



GRUPO - IV

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

**AMORTECIMENTO DE MODOS ELETROMECÂNICOS UTILIZANDO ESTABILIZADORES EM
ELOS HVDC CONSIDERANDO-SE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE**

Luciano de Oliveira Daniel (*)

CEPEL

Sergio Gomes Junior

CEPEL, UFF

RESUMO

A análise linear ajuda na identificação de modos instáveis de um sistema contendo um elo CCAT, incluindo a identificação separada de modos eletromecânicos e possíveis modos instáveis de controle do elo CC. Neste artigo é apresentado um estudo de aplicação de estabilizadores no lado do sistema inversor de um elo CCAT com as usuais estratégias de controle. Foi utilizado um sistema de 12 barras como exemplo de apresentação tutorial contendo uma interligação CA em paralelo ao elo de corrente contínua. Foram também apresentados resultados da aplicação de estabilizadores em um dos bipolos de Belo Monte no Sistema Interligado Nacional.

PALAVRAS-CHAVE

Análise Modal, Estabilidade Eletromecânica, Elos CCAT, Controle, PacDyn.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os Elos de Corrente contínua têm sido utilizados em todo o mundo na transmissão de grandes blocos de energia por longas distâncias e na interconexão de sistemas assíncronos. Também é fato conhecido que os sistemas de controle associados aos elos CCAT interagem com a rede ca na qual o mesmo está conectado, especialmente no caso de conexões ca e cc paralelas, como ocorre atualmente no sistema elétrico Brasileiro.

As simulações no domínio do tempo de sistemas não-lineares são essencialmente baseadas na análise da forma de onda e comparação das curvas para diversos casos simulados. Este tipo de análise é importante, porém possui certas limitações para a obtenção de informações estruturais do sistema estudado, sendo difícil extrair informações relevantes a partir dos resultados. A análise linear é uma abordagem complementar à simulação no domínio do tempo. Nesta abordagem, uma aproximação linear do modelo do sistema é obtida através da linearização das equações do sistema em torno de um determinado ponto de operação. A análise modal pode então ser aplicada ao modelo linear para a obtenção de uma variedade de informações sobre a dinâmica do sistema. O modelo linear é válido somente no contexto de pequenas perturbações, contudo tal análise fornece informações importantes sobre a estabilidade do sistema para um determinado estado de operação, informações estas que podem resultar em soluções para a melhoria do desempenho do sistema mesmo submetido a grandes perturbações.

Em [1] um Elo CC conecta dois sistemas ca assíncronos e um estabilizador foi projetado e inserido na malha de controle de corrente do retificador para amortecer um modo eletromecânico existente na rede ca. Neste trabalho, a aplicação de estabilizadores no lado do inversor será considerada em um caso exemplo de pequeno porte contendo transmissão ca e cc em paralelo. Também será analisada a aplicação de estabilizadores no Sistema Interligado Nacional de grande porte em um dos bipolos de Belo Monte. Será utilizado o programa PacDyn do CEPEL onde serão realizados cálculos de polos e resíduos, *mode-shape*, fatores de observabilidade e controlabilidade e de participação e a utilização do método de *Nyquist* para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência por alocação de par de polos complexos e simulações no domínio do tempo. O principal objetivo é apresentar os resultados dos estudos mostrando a aplicação de estabilizadores em elos cc, apresentando as principais ferramentas que podem ser usados em conjunto com a metodologia convencional de simulação de tempo e o desempenho dinâmico de elos contendo estabilizadores para diferentes filosofias de controle.

2.0 - SISTEMA ELÉTRICO 12 BARRAS

Na Figura 2.1 é mostrado o sistema (caso base com seu ponto de operação convergido no Programa ANAREDE) que foi utilizado para as análises deste trabalho. Este sistema, baseado em [2] e [3], consiste em dois subsistemas interligados por uma conexão em ca (LT 6-12-13-10) em paralelo com uma conexão cc (elo cc do tipo LCC em ponte de 12 pulsos, entre as barras 7 e 9). As características, valores nominais, parâmetros e malhas de controle deste Elo cc são os mesmos presentes em [1]. O subsistema da esquerda contém dois geradores e é composto pelas barras 1, 2, 5, 6 e 7 e seus respectivos circuitos de interconexão. O subsistema da direita também contém dois geradores e é composto pelas barras 3, 4, 9, 10 e 11 e seus respectivos circuitos de interconexão. A carga principal deste sistema está contida na barra 10. A máquina 1 é a única máquina que possui estabilizador.

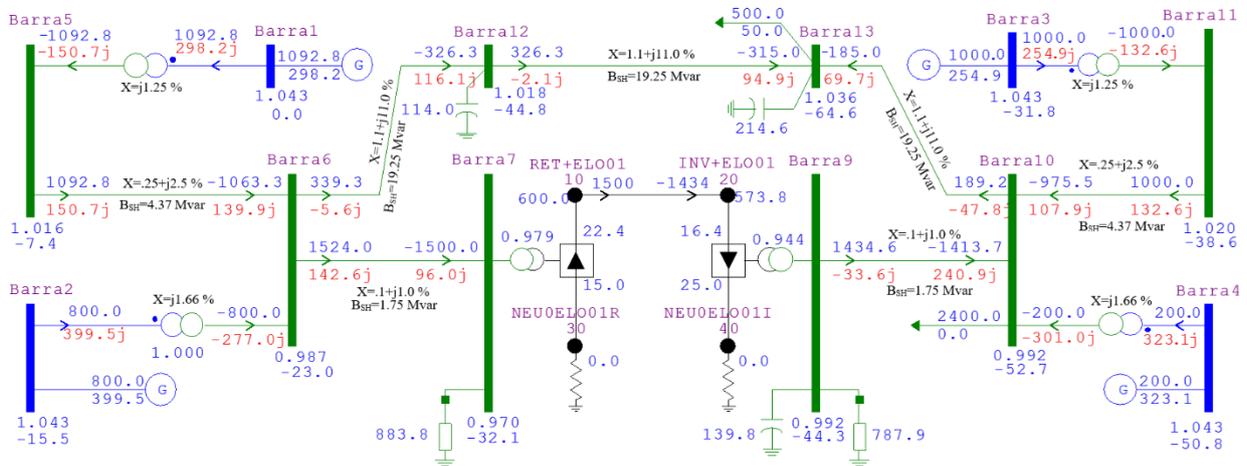


Figura 2.1 - Caso base de fluxo de potência convergido no ANAREDE.

3.0 - ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA 12 BARRAS UTILIZANDO ELO CCAT

Neste Item é mostrada a utilização do controle do inversor do Elo cc para estabilização de um modo eletromecânico do sistema de 12 barras para quatro modos distintos de controle: área de comutação mínima, ângulo de extinção gama mínimo, tensão ca e tensão cc. É importante observar que em todos estes quatro casos o ângulo de extinção do inversor em operação nominal é de 25°, acima do valor mínimo considerado de 17°. Isto é feito para que se tenha margem para controle. Além disto, o elo cc encontra-se em controle de potência.

