

Aplicação do UPFC e do SSSC para Melhoria da Estabilidade Angular de Sistemas Elétricos de Potência

Davi Carvalho Moreira

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A – Eletrobras Eletronorte
Rod. BR 422, Km 13, UHE Tucuruí, 68464-000, Tucuruí-PA
davimoreira@eln.gov.br

Marcus Vinicius Alves Nunes

Universidade Federal do Pará – UFPA
Av. Augusto Correa Nº 01, Guamá, 66050-000, Belém-PA
mvan@ufpa.br

João Paulo Abreu Vieira

Universidade Federal do Pará – UFPA
Av. Augusto Correa Nº 01, Guamá, 66050-000, Belém-PA
jpavieira@ufpa.br

Bruno Merlin

Universidade Federal do Pará – UFPA
Rod. BR 422, Km 13, CAMTUC, 68464-000, Tucuruí-PA
brunomerlin@ufpa.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo que avalia a influência do SSSC (Static Synchronous Series Compensator) e do UPFC (Unified Power Flow Controller) na estabilidade angular de sistemas elétricos de potência sob condições de pequenas e grandes perturbações. As análises são realizadas por meio do programa PSAT (Power System Analysis Toolbox), o qual apresenta os modelos dos FACTS e de seus controles associados, dentre os quais, o controlador POD (Power Oscillation Damping). A análise da estabilidade e o projeto dos estabilizadores são baseados em análise modal e simulação no domínio tempo, bem como em técnicas de resposta em frequência. Os resultados mostraram que o SSSC e o UPFC contribuem para a melhoria da estabilidade angular, quando equipados com o POD.

PALAVRAS CHAVES: Estabilidade angular. FACTS. POD.

Área principal. (EN – PO na Área de Energia, SIM – Simulação)

ABSTRACT

This paper presents a study evaluating the influence of SSSC (Static Synchronous Series Compensator) and UPFC (Unified Power Flow Controller) in the angular stability of electric power systems under conditions of small and large disturbances. The analyzes are performed using PSAT program (Power System Analysis Toolbox), which presents the models of FACTS and their associated controls, among which, the POD controller (Power Oscillation Damping). The analysis of the stability and the design of the stabilizers are based on modal analysis and simulation in the time domain as well as in response techniques in frequency. The results showed that the UPFC and SSSC is improved angular stability when equipped with the POD.

KEYWORDS: Angular Stability. FACTS. POD.

Main area. (EN – OP Area Energy, SIM – Simulation)

1. Introdução

Devido à desregulamentação do setor elétrico, as concessionárias de energia elétrica por todo mundo estão operando em mercados cada vez mais competitivos. Ao mesmo tempo, pressões econômicas e ambientais impõem severas restrições à construção de novas linhas de transmissão, de forma que o aumento da capacidade de transferência de potência dos sistemas é, usualmente, conseguido pelo reforço das linhas já existentes. Contudo, a operação desses sistemas está muito próxima dos seus limites de estabilidade, favorecendo o surgimento de oscilações eletromecânicas, que são fatores limitantes para o transporte de energia entre grandes sistemas de potência. O desenvolvimento de novas tecnologias, tais como, dispositivos FACTS (do inglês “Flexible Alternating Current Transmission System”) têm ajudado as empresas do setor elétrico a lidarem com tais problemas.

O conceito FACTS agrupa um conjunto de novos equipamentos de eletrônica de potência que permitem maior flexibilidade de controle dos sistemas elétricos. Neste caso, entende-se por flexibilidade, como a capacidade de rápida e contínua alteração dos parâmetros que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema elétrico, conforme descrito por Kimbark (1956). Os equipamentos FACTS são divididos em gerações definidas, em especial, pela tecnologia dos dispositivos semicondutores, destacando-se os conversores VSC (do inglês, “Voltage Source Converter”), tais como: SSSC (do inglês, “Static Synchronous Series Compensator”) e UPFC (do inglês, “Unified Power Flow Controller”), segundo Jiang (2007).

Podendo desempenhar várias funções, esses controladores podem realizar controle do fluxo de potência, controle da tensão e compensação série reativa, melhorando a estabilidade transitória e a estabilidade a pequenas perturbações quando equipados com estabilizadores suplementares, POD (do inglês, “Power Oscillation Damping”), em Wang (1999).

Ressalta-se que os estabilizadores de sistemas de potência PSS (do inglês, “Power System Stabilizer”) possuem grande atuação nas oscilações eletromecânica dos modos locais, porém, em alguns casos, pode não ser a melhor alternativa para o amortecimento de oscilações de modo interárea, conforme Cai e Erlich (2005), uma vez que o uso de tais controladores gera objetivos conflitantes no controle das oscilações, podendo comprometer o amortecimento dos modos locais, segundo Pellanda et al. (2006). Neste caso, o uso de dispositivos FACTS equipados com controladores estabilizadores suplementares pode ser uma alternativa para solucionar este problema, conforme apresentado no estudo de Chang, Cheng, e Xie (2006).

