



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

METODOLOGIA PARA AJUSTE E COMPARAÇÃO ENTRE PSS2B E PSS4B: APLICAÇÃO DOS ESTABILIZADORES EM UM SISTEMA TESTE BRASILEIRO DE 33 BARRAS

IVAN PAULO DE FARIA(1); FELIPE RODRIGO RIBEIRO DE OLIVEIRA(2); AURÉLIO LUIZ MAGALHÃES COELHO(3);
UNIFEI - Campus Itabira(1); UNIFEI - Campus Itabira(2); UNIFEI - Campus Itabira(3);

RESUMO

Os estabilizadores de sistemas de potência (PSS) são empregados para atenuar oscilações em baixa frequência e consequentemente melhorar a estabilidade de sistemas. Neste trabalho, são apresentados procedimentos para ajuste tanto de estabilizadores do tipo PSS2B quanto do tipo PSS4B. Os resultados mostraram que o uso do estabilizador de banda única (PSS2B) nos geradores de um sistema equivalente de 33 barras apresentou resultados satisfatórios. Porém, ao alterar a característica do sistema, novas frequências de oscilações surgiram e foram pouco amortecidas pelo PSS2B. Neste caso, a utilização do estabilizador multibanda (PSS4B) trouxe melhores resultados, validando assim as técnicas apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade Angular Transitória de Sistemas de Potência, Estabilizadores, PSS2B, PSS4B.

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescimento dos sistemas de potência e de suas interconexões devido a mercados de energia competitivos, crescimento econômico e desenvolvimento populacional, criou a necessidade de operar os sistemas de energia próximos aos seus limites de capacidade, levando algumas vezes a problemas de estabilidade. A estabilidade de um sistema de potência pode ser entendida como a propriedade deste sistema em se manter em um estado de equilíbrio operativo após sofrer alguma espécie de distúrbio ou perturbação (1). Dentre os aspectos envolvidos nesta área, a estabilidade angular tem grande destaque, correspondendo ao estudo de estabilidade que avalia a habilidade do sistema de potência em manter suas unidades geradoras operando em condições de sincronismo (2).

Uma das formas mais econômicas para se aumentar a estabilidade dinâmica de sistemas elétricos é escolher e aplicar apropriadamente sistemas de excitação e estabilizadores de potência. O Submódulo 3.6 do ONS (3), que versa sobre os requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica, exige o emprego de PSS do tipo integral de potência acelerante em geradores com potências maiores que 30 MVA. A norma apresentada pelo IEEE (4) denomina tal estabilizador de PSS2B.

Em 2005, o IEEE introduz um novo modelo padrão para estabilizadores de sistemas de potência, o PSS4B. Este é um estabilizador multibanda, que possui três blocos de controle em paralelo, cada um visando o amortecimento de diferentes modos de oscilação do sistema em que for inserido (4).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma comparação entre os estabilizadores dos modelos IEEE PSS2B e PSS4B, avaliando a estabilidade angular de um Sistema Teste Brasileiro de 33 barras (STB-33), quando utilizado os dois tipos de estabilizadores nos geradores de suas usinas hidrelétricas (UHE's).

2.0 - O ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA

O estabilizador de sistemas de potência é uma malha de controle adicional, na maioria das vezes inserida junto ao regulador automático de tensão (AVR) do gerador, tendo como principal função amortecer oscilações eletromecânicas, assim como melhorar a estabilidade do sistema elétrico de potência em que é empregado. Para que haja o amortecimento, o estabilizador controla a excitação da máquina utilizando um sinal auxiliar, produzindo um componente de conjugado elétrico em fase com as alterações na velocidade do rotor.

São diversas as metodologias encontradas para o projeto do PSS, conforme citadas nas referências (6) a (13), fato este explicado pela dificuldade de se satisfazer as metas de projeto, além de cada método possuir vantagens e desvantagens peculiares. Um dos modelos de PSS mais utilizados atualmente é o PSS2B, que utiliza como referência a potência elétrica e a velocidade (ou frequência) do gerador. Este estabilizador pode ser dividido em dois principais estágios, sendo o primeiro, transdutor de integral da potência acelerante ou de velocidade do rotor e o segundo, ganho e avanço-atraso de fase. O primeiro estágio do PSS2B, representado na Figura 1 – (a), possui filtros *washout* que removem a componente contínua dos sinais de entrada. Em seguida, integrador e filtro passa-baixa são utilizados para que a integral da potência acelerante da máquina seja sintetizada (12). O segundo estágio modifica a integral da potência acelerante e envia o sinal resultante para a entrada do regulador automático de tensão da máquina. Este sinal causa o amortecimento das oscilações de baixa frequência. O diagrama de blocos deste estágio é mostrado na Figura 1 – (b) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

