

Atuação do FACTS SSSC Modelado por Injeções de Corrente no Sistema Elétrico de Potência

Luís Fabiano Barone Martins
Depto. de Eletromecânica
Instituto Federal do Paraná
Jacarezinho, PR 86400 – 000
luis.martins@ifpr.edu.br

Elenilson de Vargas Fortes
Depto. de Áreas Acadêmicas
Instituto Federal Goiás
Jataí, GO 75804 – 000
elenilson.fortes@ifg.edu.br

Percival Bueno de Araujo
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual Paulista
Ilha Solteira, SP 15385 – 000
percival@dee.feis.unesp.br

Bruno Rafael Gamino
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual Paulista
Ilha Solteira, SP 15385 – 000
gaminobr@gmail.com

Resumo—O objetivo principal deste trabalho é analisar a influência do dispositivo Compensador Série Síncrono Estático (SSSC) no amortecimento das oscilações eletromecânicas de um sistema elétrico de potência (SEP) quando submetido a pequenas perturbações. Para tanto, o SSSC é modelado por injeção de corrente e suas equações são linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio. Estas equações são então incorporadas ao Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC). Também é realizada uma análise estática do SSSC no SEP. Por meio do controle de fluxos de potência ativa e potência reativa o SSSC tem sua atuação investigada no que se refere ao melhoramento do perfil de tensão na barra inicial de sua instalação. Todas as análises são realizadas utilizando um programa computacional desenvolvido no ambiente *MATLAB*®.

Palavras chave— Compensador Série Síncrono Estático, Modelo de Sensibilidade de Corrente, *Power Oscillation Damping*, Enxame de Partículas.

I. INTRODUÇÃO

Oscilações eletromecânicas entre geradores síncronos interligados são fenômenos inerentes aos SEPs, sendo uma das vertentes de estudo na operação e no planejamento. O amortecimento dessas oscilações propicia um SEP mais confiável e seguro e garante a sua estabilidade.

A estabilidade de um SEP está relacionada com a sua capacidade de permanecer em equilíbrio em condições normais de operação e, quando submetidos a perturbações, deve encontrar um novo ponto de equilíbrio que satisfaçam as restrições de operação. Estas perturbações podem ser de pequena ou de grande magnitude [1]. Nesse trabalho é enfatizado o estudo da estabilidade a pequenas perturbações.

Atualmente os SEPs são interligados e caracterizados por longas linhas de transmissão. Este fato, aliado ao alto carregamento e à atuação de reguladores automáticos de tensão de ação contínua, faz com que surjam oscilações de baixa frequência, fracamente amortecidas ou até mesmo instáveis. As oscilações existentes em uma mesma área (loais – 0,8 a 1,8 Hz) e entre diferentes áreas (interárea – 0,2 a 0,8 Hz) [2] e podem comprometer a estabilidade do SEP devendo, portanto, buscar meios de amortecê-las. Os dispositivos FACTS (e em particular o SSSC), graças à capacidade de melhorar a controlabilidade, a segurança, a estabilidade e a flexibilidade dos SEPs em que estão instalados são uma solução paliativa para este problema [3][4].

A família dos FACTS inclui, entre outros, o Compensador Estático (STATCOM), o Compensador Série Síncrono

Estático (SSSC) e o Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC) [4]–[6]. Estes FACTS são baseados na tecnologia conversor fonte de tensão (em inglês *Voltage Source Converters* –VSC) e possuem a capacidade de fornecer potência reativa ao SEP. Com isto é possível o controle de fluxos de potência, o que torna o SEP mais flexível.

De maneira geral os FACTS não são capazes de introduzir amortecimento adicional suficiente às oscilações para que o SEP possa operar dentro de uma faixa segura. Contudo, se a estes dispositivos forem adicionados controladores do tipo *Power Oscillation Damping* (POD), o conjunto FACTS-POD será capaz de inserir amortecimento suplementar às oscilações do SEP, em especial às do tipo interárea [2]–[11].

Para que o conjunto SSSC-POD desempenhe satisfatoriamente o papel de inserir amortecimento ao modo oscilatório interárea, o correto ajuste de seus parâmetros é de grande importância, sendo comum na literatura a utilização de métodos clássicos. Como alternativa a estas técnicas, os métodos estocásticos têm sido empregados com êxito para o ajuste destes parâmetros [8]–[13]. Para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares já foram utilizados o método *Bacterial Foraging Optimization* (BFO) [12] em [8] e [11] e o Enxame de Partículas (PSO) [13] em [9] e [10]. Neste trabalho será utilizado o método PSO para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros de um controlador POD acoplado ao SSSC para introduzir amortecimento às oscilações do tipo interárea de um SEP teste.

O modelo linear que será utilizado para representar o SEP é baseado no balanço nodal de correntes em cada barra do sistema elétrico e é conhecido como Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) [14]. Em vista disso é proposto um modelo para o SSSC também linear e baseado em injeção de corrente. Este modelo poderá ser utilizado tanto em análises estáticas quanto dinâmicas no SEP.