Os estudos e análises em questão avaliam a influência dos dispositivos FACTS na estabilidade angular de sistemas elétricos de potência sob condições de pequenas e grandes perturbações. Dois sistemas elétricos foram utilizados nos estudos, sendo um sistema máquina barra-infinita e um sistema multi-máquinas, apresentados em Kundur (1994). O projeto dos estabilizadores e a análise da estabilidade são baseados em técnicas de resposta em frequência utilizando o critério de Nyquist, bem como a análise modal e simulação no domínio do tempo, respectivamente. Os resultados obtidos mostram que os controladores SSSC e UPFC equipados com POD possuem grande potencial para a manutenção da estabilidade angular de sistemas elétricos de potência.

2. Modelagem do SSSC

O modelo do SSSC em estudo, Milano (2012), é representado por uma fonte de tensão V_s , conforme ilustrado na Figura 1.

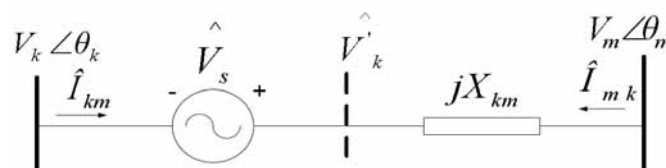


Figura 1. Circuito do SSSC

A tensão V_s é sempre mantida em quadratura com a corrente da linha. Assim, o único parâmetro controlável é a magnitude V_s . O fluxo total de potência ativa e reativa em uma linha de transmissão com um SSSC é dado por:

$$\begin{aligned}
 P_{km} &= (1+\epsilon) \frac{V_k V_m}{X_{km}} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) \\
 P_{km} &= -P_{mk} \\
 Q_{km} &= (1+\epsilon) \frac{V_k}{X_{km}} (V_k - V_m \cos(\theta_k - \theta_m)) \\
 Q_{mk} &= (1+\epsilon) \frac{V_m}{X_{km}} (V_m - V_k \cos(\theta_k - \theta_m))
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\epsilon = \frac{V_s}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})}} \tag{2}$$

O modelo dinâmico do SSSC é representado na Figura 2 e a equação diferencial que descreve o seu comportamento dinâmico é:

$$\dot{V}_s = \frac{(V_{so} + V_{POD} - V_s)}{T_r} \tag{3}$$

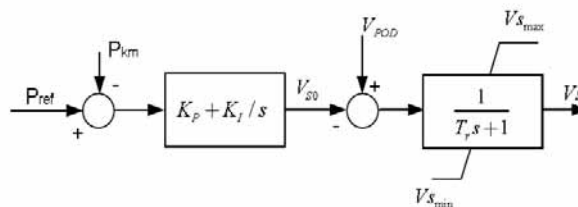


Figura 2. Modelo dinâmico do SSSC

A entrada V_{so} determina o modo de operação do controlador que por sua vez determina o valor da tensão V_s do SSSC no espaço de estado. Três modos de controle diferentes podem ser implementados para o SSSC: tensão constante, reatância constante e o fluxo de potência constante.

Para cada modo de controle, a tensão de entrada V_{so} é dada por:

Tensão constante: A magnitude da tensão V_s no estado estacionário é mantida constante, independentemente da linha, de modo à entrada $V_{so} = \text{const}$.

Reatância constante: A magnitude da tensão V_s varia proporcionalmente à linha, mantendo constante a impedância total da linha de transmissão em que o SSSC está conectado. Neste modo de operação do V_{so} de entrada é a seguinte:

$$V_{so} = (k X_{km} I_{km}) \tag{4}$$

onde k é o grau de compensação série, I_{km} é a magnitude da corrente de linha, e X_{km} é a reatância da linha de transmissão.

Fluxo de potência constante: Nesse modo, a tensão V_{S0} é à saída de um controlador PI utilizada para controlar o fluxo de potência em linhas de transmissão, como mostra a Figura 2.

Duas estratégias podem ser implementadas para a constante de modo de controle do fluxo de potência: (i) fluxo de potência constante e (ii) ângulo constante.

3. Modelagem do UPFC

O modelo do UPFC, Milano (2012), é obtido a partir da combinação do STATCOM e do SSSC, sendo representado por uma fonte de tensão série V_s e por uma fonte de corrente I_{sh} , como mostra a Figura 3:

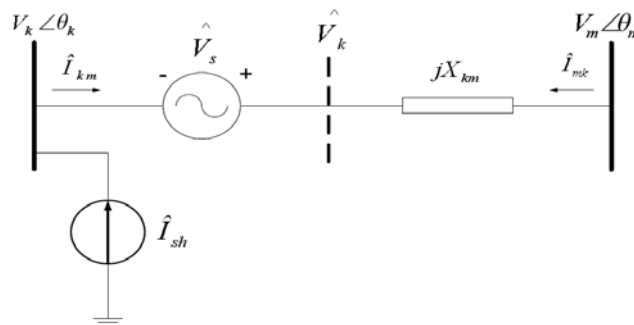


Figura 3. Circuito equivalente do UPFC

sendo definido por:

$$\hat{V}_s = (v_p + jv_q)e^{j\phi} = r\hat{V}_k e^{j\gamma} \tag{5}$$

$$\hat{I}_s = (i_p + ji_q)e^{j\theta_k} \tag{6}$$

O diagrama vetorial do circuito equivalente da fonte de tensão é dado na Figura 4.

