



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

SIMULAÇÃO E ANÁLISE LINEAR EM ALTA FREQUÊNCIA DE SISTEMAS CONTENDO ELOS HVDC COM CONVERSORES COM CAPACITORES DE COMUTAÇÃO

NICHOLAS SOARES LEITE(1); THIAGO JOSE MASSERAN ANTUNES PARREIRAS(2); SERGIO GOMES JUNIOR(1,2); BRUNO WANDERLEY FRANÇA(1); LEONARDO PINTO DE ALMEIDA(2)
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE(1); CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(2)

RESUMO

Neste artigo desenvolveu-se um modelo de conversor HVDC CCC, utilizando fasores dinâmicos, que foi implementado nas ferramentas de simulação de transitórios eletromagnéticos PacDyn e AnaHVDC. Esse modelo foi utilizado na simulação de diversos casos que continham elos HVDC, realizando-se assim um estudo de seu comportamento quando inserido em um sistema elétrico, e seu desempenho quando aplicados distúrbios à rede. O processo de validação deu-se comparando os resultados obtidos nos casos simulados em dois programas computacionais que já possuem os modelos de conversor CCC: o Anatem, que realiza simulações de estabilidade transitória, e o PSCAD, utilizado para análises de transitórios eletromagnéticos.

PALAVRAS-CHAVE

CCC, HVDC, fasores dinâmicos, AnaHVDC, PacDyn

1.0 INTRODUÇÃO

A transmissão em corrente contínua de alta tensão (*High Voltage Direct Current* – HVDC) apresenta diversas vantagens quando comparada à transmissão tradicional, em corrente alternada. Dentre elas podemos citar menores custos totais para transmissões à longa distância, menores perdas por efeito corona, efeito Joule e radio-interferência e torres menores e mais leves.

O Brasil, sendo um país com grandes extensões geográficas e com unidades geradoras afastadas dos centros consumidores, necessita transmitir energia elétrica a longas distâncias. Para isso, a tecnologia HVDC se mostra uma opção eficiente e economicamente vantajosa. De fato, existem atualmente várias conexões HVDC instaladas e em operação no Brasil atualmente, dentre as quais podemos citar as conectadas às estações de Itaipu, do Complexo do Rio Madeira, de Belo Monte, de Garabi, de Porto Velho, de Acaray, de Melo, de Uruguaiana e de Rivera. E essa tecnologia não é utilizada somente para a transmissão de energia elétrica. Devido às suas características, as conexões HVDC, conhecidas mais comumente como elos HVDC ou elos de corrente contínua, permitem a conexão entre sistemas CA assíncronos, ou entre sistemas com diferentes níveis de tensão. No Brasil, um exemplo desta utilização é a usina de Garabi, localizada na fronteira entre Brasil e Argentina. Nessa conexão, utiliza-se um elo HVDC para conectar o sistema elétrico brasileiro, que funciona a 60 Hz, ao sistema argentino, que funciona a 50 Hz.

Dentre os tipos de conversores de corrente utilizados nos elos HVDC existentes no Brasil, podemos citar o conversor comutados pela linha (*Line Commutated Converter* – LCC) e o conversor com capacitores de comutação (*Capacitor Commutated Converter* – CCC). O foco deste trabalho, o conversor CCC é utilizado atualmente nas conexões de Garabi e da região de Porto Velho, onde são utilizados dois elos HVDC com conversores CCC para fazer a conexão da região, que opera a 500 kV nominais, com os sistemas do Acre e de Rondônia, que funcionam a 230 kV nominais e possuem baixa relação de curto-circuito.

Com conversores CCC já em operação no sistema elétrico brasileiro, e com possíveis projetos futuros, é necessário um modelo computacional desses conversores, que permita sua simulação e análise linear. Em [1], foi desenvolvido um modelo de conversor CCC para ser implementado nos programas AnaHVDC e PacDyn. O AnaHVDC [2-3] é uma ferramenta de simulação e análise de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, capaz de simular sistemas com múltiplos elos HVDC, e o PacDyn [4], uma ferramenta de análise de respostas a pequenas perturbações.

Neste trabalho, esse modelo de conversor CCC será apresentado e descrito, e implementado na simulação de um caso com elos HVDC. Com isso, pretende-se mostrar a importância da análise linear para estudos de elos HVDC com conversores CCC. Através da análise linear, torna-se possível detectar e identificar a existência de modos de oscilação mal amortecidos nos sistemas, permitindo que sejam aplicadas, então, técnicas de controle clássico para realização de ajustes em sistemas de controle, visando a melhoria de seus fatores de amortecimento.

2.0 O MODELO CONVENCIONAL DE ELOS HVDC COM CCC

O modelo convencional de elos HVDC com conversores CCC, apresentado em [5 - 6], é tradicionalmente o modelo utilizado para estudos de transitórios eletromecânicos em sistemas de potência. Nesse modelo, não se considera a dinâmica de alta frequência da rede, e os harmônicos da rede não são incluídos nos cálculos das variáveis. Assim sendo, aplicou-se técnicas de simplificação aos equacionamentos do modelo, com as variáveis CA do sistema sendo calculadas considerando-se apenas as suas componentes fundamentais, enquanto as variáveis CC são calculadas a partir de seus valores médios.