Neste contexto, as principais contribuições deste trabalho são: 1) Representar o SEP por meio de um modelo linear baseado em resíduos de corrente na forma polar; 2) Modelar o dispositivo SSSC por injeções de corrente nas barras onde está instalado e inseri-lo ao modelo do SEP; 3) Realizar análises estáticas e dinâmicas utilizando o modelo apresentado; 4) Utilizar o PSO como ferramenta de ajuste dos parâmetros do controlador POD.

A validação da metodologia proposta foi realizada por meio de simulações utilizando o programa *MATLAB*® em um

sistema teste simétrico de 10 barras e 2 áreas.

II. COMPENSADOR SÉRIE SÍNCRONO ESTÁTICO (SSSC)

A. Modelo de Injeção de Correntes do SSSC

O controlador SSSC é composto por um conversor VSC conectado a uma fonte de energia opcional através de uma ligação em CC com um capacitor. Sua ligação à linha de transmissão se dá por meio de um transformador de acoplamento, como mostrado na Figura 1.

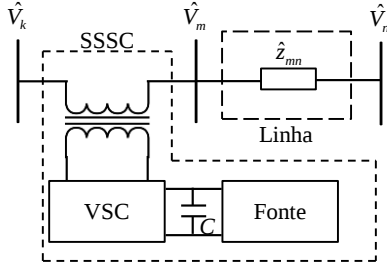


Figura 1. Diagrama esquemático do SSSC.

O dispositivo SSSC é representado por uma fonte de tensão série ($\hat{V}_s$) com a susceptância do transformador de acoplamento (jb_{km}), conforme o circuito equivalente ilustrado na Figura 2.

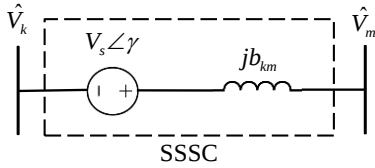


Figura 2. Circuito equivalente do SSSC entre as barras k e m .

Na prática, a tensão $\hat{V}_s$ pode ser ajustada de modo a controlar o fluxo de potência na linha de transmissão $k - m$. O ângulo de fase da fonte de tensão $\hat{V}_s$ é representado em função de suas componentes em fase V_q e em quadratura V_p [15] como em (1).

$$\gamma = \arctan(V_p/V_q) \quad (1)$$

A partir do circuito equivalente do SSSC são obtidas as equações (2)–(5), que determinam as injeções de corrente efetuadas pelo dispositivo instalado entre as barras k e m .

$$I_{rk}^{SSSC} = (V_p \cdot \cos \theta_k + V_q \cdot \sin \theta_k) \cdot b_{km} \quad (2)$$

$$I_{ik}^{SSSC} = (V_p \cdot \sin \theta_k - V_q \cdot \cos \theta_k) \cdot b_{km} \quad (3)$$

$$I_{rm}^{SSSC} = -(V_p \cdot \cos \theta_k + V_q \cdot \sin \theta_k) \cdot b_{km} \quad (4)$$

$$I_{im}^{SSSC} = -(V_p \cdot \sin \theta_k - V_q \cdot \cos \theta_k) \cdot b_{km} \quad (5)$$

As equações (2)–(5) são representadas na Figura 3, definindo um modelo de injeção de corrente para o SSSC nas barras comuns à sua instalação (k e m).

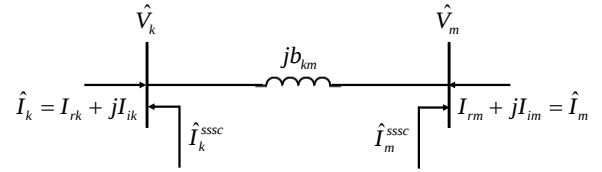


Figura 3. Modelo de injeção de corrente do SSSC.

B. Configuração do Sistema de Controle do SSSC

Para realizar o controle dos fluxos de potência pelo SSSC (Figura 4) nas barras comuns à sua instalação são utilizados controladores do tipo Proporcional-Integral (PI).

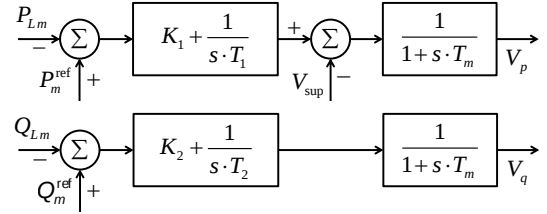


Figura 4. Estrutura do sistema de controle do SSSC.

A partir da Figura 4 verifica-se que os controladores PI são responsáveis por modular as variáveis de controle da fonte de tensão síncrona. Além disso, a constante de tempo T_m é o atraso inerente do dispositivo de controle e encontra-se no intervalo entre 1 e 10 ms [4]. Os parâmetros dos controladores PI são os ganhos K_1 e K_2 , e as constantes de tempo T_1 e T_2 . O sinal suplementar do POD é V_{sup} .