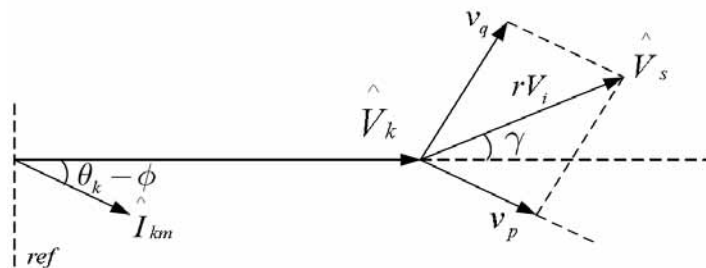


Figura 4. Diagrama fasorial da tensão série V_s

As equações de energia que descrevem o modelo de injeção de potência do UPFC são:

$$\begin{aligned} P_{km} &= brV_kV_m \text{sen}(\gamma + \theta_k - \theta_m) \\ P_{mk} &= -brV_kV_m \text{sen}(\gamma + \theta_k - \theta_m) \\ Q_{km} &= brV_k^2 \cos \gamma - i_q V_k \\ Q_{mk} &= -brV_kV_m \cos(\gamma + \theta_k - \theta_m) \end{aligned} \tag{7}$$

O modelo dinâmico do UPFC é de 3º ordem, conforme nos mostra a Figura 5. Observe-se que o controlador POD pode ser usado para modular qualquer variável do UPFC (v_p , v_q , i_q). O conjunto das equações diferenciais é:

$$\begin{aligned} \dot{v}_p &= \frac{1}{T_r} \left(v_{p0} + u_1 V_{POD} - v_p \right) \\ \dot{v}_q &= \frac{1}{T_r} \left(v_{q0} + u_2 V_{POD} - v_q \right) \\ \dot{i}_q &= \frac{1}{T_r} \left[K_r \left(V_{ref} + u_3 V_{POD} - V_k \right) - i_q \right] \end{aligned} \quad (8)$$

onde u_1 , u_2 e u_3 em “1” corresponde ao sinal de habilitação de estabilização POD, “0” caso contrário.

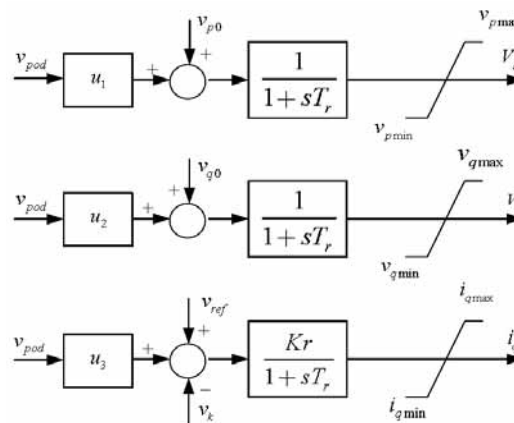


Figura 5. Diagrama do sistema de controle do UPFC

Variáveis de estado do UPFC

v_p : Representa a componente da tensão série V_s que está em fase com a corrente de linha. Em estado estacionário, a entrada v_{p0} está definida em zero, para que a troca de potência ativa entre o UPFC e o sistema só ocorra quando esta variável for modulada pelo controlador POD, ou seja, durante um transitório.

v_q : Esta variável representa a componente de tensão série V_s que está em quadratura com a linha. A entrada v_{q0} determina o valor da variável v_q no espaço de estado. Dois modos de controle podem ser implementadas para esta variável: Tensão constante e reatância constante.

i_q : Esta variável representa a componente I_{Sh} que esta em quadratura com a tensão do barramento V_k . Essa corrente mantém a tensão do barramento em torno de um nível especificado através do regulador ganhar K_r .

4. Controlador POD

Os controladores POD são dispositivos suplementares projetados para produzir torque amortecimento no eixo do gerador. O sinal de saída do POD pode ser usado no SSSC e no UPFC, modulando qualquer um dos parâmetros (V_p , V_q e I_q) durante os transitórios eletromecânicos, obtendo-se o torque de amortecimento desejado. A estrutura do POD é composta basicamente por um ganho estabilizante, um filtro passa alta, e por um circuito compensador de fase. O filtro garante que o controlador atue somente diante do transitório.

O compensador de fase fornece ao sinal de entrada a característica de fase (avanço/atraso) necessária, e o ganho determina a quantidade de amortecimento introduzida no sistema. A Figura 6 exhibe o diagrama de controle do POD, conforme apresentado por Ayres (2005).