3.1 Inversor em Controle de Area Mínima

Para obter-se todos os polos do sistema 12 barras original, calcula-se a QR no PacDyn [4],[5]. Os polos com amortecimento menor que 27% (polos menos amortecidos) são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Polos (QR) do sistema 12 barras original com inversor em controle de área-mínima.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
1	0,1628	2,3756	2,3812	0,3781	-6,8351	DELTA Barra3 # 3
2	0,1628	-2,3756	2,3812	-0,3781	-6,8351	
3	-1,55105e-013	3,48227e-007	3,48227e-007	5,54221e-008	0,00004	x 0017 DMCVMD03 # 2
4	-1,55105e-013	-3,48227e-007	3,48227e-007	-5,54221e-008	0,00004	
5	-0,8818	6,6677	6,7257	1,0612	13,111	DELTA Barra4 # 4
6	-0,8818	-6,6677	6,7257	-1,0612	13,111	
7	-1,0772	7,1000	7,1812	1,1300	15,000	DELTA Barra2 # 2
8	-1,0772	-7,1000	7,1812	-1,1300	15,000	
9	-0,5841	2,0047	2,0881	0,3191	27,972	x 0007 DMCVMD03 # 1
10	-0,5841	-2,0047	2,0881	-0,3191	27,972	

Observa-se que existe um modo eletromecânico p_1 instável com frequência 2,3756 rad/s do lado do inversor, conforme podemos concluir observando os fatores de participação deste modo (Tabela 3.2). Na Figura 3.1 e Tabela 3.3 temos os fatores de observabilidade de velocidade para o modo p_1 , de onde verifica-se que a velocidade da barra 4 é a melhor escolha para o estabilizador a ser projetado já que é a que possui maior observabilidade do modo.

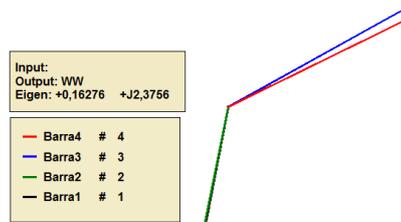


Figura 3.1 – Fatores de Observabilidade do modo p_1 .

Tabela 3.2 – Fatores de participação do modo p_1 .

Module	Phase	Bus Name	Var
1,0000	0	Barra3 # 3	DELTA
1,0000	3,18055e-014	Barra3 # 3	WW
0,5972	-111,91	DMCVMD03 # 1	x 0007
0,4984	69,804	Barra1 # 1	DFIT

Tabela 3.3 - Fatores de Observabilidade de p_1 .

Module	Phase	Bus Name
1,0000	26,219	Barra4 # 4
0,9978	29,138	Barra3 # 3
0,6401	-101,29	Barra2 # 2
0,6251	-100,99	Barra1 # 1

Projetou-se na ferramenta de ajuste automático do PacDyn [6] um estabilizador para ser conectado no controle do inversor de modo a amortecer o modo p_1 em 16%. Para isto, escolheu-se a velocidade da Barra 4 como saída da FT (função de transferência) e o sinal de modulação SM04 presente no inversor do modelo *Built-in* de Elo MD03 [7] do ANATEM. Definiu-se a FT (INPUT=SM04 2, OUTPUT= WW 4) no PacDyn e rodou-se a resposta em frequência.

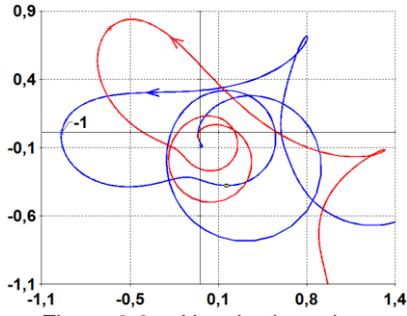


Figura 3.2 – Nyquist do projeto PSSHVDC1.

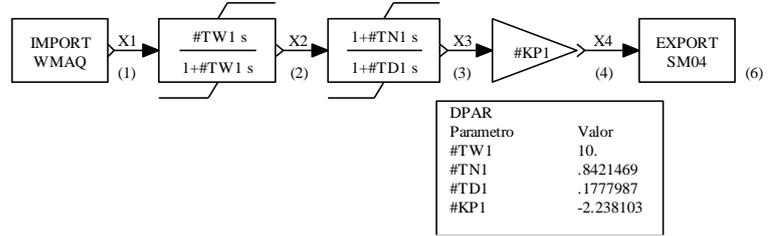


Figura 3.3 – Diagrama do PSSHVDC1.

Na Figura 3.2 temos em vermelho a resposta em frequência original e em azul aquela projetada no PacDyn. Observa-se que o laço contorna o -1 no sentido anti-horário, estabilizando assim o modo p_1 . Na Figura 3.3 temos a malha do PSSHVDC1 gerada pelo PacDyn juntamente com os parâmetros ajustados.

Tabela 3.4 - Polos (QR) do sistema 12 barras com o PSSHVDC1.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
1	1,74809e-007	0.	1,74809e-007	0.	-100,00	x 0017 DMCVMD03 # 2
2	-0,8256	6,8431	6,8927	1,0891	11,977	WW Barra4 # 4
3	-0,8256	-6,8431	6,8927	-1,0891	11,977	
4	-0,9427	7,0813	7,1438	1,1270	13,197	DELTA Barra2 # 2
5	-0,9427	-7,0813	7,1438	-1,1270	13,197	
6	-0,4151	2,5607	2,5941	0,4075	16,000	x 0007 DMCVMD03 # 1
7	-0,4151	-2,5607	2,5941	-0,4075	16,000	
8	-0,6849	2,2392	2,3416	0,3564	29,248	x 0007 DMCVMD03 # 1
9	-0,6849	-2,2392	2,3416	-0,3564	29,248	

Vemos na QR da Tabela 3.4 que com a inclusão do estabilizador no inversor todos os modos estão bem amortecidos e o polo estabilizado foi alocado na posição escolhida no ajuste, com fator de amortecimento de 16% e frequência de 2,56 rad/s, ou seja, o PSSHVDC1 está atuando adequadamente. Simulando no tempo no ANATEM e comparando as respostas com e sem o PSSHVDC1 para um degrau *shunt* de -20 Mvar na barra 10, verifica-se o efeito amortecedor do estabilizador projetado:

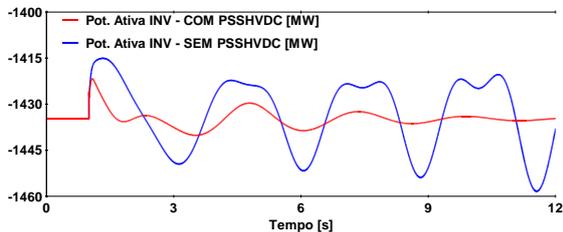


Figura 3.4 – Comparação Pot. Ativa no Inversor.

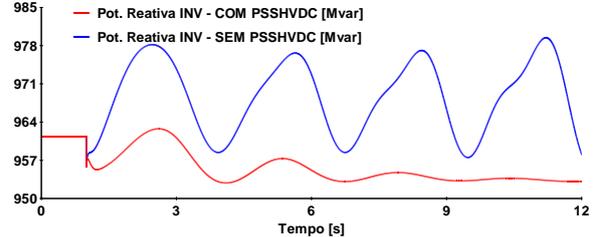


Figura 3.5 – Comparação Pot. Reativa no Inversor.

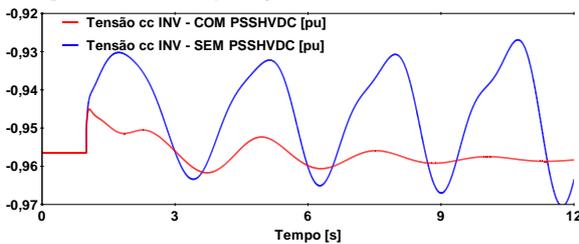


Figura 3.6 – Comparação Tensão cc no Inversor.

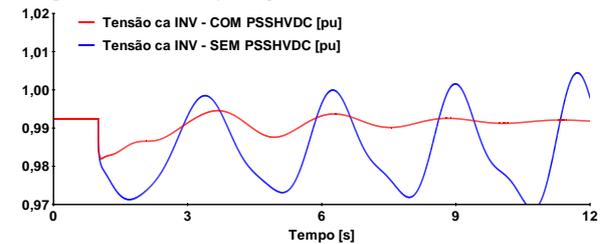


Figura 3.7 – Comparação Tensão ca no Inversor.