O comportamento dinâmico da estrutura de controle mostrada na Figura 4 é dado pelo conjunto de equações (6), obtidas por inspeção.

$$\begin{aligned} \dot{V}_p &= \frac{K_1}{T_m} \cdot (P_m^{ref} - P_{Lm}) + \frac{1}{T_m} \cdot (X_1 - V_p + V_{sup}) & \dot{X}_1 &= \frac{K_1}{T_1} \cdot (P_m^{ref} - P_{Lm}) \\ \dot{V}_q &= \frac{K_2}{T_m} \cdot (Q_m^{ref} - Q_{Lm}) + \frac{1}{T_m} \cdot (X_2 - V_q) & \dot{X}_2 &= \frac{K_2}{T_2} \cdot (Q_m^{ref} - Q_{Lm}) \end{aligned} \quad (6)$$

Em (6) as grandezas P_{Lm} , Q_{Lm} , P_m^{ref} e Q_m^{ref} são, respectivamente, os controles e os valores especificados dos fluxos de potência ativa e reativa na linha $k - m$.

III. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A. Formulação Inicial

O resíduo da corrente injetada na barra k , $\Delta \hat{I}_k$, é determinado a partir do balanço de correntes ilustrado na Figura 5 e equacionado conforme (7).

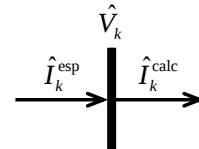


Figura 5. Balanço de correntes na barra k .

$$\Delta \hat{I}_k = \hat{I}_k^{esp} - \hat{I}_k^{calc} = \underbrace{\frac{P_k^{esp} - jQ_k^{esp}}{\hat{V}_k}}_{\hat{I}_k^{esp}} - \sum_{m \in \Omega_k} \underbrace{\hat{I}_m^{calc}}_{\hat{I}_k^{calc}} = 0 \quad (7)$$

Em (7) as variáveis $\hat{I}_k^{esp}$ e $\hat{I}_k^{calc}$ representam os fasores das correntes especificada e calculada. P_k^{esp} e Q_k^{esp} são as potências ativa e reativa especificadas. O fasor tensão da barra k é $\hat{V}_k$ conforme definido por (8). A corrente que circula entre as barras k e m é representado por $\hat{I}_{km}$ e mostrado em (9). As variáveis V_k e θ_k em (8) correspondem, nesta ordem, à magnitude e ângulo da tensão na barra k .

$$\hat{V}_k = V_k [\cos \theta_k + j \sin \theta_k] \quad (8)$$

$$\sum_{m \in \Omega_k} \hat{I}_{km} = \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} + jB_{km}) (\cos \theta_m + j \sin \theta_m) = \hat{I}_k^{calc} \quad (9)$$

Em (9) a condutância e a susceptância entre as barras k e m são G_{km} e B_{km} , respectivamente. O conjunto de todas as barras vizinhas à barra k é denotado por Ω_k . A união do conjunto Ω_k com a própria barra k é chamada de κ .

Substituindo (8) e (9) em (7) e separando em parte real (ΔI_{rk}) e parte imaginária (ΔI_{ik}) obtêm-se as componentes dos resíduos de corrente na barra k definidos em (10) e (11).

$$\Delta I_{rk} = \frac{1}{V_k} (P_k^{esp} \cos \theta_k + Q_k^{esp} \sin \theta_k) - \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \cos \theta_m - B_{km} \sin \theta_m) = 0 \quad (10)$$

$$\Delta I_{ik} = \frac{1}{V_k} (P_k^{esp} \sin \theta_k - Q_k^{esp} \cos \theta_k) - \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \sin \theta_m + B_{km} \cos \theta_m) = 0 \quad (11)$$

Aplicando o método de Newton-Raphson em (10) e (11) é obtida a formulação matricial (12) que é o sistema linearizado utilizado para determinar as variáveis algébricas do fluxo de carga.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{rk} \\ \Delta I_{rm} \\ \Delta I_{ik} \\ \Delta I_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rk}}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{rm}}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{ik}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{ik}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{ik}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{ik}}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta I_{im}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta I_{im}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \Delta I_{im}}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta I_{im}}{\partial V_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

B. Equações dos Resíduos de Correntes

Os resíduos de potências, ativa (ΔP_k) e reativa (ΔQ_k) na barra k são definidos em (13).