As equações que definem as tensões CC instantâneas do conversor, quando em comutação e durante condução normal, são descritas por (1) e (2), respectivamente:

$$v_d = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_L \cos(\omega t + \alpha) - \frac{i_d t}{2C} + \frac{\Delta V_1}{2} - \frac{i_d t}{C} + \Delta V_1 \quad (1)$$

$$v_d = V_L \cos(\omega t + \alpha) + \frac{\sqrt{2}}{2} V_L \sin(\omega t + \alpha) - \frac{2i_d t}{C} + \frac{i_d \pi}{3\omega C} + 2\Delta V_1 \quad (2)$$

Onde:

V_L é a tensão de linha.

ω é a frequência angular.

α é o ângulo de disparo.

i_d é a corrente contínua do conversor.

C é a capacitância do capacitor de comutação.

ΔV_1 é a variação da tensão no capacitor saindo de condução, durante comutação.

A equação que descreve a tensão CC média desse modelo de elo é descrita em (3):

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_L (\cos(\mu + \alpha) + \cos \alpha) + (1 - \frac{3\mu}{4\pi}) (\Delta V_1 - \Delta V_2) \quad (3)$$

Onde:

μ é o ângulo de comutação.

ΔV_2 é a variação da tensão no capacitor entrando em condução, durante comutação.

O ângulo de comutação do sistema é calculado a partir da equação implícita (4), dependente:

$$\frac{i_d}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} V_L \left(\frac{\omega C}{1 - (\omega \sqrt{LC})^2} \right) \cos(\alpha + \mu) - Y \cos(\mu \omega \sqrt{LC} - \beta) = 0 \quad (4)$$

Onde:

L é o valor da indutância equivalente do transformador.

$Y = \sqrt{E^2 + F^2}$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{F}{E} \right)$$

$$E = -\frac{\sqrt{2} V_L \omega \cos \alpha}{2L \left(\frac{1}{LC} - \omega^2 \right)} - \frac{I_d}{2}$$

$$F = \frac{\sqrt{2} V_L \sin \alpha}{2L(LC) \left(\frac{1}{LC} - \omega^2 \right)} + \frac{\pi I_d}{3\omega LC} - \frac{\Delta V_1}{2L}$$

3.0 MODELO DE ELOS HVDC COM CCC BASEADOS EM FASORES DINÂMICOS

Para que se possa fazer uma análise confiável e precisa dos sistemas elétricos que atualmente possuem elos HVDC com conversores CCC, se mostrou necessário desenvolver um modelo de conversor capaz de fazer simulações de sistemas em alta frequência, fora do escopo dos transitórios eletromecânicos.

Para esse trabalho desenvolveu-se um modelo de elo HVDC com conversor CCC para transitórios eletromagnéticos, que considera as dinâmicas de alta frequência do sistema em seus cálculos. Nesse modelo, utilizou-se funções de chaveamento generalizadas [7] para a representação dos componentes chaveados do sistema. Para o desenvolvimento das equações da tensão e da corrente do elo, baseou-se no conceito de fasores dinâmicos [8].

Como esses modelos foram desenvolvidos para serem utilizados no PacDyn e no AnaHVDC, programas que não incluem harmônicos em seus cálculos, a representação das variáveis CA do sistema é feita através das componentes harmônicas fundamentais, e a representação das variáveis CC é feita através dos valores médios.

A equação que define a relação entre as correntes alternadas nos capacitores e a corrente da linha CC é descrita pela equação (5):

$$i = S_i I_{CC} \quad (5)$$

A equação (5) pode ser expressa em sua forma trifásica, de acordo com a equação (6):

$$i_a = S_{ia} I_{CC}, i_b = S_{ib} I_{CC}, i_c = S_{ic} I_{CC} \quad (6)$$

Onde:

i_a, i_b, i_c são as correntes das fases a, b e c, respectivamente;

S_{ia}, S_{ib}, S_{ic} são as funções de chaveamento das correntes das fases a, b e c, respectivamente;

I_{CC} é a corrente contínua na linha CC.

As funções de chaveamento generalizadas da corrente do elo são demonstradas na FIGURA 1, com a curva vermelha definindo o comportamento da função de chaveamento completa, que considera todos os harmônicos, e a curva em azul representando a função que considera somente a componente fundamental.

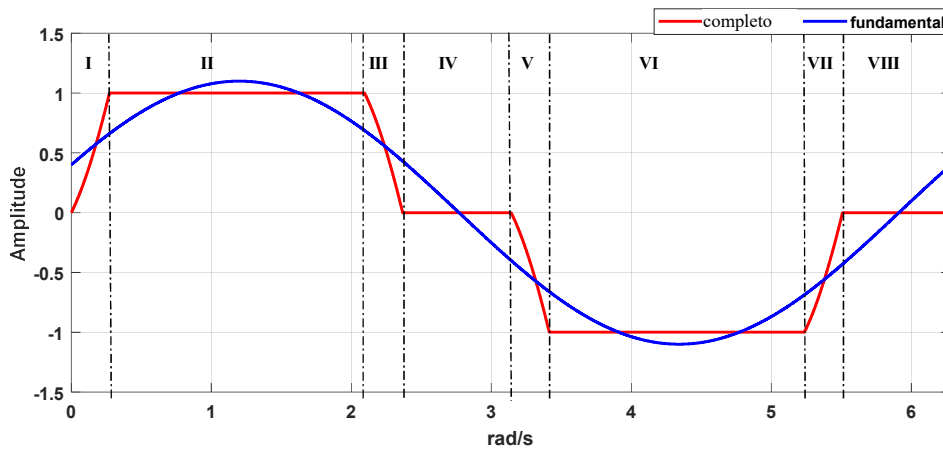


FIGURA 1 - Formas de onda das funções de chaveamento da corrente

O gráfico das funções de chaveamento que considera componentes harmônicas pode ser segmentado em oito partes, cada uma com sua própria função de chaveamento. A TABELA 1 apresenta as diferentes funções para cada um dos oito trechos:

TABELA 1 - Função de chaveamento da corrente por trecho

Trecho	Função de chaveamento (S_i)
I	$\frac{1}{I_{CC}} \left[k_{aux} V_L (\cos(\alpha) \cos(\omega t) - \sin(\alpha) \sin(\omega t) - \cos(\alpha) \cos(\omega_0 \omega t) + \omega_0 \sin(\alpha) \sin(\omega_0 \omega t)) + i_d \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi \omega_0}{3} \sin(\omega_0 \omega t) - \frac{\cos(\omega_0 \omega t)}{2} \right) - \frac{3 \Delta V_1 \sin(\omega_0 \omega t)}{2 \pi d x l \omega_0} \right]$
II	1
III	$\frac{1}{I_{CC}} \left\{ 1 - \left[k_{aux} V_L \left(\cos(\alpha) \cos \left(\omega \left(t - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right) - \sin(\alpha) \sin \left(\omega \left(t - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right) - \cos(\alpha) \cos \left(\omega_0 \omega \left(t - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right) + \omega_0 \sin(\alpha) \sin \left(\omega_0 \omega \left(t - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right) \right] + i_d \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi \omega_0}{3} \sin \left(\omega_0 \omega \left(t - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right) - \frac{1}{2} \cos \left(\omega_0 \omega \left(t - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right) - \frac{3 \Delta V_1 \sin(\omega_0 \omega t)}{2 \pi d x l \omega_0} \right] \right\}$

IV	0
V	$-\frac{1}{i_{cc}} \left\{ k_{aux} V_L (\cos(\alpha) \cos(\omega(t - \pi/\omega)) - \sin(\alpha) \sin(\omega(t - \pi/\omega)) - \cos(\alpha) \cos(\omega_0 \omega(t - \pi/\omega)) + \omega_0 \sin(\alpha) \sin(\omega_0 \omega(t - \pi/\omega))) + i_d \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi \omega_0}{3} \sin(\omega_0 \omega(t - \pi/\omega)) - \frac{1}{2} \cos(\omega_0 \omega(t - \pi/\omega)) \right) - 3\Delta V_1 \sin(\omega_0 \omega t) / 2\pi dx l \omega_0 \right\}$
VI	-1
VII	$\frac{1}{i_{cc}} \left\{ \left[k_{aux} V_L (\cos(\alpha) \cos(\omega(t - 5\pi/3\omega)) - \sin(\alpha) \sin(\omega(t - 5\pi/3\omega)) - \cos(\alpha) \cos(\omega_0 \omega(t - 5\pi/3\omega)) + \omega_0 \sin(\alpha) \sin(\omega_0 \omega(t - 5\pi/3\omega))) + i_d \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi \omega_0}{3} \sin(\omega_0 \omega(t - 5\pi/3\omega)) - \frac{1}{2} \cos(\omega_0 \omega(t - 5\pi/3\omega)) \right) - 3\Delta V_1 \sin(\omega_0 \omega t) / 2\pi dx l \omega_0 \right] - 1 \right\}$
VIII	0

Onde:

$$k_{aux} = \frac{\sqrt{2} V_L \omega}{2L(\frac{1}{LC} - \omega^2)};$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\omega \sqrt{LC}};$$

$$dxl = \frac{3\omega L}{\pi};$$

A função de chaveamento da corrente que considera somente a componente harmônica fundamental pode ser descrita através das componentes real e imaginária de seus fasores dinâmicos, conforme as equações (7) e (8).

$$S_{ire} = \frac{\sqrt{3}}{6i_{dc}\pi(\omega_0^2 - 1)} [sen(\alpha + \mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0^2)6i_{dc} + sen(2\alpha - \theta_{pll})(\omega_0^2 - 1)3k_1V_L + cos(\alpha + (1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})(6\Delta V_1k_2 - 2\pi\omega_0i_{dc}) + cos(\alpha + (1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 + \omega_0)(6\Delta V_1k_2 - 2\pi\omega_0i_{dc}) + sen(\alpha + (1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0)3i_{dc} + sin(\theta_{pll})(1 + \omega_0^2)6k_1V_L + sin(2\alpha + (1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0^2)3k_1V_L + sin(2\alpha + (1 - \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0^2)3k_1V_L + sen(2\alpha + 2\mu - \theta_{pll})(\omega_0^2 - 1)3k_1V_L + sen((1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})3k_1V_L(1 - \omega_0)^2 - sen(\theta_{pll} - (1 - \omega_0)\mu)3k_1V_L(1 + \omega_0)^2 - sen(\alpha - \theta_{pll})6i_{dc}\omega_0^2 + cos(\theta_{pll})(\omega_0^2 - 1)6k_1V_L + cos(\alpha - \theta_{pll})\omega_0(4\pi\omega_0i_{dc} - 12\Delta V_1k_2)] \quad (7)$$