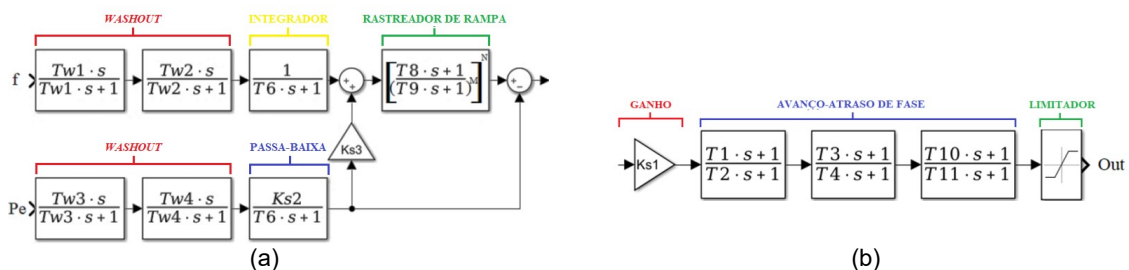


FIGURA 1 – (a) Estágio 1 – Integral da Potência Acelerante; (b) Estágio 2 – Ganho e Avanço-atraso de Fase.

Uma das desvantagens do PSS2B é o fato de seu projeto ser realizado considerando a atuação do estabilizador para apenas uma frequência de oscilação. Caso surjam oscilações com frequências consideravelmente diferentes da ajustada, o estabilizador pode não apresentar resultados satisfatórios.

A necessidade de um amortecimento em uma ampla faixa de frequências motivou então o conceito de um estabilizador multibanda, conhecido como *Multiband Power System Stabilizer* (MB-PSS). O modelo PSS4B representa uma estrutura baseada neste tipo de estabilizador. De maneira igual ao PSS2B, o PSS4B possui também uma malha responsável pela transdução de velocidade. Uma das representações desta malha pode ser vista na Figura 2 – (a). Três bandas separadas, indicadas por L, I e H, dedicadas a baixos, intermediários e aos altos modos de oscilação, respectivamente, são utilizadas neste estabilizador, como mostrado na Figura 2 – (b). A banda baixa é tipicamente associada com o modo global do sistema de potência, a intermediária com o modo inter-área, e a alta com o modo local. Cada uma das três bandas é composta de uma estrutura diferencial, um ganho e um limitador. Suas saídas são somadas e passadas por um limitador final, resultando na saída do PSS.

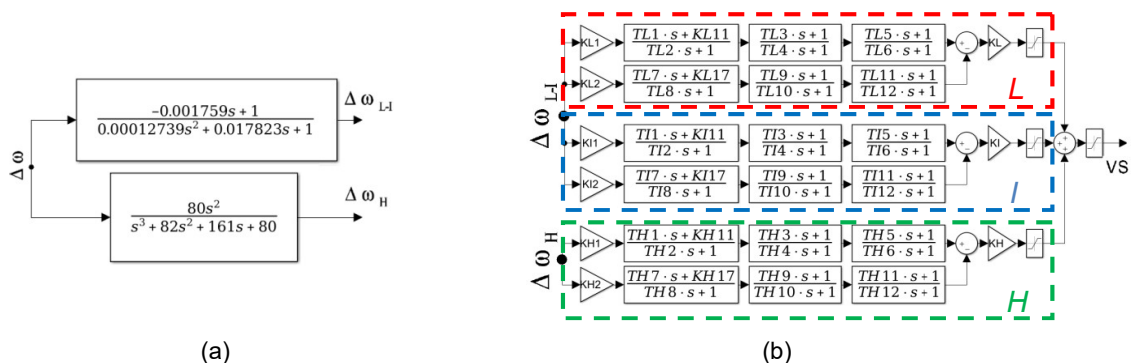


FIGURA 2 – (a) Transdutor de Velocidade do PSS4B; (b) Estrutura do Estabilizador PSS4B.

Apesar da quantidade de parâmetros a ser ajustada no PSS4B causar uma flexibilidade quanto sua sintonização, o que é uma característica desejável, existe resistência quanto ao seu uso, por se tornar mais complexo o seu

projeto. Assim, o foco deste trabalho será propor estratégias que simplifiquem o processo de sintonização deste estabilizador, a fim de que os métodos de ajuste do mesmo não se tornem tão distantes dos utilizados no PSS de uma única banda.

3.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE BRASILEIRO DE 33 BARRAS

O sistema utilizado para realização das análises do comportamento dos estabilizadores é o Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras (STB-33), denominado também de sistema Sul. Este sistema foi elaborado pela referência (15) a partir de dados extraídos da malha de 500 kV da região Sul do Brasil, acoplado com um trecho em 230 kV, formando um anel. Este modelo, que pode ser visto na Figura 3, possui 33 barras, existindo entre estas, 7 centrais hidrelétricas. Para cada máquina geradora do sistema, foram consideradas as malhas de controle associadas a elas, tais como reguladores de tensão, excitatrizes, reguladores de velocidade, turbina e PSS. Os modelos dos controladores assim como seus parâmetros foram retirados da base de dados dinâmicos do ONS. Com exceção dos estabilizadores das usinas de Gov. Bento Munhoz e Salto Santiago, que são de um tipo não padronizado pelo IEEE, todas as outras máquinas são equipadas com os estabilizadores do tipo PSS2B.