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k^{calc} \quad \Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{calc} \quad (13)$$

Na equação (13), as potências calculadas, ativa (P_k^{calc}) e reativa (Q_k^{calc}), são definidas como em (14) e (15).

$$P_k^{calc} = V_k [I_{rk}^{calc} \cos \theta_k + I_{ik}^{calc} \sin \theta_k] \quad (14)$$

$$Q_k^{calc} = V_k [I_{rk}^{calc} \sin \theta_k - I_{ik}^{calc} \cos \theta_k] \quad (15)$$

A partir de (13)–(15), os resíduos de correntes definidos em (10) e (11) podem ser escritos em função dos resíduos de potências, ativa e reativa conforme (16) e (17) e, consequentemente, substituídos em (12).

$$\Delta I_{rk} = \frac{\Delta P_k \cdot \cos \theta_k + \Delta Q_k \cdot \sin \theta_k}{V_k} = 0 \quad (16)$$

$$\Delta I_{ik} = \frac{\Delta P_k \cdot \sin \theta_k - \Delta Q_k \cdot \cos \theta_k}{V_k} = 0 \quad (17)$$

C. Inclusão do SSSC no Fluxo de Potência Modelado por Injeções de Correntes

Para a inclusão do SSSC no algoritmo de Newton-Raphson todos os balanços das componentes real e imaginária das correntes nas barras devem ser atendidos conforme (18).

$$\Delta I_{rl} = I_{rl}^{esp} - I_{rl}^{calc} + I_{rl}^{sssc} = 0 \quad \Delta I_{il} = I_{il}^{esp} - I_{il}^{calc} + I_{il}^{sssc} = 0 \quad (18)$$

Em (18) as componentes, real e imaginária das correntes injetadas nas barras k e m pelo SSSC são I_{rl}^{sssc} e I_{il}^{sssc} , respectivamente e $l = \{k, m\}$.

Como na estrutura do SSSC existe uma fonte de tensão ajustável em fase e magnitude, é possível controlar os fluxos de potência ativa e/ou reativa na linha de transmissão onde se encontra instalado. Os fluxos controlados pelo dispositivo SSSC (P_{Lm} e Q_{Lm}) podem ser obtidos a partir da Figura 6, realizando o balanço nodal de potências na barra m do SEP, como mostrado em (19).

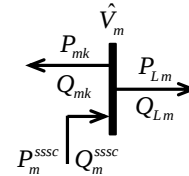


Figura 6. Balanço dos fluxos na barra final de instalação do SSSC.

$$0 = P_{Lm} - P_m^{sssc} + P_{mk} \quad 0 = Q_{Lm} - Q_m^{sssc} + Q_{mk} \quad (19)$$

Em (19) as potências ativa e reativa injetadas pelo dispositivo são P_m^{sssc} e Q_m^{sssc} . Os fluxos de potências ativa e reativa da barra m para a barra k são denotados por P_{mk} e Q_{mk} .

Utilizando a técnica do fluxo de carga expandido proposto em [16], as equações exibidas em (6) são incluídas no algoritmo de Newton-Raphson baseado na Lei de Kirchhoff para correntes (formulação (12)). Esta ferramenta parte do princípio de que as variáveis de estado em (6) tornam-se constantes em relação ao tempo, reduzindo-se a equações algébricas para determinado ponto de equilíbrio. Com isso, a solução do problema passa a ser a determinação dos zeros de uma série de equações não lineares, que pode ser feita por meio de um algoritmo de fluxo de potência, que neste trabalho é modelado usando a lei de Kirchhoff para correntes nas barras.

A equação matricial dos balanços de corrente do fluxo de potência, onde as equações dinâmicas do SSSC estão incluídas com as equações algébricas que representam o sistema elétrico, pode ser observada em (20).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta \dot{V}_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_{rk} \\ \Delta I_{rm} \\ \Delta I_{rk} \\ \Delta I_{rm} \\ \Delta \dot{V}_p \\ \Delta \dot{V}_q \\ \Delta I_{rk} \\ \Delta I_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1}^{SSSC} & \mathbf{J2}^{SSSC} \\ \mathbf{J3}^{SSSC} & \mathbf{J4}^{SSSC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_{rk} \\ \Delta I_{rm} \\ \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta I_{rk} \\ \Delta I_{rm} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A matriz jacobiana apresentada em (20) é dividida em quatro blocos. O bloco $\mathbf{J4}^{SSSC}$ tem sua construção muito parecida com a da jacobiana do fluxo de potência apresentada em (12). O diferencial está nos elementos marcados com o sinal (*) onde são somadas as parcelas referentes às derivadas das correntes injetadas pelo SSSC nas componentes real e imaginária.

D. Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC)

O MSC é uma ferramenta de análise linear para SEPs, fundamentada na Lei de Kirchhoff para correntes, que deve ser atendida mesmo quando o sistema é perturbado [14]. Sua modelagem para sistemas multimáquinas composto por ng geradores e nb barras é mostrada em (21)–(24). Nesta formulação $\Delta \mathbf{x}$ representa as variáveis de estado (velocidade angular ($\Delta \omega$), ângulo interno do rotor ($\Delta \delta$), a tensão interna em quadratura ($\Delta E'_q$) e a tensão de campo do gerador (ΔE_{fd})), $\Delta \mathbf{u}$ são as variáveis de entrada (potência mecânica (ΔP^{mec}) e a tensão de referência do regulador automático de tensão (ΔV^{ref})) e $\Delta \mathbf{y}$ as variáveis algébricas (magnitude (ΔV) e fase ($\Delta \theta$) da tensão nas barras do SEP).