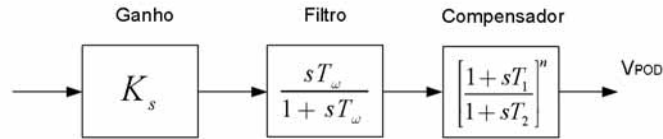


Figura 6. Diagrama de controle do POD

Projeto do Controlador POD

Assim como no caso do PSS, várias técnicas de controle moderno, mostradas na literatura, estão sendo aplicadas em projetos de controladores POD. No entanto, o avanço da teoria de controle observado nos últimos anos não foi acompanhado no campo de tal aplicação, e assim, o uso de técnicas de controle clássico ainda predomina nos projetos de controladores nos sistemas de potência atuais. As técnicas mais comumente utilizadas no projeto de controladores POD são baseadas em métodos de resposta em frequência e na sensibilidade dos autovalores. Basicamente, o projeto de um controlador para amortecimento de oscilações envolve dois passos:

1. Cálculo da fase a ser compensada pelo estabilizador;
2. Determinação do valor do ganho estabilizante K_s .

Os blocos de compensação de fase do controlador POD são projetados de acordo com as seguintes equações:

$$\alpha = \frac{(1 - \text{sen}(\varphi/n))}{(1 + \text{sen}(\varphi/n))} \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_n \sqrt{\alpha}} \quad \text{e} \quad T_1 = \alpha T_2 \quad (10)$$

Sendo φ a fase a ser compensada, ω_n a frequência do modo a ser amortecido, e n é o número de blocos do compensador de fase. O ganho do POD é escolhido de modo a atender a taxa de amortecimento requerida para o modo considerado, conforme Ayres et al. (2010).

A escolha de um sinal de entrada adequado no projeto de um estabilizador efetivo e robusto é um aspecto de fundamental importância que deve ser levado em conta. Para conseguir um amortecimento adequado, o sinal de realimentação do controlador deve observar o modo de oscilação a ser amortecido. De preferência esse sinal deve estar disponível localmente, ou que possa de alguma forma ser sintetizado a partir de medidas locais.

A utilização de sinais locais elimina a necessidade do uso de canais de telecomunicação, reduzindo atrasos de resposta, aumentando a confiabilidade e diminuindo os custos de implementação do controlador. Sinais na linha de transmissão, tais como potência ativa, potência reativa, magnitude da corrente ou a magnitude das tensões nas barras são candidatos a serem considerados na escolha do sinal de entrada de um controlador POD. Dentre essas possibilidades, a potência ativa e a corrente na linha são os sinais mais abordados na literatura.

É importante ressaltar que os parâmetros do controlador POD de um mesmo dispositivo FACTS serão diferentes para diferentes sinais de entrada.

5. Simulações, Análises e Resultados

5.1. Sistema Máquina-Barra Infinita (SMBI)

O sistema em estudo, representado pela Figura 7, é formado por uma estação de geração termelétrica composta de quatro 555 MVA, 24 kV, 60 Hz unidades geradoras conectadas a uma barra infinita através de um transformador-elevador seguido por duas linhas de

transmissão em paralelo, conforme apresentado em Kundur (1994). Os quatro geradores da usina são representados por um gerador de modelo equivalente de um eixo equipado com um regulador automático de tensão. O ponto de operação corresponde a uma condição de carga pesada em que os geradores entregam 1998 MW para o barramento infinito. O UPFC encontra-se conectado nesse sistema, fornecendo uma compensação série-reativa da linha #2 e regula a tensão na barra #2.

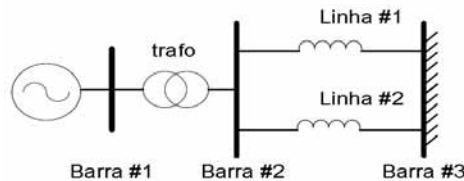


Figura 7. Diagrama unifilar do sistema máquina-barramento infinito

Análise Paramétrica

As análises paramétricas têm como objetivo mostrar o comportamento do sistema quando submetido a variações de alguns de seus parâmetros, assim como os do UPFC. Os principais parâmetros do UPFC, como o grau de compensação série (C_p) e o ganho do regulador de tensão (K_r) são analisados mostrando a influência no comportamento do modo eletromecânico do sistema.

Grau de Compensação Série (C_p)

O grau de compensação série é definido como o percentual da reatância indutiva da linha de transmissão a ser compensada. Desta forma, variando esse parâmetro podemos analisar seu impacto no comportamento do modo eletromecânico quanto ao seu amortecimento. C_p é variado de 10% a 90%. Conforme o grau de compensação é aumentado, uma melhora no amortecimento do sistema é observada. Verifica-se que quanto maior a compensação série da linha de transmissão, maior é a tensão série injetada pelo conversor.

Ganho do Regulador de tensão do UPFC (K_r)

Uma das principais funções do conversor em paralelo é fazer a regulação automática de tensão através de um controlador de ganho estático K_r . A variação do ganho K_r é de 10 a 100. Verificou-se que o aumento deste ganho acarreta em uma melhora no amortecimento do sistema.

Análise dos Autovalores

A Tabela 1 mostra os autovalores associados ao modo eletromecânico para a configuração desse sistema. É verificado que com o controlador UPFC, o sistema é estável, porém, o modo eletromecânico é mal amortecido ($\zeta < 5\%$).