3.2 Inversor em Controle de Gama Mínimo

Inicialmente, colocou-se o inversor em controle de gama-mínimo no código DMCV (FLGAM) do ANATEM [7].

Tabela 3.5 – Polos (QR) do sistema 12 barras original com inversor em controle de gama-mínimo.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
1	2,86350e-007	0.	2,86350e-007	0.	-100,00	x 0017 DMCVMD03 # 2
2	0,1424	2,4638	2,4680	0,3921	-5,7696	DELTA Barra3 # 3
3	0,1424	-2,4638	2,4680	-0,3921	-5,7696	
4	-0,8890	6,6959	6,7547	1,0657	13,161	WW Barra4 # 4
5	-0,8890	-6,6959	6,7547	-1,0657	13,161	
6	-1,0123	7,1236	7,1951	1,1337	14,069	DELTA Barra2 # 2
7	-1,0123	-7,1236	7,1951	-1,1337	14,069	
8	-0,8474	1,8384	2,0243	0,2926	41,863	x 0007 DMCVMD03 # 1
9	-0,8474	-1,8384	2,0243	-0,2926	41,863	

A Tabela 3.5 mostra o cálculo da QR no PacDyn onde observa-se um modo eletromecânico p_2 instável com frequência **2,4638 rad/s** do lado do inversor, conforme indicado na Tabela 3.6. Na Figura 3.8 e Tabela 3.7 temos os fatores de observabilidade de velocidade para o modo p_2 , de onde verifica-se que a velocidade da barra 3 é a melhor escolha para o estabilizador a ser projetado.

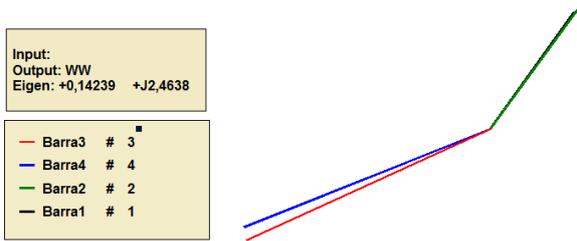


Figura 3.8 – Fatores de Observabilidade do modo p_2 .

Tabela 3.6 – Fatores de participação do modo p_2 .

Module	Phase	Bus Name	Var
1,0000	1,27222e-014	Barra3 # 3	DELT
1,0000	0.	Barra3 # 3	WW
0,3825	39,280	Barra1 # 1	DELT
0,2100	49,851	Barra1 # 1	WW

Tabela 3.7 - Fatores de Observabilidade de p_2 .

Module	Phase	Bus Name
1,0000	-155,31	Barra3 # 3
0,9886	-158,13	Barra4 # 4
0,5819	54,011	Barra2 # 2
0,5376	54,597	Barra1 # 1

Projetou-se um estabilizador para ser conectado no controle do inversor de modo a amortecer o modo p_2 em 16%. Para isto, escolheu-se a velocidade da Barra 3 como saída da FT (INPUT=SM04 2, OUTPUT= WW 3) definida no PacDyn e rodou-se a resposta em frequência.

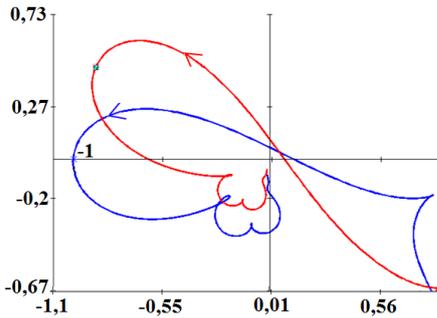


Figura 3.9 – Nyquist do projeto PSSHVDC2.

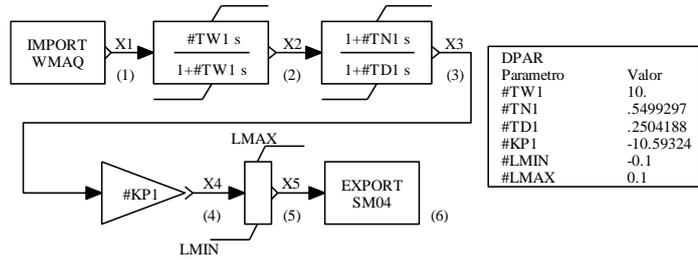


Figura 3.10 – Diagrama do PSSHVDC2.

Na Figura 3.9 temos em vermelho a resposta em frequência original e em azul aquela projetada no PacDyn. Observa-se que o laço contorna o -1 no sentido anti-horário, estabilizando assim o modo p_2 . Na Figura 3.10 temos a malha do PSSHVDC2 gerada pelo PacDyn juntamente com os parâmetros ajustados.

Tabela 3.8 – Polos (QR) do sistema 12 barras com o PSSHVDC2.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	#	Damp (%)	Part. Factor
1	1,96969e-007	0.	1,96969e-007	0.		-100,00	x 0017 DMCVMD03 # 2
2	-0,8878	6,6493	6,7083	1,0583		13,234	DELT Barra4 # 4
3	-0,8878	-6,6493	6,7083	-1,0583		13,234	
4	-1,0053	7,1035	7,1743	1,1306		14,013	DELT Barra2 # 2
5	-1,0053	-7,1035	7,1743	-1,1306		14,013	
6	-0,4312	2,6600	2,6947	0,4234		16,000	x 0007 DMCVMD03 # 1
7	-0,4312	-2,6600	2,6947	-0,4234		16,000	
8	-0,8620	2,3158	2,4710	0,3686		34,884	x 0007 DMCVMD03 # 1
9	-0,8620	-2,3158	2,4710	-0,3686		34,884	

Vemos na QR da Tabela 3.8 que com a inclusão do estabilizador no inversor todos os modos estão com amortecimento maior que 13%, e o polo de interesse foi alocado na posição desejada de acordo com a análise do diagrama de Nyquist amortecido, na frequência de 2,66 rad/s, logo o PSSHVDC2 está atuando corretamente. Simulando no tempo no ANATEM e comparando as respostas com e sem o PSSHVDC2 para um degrau *shunt* de -20 Mvar na barra 10, pode-se também notar o efeito amortecedor do estabilizador:

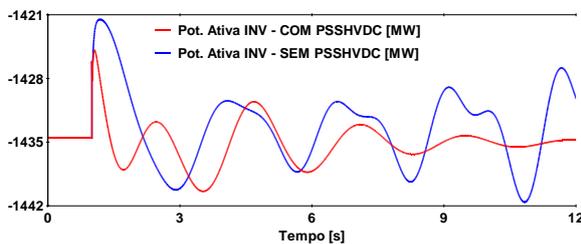


Figura 3.11 – Comparação Pot. Ativa no Inversor.

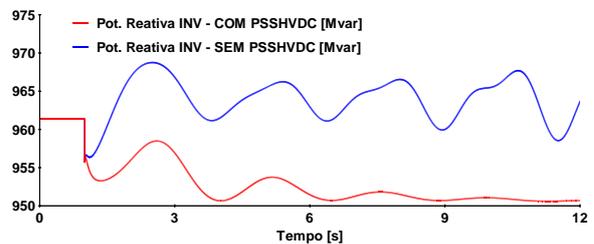


Figura 3.12 – Comparação Pot. Reativa no Inversor.

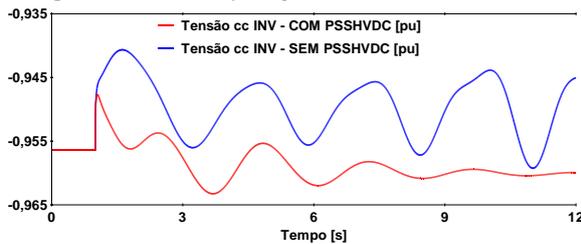


Figura 3.13 – Comparação Tensão cc no Inversor.