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 & \Delta \delta_1 & \Delta E'_{q1} & \Delta E_{fd1} & \dots & \Delta \omega_{ng} & \Delta \delta_{ng} & \Delta E'_{qng} & \Delta E_{fdng} \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

$$\Delta \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta P_1^{mec} & \Delta V_1^{ref} & \Delta P_{L1} & \Delta Q_{L1} & \dots & \Delta P_{ng}^{mec} & \Delta V_{ng}^{ref} & \Delta P_{Lng} & \Delta Q_{Lng} \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 & \Delta V_1 & \dots & \Delta \theta_{nb} & \Delta V_{nb} \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1} & \mathbf{J2} \\ \mathbf{J3} & \mathbf{J4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B1} \\ \mathbf{B2} \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{u} \quad (24)$$

A representação na forma de espaço de estados é obtida eliminando $\Delta \mathbf{y}$ em (24), o que resulta em (25).

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{u} \quad (25)$$

Em (25) $\mathbf{A}$ é a matriz de estados e $\mathbf{B}$ é a matriz de coeficientes das entradas, conforme (26).

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{J1} - \mathbf{J2} \cdot \mathbf{J4}^{-1} \cdot \mathbf{J3} \\ \mathbf{B} &= \mathbf{B1} - \mathbf{J2} \cdot \mathbf{J4}^{-1} \cdot \mathbf{B2} \end{aligned} \quad (26)$$

E. Inclusão do SSSC no MSC

Visto que as características dinâmicas do SSSC já foram consideradas no fluxo de potência (formulação (20)), as

informações deste dispositivo já estão contidas em $\mathbf{J1}^{SSSC}$, $\mathbf{J2}^{SSSC}$, $\mathbf{J3}^{SSSC}$ e $\mathbf{J4}^{SSSC}$ que podem ser incluídas diretamente no MSC, conforme (27) e (28).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J1}^c & \mathbf{J2}^c \\ \mathbf{J3}^c & \mathbf{J4}^{SSSC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}^c \\ \Delta V_p \\ \Delta X_1 \\ \Delta V_q \\ \Delta X_2 \\ \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B1}^c & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B1}^{SSSC} \\ \mathbf{B2} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ \mathbf{P}_m^{ref} \\ \mathbf{C}_m^{ref} \\ \mathbf{C}_m^{ref} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}^c = \left[\mathbf{J1}^c - \mathbf{J2}^c \cdot (\mathbf{J4}^{SSSC})^{-1} \cdot \mathbf{J3}^c \right] \cdot \Delta \mathbf{x}^c + \left[\mathbf{B1}^c - \mathbf{J2}^c \cdot (\mathbf{J4}^{SSSC})^{-1} \cdot \mathbf{B2}^c \right] \cdot \Delta \mathbf{u}^c \quad (28)$$

F. Modelo Dinâmico do POD

O objetivo do controlador POD é inserir torque de amortecimento adicional aos modos de oscilação interárea de um SEP. A estrutura que será utilizada neste trabalho é mostrada na Figura 7 e é formada por um ganho estabilizante (K^P), um filtro *washout* (Tw), e por blocos de avanço/atraso de fase. Na literatura, as constantes de tempo usualmente são definidas como: $T_1^P = T_3^P$ e $T_2^P = T_4^P$ [7]–[11].

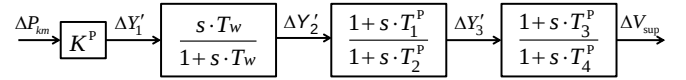


Figura 7. Estrutura do controlador POD.

O algoritmo PSO [13] será utilizado para a determinação dos parâmetros do POD e este ajuste deverá posicionar os autovalores relacionados aos modos interárea (λ_{is}), em uma região especificada do plano complexo. Neste trabalho foi adotada a função objetivo $Fo = \min \sum_{i=1}^{np} |\lambda_{is} - \lambda_i|$ (já utilizada na literatura [9] [10]), sendo λ_{is} os autovalores calculados, λ_i os desejados, np o número de autovalores de interesse e $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$. Além disso, a minimização de Fo está sujeita às restrições (29).

$$\begin{aligned} \xi^{esp} - \text{tol} &\leq \xi_i \leq \xi^{esp} + \text{tol} \quad \sigma_i \leq 0 \\ K^{\min} &\leq K^P \leq K^{\max} \quad T_1^{\min} \leq T_1^P \leq T_1^{\max} \quad T_2^{\min} \leq T_2^P \leq T_2^{\max} \end{aligned} \quad (29)$$

Neste trabalho foi definido um amortecimento de 20% para o modo interárea. A constante de tempo Tw foi ajustada em 1s e o erro admissível foi de 0,1%. Os limites dos ganhos e constantes de tempo do controlador POD foram especificados de acordo com a Tabela I.