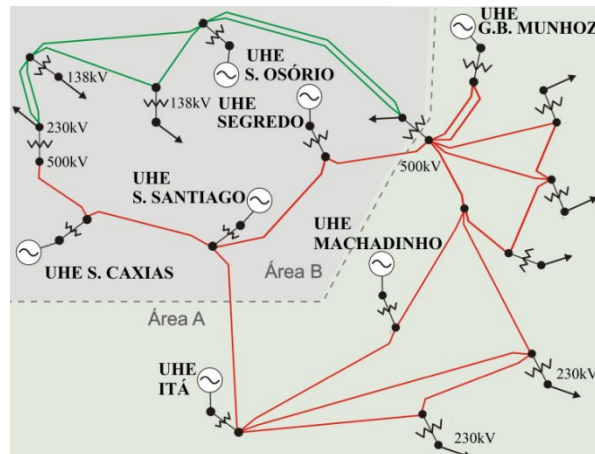


FIGURA 3 - Diagrama unifilar do sistema STB-33 (15).

4.0 - METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DOS PSS2B E PSS4B

Os programas ANAREDE, PACDYN e ANATEM do CEPEL foram utilizados para modelar o sistema elétrico STB-33. Visando alterar os estabilizadores deste sistema, quatro etapas foram seguidas, como mostrado a seguir.

4.1 Verificação do Polo Mais Crítico

Utilizando o programa PACDYN do CEPEL, os polos eletromecânicos foram identificados a partir da variável com o maior fator de participação para cada polo. Na Tabela 1 estão apresentados os polos dos modos eletromecânicos mais críticos do sistema.

Tabela 1 – Polos Eletromecânicos do Sistema.

	<i>Real</i>	<i>Imaginário</i>	<i>Amortecimento</i>	<i>Frequência</i>		<i>Real</i>	<i>Imaginário</i>	<i>Amortecimento</i>	<i>Frequência</i>
1	-0,65	6,44	10,03%	1,03Hz	4	-1,65	8,37	19,30%	1,33Hz
2	-0,65	5,80	11,23%	0,92Hz	5	-2,23	10,84	20,18%	1,73Hz
3	-0,89	7,74	11,45%	1,23Hz	6	-3,13	9,23	32,13%	1,47Hz

4.2 Verificação dos Resíduos do Polo Mais Crítico

O objetivo nesta etapa é definir em qual usina a substituição do PSS trará melhores resultados. Para isto, seguiu-se o procedimento descrito pela referência (13), que diz que o maior resíduo fornecerá maior amortecimento ao modo de oscilação selecionado. Os valores dos resíduos obtidos, apresentados na Figura 4, estão normalizados em relação ao gerador de maior resíduo. O resíduo obtido para cada localização possível do controlador fornece informações sobre a controlabilidade e observabilidade do conjunto entrada-saída para o controlador em um determinado autovalor.



FIGURA 4 – Resíduos da função de transferência do polo mais crítico.

Pelos resíduos, verifica-se que o estabilizador da UHE Machadinho é o mais indicado para ser reajustado, pois possui maior valor e, a princípio, é onde um novo estabilizador possuirá maior capacidade de causar variação.

4.3 Remoção do Estabilizador da Usina Selecionada e Nova Verificação do Polo Mais Crítico do Sistema.

Nesta etapa, removeu-se o estabilizador da usina de Machadinho, que é a que possui o maior resíduo associado ao polo mais crítico encontrado. Este procedimento resultou no deslocamento do polo mais crítico do sistema. A Tabela 2 apresenta as novas informações deste polo.

Tabela 2 – Polo eletromecânico mais crítico do sistema.

	<i>Real</i>	<i>Imaginário</i>	<i>Amortecimento</i>	<i>Frequência</i>
1	-0,4483	6,5612	6,82%	1,04 Hz

4.4 Projeto do novo estabilizador de acordo com a frequência de oscilação associada ao polo mais crítico

Sabendo a localização do polo mais crítico no plano complexo, consegue-se encontrar qual a frequência de oscilação associada a ele para que possa ser feito o projeto do estabilizador. Neste caso o novo PSS da usina de Machadinho foi projetado para amortecer as oscilações que possuem frequências próximas a 1,04 Hz.

5.0 - PROCEDIMENTO PARA AJUSTE DOS PSS

5.1 PSS2B

Utilizando-se o PACDYN, e seguindo a técnica de sintonização por compensação de fase (5), a resposta em frequência da função de transferência entre a referência do AVR e a tensão na barra onde estão conectadas as máquinas de Machadinho foi obtida. Observando a Figura 5, é possível ver que, na frequência de 1,04 Hz (aproximadamente 6,53 rad/s), existe um atraso de fase de $-95,42^\circ$, causado tanto pela malha de controle presente no AVR quanto pelos enrolamentos da máquina.