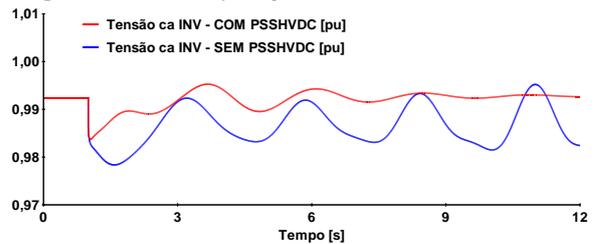


Figura 3.14 – Comparação Tensão ca no Inversor.

3.3 Inversor em Controle de Tensão ca

Conectou-se a malha de controle da tensão ca no inversor no sinal de modulação SM04 do elo, conforme mostrado na Figura 3.15. A Figura 3.16 mostra a resposta do sistema estabilizado com e sem o controle de tensão ca.

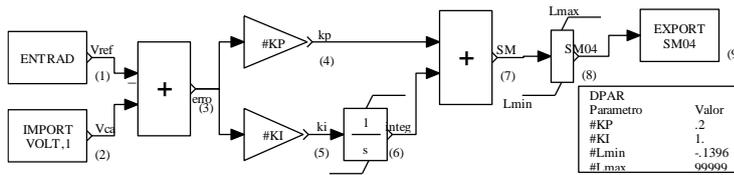


Figura 3.15 – Malha de controle da tensão ca no inversor.

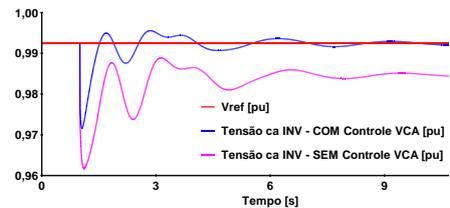


Figura 3.16 – Resposta do Controle VCA.

A Tabela 3.9 mostra o cálculo da QR no PacDyn antes da estabilização onde observa-se um modo eletromecânico p_3 instável com frequência **2,5828 rad/s** do lado do inversor, conforme indicado na Tabela 3.9 e caracterizado como modo eletromecânico pelos fatores de participação na Tabela 3.10. Na Figura 3.17 e Tabela 3.11 temos os fatores de observabilidade de velocidade para o modo p_3 , de onde verifica-se que a velocidade da barra 3 é a melhor escolha para o estabilizador a ser projetado.

Tabela 3.9 – Polos (QR) do sistema 12 barras original com inversor em controle de tensão ca.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
1	4,66954e-007	0.	4,66954e-007	0.	-100,00	x 0017 DMCVMD03 # 2
2	0,1278	2,5828	2,5860	0,4111	-4,9407	WW Barra3 # 3
3	0,1278	-2,5828	2,5860	-0,4111	-4,9407	WW Barra3 # 3
4	-0,8754	6,7284	6,7851	1,0709	12,902	WW Barra4 # 4
5	-0,8754	-6,7284	6,7851	-1,0709	12,902	WW Barra4 # 4
6	-1,0261	7,1098	7,1835	1,1316	14,284	WW Barra2 # 2
7	-1,0261	-7,1098	7,1835	-1,1316	14,284	WW Barra2 # 2
8	-1,4621	2,4718	2,8718	0,3934	50,913	x 0007 DMCVMD03 # 1
9	-1,4621	-2,4718	2,8718	-0,3934	50,913	x 0007 DMCVMD03 # 1

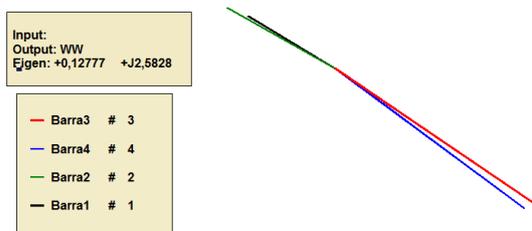


Figura 3.17 – Fatores de Observabilidade do modo p_3 .

Tabela 3.10 – Fatores de participação do modo p_3 .

Module	Phase	Bus Name	Var
1,0000	-3,18055e-015	Barra3 # 3	WW
1,0000	0.	Barra3 # 3	DELT
0,2982	-4,1444	Barra1 # 1	DELT
0,2982	0,2982	Barra1 # 1	DELT

Tabela 3.11 - Fatores de Observabilidade de p_3 .

Module	Phase	Bus Name
1,0000	-34,297	Barra3 # 3
0,9757	-36,603	Barra4 # 4
0,5136	150,45	Barra2 # 2
0,4213	148,89	Barra1 # 1

Projetou-se um estabilizador para ser conectado no Controle VCA do inversor de modo a amortecer o modo p_3 em 15%. Para isto, escolheu-se a velocidade da Barra 3 como saída da FT (INPUT=SM04 2, OUTPUT= WW 3) definida no PacDyn e rodou-se a resposta em frequência.

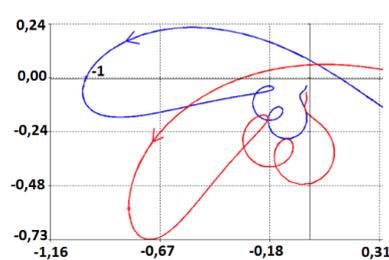


Figura 3.18 – Projeto PSSHVDC3.

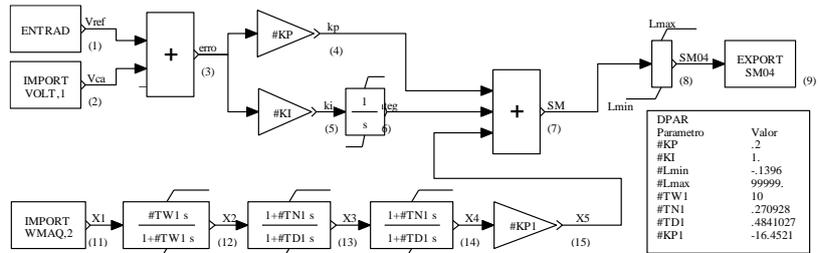


Figura 3.19 – Diagrama do Controle VCA com PSSHVDC3.

Na Figura 3.18 temos em vermelho a resposta em frequência original e em azul aquela projetada no PacDyn. Observa-se que o laço contorna o -1 no sentido anti-horário, estabilizando assim o modo p_3 . Na Figura 3.19 temos a malha do Controle VCA com o PSSHVDC3 juntamente com os parâmetros ajustados.

Tabela 3.12 – Polos (QR) do sistema 12 barras com o Controle VCA e o PSSHVDC3.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
1	3,67131e-007	0.	3,67131e-007	0.	-100,00	x 0017 DMCVMD03 # 2
2	-0,8901	6,7074	6,7662	1,0675	13,156	DELT Barra4 # 4
3	-0,8901	-6,7074	6,7662	-1,0675	13,156	DELT Barra4 # 4
4	-1,0279	7,1006	7,1746	1,1301	14,327	DELT Barra2 # 2
5	-1,0279	-7,1006	7,1746	-1,1301	14,327	DELT Barra2 # 2
6	-0,4142	2,7300	2,7612	0,4345	15,000	x 0007 DMCVMD03 # 1
7	-0,4142	-2,7300	2,7612	-0,4345	15,000	x 0007 DMCVMD03 # 1
8	-0,8592	2,9262	3,0497	0,4657	28,175	x 0007 DMCVMD03 # 1
9	-0,8592	-2,9262	3,0497	-0,4657	28,175	x 0007 DMCVMD03 # 1

Vemos na QR da Tabela 3.12 que com a inclusão do estabilizador todos os modos estão com amortecimento maior que 13%, e o polo de interesse foi alocado na frequência selecionada no ajuste de 2,73 rad/s e com o fator de amortecimento especificado de 15%, logo o PSSHVDC3 está atuando adequadamente. Simulando no tempo no ANATEM e comparando as respostas com e sem o PSSHVDC3 para um degrau *shunt* de -20 Mvar na barra 10, verificamos o efeito amortecedor do estabilizador projetado:

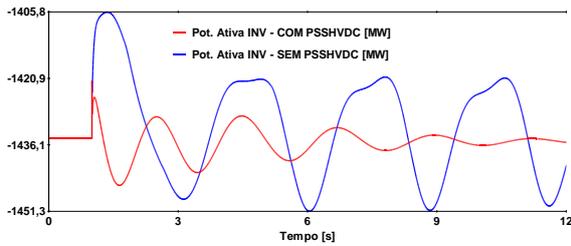


Figura 3.20 – Comparação Pot. Ativa no Inversor.