TABELA I
LIMITES DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR POD.

Parâmetros	POD
$K^{\min} - K^{\max}$	0,10 – 3,00
$T_1^{\min} - T_1^{\max}$	0,05 – 0,90
$T_2^{\min} - T_2^{\max}$	0,05 – 0,90

IV. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

Para a validação dos estudos desenvolvidos foram realizadas simulações em um SEP teste conhecido como

“sistema simétrico de duas áreas” [17], cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 8. Este SEP é constituído por 4 geradores, 11 barras e 16 linhas de transmissão (LTs), já considerando a inclusão de uma nova barra (F_1) e uma nova LT ($7 - F_1$) fictícias, utilizadas exclusivamente para realizar simulações com o SSSC. Entre as barras 7 e F_1 foi considerada a reatância do transformador de acoplamento entre o VSC e a linha de transmissão cujo valor considerado foi de 0,01 pu. Os ganhos e constantes de tempo da estrutura de controle do SSSC (ver Figura 4) são considerados fixos, sendo $K_1 = K_2 = 0,1$ pu, $T_1 = T_2 = 0,1$ s e $T_m = 0,005$ s. Para se considerar o SSSC incluído no SEP mas sem exercer qualquer controle sobre os fluxos de potências ativa e reativa, as variáveis de controle do VSC assumem valores bem pequenos (em pu) ($V_p = 1,31 \times 10^{-6}$ e $V_q = 1,88 \times 10^{-6}$). Para esta condição de operação, as tensões nos barramentos do SEP teste podem ser analisadas a partir da Figura 9.

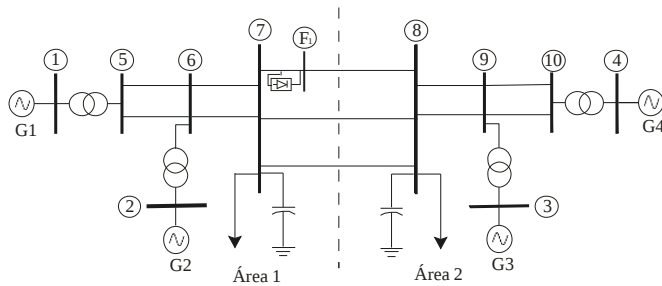


Figura 8. Diagrama do sistema simétrico de duas áreas.

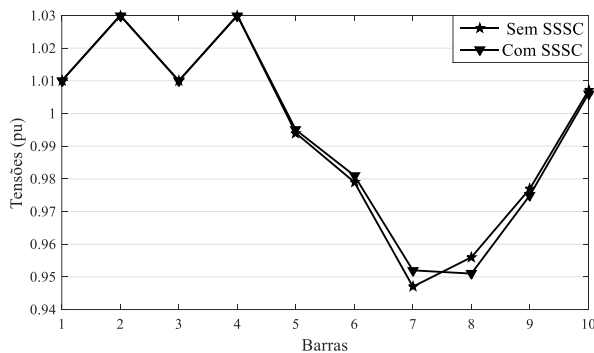


Figura 9. Níveis de tensão do sistema antes e depois da atuação do SSSC.

Analisando o gráfico da Figura 9 denotado por “sem SSSC” é possível inferir que o SEP apresenta a tensão na barra 7 ($V_7 = 0,947$ pu) fora dos limites aceitáveis de operação (0,95 – 1,05 p.u.). Esta violação dos limites da tensão pode ocasionar instabilidade de tensão caso uma perturbação de maior magnitude ocorrer no SEP. Nessa condição de operação (sem controle dos fluxos) o fluxo na linha $F_1 - 8$ é $S_{F_1-8} = 51,23 - j15,09$ MVA. Para solucionar este problema, o SSSC foi instalado entre as barras 7 e F_1 . Após a atuação do SSSC e do controle dos fluxos de potências ativa e reativa (sendo especificada uma potência complexa de $\hat{S}_{F_1-8}^{esp} = 75 - j35$ MVA) tem-se o novo perfil de tensões para o SEP simétrico de duas áreas (curva denotada por “com SSSC” na Figura 9).

Analisando esta curva conclui-se que o problema de subtenção na barra 7 foi corrigido, permanecendo dentro da

faixa recomendada ($V_7 = 0,952$ pu). Nessa condição de operação, a tensão do conversor do SSSC é $\hat{V}_s = 0,163\angle -52,55^\circ$ pu, fornecendo uma potência complexa de $10,163 + j14,822$ MVA ao SEP.