Tabela 1 – Característica do modo eletromecânico

Sistema	Autovalores (λ)	Frequência (ω_n)	Amortecimento (ζ)
SMBI com UPFC	- 0.16 ± 8.041	1.28 Hz	2%

O amortecimento efetivo do modo eletromecânico pode ser conseguido pela adição de um ESP no sistema de excitação do gerador ou através da introdução de um controlador POD na malha de controle do UPFC. Neste caso, somente a segunda alternativa será considerada neste trabalho.

Projeto do Controlador POD

Como sinal de entrada, a corrente através ($I_{2.1}$) do transformador, foi escolhida como sinal estabilizador. Na fig. 8 é mostrado o diagrama de blocos que descreve a dinâmica do sistema com o UPFC-POD.

Para que o UPFC apresente 20% de amortecimento do modo eletromecânico, definiu-se o parâmetro $T_\omega = 3s$, sendo que o ganho K_ω é escolhido de modo a atender a taxa de amortecimento requerida para o modo considerado, conforme Ayres et al. (2010) e Castro e Costa (2007).

Com o UPFC, o sistema em malha aberta não possui polos instáveis (Tabela 1). O diagrama de Nyquist da função de transferência de malha aberta é mostrado na Figura 9(a). A fase a ser compensada é calculada de forma que o gráfico polar fique o mais distante possível do ponto de instabilidade $(-1, j0)$. Assim, o ponto de frequência crítica é realocado para o eixo real através de φ graus, obtendo assim, a função de transferência compensada mostrada na Figura 9(b).

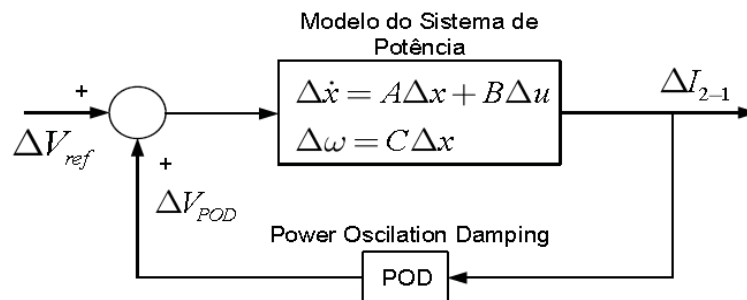


Figura 8. Diagrama do controlador POD do UPFC adicionado ao sistema

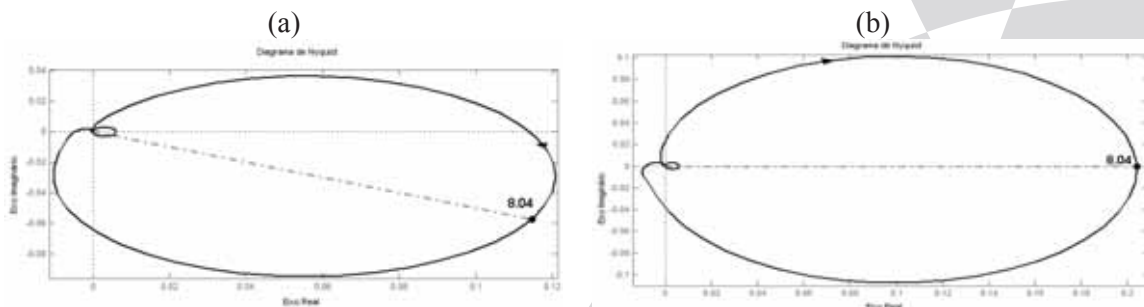


Figura 9. Diagramas de Nyquist: (a) $\Delta I_{2-1}(s)/\Delta V_{POD}(s)$
(b) $(\Delta I_{2-1}(s)/\Delta V_{POD}(s)).POD$

A tabela 2 fornece os parâmetros dos controlados POD projetados para o SMBI.

Tabela 2 – Parâmetros dos controladores POD derivativos de ΔI_{2-1}

Controlador POD	K_w (p.u/p.u.)	$T1$ (s)	$T2$ (s)
POD - V_p	-37	0.1569	0.0985
POD - V_q	-6	0.1569	0.0985
POD - I_q	0.4	0.1569	0.0985

Avaliação do desempenho dos controladores POD

Aplicando um degrau de 10% na potência mecânica da máquina, verifica-se a eficácia dos controladores POD, onde as oscilações são amortecidas em torno de 5,0s.

A Figura 10 apresenta os gráficos do desvio de velocidade do rotor para as configurações com UPFC, UPFC com POD- V_p , UPFC com POD- V_q , e UPFC com POD- I_q . Pode-se observar que sem o uso do POD, as oscilações são fracamente amortecidas. Por outro lado, os três controladores derivados do sinal da corrente amortecem as oscilações de forma bastante satisfatória.