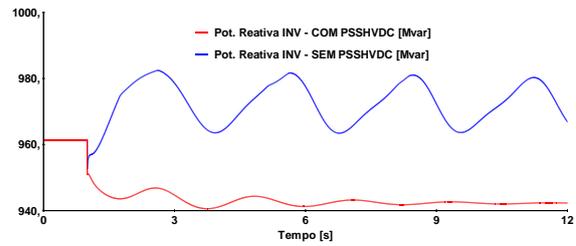


Figura 3.21 – Comparação Pot. Reativa no Inversor.

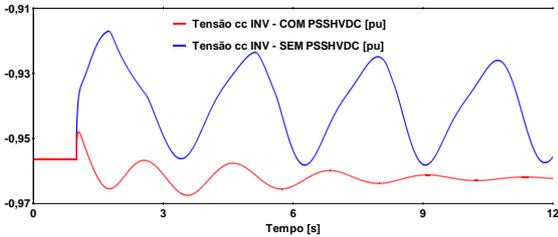


Figura 3.22 – Comparação Tensão cc no Inversor.

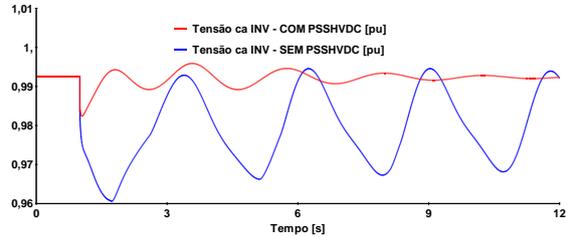


Figura 3.23 – Comparação Tensão ca no Inversor.

3.4 Inversor em Controle de Tensão cc

Conectou-se a malha de controle da tensão cc no inversor no sinal SM04 do elo, conforme mostrado na Figura 3.24. A Tabela 3.13 mostra o cálculo da QR no PacDyn onde observa-se um modo eletromecânico p_4 instável com frequência $2,5633 \text{ rad/s}$ do lado do inversor, conforme indicado na Tabela 3.14. Na Figura 3.25 e Tabela 3.15 temos os fatores de observabilidade de velocidade para o modo p_4 , de onde verifica-se que a velocidade da barra 3 é a melhor escolha para o estabilizador a ser projetado.

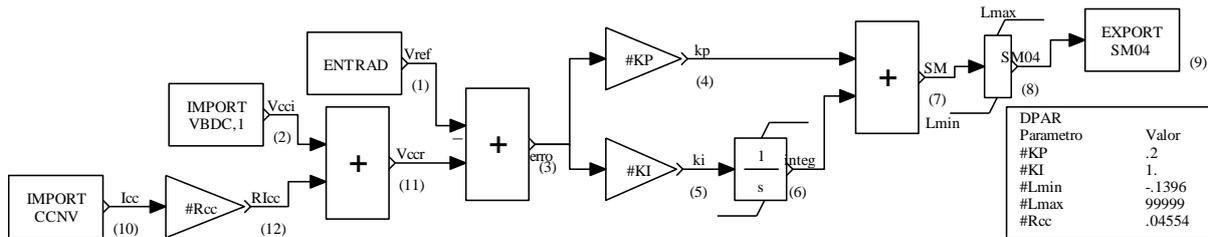


Figura 3.24 – Malha de controle da tensão cc no inversor.

Tabela 3.13 – Polos (QR) do sistema 12 barras original com inversor em controle de tensão cc.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	#	Damp (%)	Part. Factor
1	5,11231e-007	0.	5,11231e-007	0.		-100,00	x 0017 DMCVMD03 # 2
2	0,1248	2,5633	2,5663	0,4080		-4,8621	DELTA Barra3 # 3
3	0,1248	-2,5633	2,5663	-0,4080		-4,8621	
4	-0,8787	6,7251	6,7822	1,0703		12,956	WW Barra4 # 4
5	-0,8787	-6,7251	6,7822	-1,0703		12,956	
6	-1,0281	7,1128	7,1867	1,1320		14,306	DELTA Barra2 # 2
7	-1,0281	-7,1128	7,1867	-1,1320		14,306	
8	-1,5648	2,2851	2,7695	0,3637		56,499	x 0007 DMCVMD03 # 1

Tabela 3.14 – Fatores de participação do modo p_4 .

Module	Phase	Bus Name	Var
1,0000	1,59028e-015	Barra3 # 3	DELTA
1,0000	-1,59028e-015	Barra3 # 3	WW
0,3202	2,8527	Barra1 # 1	DELTA

Tabela 3.15 - Fatores de Observabilidade de p_4 .

Module	Phase	Bus Name
1,0000	-36,381	Barra3 # 3
0,9771	-38,811	Barra4 # 4
0,5310	152,11	Barra2 # 2
0,4446	150,91	Barra1 # 1

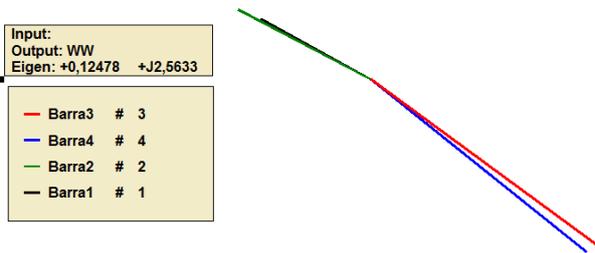


Figura 3.25 – Fatores de Observabilidade do modo p_4 .

Projetou-se um estabilizador conectado no Controle VCC do inversor para amortecer o modo p_4 em 15%. Definiu-se uma FT (INPUT=SM04 2, OUTPUT= WW 3) no PacDyn e rodou-se a resposta em frequência. Na Figura 3.26 temos em vermelho a resposta em frequência original e em azul aquela projetada no PacDyn. Observa-se que o laço contorna o -1 no sentido anti-horário, estabilizando assim o modo p_4 . Na Figura 3.27 temos a malha do Controle VCC com o PSSHVDC4 juntamente com os parâmetros ajustados.

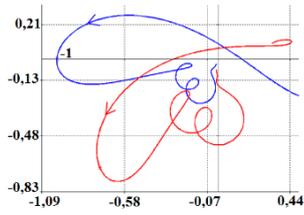


Figura 3.26 – Projeto PSSHVDC4.

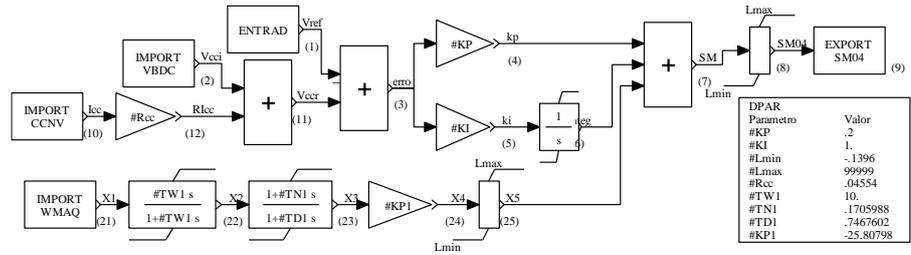


Figura 3.27 – Diagrama do Controle VCC com PSSHVDC4.