Para o caso base analisado (sem atuação do SSSC) os autovalores de interesse da matriz de estado do SEP são apresentados na Tabela II, bem como as frequências de oscilação (ω_n) e os coeficientes de amortecimento (ξ) associados.

TABELA II
AUTOVALORES DOMINANTES, FREQUÊNCIAS E COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO DO CASO BASE.

Modos	Autovalor	ω_n [Hz]	ξ [p.u.]
L1	$-0,3053 \pm j6,3738$	1,0156	0,0478
L2	$-0,3044 \pm j5,8110$	0,9261	0,0523
I1	$0,0427 \pm j4,2552$	0,6773	-0,0100

De acordo com os valores mostrados na Tabela II para esta situação o SEP teste apresenta três modos eletromecânicos de oscilação, sendo dois locais (L1 e L2) e um modo interárea (I1), o qual é responsável pela sua instabilidade oscilatória.

Considerando o SSSC instalado no SEP e realizando o controle dos fluxos, novamente foram calculados os autovalores da matriz de estado, cujos resultados de interesse são mostrados na Tabela III.

TABELA III
AUTOVALORES DOMINANTES, FREQUÊNCIAS E COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO COM O SSSC EM FUNCIONAMENTO.

Modos	Autovalor	ω_n [Hz]	ξ [p.u.]
L1	$-0,3150 \pm j6,3698$	1,0150	0,0494
L2	$-0,2952 \pm j5,8106$	0,9260	0,0507
I1	$-0,0420 \pm j4,1549$	0,6613	0,0101

Comparando os resultados mostrados nas Tabela II e III conclui-se que o controle dos fluxos exercido pelo SSSC influenciou positivamente no amortecimento do modo interárea I1. Note que os autovalores associados a este modo se posicionaram no semiplano esquerdo do plano complexo, tornando o SEP estável, mas fracamente amortecido.

Para fornecer amortecimento suplementar ao modo interárea, um controlador POD é acoplado à malha de controle do SSSC. O projeto de seus parâmetros é realizado utilizando-se a técnica PSO conforme apresentada em [13] e aplicada em [9] e [10]. O sinal de entrada utilizado para o POD é o fluxo de potência ativa na LT 6–7, disponível localmente. Foi especificado em projeto que o modo interárea deveria apresentar um coeficiente de amortecimento de $20\% \pm 0,1\%$.

Os valores de ganho e das constantes de tempo definidos pelo método PSO foram $K^P = 2,2385$ pu, $T_1^P = T_3^P = 0,07657$ s e $T_2^P = T_4^P = 0,60985$ s.

Utilizando estes valores e considerando a atuação do conjunto SSSC-POD os autovalores da matriz de estados foram calculados e os de natureza oscilatória são apresentados na Tabela VI, com suas frequências (ω_n) e coeficientes de amortecimento (ξ) associados.

TABELA IV
AUTOVALORES DOMINANTES, FREQUÊNCIAS E COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO COM O CONJUNTO SSSC – POD EM FUNCIONAMENTO.

Modos	Autovalor	ω_n [Hz]	ξ [p.u.]
L1	$-0,3164 \pm j6,3653$	1,0143	0,0496

L2	$-0,2941 \pm j5,8080$	0,9256	0,0506
I1	$-0,7509 \pm j3,6967$	0,6004	0,1991

Analisando os dados mostrados na Tabela IV torna-se explícito que o POD ajustado com os parâmetros obtidos pelo PSO forneceu amortecimento dentro da faixa definida em projeto ($20\% \pm 0,1\%$).

Comparando os modos locais apresentados nas Tabelas II, III e IV, observa-se que pouco se alteram com a inclusão do SSSC e do conjunto SSSC-POD, o que era esperado, já que estes dispositivos têm atuação destacada no modo interárea.

Na Figura 10 é apresentada a variação angular do gerador 2 ($\Delta\delta_2$) em relação ao gerador 1 ($\Delta\delta_1$) (referência para o sistema simétrico de duas áreas) após uma perturbação de 0,05 pu na potência mecânica do gerador 1, considerando as três situações avaliadas no trabalho.

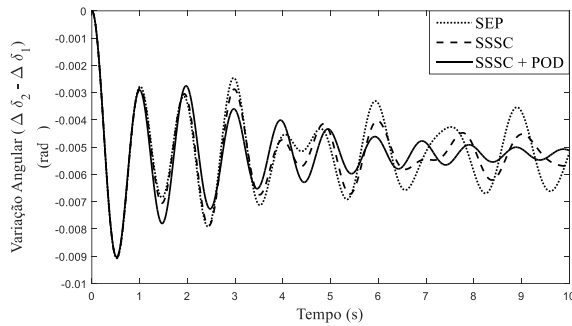


Figura 10. Variação angular $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$ sem a instalação do SSSC, com o SSSC e com o conjunto SSSC – POD.