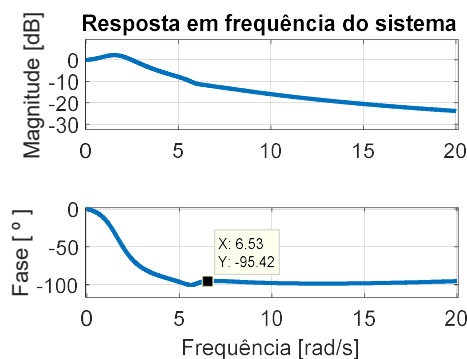


FIGURA 5 – Resposta em frequência do sistema.

O método de projeto escolhido utiliza os blocos *lead-lags* do PSS2B para compensar este atraso de fase, resultando em uma subcompensação de 10° a 20° . Escolhendo então uma subcompensação final de 20° , os blocos do presente estabilizador devem causar um avanço de fase de $75,42^\circ$. Na estrutura do PSS2B, existem três blocos do tipo avanço-atraso destinados a esta compensação, porém apenas dois deles foram utilizados. Eles foram ajustados de forma que cada um compense $37,71^\circ$ na frequência de interesse. Utilizando as Equações (1) a (3), os parâmetros do controlador foram encontrados.

$$a = \frac{1 + \sin\phi_{máx}}{1 - \sin\phi_{máx}} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{a} \cdot \omega_m} \quad (2)$$

$$G_c = \frac{1 + (a \cdot T)s}{1 + (T)s} \quad (3)$$

Sendo que $\phi_{m\acute{a}x}$ é o ângulo máximo de avanço de fase e ω_m a frequência onde irá ocorrer esta defasagem angular. O ajuste do ganho proporcional do estabilizador, neste trabalho, foi realizado utilizando a função *Root Locus* do programa PACDYN. Tal ferramenta possibilita observar a localização dos polos do sistema de acordo com a alteração do ganho. Para os demais parâmetros do estabilizador presentes no primeiro estágio do PSS2B foram utilizados valores típicos, recomendados pelo IEEE (4). As quatro etapas apresentadas na seção 4.0 foram sendo realizadas repetidamente até que os estabilizadores de todas as usinas fossem alterados.

5.2 PSS4B

Diferentemente do PSS2B, não foi encontrado, nas pesquisas realizadas, um método de ajuste do PSS4B que satisfizesse as metas de projeto do presente trabalho. Desta forma, simplificações serão sugeridas para que o projeto do mesmo possa ser realizado de forma semelhante ao PSS2B, utilizando os princípios da técnica de compensação de fase. Uma maneira encontrada para que no projeto do PSS4B permanecesse a figura da estrutura que realiza a filtragem do sinal de entrada, presente nos outros modelos de estabilizadores, foi seguir a recomendação da referência (16). Este documento recomenda o método de ajuste baseado em três filtros passa bandas simétricos, sendo estes localizados nos três braços do estabilizador multibanda e ajustados para uma frequência baixa (FL), uma intermediária (FI) e uma alta (FH). Suas constantes de tempo e ganhos dos ramos são derivadas das Equações (4) a (7), onde R é uma constante igual a 1,2. Este método permite estudos de sensibilidade variando somente seis parâmetros do estabilizador: FL, FI, FH, KL, KI e KH (17).

$$T_{L2} = T_{L7} = \frac{1}{2\pi F_L \sqrt{R}} \quad (4)$$

$$T_{L1} = \frac{T_{L2}}{R} \quad (5)$$

$$T_{L8} = T_{L7} \cdot R \quad (6)$$

$$K_{L1} = K_{L2} = (R^2 + R)/(R^2 - 2R + 1) \quad (7)$$

Utilizando o filtro apresentado, garante-se que o PSS atue somente para as oscilações cujas frequências não são atenuadas pelos filtros. Porém, ainda se faz necessário compensar o atraso de fase causado pelo regulador de tensão e enrolamentos do gerador. A Figura 6 apresenta o ramo de baixa frequência do PSS4B de forma simplificada, sendo os blocos descritos pelas Equações (8) a (11).

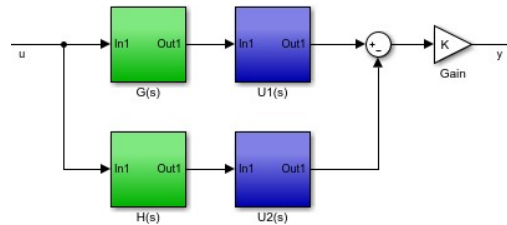


FIGURA 6 – Representação de um dos ramos do PSS4B.

$$G(s) = K_{L1} \frac{K_{L11} + sT_{L1}}{1 + sT_{L2}} \quad (8)$$

$$H(s) = K_{L2} \frac{K_{L17} + sT_{L7}}{1 + sT_{L8}} \quad (9)$$

$$U1(s) = \frac{1 + sT_{L3}}{1 + sT_{L4}} \frac{1 + sT_{L5}}{1 + sT_{L6}} \quad (10)$$

$$U2(s) = \frac{1 + sT_{L9}}{1 + sT_{L10}} \frac{1 + sT_{L11}}{1 + sT_{L12}} \quad (11)$$