Tabela 3.16 – Polos (QR) do sistema 12 barras com o Controle VCC e o PSSHVDC4.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	# Damp (%)	Part. Factor
1	2,68412e-007	0.	2,68412e-007	0.	-100,00	x 0017 DMCVMD03 # 2
2	-0,8944	6,7039	6,7633	1,0670	13,225	DELTA Barra4 # 4
3	-0,8944	-6,7039	6,7633	-1,0670	13,225	
4	-1,0306	7,1035	7,1779	1,1306	14,358	WW Barra2 # 2
5	-1,0306	-7,1035	7,1779	-1,1306	14,358	
6	-0,4203	2,7700	2,8017	0,4409	15,000	x 0007 DMCVMD03 # 1
7	-0,4203	-2,7700	2,8017	-0,4409	15,000	
8	-0,8975	2,7855	2,9266	0,4433	30,669	x 0007 DMCVMD03 # 1
9	-0,8975	-2,7855	2,9266	-0,4433	30,669	

Vemos na QR da Tabela 3.16 que com a inclusão do estabilizador todos os modos estão com amortecimento maior que 13% e o polo de interesse foi corretamente alocado na frequência selecionada de 2,77 rad/s e no fator de amortecimento de 15%, logo o PSSHVDC4 está atuando adequadamente. Simulando no tempo no ANATEM e comparando as respostas com e sem o PSSHVDC4 para um degrau *shunt* de -20 Mvar na barra 10, temos:

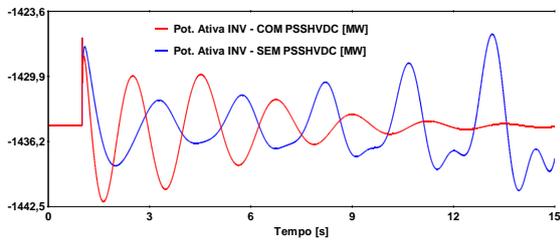


Figura 3.28 – Comparação Pot. Ativa no Inversor.

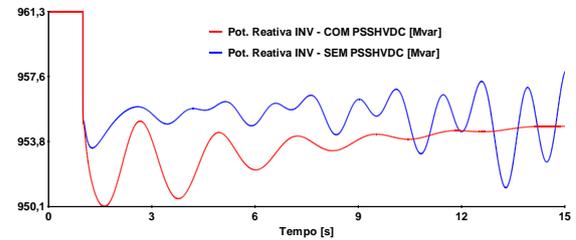


Figura 3.29 – Comparação Pot. Reativa no Inversor.

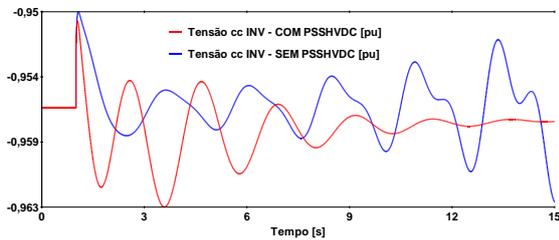


Figura 3.30 – Comparação Tensão cc no Inversor.

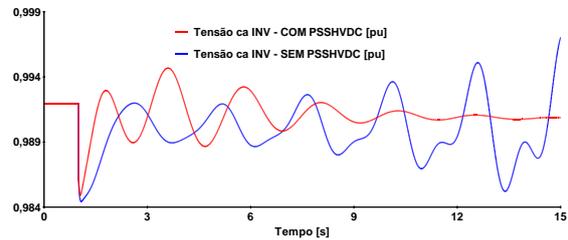


Figura 3.31 – Comparação Tensão ca no Inversor.

4.0 - ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO (SIN) UTILIZANDO ELO CCAT

4.1 Sistema Sudeste Exportador

Considerou-se inicialmente um caso real do sistema brasileiro (Caso ONS-PAR, ano 2020, Sudeste exportador máximo, carga média, inverno, sem as gerações Eólicas) com potência elevada de 6400 MW nos dois bipolos de Belo Monte no sentido Sudeste-Norte. Observa-se pela QR que existe um modo inter-area (Norte-Sul) pouco amortecido (7%) de frequência igual a 3,2 rad/s.

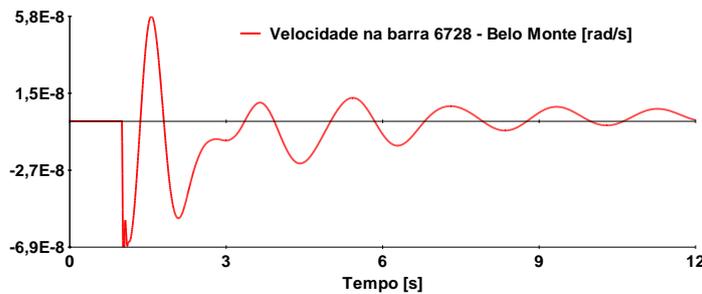


Figura 4.1 - Velocidade na barra 6728.

Este modo pode ser constatado em uma simulação no tempo no PacDyn de um degrau de 0,01 Mvar na barra **BMONTECS-2CS #6728** observando-se a velocidade na mesma barra, conforme mostra a Figura 4.1.

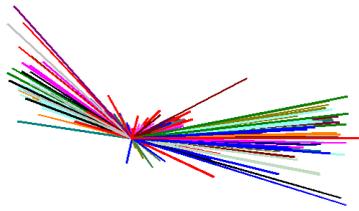


Figura 4.2 – Mode-shape do modo 3,2 rad/s.

Tabela 4.1 – Fator de observabilidade de 3,2 rad/s.

Module	Phase	Bus Name	Module	Phase	Bus Name
1,0000	0	BMONTECS-2CS# 6728	0,8908	8,4112	BALB-EQV-3GR# 8597
0,9895	-17,563	SUZANO--2GR# 5698	0,8897	5,2776	RCD-ALS--1CS# 5147
0,9690	11,171	SANTJARI-3GR# 8269	0,8886	3,8527	RCD-SIE--1CS# 5145
0,9585	6,6714	CALDEIRA-2GR# 8276	0,8871	5,4905	TAPAJOS--1CS# 6537
0,9583	-16,170	TERMFTZG-2GR# 5654	0,8839	10,816	CURUAUN2-1GR#99752
0,9427	-1,2699	PEIXEANG-2GR# 7110	0,8800	9,8206	CURUAUN1-1GR#99751
0,9411	-4,4773	MAUA3V-1GR# 8538	0,8760	4,7114	RUIROPOL--1CS# 6552
0,9399	3,8640	FGOMES--3GR# 8279	0,8756	-4,4585	ESTREITO-3GR# 5595
0,9176	4,5513	C.NUNES1-2GR# 8224	0,8739	4,7031	BOAESP-2-1CS# 5523
0,9171	1,1174	IRECE---1CS# 6347	0,8643	9,1270	CURUAUN3-1GR#99753
0,9103	6,1103	C.NUNES2-1GR# 8225	0,8524	4,5200	BJLAPA--1CS# 6350
0,9037	1,6255	SOBRADIN-2GR# 6294	0,8460	-1,1175	MAUA-BLC-1GR# 8595
0,9029	0,4494	TERMFTZV-1GR# 5655			

No *Mode-shape* da Figura 4.2 constata-se que para este modo de 3,2 rad/s as máquinas da área Norte oscilam contra as da área Sul. O fator de observabilidade do modo é mostrado na Tabela 4.1. De modo a amortecer este modo eletromecânico em 20%, será projetado um estabilizador a ser conectado no controle do retificador do Bipolo 1 de Belo Monte (Terminal Minas). Assumiu-se a possibilidade de utilização do sistema de comunicação do bipolo para utilização deste sinal. Para isto, escolheu-se a velocidade da Barra **BMONTECS-2CS #6728** que corresponde a uma das duas máquinas da usina em operação, que neste cenário trabalham como síncrono e projetou-se um PSSHVDC. A saída deste estabilizador será conectada no sinal SM01 que foi incluído como IMPORT nos CDUs **30001 P1-RET** e **30003 P2-RET** deste bipolo. Definindo-se uma FT (INPUT=SM01 3201+ SM01 3203, OUTPUT=WW 6728) no PacDyn, roda-se a resposta em frequência e projeta-se o PSSHVDC. Os resultados são mostrados na Figura 4.3 e na Figura 4.4.