As curvas mostradas na Figura 10 trazem a informação visual do aumento do amortecimento introduzido ao modo interárea pela atuação do SSSC e do conjunto SSSC-POD, como já explicitado nos dados das Tabelas II, III e IV.

V. CONCLUSÕES

Este artigo descreveu a construção de um modelo matemático para o SSSC baseado em injeções de corrente. Esta modelagem permite representar o SSSC no algoritmo de fluxo de potência formulado pelos resíduos das injeções de corrente nas barras na forma polar, utilizando o método de Newton-Raphson. Esta mesma modelagem pode ser introduzida nas equações do SEP representado pelo MSC. Com estas ferramentas é possível realizar análise estática (afundamento de tensão) e análise dinâmica (estabilidade) de um SEP. Além disso, foi apresentada uma estrutura de controle para o SSSC utilizando controladores do tipo PI.

Os estudos desenvolvidos foram aplicados no sistema simétrico de duas áreas e pelos resultados obtidos ficou demonstrada a capacidade do SSSC no controle dos fluxos de potências ativa e reativa na linha de transmissão de instalação e consequente melhoria no perfil de tensão. Também foi realizada a análise da estabilidade do SEP e um controlador POD acoplado à malha de controle do SSSC teve seus parâmetros ajustados pelo PSO. Dos resultados obtidos foi possível concluir que o ajuste realizado foi capaz de introduzir amortecimento adicional à oscilação do tipo interárea do SEP.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [2] E. Larsen, and D. Swann, "Applying power system stabilizers Part II: Performance objectives and tuning concepts," *IEEE Transactions on, PAS-100*, n. 6, pp. 3025–3033, 1981.
- [3] J. D. D. Ngumfack-Ndongmo, G. Kenné, R. Kuete-Fochie, A. Cheukem, H. B. Fotsin, and F. Lamnabhi-Lagarigue, "A simplified nonlinear controller for transient stability enhancement of multimachine power systems using SSSC device," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 650–657, 2014.
- [4] J. Dixon, L. Morán, J. Rodríguez, and R. Domke, "Reactive Power Compensation Technologies , State-of-the-Art Review," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2144 – 2164, 2005.
- [5] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. 2000.
- [6] L. Gyugyi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, and A. Edris, "The unified power flow controller: a new approach to power transmission control," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 2, pp. 1085–1097, 1995.
- [7] C. E. Pupin, A. P. Pina, and P. B. Araujo, "Estudo da estabilidade a pequenas perturbações com a atuação do dispositivo FACTS SSSC em sistemas multimáquinas," in *Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications–DINCON*, 2009, p. 8.
- [8] M. M. Menezes, P. B. Araujo, and E. V. Fortes, "Bacterial Foraging Optimization algorithm used to adjust the parameters of Power System Stabilizers and Thyristor Controlled Series Capacitor-Power Oscillation Damping controller," in *Industry Applications (INDUSCON)*, 2014, pp. 1–6.
- [9] C. E. Pupin, P. B. Araujo, M. M. Menezes, and E. V. Fortes, "Ajuste de Controladores ESP e POD de Sistemas de Potência pela Técnica Particle Swarm Optimization.," in *CLAGTEE 2015. São José dos Campos - SP*, 2015, pp. 1–10.
- [10] E. L. Miotto, E. V. Fortes, and P. B. Araujo, "Ajuste dos Parâmetros de Controladores Suplementares pelo Algoritmo Particle Swarm Optimization Utilizando o Modelo de Sensibilidade de Corrente.," in *SBAI 2015. Natal - RN*, 2015, pp. 1–6.
- [11] E. V. Fortes, E. L. Miotto, P. B. Araujo, C. Pupin, and M. M. Menezes, "Ajuste dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento utilizando o algoritmo bacterial foraging optimization," in *CBQEE 2015. Centro de Convenções Raymundo Asfora - Campina Grande PB*, 2015, pp. 1–6.
- [12] K. M. Passino, "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control," *IEEE Control Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 52–67, Jun. 2002.
- [13] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE Int. Conf.*, vol. 4, pp. 1942–1948 vol.4, 1995.
- [14] C. R. de Pádua Júnior, A. L. M. Takahashi, M. A. Furini, and P. B. de Araujo, "Proposta de um Modelo para Análise de Estabilidade a Pequenas Perturbações Baseado na Lei de Kirchhoff para Correntes," in *Sbai 2013. Fortaleza - CE*, 2013, pp. 1–6.
- [15] Z. Huang, Y. Ni, C. M. Shen, F. F. Wu, S. Chen, and B. Zhang, "Application of unified power flow controller in interconnected power systems-modeling, interface, control strategy, and case study," *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 15, no. 2, pp. 817–824, 2000.
- [16] I. Kopcak, V. F. Da Costa, and L. C. P. Da Silva, "A Generalized Load Flow Method Including the Steady State Characteristic of Dynamic Devices," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, vol., no, 2007, pp. 86–91.
- [17] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.