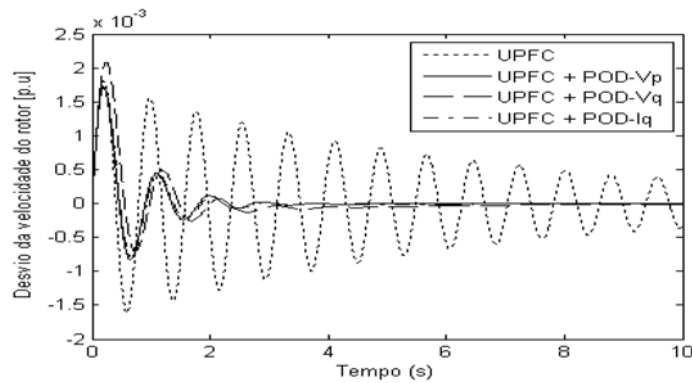


Fig. 10. Resposta ao degrau de 10% na “Pm” para o Sistema com UPFC, UPFC com POD-Vp, UPFC com POD-Vq e UPFC com POD-Iq

Análise dos Autovalores do SMBI

Através da análise dos autovalores do SMBI, Figura 13, também é possível avaliar o desempenho do controlador POD. Os modos pouco amortecidos da Figura 11(a) são afastados do eixo imaginário quando o UPFC encontra-se equipado com o controlador POD, proporcionando um aumento no amortecimento desses modos, como mostrado na Figura 11(b).

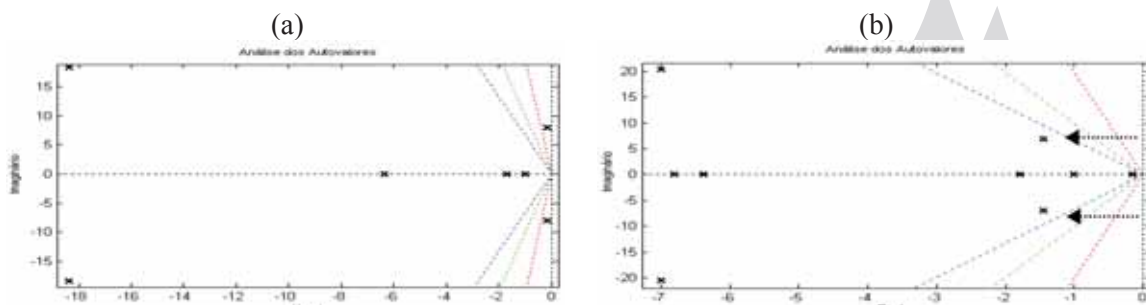


Fig. 11. Análise dos autovalores do SMBI (a) sem estabilizadores (b) com estabilizador suplementar POD

5.2. Sistema Multi-máquinas (SMM)

O sistema multi-máquinas em estudo, apresentado em Kundur (1994), é bastante indicado para o estudo de oscilações de modo local e, principalmente, de modo inter-área. Esse sistema consiste de duas áreas conectadas por uma linha de intercâmbio fraca. Cada área consiste de duas unidades de geração. O sistema multi-máquinas, representado na Figura 12.

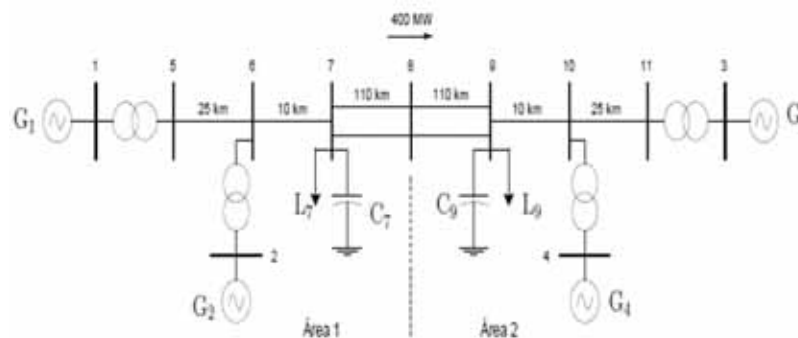


Fig. 12. Sistema duas-áreas

Esse sistema apresenta três modos eletromecânicos, sendo dois modos locais e um modo inter-área (Tabela 3).

Análise dos Autovalores

A Tabela 3 fornece as características desses três modos eletromecânicos. Os modos locais apresentam um bom amortecimento ($\zeta > 10\%$), entretanto o modo interárea possui um baixo amortecimento. A instalação de ESP nos geradores ou a instalação de dispositivos FACTS equipados com controladores POD na linha de interligação das duas áreas (linha 7-9) podem melhorar o amortecimento do sistema. Somente a segunda alternativa será considerada neste trabalho, sendo o SSSC, em modo tensão constante, equipado com POD.

Tabela 3 – Característica do modo eletromecânico

Sistema	Autovalores (λ)	Frequência (ω_n)	Amortecimento (ζ)
Local 1	$-0.90 \pm j6.95$	1.11	12%
Local 2	$-0.99 \pm j7.18$	1.15	13%
Interárea	$-0.22 \pm j3.83$	0.61	5%

Projeto do controlador POD

Para o projeto do controlador POD do sistema duas áreas considerou-se como sinal de entrada para o controlador, o fluxo de corrente da linha entre as barras 7 e 8 (ΔI_{7-8}), mesma consideração que Ayres (2005). A fim de que o SSSC apresente 10% de amortecimento do modo eletromecânico, definiu-se o parâmetro $T_w = 0.8s$, sendo que o ganho K_w é escolhido de modo a atender a taxa de amortecimento requerida para o modo considerado, Ayres et al. (2010) e Castro e Costa (2007).

Com o SSSC, o sistema em malha aberta não possui pólos instáveis. O diagrama de Nyquist da função de transferência de malha aberta é mostrado na Figura 13(a). A fase a ser compensada é calculada de forma que o gráfico polar fique o mais distante possível do ponto de instabilidade $(-1, j0)$. Assim, o ponto de frequência crítica é realocado para o eixo real através de um atraso de ϕ graus, obtendo assim, a função de transferência compensada mostrada na Figura 13(b).

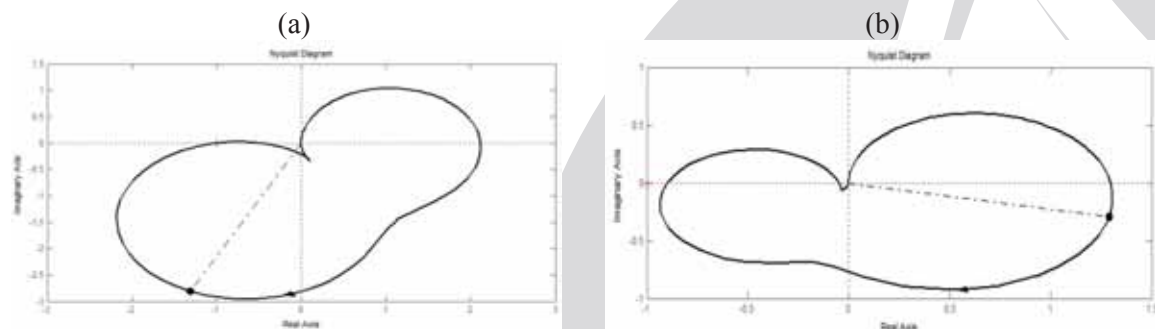


Fig. 13. Diagramas de Nyquist: (a) $\Delta I_{7-8}(s)/\Delta V_{POD}(s)$, (b) $(\Delta I_{7-8}(s)/\Delta V_{POD}(s)).POD$

A tabela 4 fornece os parâmetros do controlador POD para o SMM.

Tabela 4 – Característica do modo eletromecânico

Controlador POD	K_w (p.u./p.u.)	T_1 (s)	T_2 (s)
POD	-0.7	0.1660	0.3772

Avaliação da eficácia do controlador POD

A eficácia do controlador POD é verificada, como mostra a Figura 14, aplicando-se um degrau de 5% na referência de tensão AVR da máquina #1. As oscilações do sistema são bem amortecidas se o controlador POD for incluído.

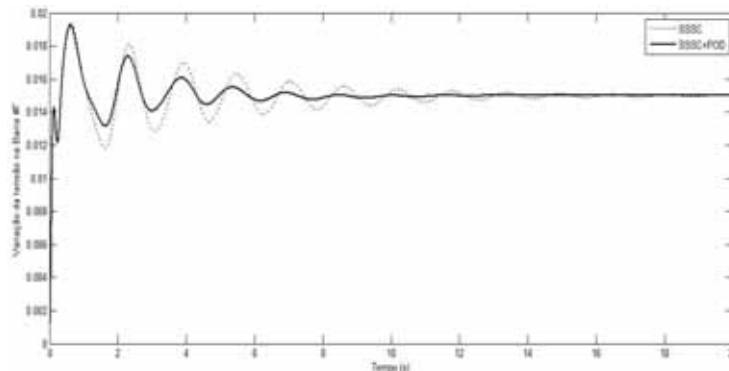


Figura 14. Tensão da barra #7 após um degrau de 5% na referência do regulador de tensão da máquina #1 sem POD e com POD

Embora o procedimento proposto seja realizado por um sistema linear, é uma prática verificar a robustez do POD pelo meio de um estudo de estabilidade transitória. A Figura 15(a) retrata a trajetória do ângulo do rotor da máquina #1 com uma falta na Barra #8. A falta consiste em um curto-circuito trifásico que ocorre em $t = 0$ s e eliminado em 50ms com abertura da linha #6. Mesmo após esta perturbação grave, o POD melhora o amortecimento das oscilações inter-área, cujo resultado pode ser verificado na Figura 15(b).

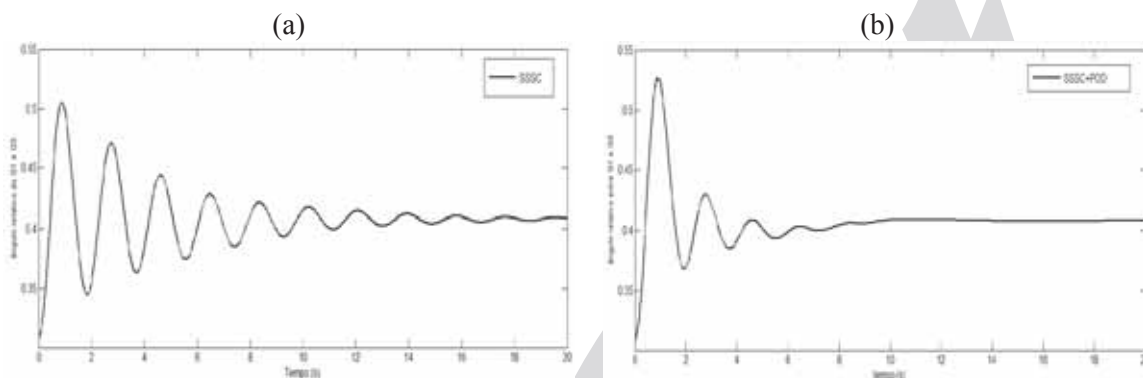


Fig. 15. Ângulo relativo entre os geradores G1e G3 (a) sem POD e (b) com POD

Análise dos Autovalores do SMM

Através da análise dos autovalores do SMM, mostrado na Figura 16, é possível avaliar o desempenho do controlador. Os modos locais sofrem pouca influência do dispositivo SSSC-POD, entretanto o modo inter-área, pouco amortecido, é afastado do eixo imaginário melhorando o amortecimento deste modo crítico Figura16(b).

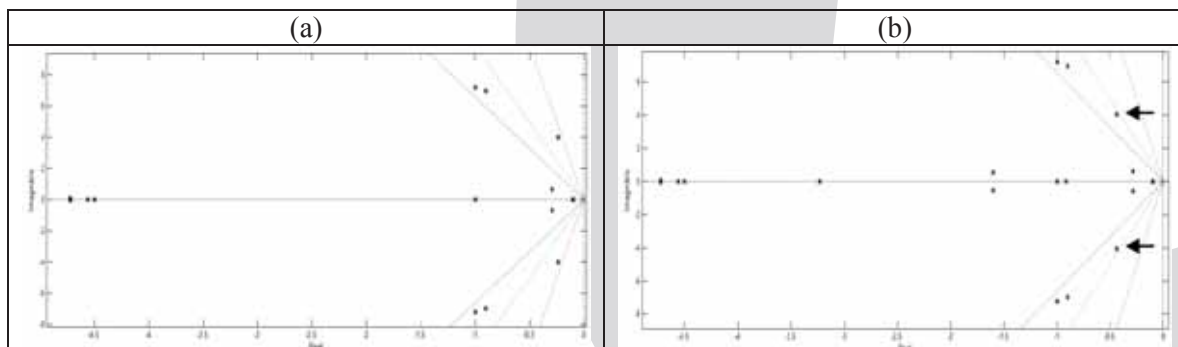


Figura 16. Análise dos Autovalores do SMM (a) sem estabilizadores (b) com SSSC-POD

6. Conclusões

Neste trabalho foram realizados estudos avaliando o desempenho dos controladores SSSC e UPFC para o amortecimento de oscilações eletromecânicas sob condições de pequenas e grandes perturbações. A análise da estabilidade e o projeto dos estabilizadores foram baseados na análise modal e simulações no domínio do tempo, assim como em técnicas de resposta em frequência utilizando o critério de Nyquist. Diversas simulações e análises foram realizadas considerando dois sistemas teste largamente utilizados na literatura em estudos de estabilidade angular. Os resultados mostraram que o SSSC e o UPFC possuem grande potencial para a manutenção da estabilidade angular de sistemas de potência quando equipado com controladores POD.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Centrais Elétrica do Norte do Brasil pelo suporte técnico, financeiro e científico ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Desenvolvimento Controle Vetorial aplicado a geradores síncronos da UHE Tucuruí visando a melhoria da estabilidade transitória do sistema elétrico”.

Referências

- Ayres, H. M.**, Aplicação do Controlador UPFC para o Amortecimento das Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 2005.
- Ayres, H. M., Kopcak I., Castro M. S., Milano F., e Costa V. F.** (2010), A Didactic Procedure for Designing Power Oscillation Dampers of FACTS Devices, *SIMPAT - Simulation Modelling Practice and Theory - Elsevier*, Vol. 18, Issue 6, pp. 896-909.
- Cai, L.J., C. e Erlich, I.** (2005), Simultaneous coordinated tuning of pss and facts damping controllers in large power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, Issue 1, pp. 294-300.
- Castro, M. S. e Costa V. F.** (2007), A influência de controladores FACTS na estabilidade de ângulo a pequenas perturbações de Sistemas elétricos de Potência, *Revista Controle e Automação*, Vol. 18, Issue 3.
- Chang, Y., Xu Z., Cheng G. e Xie J.** (2006), A novel SVC supplementary controller based on wide area signals, *Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-7.
- Jiang, X.**, Operating Modes and Their Regulations of Voltage-Sourced Converter based FACTS Controllers, Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Graduate Faculty, 2007.
- Kimbark E. W.**, *Power System Stability*. Wiley & Sons, New York, 1956.
- Kundur, P.**, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- Milano F.**, PSAT, Matlab-based power system analysis toolbox, www.uclm.es/area/gsee/web/Federico, 2012.
- Pellanda, P., Savelli, D. C., Macedo, N. J. P., Martins, N. e Luz, G. S.** (2006), Síntese de sinais e escolha de estrutura dos estabilizadores dos tesc da interligação norte-sul considerando robustez a perturbações externas, *SEPOPE*, 10, pp. 1-8.
- Wang, H. F.** (1999), Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and applications, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 146, Issue 5, pp. 521-527.