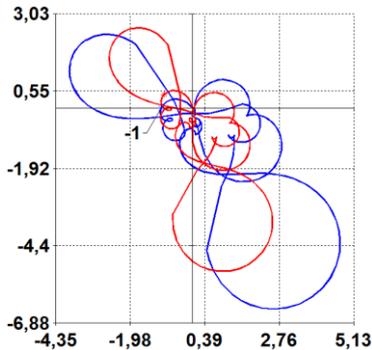


Figura 4.3 – Projeto PSSHVDC.

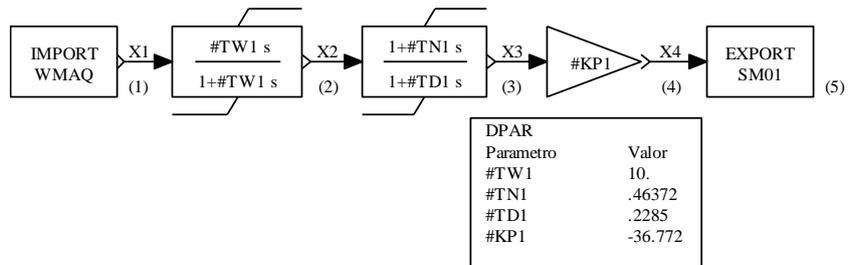


Figura 4.4 – Diagrama do PSSHVDC.

Conectando-se o PSSHVDC nos respectivos retificadores em Estreito-MG e convergindo-se o polo usando o DPA (*Dominant Pole Algorithm*), vemos na Figura 4.5 que o polo com frequência 3,18 rad/s está com 20,00% de amortecimento, então o estabilizador está atuando corretamente. Na Figura 4.6 vemos a resposta no tempo no PacDyn de um degrau de 0,01 Mvar na barra **BMONTECS-2CS #6728** observando-se a velocidade na mesma barra com e sem o PSSHVDC, onde pode-se observar que o modo em questão foi, de fato, amortecido.

Iter	Eigenvalue Estimate		Mismatch
1	+0.60000000	+3.00000000j	0.4215075E+00
2	-0.75263452	+4.16009779j	0.5156950E-01
3	-0.62692454	+3.99378276j	0.1367882E-01
4	-0.63240973	+4.04957865j	0.1314105E-02
5	-0.62705256	+4.04903887j	0.1049857E-04
6	-0.62703106	+4.04907612j	0.6572375E-09
7	-0.62703106	+4.04907612j	0.7153165E-13 converged

Done.

Real	Imaginary	Conv.	Damp	Freq.	Module
-0,6144	3,010 c..		20,00%	0,48	3,07

Figura 4.5 – Polo convergido pelo DPA.

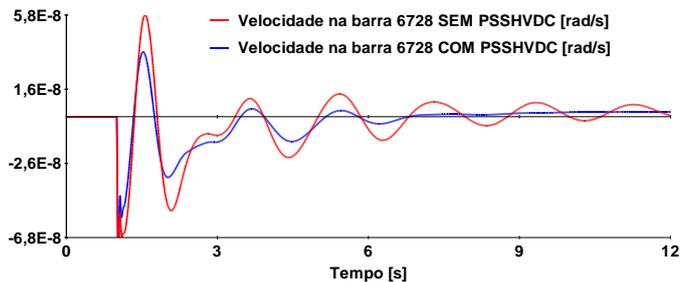


Figura 4.6 – Comparação com e sem o PSSHVDC.

4.2 Sistema Norte Exportador

Considerou-se também um outro caso real do sistema brasileiro (Caso ONS-PAR, ano 2019, Norte exportador, sem as gerações Eólicas) com os bipolos de Belo Monte em potência elevada de 7200 MW transmitindo no sentido Norte-Sudeste. Observa-se pela QR a existência de um modo inter-área (Norte-Sul) com frequência de 2,41 rad/s e amortecimento de 10,58%.

Tabela 4.2 – Fator de observabilidade de 2,41 rad/s.

Module	Phase	Bus Name	Module	Phase	Bus Name
1,0000	-133,68	CALDEIRA-2GR# 8276	0,8610	-132,56	PIMENTL2-2GR# 6556
0,9991	-142,04	MAUA3-V-1GR# 8538	0,8610	-132,56	PIMENTL3-2GR# 6559
0,9940	-141,09	BMONTE1-18GR# 6729 2	0,8610	-132,56	PIMENTL1-2GR# 6555
0,9757	-141,12	BMONTE1-18GR# 6729 1	0,8604	-131,67	CURUAUN1-1GR#99751
0,9715	-134,67	C.NUNES2-1GR# 8225	0,8265	-136,95	TUCURUI5-4GR# 6424
0,9706	-141,10	BMONTE1-18GR# 6729 3	0,8240	-137,11	TUCURUI6-7GR# 6425
0,9695	-137,16	FGOMES--2GR# 8279	0,8131	-134,60	VCONDE--2CS# 6465
0,9673	-135,55	C.NUNES1-2GR# 8224	0,7481	-146,62	TUCURUI3-4GR# 6422
0,9364	-131,77	BALB-EQV-3GR# 8597	0,7369	-144,68	TUCURUI1-4GR# 6419
0,9164	-134,41	PIE-GERA-4GR# 8610	0,7338	-143,52	TUCURUI2-3GR# 6420
0,9121	-132,16	SANTJARI-2GR# 8269	0,7303	-139,63	SUZANO--2GR# 5698
0,9088	-133,76	PIE_MANA-4GR# 8609	0,7071	-132,21	ESTREITO-6GR# 5595
0,9012	-134,26	CROCHA_E-4GR# 8611	0,7060	-134,30	MARABA--1CS# 6405
0,8855	-137,83	MAUA3-G-2GR# 8535	0,6941	-135,34	BOAESP-2-1GR# 5522
0,8635	-130,68	CURUAUN3-1GR#99753	0,6522	-148,08	TERMFZG-2GR# 5654

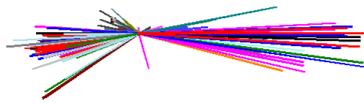


Figura 4.7 – Mode-shape do modo 2,41 rad/s.