$$S_{iim} = -\frac{\sqrt{3}}{6i_{dc}\pi(\omega_0^2 - 1)} \left\{ cos(\alpha + (1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0)3i_{dc} + cos(\alpha + (1 - \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 + \omega_0)3i_{dc} + sen(\alpha + (1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0)(6\Delta V_1k_2 - 2\pi\omega_0i_{dc}) - sen(\alpha + (1 - \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 + \omega_0)(6\Delta V_1k_2 - 2\pi\omega_0i_{dc}) - cos(\theta_{pll})(1 + \omega_0^2)6k_1V_L + cos(2\alpha + (1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0^2)3k_1V_L + cos(2\alpha + (1 - \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0^2)3k_1V_L + cos(2\alpha + (1 - \omega_0)\mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0^2)3k_1V_L + cos(2\alpha + 2\mu - \theta_{pll})(\omega_0^2 - 1)3k_1V_L + cos((1 + \omega_0)\mu - \theta_{pll})3k_1V_L(1 - \omega_0)^2 + cos(\theta_{pll} - (1 - \omega_0)\mu)3k_1V_L(1 + \omega_0)^2 + cos(\alpha + \mu - \theta_{pll})(1 - \omega_0)^26i_{dc} + cos(2\alpha - \theta_{pll})(\omega_0^2 - 1)3k_1V_L + sen(\alpha - \theta_{pll})\omega_0(12\Delta V_1k_2 - 4\pi\omega_0i_{dc}) - cos(\alpha - \theta_{pll})6i_{dc}\omega_0^2 + sen(\theta_{pll})(\omega_0^2 - 1)6k_1\mu V_L \right\} \quad (8)$$

Onde:

$$k_1 = ak \frac{\pi}{6\omega L(\omega_0^2 - 1)};$$

a é a relação do tap do transformador;

k é a constante do conversor;

$$k_2 = \frac{1}{2\omega L\omega_0}.$$

Quando calculando as funções de chaveamento das tensões, concluiu-se que a metodologia utilizada para o cálculo das correntes CA não poderia ser aplicada. Ao se calcular a contribuição do capacitor de comutação para o valor médio da tensão CC, concluiu-se que ela era zero, e ao se calcular a tensão CA, concluiu-se que ela possuía uma relação direta com a corrente CC e com predominância da 6ª ordem harmônica.

Foi necessário, então, desenvolver uma nova metodologia para se obter as funções de chaveamento das tensões. Para isso baseou-se nas equações do modelo eletromagnético do LCC **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, desenvolvida em [9], e do modelo eletromecânico do CCC (10), apresentadas em [5].

$$V_{cc} = 3S_{V_{are}} v_{a_{re}} + 3S_{V_{aim}} v_{a_{im}} \quad (9)$$

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_L (\cos(\mu + \alpha) + \cos \alpha) + \left(1 - \frac{3\mu}{4\pi}\right) (\Delta V_1 - \Delta V_2) \quad (10)$$

A partir dessas equações, modelou-se a equação (11), que define a tensão CC dos conversores, considerando funções de chaveamento e fasores dinâmicos.

$$V_d = 3S_{V_{are}} v_{a_{re}} + 3S_{V_{aim}} v_{a_{im}} + \left(1 - \frac{3\mu}{4\pi}\right) \left(2\Delta V_1 - \frac{i_d \mu}{\omega C}\right) \quad (11)$$

Onde:

$$S_{V_{are}} = \frac{\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} [\cos(\alpha - \theta_{pll}) + \cos(\alpha + \mu - \theta_{pll})]$$

$$S_{V_{aim}} = -\frac{\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} [\sin(\alpha - \theta_{pll}) + \sin(\alpha + \mu - \theta_{pll})]$$

Além das equações já mencionadas, é necessário modelar o comportamento do PLL (*Phase-Locked Loop*) dos conversores. Esses equipamentos garantem que o comportamento das pontes chaveadas esteja em fase com os sinais de entrada dos conversores. O diagrama de bloco que representa o comportamento do PLL, tanto para o retificador quanto para o inversor, está demonstrado na FIGURA 2:

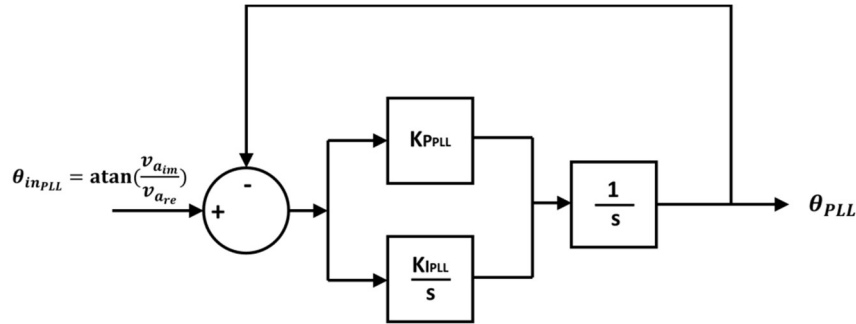


FIGURA 2 - Diagrama do PLL dos conversores

4.0 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Com o intuito de se validar os modelos de conversor desenvolvidos, simulou-se um caso que incluía o modelo nos programas PSCAD, AnaHVDC e PacDyn, e comparou-se os resultados obtidos. Com o caso originalmente apresentando instabilidade, foram realizados ajustes em seus controladores. Esses ajustes foram analisados através do PacDyn, mostrando assim sua importância para o ajuste de controladores.

4.1 Sistema simulado

O sistema utilizado neste trabalho é composto por um elo HVDC com conversores CCC, formado por monopolos de 12 pulsos. Os conversores são conectados a unidades geradoras através de linhas de transmissão CA. A FIGURA 3 mostra o diagrama unifilar do sistema.

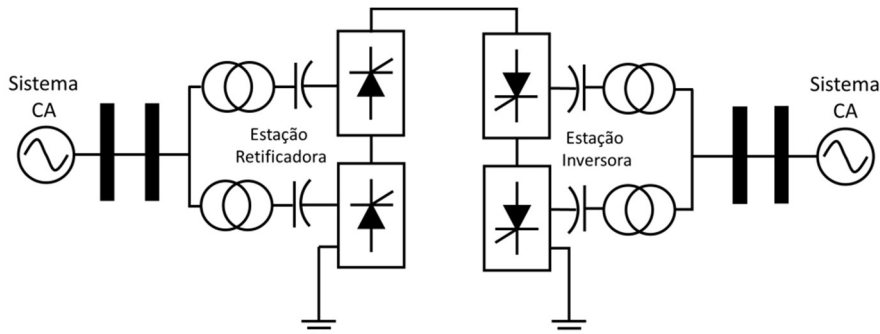


FIGURA 3 - Diagrama unifilar do sistema simulado

A linha CC possui resistência de 5Ω e indutância de 1200 mH , e todos transformadores dos conversores possuem potência nominal de 1152 MVA , corrente nominal de 3930 A , tensão primária de 500 kV e tensão secundária de $207,2 \text{ kV}$. O valor do tap em ambos os transformadores é 1. A reatância de comutação do transformador do lado retificador é $0,12 \text{ pu}$, e $0,144 \text{ pu}$ do lado do inversor. O PLL do retificador possui ganho proporcional de 20 pu/pu , e ganho integral de 200 pu/pu.s . Do lado de inversor, o PLL ganho proporcional de 10 pu/pu e ganho integral de 100 pu/pu.s . As linhas CA do lado do retificador possuem resistência de $1,6875 \Omega$ e indutância de $39,7887 \text{ mH}$, enquanto as linhas CA do lado inversor possui $0,41063 \Omega$ e $14,4847 \text{ mH}$.

Os conversores são controlados através de controladores PI, conforme mostrado na FIGURA 4. Nos retificadores, foi utilizado controladores de corrente com ganho proporcional de 30 graus/pu , e ganho integral de 6000 graus/pu.s . Já nos inversores foram implementados controladores de tensão CC, com ganho K_P de 200 graus/pu e ganho K_I de 5000 graus/pu.s .

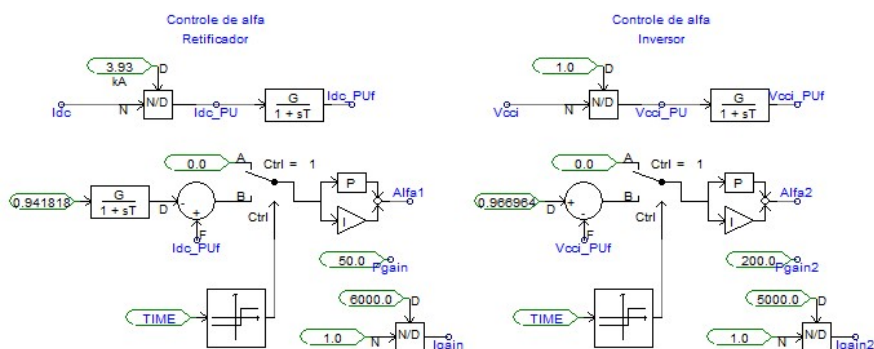


FIGURA 4 - Controladores do retificador e do inversor

4.2 Análise dos sistemas de controle

Para realizar a simulação do caso no PSCAD, é necessário primeiro inicializar o caso. Para isso, executa-se a simulação sem aplicar nenhuma perturbação, até que o sistema atinja o regime permanente. Nesse ponto, utiliza-se a ferramenta “*snapshot*” do PSCAD para se salvar um instante em que o sistema está em regime permanente, permitindo inicializar futuras simulações a partir desse ponto. O PacDyn e o AnaHVDC não necessitam de energização da rede elétrica, pois fazem a inicialização automática das variáveis do sistema, a partir de um ponto de operação obtido de um cálculo de fluxo de potência do ANAREDE, um programa de análise de regime permanente.

Durante a tentativa de inicialização do PSCAD, obteve-se o comportamento da corrente contínua demonstrado no gráfico da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a). Pode-se observar que, neste caso, a corrente apresenta uma oscilação mal amortecida, não conseguindo chegar a um estado de regime permanente.

No PacDyn e no AnaHVDC, que realizam uma inicialização automática na condição exata de regime permanente, simulou-se o caso com uma perturbação do tipo degrau na tensão da barra terminal à unidade retificadora, de valor de 1% da tensão da barra. Pode-se notar, dos resultados demonstrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b), que em ambas as ferramentas se obteve curvas com comportamentos mal amortecidos. Nota-se também que os dois programas apresentam resultados diferentes. Isso deve às não-linearidades do sistema, que são consideradas nos cálculos do AnaHVDC, mas não nos do PacDyn. Esses resultados indicam mal ajuste dos equipamentos chaveados do elo, e mostram a importância de se considerar dinâmicas de alta frequência quando lidando com tais equipamentos.

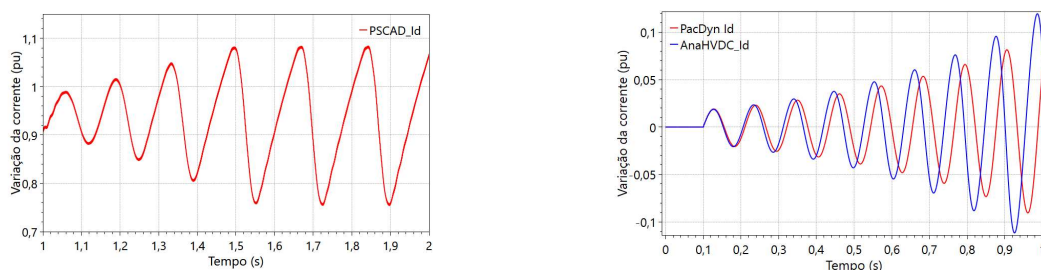


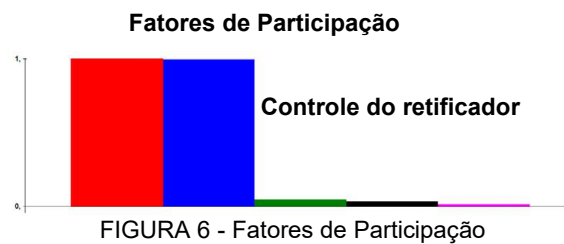
FIGURA 5 - Corrente CC na energização do PSCAD (a) e variação dessa corrente no PacDyn e AnaHVDC (b)

Através do PacDyn, fez-se uma análise do caso, estudando o motivo do comportamento das curvas. Inicialmente calculou-se os polos do sistema utilizando o método QZ, e obteve-se os principais modos de oscilação. Os modos de interesse são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 - Principais modos de oscilação do sistema simulado

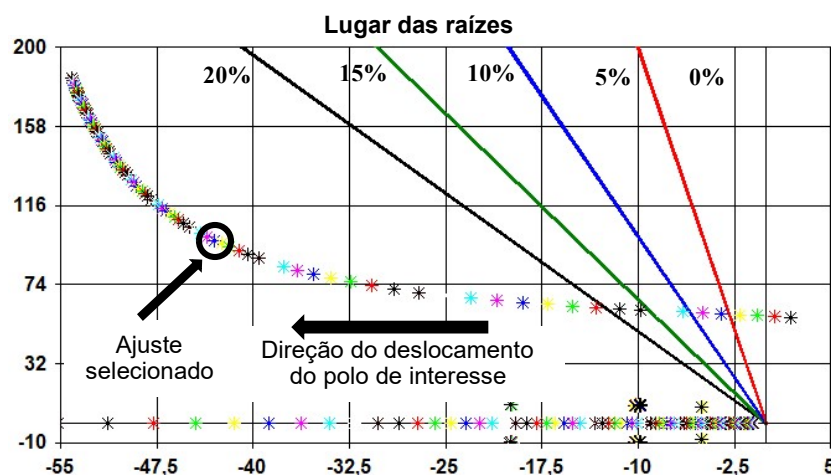
Número	Modo de oscilação	Fator de Amortecimento (%)	Frequência (Hz)
1	$1,6249 + j56,561$	-2,8717	9,002
2	$-5,1287 + j3673,1$	0,1396	584,59
3	$-25,509 + j4403,9$	0,5792	700,9
4	$-27,923 + j2847,0$	0,9807	453,12
5	$-22,674 + j2066,2$	1,0973	328,85

Da TABELA 2, concluiu-se que devem ser melhorados os fatores de amortecimento dos polos de valor de $1,899 \pm j56,586$. Para isso, foi necessário continuar o processo de análise modal. O passo seguinte foi o cálculo do fator de participação modal, e pode-se notar que esse é o modo que contribui para a instabilidade do sistema. A FIGURA 6 mostra o resultado gráfico dessa análise.



Através do cálculo do fator de participação, nota-se que o polo em questão é fortemente relacionado ao controlador do retificador, enquanto os outros polos da TABELA 2 são relacionadas as linhas do sistema.

A solução do problema de instabilidade do modelo pode ser obtida através do cálculo do lugar das raízes do sistema, onde pode-se obter diversos pares de ganhos K_i e K_p condizentes com os controladores do retificador. Implementou-se esses pares de ganhos no sistema, testando-os para se obter um sistema com amortecimentos satisfatórios. A FIGURA 7 demonstra o gráfico do lugar das raízes, calculado através do método QZ, para ganhos K_p variando entre 100% e 2000%, e ganhos K_i variando entre 100% e 10%.



A partir da análise do lugar das raízes, foi possível selecionar os valores de K_p e K_i mais adequados para solucionar o problema de amortecimento existente no sistema. Escolheu-se, para o ajuste dos controladores do retificador, um ganho K_p de 210 e um ganho K_i de 4310. Realizando-se, novamente, a análise dos modos de oscilação do sistema através do método QZ, agora para o sistema com os novos ganhos implementados nos controles do retificador, obtêm-se os resultados demonstrados na TABELA 3.

TABELA 3 - Principais modos de oscilação do sistema modificado

Número	Modo de oscilação	Fator de Amortecimento (%)	Frequência (Hz)
1	$-5,1291 + j3673,1$	0,1396	584,59
2	$-25,509 + j4403,9$	0,5792	700,9
3	$-27,945 + j2848,7$	0,9809	453,39
4	$-22,608 + j2063,0$	1,0958	328,34
5	$-43,522 + j98,177$	40,527	15,625

Dos resultados demonstrados na TABELA 3, pode-se notar que agora o sistema está bem amortecido, com seus principais fatores de amortecimento positivos, e seu modos de oscilação ocorrendo em altas frequências.

4.3 Comparação entre PSCAD, AnaHVDC e PacDyn:

Após se ajustar o caso com os ganhos obtidos através da análise do lugar das raízes do sistema, simulou-o novamente. Primeiro, inicializou-se o caso no PSCAD, com a forma de onda obtida sendo mostrada no gráfico da FIGURA 8. No instante $t = 1\text{s}$, é liberado o controle dos conversores.

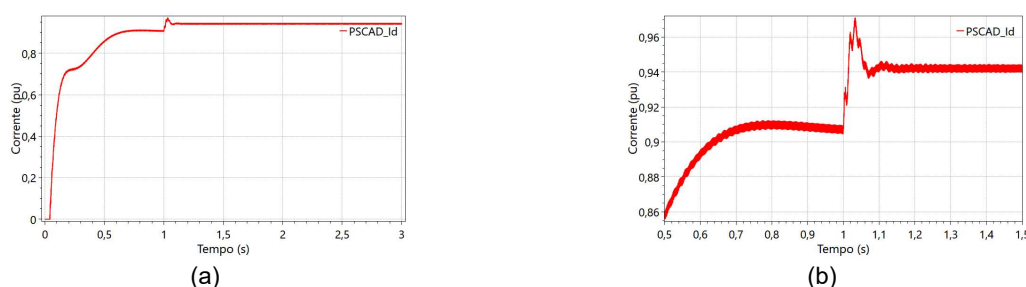


FIGURA 8 - Corrente de inicialização do PSCAD (a) e zoom na liberação do controle dos conversores (b)

Como se pode observar da FIGURA 8, para o caso modificado, a inicialização do sistema no PSCAD é bem-sucedida, e o sistema consegue entrar em regime permanente. Isso permite que seja feita a comparação entre o caso nas três ferramentas estudadas, para uma situação onde, no instante $t=0,1\text{s}$, é introduzida uma perturbação em forma de degrau unitário na barra terminal ao retificador, de valor igual a 1% da tensão total da barra. A variação da corrente contínua obtida é apresentada na FIGURA 9 (a), a variação da tensão contínua no retificador, na FIGURA 9 (b) e, como a variação da tensão do PSCAD possui altos níveis de distorção harmônica, que torna difícil a comparação com os outros programas, na FIGURA 9 (c) filtrou-se os harmônicos presentes no PSCAD, e comparou-se novamente com os resultados do PacDyn e do AnaHVDC.

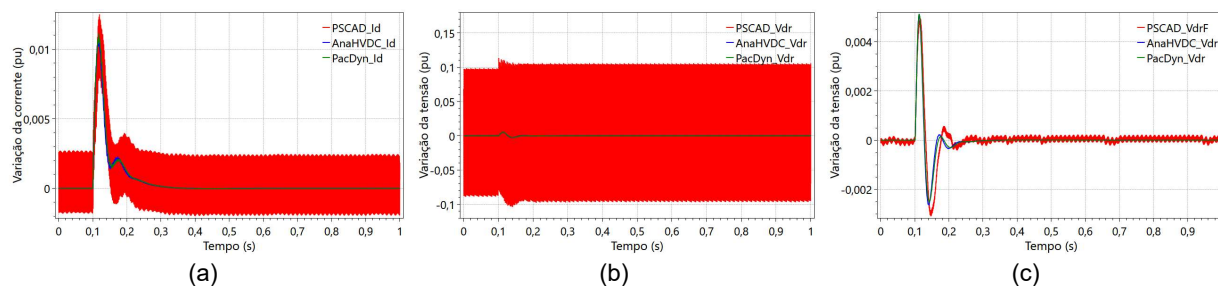


FIGURA 9 - Corrente CC (a), tensão CC (b) e tensão CC filtrada (c)

Dos resultados apresentados na FIGURA 9, pode-se observar que os ajustes implementados no controlador do retificador resultaram em uma melhoria significativa do comportamento dinâmico do caso. Com esses ajustes, foi possível corrigir o problema de oscilação mal amortecida existente. Comparando-se os três programas, pode-se notar que o PSCAD apresenta significativamente mais oscilações do que os outros dois programas. Isso se deve não a oscilações mal amortecidas como anteriormente, mas devido ao fato de o PSCAD considerar harmônicos nos cálculos de suas variáveis, enquanto o AnaHVDC e o PacDyn não os contabilizam. Porém, da análise da FIGURA 9, pode-se observar que os três programas apresentam resultados similares, com as formas de onda apresentando comportamentos parecidos entre si, tanto durante o regime permanente quanto durante o período transitório.

5.0 CONCLUSÕES

Neste artigo, foi apresentado o desenvolvimento de um modelo de elo HVDC com conversor CCC, baseado em funções de chaveamento generalizadas e em fasores dinâmicos, para ser implementado no PacDyn e no AnaHVDC. Esse modelo foi simulado no PSCAD, no PacDyn e no AnaHVDC, com o intuito de validar o modelo desenvolvido.

Inicialmente, o caso apresentou problemas relacionados a modos de oscilação mal amortecidos. Corrigiu-se esse problema utilizando-se o PacDyn, através da análise modal e do lugar das raízes do sistema, obtendo-se novos ganhos para o controlador do conversor retificador. Com esses novos ajustes, simulou-se o caso novamente, desta vez obtendo-se resultados estáveis. Comparando-se as três ferramentas, seus resultados se mostraram condizentes, mesmo com elas possuindo diferentes métodos para calcular suas variáveis.

Deste trabalho, concluiu-se que o modelo desenvolvido é válido para simulações de elos HVDC com conversores CCC tanto no PacDyn quanto no AnaHVDC. Também pode-se observar a eficiência e a importância do PacDyn como uma ferramenta para mitigação e ajuste de problemas de oscilações mal amortecidas em controladores.

6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) LEITE, N.S. Modelagem em fasores dinâmicos de conversores com capacitores de comutação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense - Niterói.
- (2) GOMES JR, S., ALMEIDA, L. P. DE, LIRIO, F. L., PARREIRAS, T. J. M. A., DANIEL, L. O., AMARAL, T. S., ROCHA, T. J. B., AZEVEDO, R. G. O novo programa computacional AnaHVDC para simulação dos múltiplos elos HVDC do SIN considerando transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, XXV SNPTEE (Seminário Nacional De Produção e Transmissão de Energia Elétrica) - Belo Horizonte.
- (3) ALMEIDA, L. P. DE, GOMES JR, S., PARREIRAS, T. J. M. A., AZEVEDO, R. G. Identificação de falhas de comutação em elos de corrente contínua modelados por fasores dinâmicos, XXV SNPTEE (Seminário Nacional De Produção e Transmissão de Energia Elétrica) - Belo Horizonte.
- (4) CEPEL. PacDyn version 9.9 – User's manual, CEPEL/DRE - Brasil
- (5) CIGRÉ - GRUPO DE TRABALHO B4.34, Integração HVDC por conversores com capacitores de comutação - Modelagem Digital e Sistema Benchmark - Brasil
- (6) REEVE, J., BARON, J., HANLEY, G. A technical assessment of artificial commutation of HVDC converters with series capacitors" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume Pas-87.
- (7) PILOTTO, L. A. S. Modelagem avançada de sistemas CA/CC, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro.
- (8) SANDERS, S. R., NOWOROLSKI, J. M., LIU, X. Z. VERGHESE, G. C., Generalized averaging method for power conversion circuits, 21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists - Estados Unidos.
- (9) GODIM DE AZEVEDO, R. Avaliação dinâmica de elos de corrente contínua em alta frequência utilizando fasores dinâmicos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense - Niterói.

DADOS BIOGRÁFICOS



Nicholas Soares Leite graduou-se em Engenharia Elétrica em 2018 pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e concluiu Mestrado em Engenharia Elétrica e Telecomunicações, também pela Universidade Federal Fluminense. Atualmente é bolsista no Centro de Pesquisas de Engenharia Elétrica (CEPEL). Suas principais áreas de interesse são: transmissão HVDC, conversores de corrente, limitadores de corrente e supercondutividade.

(2) THIAGO JOSE MASSERAN ANTUNES PARREIRAS

Thiago Jose Masseran Antunes Parreiras possui graduação (2009), mestrado (2012) e doutorado (2017) em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente, ele é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Ele tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: transitórios eletromecânicos, transitórios eletromagnéticos e projetos de sistemas de controle.

(3) SERGIO GOMES JUNIOR

Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1992 pela UFF, concluiu Mestrado e Doutorado também em Engenharia Elétrica pela UFRJ 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 é professor da UFF. Áreas de interesse: dinâmica e controle, eletrônica de potência, harmônicos e transitórios eletromagnéticos.

(4) BRUNO WANDERLEY FRANÇA

Possui doutorado (2016) e mestrado (2012) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui graduação (2009) em Engenharia Elétrica pela UFRJ (CUM LAUDE). Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal Fluminense e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. É coordenador do núcleo de ensino de Máquinas e Acionamentos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFF desde dezembro de 2018. É membro do IEEE desde 2013 (Seção Rio de Janeiro), membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência desde 2009 (SOBRAEP) e membro do IEEE Industry Applications Society desde 2019.

(5) LEONARDO PINTO DE ALMEIDA

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 2000, obteve o título de Mestre na área de Sistemas de Potência na COPPE/UFRJ em 2004. Desde 1998 trabalha no CEPEL. Tem se dedicado à realização de estudos elétricos de sistemas de potência solicitados por diferentes agentes do Setor Elétrico Brasileiro. Participou dos estudos do Projeto de Transmissão em HVDC para as usinas do rio Madeira, e mais recentemente, da usina de Belo Monte. É membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil. Principais áreas de interesse: Transmissão HVDC, FACTS, Controle em Sistemas de Potência, Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos e Fatores Dinâmicos.