Observa-se que, se $U1(s)$ for igual a $U2(s)$, e chamando-os de $C(s)$, tem-se as equações (12) e (13).

$$y(s) = K \cdot G(s) \cdot U1(s) \cdot u(s) - K \cdot H(s) \cdot U2(s) \cdot u(s) \quad (12)$$

$$y(s) = u(s) \cdot \{G(s) - H(s)\} \cdot C(s) \cdot K \quad (13)$$

Fazendo $F(s)$ conforme mostrado na equação (14),

$$F(s) = \{G(s) - H(s)\} \quad (14)$$

Tem-se a equação (15),

$$y(s) = u(s).F(s).C(s).K \quad (15)$$

Nota-se que a equação de saída resultante é semelhante com a de um PSS clássico, se for considerado que $F(s)$ é a função de transferência do filtro e transdução de velocidade, $C(s)$ a estrutura responsável pela compensação de fase e K o parâmetro responsável pelo ganho do sistema. Assim, o projeto do estabilizador PSS4B pode ser realizado seguindo a mesma linha de raciocínio do estabilizador PSS2B. Desta forma, o PSS4B em estudo pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 7. O sistema $G(s)$ foi inserido no diagrama para representar o sistema de excitação juntamente com o gerador associado, de forma que a entrada deste representa a referência do AVR e a saída, a tensão terminal da máquina.

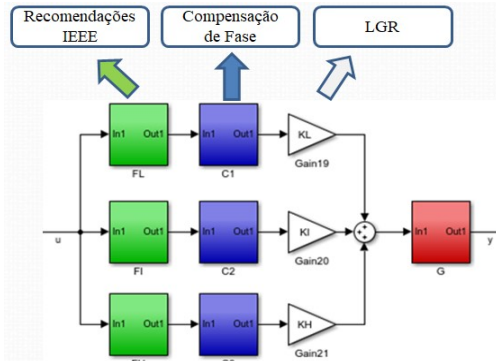


FIGURA 7 – PSS4B com as simplificações propostas.

Modelando este sistema, tem-se a equação (16).

$$\frac{y}{u} = (K_L \cdot |F_L| \cdot |C_1| \cdot |G|) \angle (F_L + C_1 + G) + (K_I \cdot |F_I| \cdot |C_2| \cdot |G|) \angle (F_I + C_2 + G) + (K_H \cdot |F_H| \cdot |C_3| \cdot |G|) \angle (F_H + C_3 + G) \quad (16)$$

Para que o diagrama de *Bode* entre a entrada e saída apresente uma defasagem angular de α° , β° e γ° , e magnitudes U, V e W, respectivamente para as três frequências escolhidas, as seguintes equações (17), (18) e (19) devem ser satisfeitas.

$$U \angle \alpha^\circ = (K_L \cdot |F_L|' \cdot |C_1|' \cdot |G|') \angle (F_L' + C_1' + G') + (K_I \cdot |F_I|' \cdot |C_2|' \cdot |G|') \angle (F_I' + C_2' + G') + (K_H \cdot |F_H|' \cdot |C_3|' \cdot |G|') \angle (F_H' + C_3' + G') \quad (17)$$

$$V \angle \beta^\circ = (K_L \cdot |F_L|'' \cdot |C_1|'' \cdot |G|'') \angle (F_L'' + C_1'' + G'') + (K_I \cdot |F_I|'' \cdot |C_2|'' \cdot |G|'') \angle (F_I'' + C_2'' + G'') + (K_H \cdot |F_H|'' \cdot |C_3|'' \cdot |G|'') \angle (F_H'' + C_3'' + G'') \quad (18)$$

$$W \angle \gamma^\circ = (K_L \cdot |F_L|''' \cdot |C_1|''' \cdot |G|''') \angle (F_L''' + C_1''' + G''') + (K_I \cdot |F_I|''' \cdot |C_2|''' \cdot |G|''') \angle (F_I''' + C_2''' + G''') + (K_H \cdot |F_H|''' \cdot |C_3|''' \cdot |G|''') \angle (F_H''' + C_3''' + G''') \quad (19)$$

Sendo $|C_1|'$ o módulo de C_1 para a frequência de oscilação baixa; $|C_1|''$ o módulo de C_1 para a frequência de oscilação intermediária; $|C_1|'''$ o módulo de C_1 para a frequência de oscilação alta; $\angle C_1'$ a fase de C_1 para a frequência de oscilação baixa; $\angle C_1''$ a fase de C_1 para a frequência de oscilação intermediária e $\angle C_1'''$ a fase de C_1 para a frequência de oscilação alta.

Uma rotina para a resolução de um sistema formado por estas três equações foi criada no software *Matlab*®, de tal forma que, informando as três frequências de oscilação, juntamente com a magnitude e fase entre a referência do AVR e a tensão terminal associadas a cada uma destas três frequências, se torna possível encontrar os parâmetros dos compensadores e ganhos para que haja a compensação de fase desejada nas três frequências.