No Mode-shape da Figura 4.7 constatamos que para este modo de 2,41 rad/s as máquinas da área Norte oscilam contra as da área Sul. O fator de observabilidade do modo é mostrado na Tabela 4.2. De modo a amortecer este modo eletromecânico em 20%, será projetado um estabilizador a ser conectado no controle do retificador do Bipolo 1 de Belo Monte (terminal Xingu). Para isto, escolheu-se a velocidade da Barra **BMONTE1-18GR #6729** e projetou-se um PSSHVDC. A saída deste estabilizador será conectada no sinal SM01. Definindo-se uma FT (INPUT=SM01 3201+ SM01 3203, OUTPUT= WW 6729 1) no PacDyn, roda-se a resposta em frequência e projeta-se o PSSHVDC. Os resultados são mostrados na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

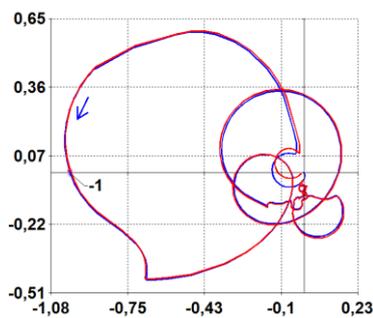


Figura 4.8 – Projeto PSSHVDC.

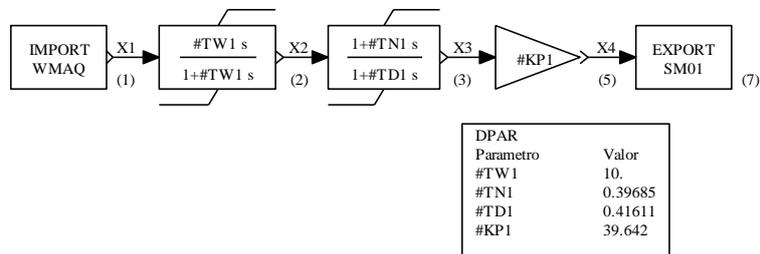


Figura 4.9 – Diagrama do PSSHVDC.

Conectando-se o PSSHVDC nos respectivos retificadores em Xingu e convergindo-se o polo usando o DPA, vemos na Figura 4.10 que o polo com frequência 2,41 rad/s está com 20,00% de amortecimento, então o estabilizador está atuando corretamente. Na Figura 4.11 vemos a resposta no tempo no PacDyn de um degrau de 0,01 Mvar na barra **BMONTE1-18GR #6729** observando-se a velocidade na mesma barra com e sem o PSSHVDC, onde pode-se observar que o modo em questão foi devidamente amortecido.

Caso PAR 2019.pac - Case#02 Caso PAR 2019 PSSHVDC - Output

Building Jacobian Matrix

Iter	Eigenvalue Estimate	Mismatch
1	-0.49216811 +2.4111104 j	0.5928972E-11 converged

Done.

	Real	Imaginary	Conv.	Damp	Freq.	Module
1	-0,4922	2,4111	cr1	20,00%	0,38	2,46

Figura 4.10 – Polo convergido pelo DPA.

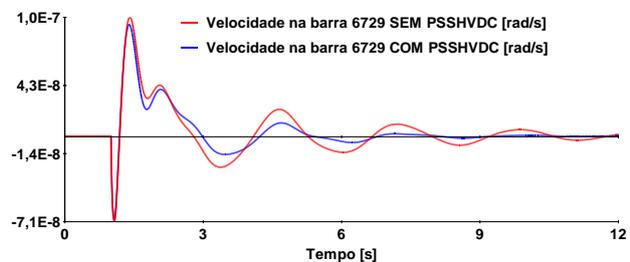


Figura 4.11 – Comparação com e sem o PSSHVDC.

5.0 - CONCLUSÕES

A análise linear pode ser muito útil na melhoria do desempenho dinâmico de sistemas de potência considerando-se a presença de elos de corrente contínua. Neste trabalho foi apresentada a aplicação de um estabilizador conectado ao controle do inversor de modo a melhorar o amortecimento de modos eletromecânicos em um sistema com transmissão cc e ca em paralelo. Foram considerados quatro tipos diferentes de controle no inversor (área mínima, gama mínimo, controle da tensão ca e controle da tensão cc) e em todos eles o PSSHVDC mostrou-se eficaz e não provocou efeitos colaterais no sistema.

Apresentou-se ainda resultado de aplicação de estabilizadores no SIN, nos retificadores do bipolo Xingu-Estreito de Belo Monte onde um dos modos de oscilação inter-área norte-sul do sistema é amortecido, tanto no cenário de fluxo Norte-Sudeste como Sudeste-Norte. Nesta aplicação utilizou-se o controle no retificador. Apenas um dos bipolos é suficiente para amortecimento de oscilações. Assumiu-se, em ambos sentidos de transmissão, que o sinal de entrada dos estabilizadores era a velocidade de uma das máquinas operando na usina de Belo Monte. No caso de fluxo Norte-Sudeste isto iria requerer o envio por telecomunicações deste sinal para o terminal Minas (Estreito), havendo a alternativa de utilização do sistema de telecomunicações do bipolo. A utilização de sinal local em MG ou a utilização de estabilizadores nos inversores não se mostraram eficazes nesta aplicação.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Daniel, L.O., Gomes Jr, S., Grander, L.O., Lirio, F.L., “Small Signal Analysis of HVDC Systems Using Computational Program PacDyn” Colloquium SC-B4 Cigré – HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance, Brasília, October 2013.
- [2] N. Martins, N.J.P. Macedo, A. Bianco, H.J.C.P. Pinto, L.T.G. Lima, “Proposal for a benchmark system for Power system oscillation analysis and control”, Colloquium on Power System Dynamic Performance, Florianópolis, 1993.
- [3] S. Gomes Jr., A. Castro, T. J. M. A. Parreiras, “Integração entre o PacDyn e ANATEM para Estudos Dinâmicos de Sistema Elétricos”, XX Seminário Nacional de Produção e Transm. de Energia Elétrica - SNPTEE, Recife, 2009.
- [4] G. H. Golub and C. F. Van Loan, “Matrix Computations”, The Johns Hopkins University Press, 1989.
- [5] Eletrobras CEPEL, “PacDyn 9.8.3 - User’s Manual”, CEPEL/DRE - Departamento de Redes Elétricas, 2017.
- [6] Gomes Jr., S., Martins, N., Pinto, H.J.C.P., “Utilização do Método de Nyquist para a Estabilização de Sistemas de Potência envolvendo Alocação de Polos Complexos”, XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, 1998.
- [7] Eletrobras CEPEL, “ANATEM 11.1.0–Manual do Usuário”, CEPEL/DRE - Departamento de Redes Elétricas, 2017.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luciano de Oliveira Daniel possui graduação em Eng. Elétrica pela UFJF (2004) e Mestrado em Eng. Elétrica pela COPPE/UFRJ (2011). Já atuou como engenheiro no ONS, professor de Eng. Elétrica na UFF e atualmente é pesquisador do CEPEL e doutorando na COPPE/UFRJ. Tem mais de 13 anos de experiência em estudos elétricos em sistemas de potência (regime permanente, estabilidade, controle, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos) e modelagem e análise de sistemas HVDC e FACTS em programas de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. Atualmente trabalha na análise de sistemas HVDC Multiterminais, DC Multi-infeed, HVDC-VSC e modelagem avançada de FACTS. É membro do Cigré CE-B4 desde 2006.



Sergio Gomes Junior graduou-se em Engenharia Elétrica em 1992 pela Universidade Federal Fluminense, concluiu Mestrado e Doutorado também em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1995 e 2002, em 2004 fez um pós-doutorado na Northeastern University em Boston, Estados Unidos e em 2016 um pós-doutorado na Norwegian University of Science and Technology em Trondheim, Noruega. Desde 1994 é pesquisador do Cepel trabalhando na pesquisa e desenvolvimento de programas computacionais para a análise de sistemas de potência e desde 2000 é gerente do projeto PacDyn no Cepel. Desde 2010 também é professor da Universidade Federal Fluminense. Suas principais áreas de interesse são: dinâmica e controle de sistemas de potência, eletrônica de potência, harmônicos e transitórios eletromagnéticos. É Senior Member do IEEE e membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil.