é considerado um curto-circuito temporário de 100 ms no meio da linha CC entre as subestações de Porto Velho e Araraquara. A Figura 11 e a Figura 12 mostram as respostas da tensão CC e a corrente nos diodos em antiparalelo do VSC-SP para o curto-circuito no meio da linha CC.

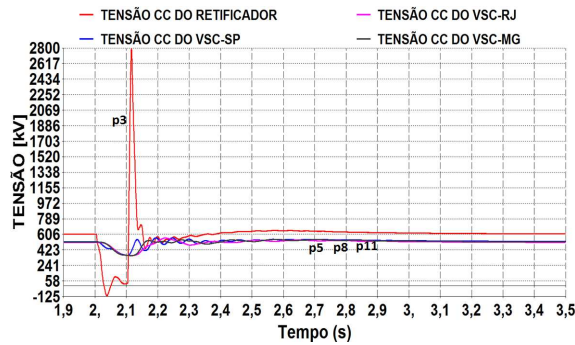


Figura 11 – Tensão CC do retificador CSC, VSC-SP, VSC-RJ e VSC-MG

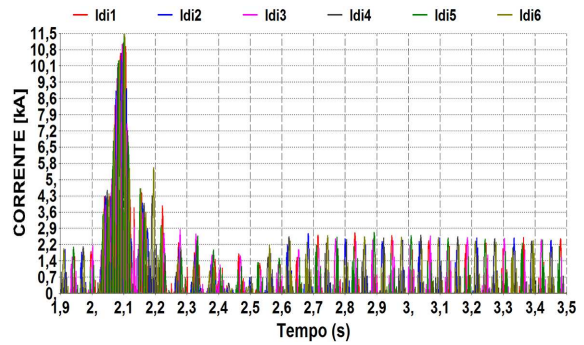


Figura 12 – Corrente nos diodos do VSC-SP

A Figura 12 mostra que os diodos do VSC-SP fornecem um caminho sem controle para a corrente de curto-circuito CC durante esse período. O valor máximo observado para essa corrente, um pouco antes da retirada do curto-circuito, foi de aproximadamente 11,5 kA, o que poderia ocasionar a queima desses elementos. Assim, é possível concluir que devem ser estudadas e analisadas topologias de conversores que usam o MMC (conversores multiníveis) com submódulos em ponte completa para que essa corrente de curto possa ser minimizada ou eliminada (7). Outra solução viável para a operação do sistema H^2VDC nessa condição é projetar os diodos do VSC para suportar esse valor de corrente ou até mesmo usar os disjuntores da rede CA para interromper essa corrente quando há esse evento. O grande problema da abertura de disjuntores CA é o retorno em operação do sistema, que nesse caso pode levar bastante tempo pelo fato de se ter 3 VSCs na configuração multiterminal.

4.0 - CONCLUSÕES

A aplicação do sistema H^2VDC e suas características como capacidade de “black-start”, controle independente de potência ativa e reativa, sem necessidade de valor mínimo de SCR na rede CA equivalente, sem falha de comutação nos seus inversores e a capacidade de transmitir grandes montantes de potência podem trazer muitos benefícios para a operação dos sistemas de potência reais, assim como tornar a sua operação mais confiável. Adicionada a essas características, o montante de equipamentos de potência reativa e o seu custo podem ser reduzidos. A emergência do bloqueio do VSC-SP causa colapso no sistema pois o controle da tensão CC é perdido. Para os casos nos quais são necessárias medidas operativas para manter a integridade do sistema foi desenvolvido um controle com uma lógica de proteção. A lógica de proteção desenvolvida, conforme mostrado na Figura 4, detecta que houve um bloqueio do VSC-SP e atua mudando o modo de controle do VSC-RJ, de modo de controle de potência para tensão CC e o sistema volta a ter controle de tensão do elo CC. Na condição de curto-circuito trifásico na rede CA equivalente do VSC-SP, as lógicas de proteção do VSC-RJ e VSC-MG atuam e mudam o modo de controle desses VSCs de controle de potência para controle de tensão e compensam o desequilíbrio de potência causado por essa emergência e os valores das sobretensões são reduzidos. As outras emergências não causam grandes problemas ao sistema H^2VDC pelo fato do VSC-SP estar no modo de controle de tensão e compensar os eventuais desequilíbrios de potência.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P.M.M. Portugal, E.H. Watanabe, and N.J.P. Macedo, "Hybrid HVDC System Using Current and Voltage Source Converters", Colloquium HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance - CE B4, October 2-3, 2013, Brasília, Brazil;
- (2) P.M.M. Portugal, E.H. Watanabe, and N.J.P. Macedo, "Study and Development of a Hybrid HVDC System Composed by Current and Voltage Source Converters", XIII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING – XIII SEPOPE, May-18th to 21st - 2014, Foz do Iguaçu (PR) – Brazil;
- (3) Relatório da Empresa de Pesquisa Energética, EPE. Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão-EPE-DEE-RE-063/2012-Rev.1. Disponível em: www.epe.gov.br;
- (4) TEEUWSEN, S.P., "Modeling the Trans Bay Cable Project as Voltage-Sourced Converter with Modular Multilevel Converter Design", IEEE/PES General Meeting, San Diego, CA, USA, 24-29 July 2011;
- (5) PORTUGAL, P. M. M., "Transmissão em Corrente Contínua com Tecnologia Híbrida de Conversores Fonte de Corrente e Tensão", tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil – Ainda em processo de defesa até Março de 2015.
- (6) T. M. Haileselassie, "Control of Multi-terminal VSC-HVDC Systems", M. Sc. dissertation, Dept. Elect. Power. Eng., Univ. Norwegian, Science and Technology, 2008;
- (7) FERREIRA, J. R. B. L., "Transmissão em Corrente Contínua com Conversor Multinível Modular em Ponte Semicompleta", dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil, 2014;

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- PAULO MAX MACIEL PORTUGAL, 1977;
- B. Sc. pela UERJ em 2002/ M. Sc. pela COPPE-UFRJ em 2007;
- Engenheiro Eletricista da Eletrobrás desde 2002, trabalhando na área de sistemas CCAT e dinâmica;

- EDSON HIROKAZU WATANABE;
- B. Sc. pela UFRJ em 1975/ M. Sc. pela COPPE-UFRJ em 1976/ D. Eng. degree pelo Tokyo Institute of Technology, Japão, em 1981;
- Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da COPPE-UFRJ e áreas de interesse em eletrônica de potência aplicada em sistemas de potência e fontes renováveis;

- NILO JOSÉ PEREIRA DE MACEDO, 1954;
- B. Sc. pela PUC-RJ em 1979/ M. Sc. pela COPPE-UFRJ em 1992;
- Engenheiro Eletricista de Furnas Centrais Elétricas desde 1980 até 2013 quando se aposentou e trabalhava na área de sistemas CCAT e dinâmica e estabilidade de sistemas de potência;