6.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Verificação da Influência dos Estabilizadores PSS2B nas Oscilações Eletromecânicas

Visando comparar o efeito dos PSSs no sistema, aplicou-se um curto-circuito trifásico franco de 100 ms de duração na barra de 500 kV de Salto Santiago, com abertura permanente da linha de transmissão de 500 kV que interliga as Usinas de Salto Santiago e Itá. Destaca-se que este tipo de perturbação foi definido como o padrão neste trabalho, sendo utilizado em todas as avaliações.

O comportamento do ângulo de carga de cada uma das usinas é representado nas Figuras 8 (a) e (b). É possível notar que para a perturbação aplicada, o sistema permanece em uma condição de estável, tanto com a presença dos PSSs da base de dados do ONS quanto com a presença dos PSS2B ajustados de acordo com a metodologia

proposta neste trabalho. No entanto, comparando as duas figuras, nota-se o maior amortecimento das oscilações devido aos novos ajustes dos PSS2B. As oscilações angulares são amortecidas em cerca de 4 segundos de simulação (Figura 8 (b)), ao passo que com os PSSs da base de dados do ONS, as oscilações são atenuadas após 12 segundos do momento do distúrbio (Figura 8 (a)).

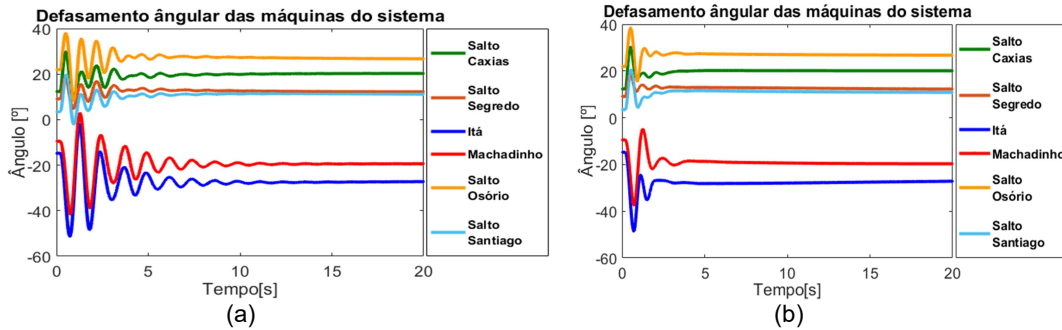


FIGURA 8 – Comportamento do ângulo de carga dos geradores. (a) Com a presença de PSSs da base de dados do ONS; (b) Com a presença dos PSS2B ajustados de acordo com a técnica desenvolvida neste trabalho.

Vale destacar que o projeto do estágio de ganho e avanço-atraso de fase do PSS2B, seguindo a metodologia de compensação de fase, pôde ser realizado basicamente com apenas duas informações, sendo elas o valor da frequência de oscilação que se deseja atenuar e o atraso de fase existentes entre a referência do AVR e a tensão terminal da máquina. Ou seja, informações estas que o comissionador consegue obter com certa facilidade em campo, não necessitando de muitos dados específicos do sistema ou mesmo da máquina em que o PSS está sendo aplicado.

Com o interesse em definir um ponto de operação do sistema que resulte em frequências de oscilações diferentes, a constante de inércia de duas das cinco máquinas da UHE Itá foi aumentada, assim como o despacho de potência dos geradores. Esta modificação resultou no surgimento de oscilações em frequências mais baixas que os PSS2B foram ajustados. O comportamento dos ângulos de carga das máquinas do sistema é mostrado na Figura 9. Nota-se que as alterações realizadas na Usina fizeram com que todo o sistema oscilasse por um período maior que 20 segundos após a aplicação do distúrbio. Este resultado mostra que mudanças no ponto de operação e alterações da inércia do sistema podem comprometer a capacidade dos estabilizadores em amortecer as oscilações.

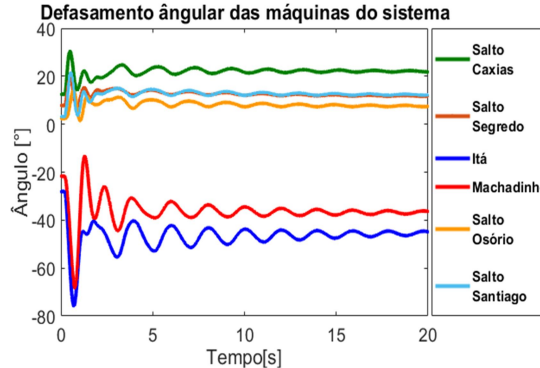


FIGURA 9 – Comportamento do ângulo de carga dos geradores após a alteração do ponto de operação do sistema.

6.2 Verificação da Influência dos Estabilizadores PSS4B nas Oscilações Eletromecânicas

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema utilizando os estabilizadores do tipo PSS4B, sintonizados a partir do método apresentado, os mesmos foram inseridos nas UHE's, sucedendo os estabilizadores de banda única.

Em um primeiro instante, o estabilizador da UHE Itá foi substituído pelo PSS4B, sendo este projetado para atuar tanto na frequência de oscilação que foi projetado o PSS2B (ωI), quanto para a frequência de oscilação que surgiu após a modificação do ponto de operação do sistema (ωL). A frequência das altas oscilações (ωH), arbitrariamente, foi definida como 12 rad/s. Para que haja uma subcompensação resultante de 20° nas três frequências ajustadas, os parâmetros da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foram utilizados para o cálculo das constantes do estabilizador.

Tabela 3 – Informações utilizadas para o projeto do PSS4B.

Par.	Valor	Par.	Valor	Par.	Valor	Par.	Valor	Par.	Valor
ωL	3.4rad/s	ωH	12rad/s	HI	-5,7dB	ΦL	-32,3°	ΦH	-67,8°

ω_l	7.2rad/s	HL	-2,6dB	HH	-7,3dB	Φ_l	-37,1°
------------	----------	----	--------	----	--------	----------	--------

Na Tabela, ω_L , ω_l e ω_H são as frequências de oscilação de ajuste, HL, HI e HH a magnitude entre V_b/V_{ref} , nas três frequências, e Φ_L , Φ_l e Φ_H a fase entre V_b/V_{ref} , também nas três frequências.

A Figura 10 apresenta a fase da resposta em frequência obtida por simulação computacional entre a referência do AVR e tensão estática. Nota-se um atraso de fase que aumenta com a frequência. Em contrapartida, percebe-se também que este atraso de fase é compensado pelo avanço de fase gerado pelo estabilizador de potência projetado. Adicionalmente, é apresentada na Figura 10 a soma aritmética das fases de V_b/V_{ref} e do PSS4B. O objetivo é fazer com que a soma de fases fique próxima a -20° nas frequências de interesse, o que ser verificado nos pontos destacados na figura.

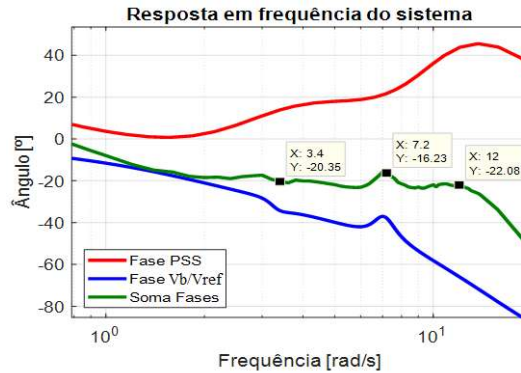


FIGURA 10 – Fase das respostas em frequência V_b/V_{ref} e estabilizador e soma das características de fase.

As Figuras 11 (a) e (b) mostram o comportamento do sistema com o estabilizador multibanda na UHE Itá antes e depois de realizadas as alterações do ponto de operação do sistema, respectivamente. Percebe-se pela Figura 11 (a) que o estabilizador manteve o bom desempenho do sistema, mas não apresentou melhoras significativas (quando comparado com a Figura 8 (b)). A existência de frequências de oscilações muito próximas entre si já fez com que o estabilizador de banda única fosse tão efetivo quanto o multibanda, não justificando a utilização do PSS que possui uma complexidade maior. Contudo, é possível ver pela Figura 11 (b), que diferentemente do que acontece ao se utilizar o PSS2B (Figura 9), o novo estabilizador amortece as oscilações em menos que 5 segundos após a aplicação do distúrbio, mesmo com o ponto de operação do sistema alterado.

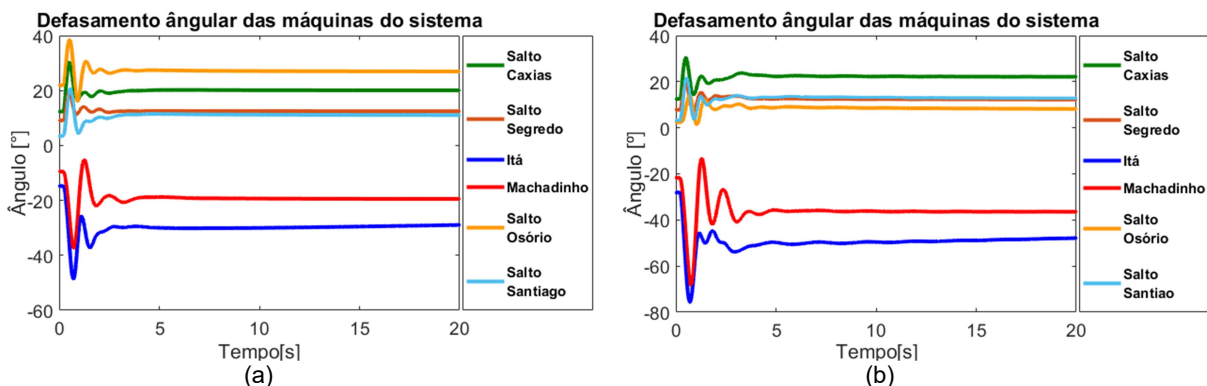


FIGURA 11 – Comportamento do ângulo de carga dos geradores. (a) Com a presença de PSS4B antes da alteração do ponto de operação do sistema; (b) Com a presença dos PSS4B após a alteração do ponto de operação do sistema.

7.0 - CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou aplicar técnicas de projeto de estabilizadores pensando em situações em que o comissionador não esteja de posse de dados detalhados do gerador e do sistema de potência. Resultados satisfatórios foram obtidos ao projetar os estabilizadores do tipo PSS2B pelo método de compensação de fase. Ao aplicar esta técnica, a habilidade do sistema de potência em manter o sincronismo de suas unidades geradoras quando da ocorrência de grandes perturbações aumentou, e o período de oscilação foi reduzido consideravelmente. Para sistemas que não possuem mais que uma frequência de oscilação forte associada às máquinas, ou que possuam, mas elas estejam próximas entre si, recomenda-se a utilização do PSS2B já que ele se mostrou robusto para estes casos.

Apesar do sistema utilizado não ser propício para verificar claramente as vantagens do PSS4B, devendo ele para isto possuir fortes oscilações tanto locais quanto inter-áreas e globais, conseguiu-se, por meio da mudança do ponto de operação do sistema, e utilizando o método de projeto apresentado, comprovar sua maior robustez quando comparado com o PSS2B. Tornou-se claro que o projeto do PSS4B irá exigir um auxílio computacional considerável. Entretanto, a necessidade de poucas informações faz com que o método apresentado se torne uma boa alternativa de projeto por parte de comissionadores.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KUNDUR, P. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- (2) MENDES, P.P.C. Estabilidade Angular de Sistemas Elétricos de Potência. UNIFEI. Itajubá, 2010.
- (3) ONS. Requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica. Submódulo 3.6. RJ, Brasil, julho 2008.
- (4) IEEE. 421.5:2005: IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies. Nova Iorque, NY, EUA, 2005.
- (5) MOTA, Daniel dos Santos. Técnicas de ajuste de estabilizadores de sistemas de potência. Dissertação de mestrado. PUC, São Paulo, 2010.
- (6) ABE, S. A new power system stabilizer synthesis in multimachine power systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Dez 2017.
- (7) CARBONERA, Luis Felipe Bianchi. Comparação de funções objetivo para seleção de PSS pelo amortecimento de oscilações em sistemas multimáquinas. Dissertação de Mestrado. 2015. UFSM.
- (8) CASTOLDI, Marcelo Favoretto. Algoritmo Híbrido para projeto de controladores de amortecimento de sistemas elétricos de potência utilizando Algoritmos Genéticos e Gradiente Descendente. 2011. EESC/USP.
- (9) SIDHARTA, O. Padhy. Robust Power System Stabilizer Design using Particle Swarm Optimization Technique. IJE, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. Vol:2, No10,2008.
- (10) ALSHAMMARI, Badr. Optimal design of multimachine power system stabilizer using Gbest-guided Artificial Bee Colony Algorithm. Abril, 2016.
- (11) GHARAVEISI, A.A. An optimal Takagi-Sugeno Fuzzy Pss for multi-machine power system. Power Symposium, EUA, 2008.
- (12) LARSEN, E.V.; SWANN, D.A. Applying power system stabilizers part I: General concepts. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100,p. 3017- 3024, Jun. 1981.
- (13) CHANG, Y. XU, Z. (2007). A novel svc supplementary controller based on wide area signals, Electric Power Systems Research.
- (14) ALVES, W.F. Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Fluminense. Niteroi. RJ. 2007.
- (15) MURDOCH, A.; VENKATARAMAM, S.; LAWSON, R. A.; PEARSON, W. R. Integral of accelerating power type PSS. Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 14, pp. 1658-1663, 1999.
- (16) IEEE. IEEE PSS2B versus PSS4B: The Limits of Performance of Modern Power System Stabilizers. Vol.20, No. 2, Mai. 2005.
- (17) HAMMER, Anders. Analysis of IEEE Power System Stabilizer Models. Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering. Junho, 2011.
- (18) ONS. Procedimentos de Rede Módulo 23: Critérios para estudos. Submódulo 23.3, 2002.

9.0 - DADOS BIográficos



Ivan Paulo de Faria nasceu em Borda da Mata/MG, em 1987. Possui Graduação em Engenharia Elétrica (2010), Mestrado (2012) e Doutorado (2016) na área de Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá. Atuou de 2011 a 2015 como pesquisador do Laboratório de Alta Tensão (LAT-EFEI), participando de projetos de P&Ds, ensaios em equipamentos de média tensão e do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Transformadores de Distribuição. Atualmente é professor Adjunto C1 da Universidade Federal de Itajubá, *Campus* de Itabira, na área de Sistemas Elétricos de Potência, lecionando disciplinas de Estabilidade de Sistemas Elétricos e Máquinas Elétricas. Suas áreas de interesse são: Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência, Análise de Curto-circuito, Fluxo de Potência, Transitórios Eletromagnéticos, Máquinas Elétricas, Ensaios em Equipamentos Elétricos.