

CONTROLE NÃO LINEAR APLICADO EM DISPOSITIVOS SÉRIE CONTROLADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

DANIEL S. SIQUEIRA*, LUÍS F.C. ALBERTO*, NEWTON G. BRETAS*

**Depto. de Eng. Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, SP, Brasil*

Emails: danielsiqueira@usp.br, lfcalberto@usp.br, ngbretas@sc.usp.br

Abstract— Control schemes with input signals suitable for controlled series devices may improve transient stability and provide damping to electromechanical oscillations of power systems. In this work the control generalized energy function theory for the synthesis of a nonlinear control law for this device, which is independent of the network topology is employed. The designed control law significantly improves the dynamics of the system and considerably increases the stability region of the system.

Keywords— FACTS Devices, Nonlinear Control, Generalized Energy Function, Control Generalized Energy Function.

Resumo— Esquemas de controle com sinais de entrada adequados para dispositivos séries controlados podem melhorar a estabilidade transitória e auxiliar no amortecimento de oscilações eletromecânicas de sistemas elétricos de potência. Neste trabalho, a teoria de função energia generalizada de controle é utilizada para a síntese de uma lei de controle não linear para para um dispositivo série controlado, que independe da topologia da rede. A lei de controle projetada melhora significativamente a dinâmica do sistema e aumenta consideravelmente a região de estabilidade do mesmo.

Palavras-chave— Dispositivos FACTS, Controle não Linear, Função Energia Generalizada, Função Energia Generalizada de Controle.

1 Introdução

Os compensadores séries controláveis (CSC) são dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) que utilizam a tecnologia dos tiristores de potência com a função de variar o grau de compensação séries de linhas de transmissão (Hingorani and Gyugyi, 2000; Acha, 2004; Mathur and Varma, 2002; Zhang et al., 2012). Entre os dispositivos séries FACTS podemos destacar o TCSC (Thyristor-controlled series capacitor), TSSC (Thyristor-switched series capacitor) e SSSC (Static Synchronous Series Compensator) (Hingorani and Gyugyi, 2000).

Esses dispositivos têm sido usados com grande eficiência em sistemas elétricos de potência (SEP) para melhorar os limites de estabilidade transitória e para fornecer amortecimento das oscilações eletromecânica (Noroozian et al., 2001; Kuiava et al., 2007).

Trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de sintetizar leis de controle para estes dispositivos (Noroozian et al., 2001; Kuiava et al., 2007). A maioria das técnicas empregadas para o projeto de controle em sistemas elétricos de potência utilizam modelos linearizados. Controladores projetados com técnicas lineares podem perder eficiência quando o ponto de operação utilizado no projeto varia de forma significativa.

Controladores não lineares podem oferecer maior robustez a estas variações. Dentre várias técnicas de projeto de controle não linear, os métodos baseados em funções de Lyapunov e/ou funções energia têm sido amplamente utilizados em sistemas elétricos de potência (Ghandhari, Andersson, Pavella and Ernst, 2001; Ghandhari, An-

dersson and Hiskens, 2001). Estas técnicas requerem a existência de uma função de Lyapunov e/ou função energia para o projeto, entretanto, mostrou-se que não existem funções de Lyapunov e/ou funções energia gerais para modelos de sistemas elétricos mais complexos que consideram, por exemplo, as perdas do sistema (Chiang, 1989).

Funções energia generalizadas (FEG) surgiram como uma alternativa para lidar com estas classes de modelos que apresentam comportamento complexo. A função energia generalizada (FEG) foi apresentada por Alberto (2006) e desenvolvida posteriormente por Silva et al. (2009) com a proposição da função energia generalizada de controle (FEGC). O conceito de FEG e FEGC se baseia na extensão do princípio de invariância de LaSalle (Rodrigues et al., 2000). Assim, este conceito pode ser utilizado tanto para a concepção de controles ou quanto para avaliar a estabilidade através de métodos diretos (Bretas and Alberto, 2003).

Uma característica importante da função energia generalizada é que a sua derivada ao longo de trajetórias do sistema, ao contrário da função energia e função de Lyapunov, pode ser positiva em alguns conjuntos limitados (Chiang and Alberto, 2015).

Neste trabalho, a síntese de uma lei de controle não linear baseada na função energia generalizada de controle para um dispositivo CSC, que independe da topologia da rede, utilizando um sistema onde a estrutura da rede elétrica é preservada, é apresentada.

2 Dispositivos CSC em Sistemas Elétricos de Potência

Para o projeto de controle, o CSC pode ser modelado na rede elétrica como uma reatância capacitiva em série com a linha de transmissão (Zhang et al., 2012), figura 1.

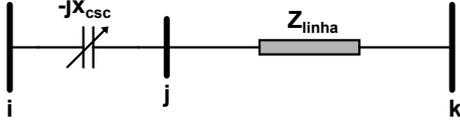


Figura 1: Modelo do dispositivo CSC na rede elétrica.

Os fluxos de potência ativa e reativa no dispositivo CSC podem ser calculados desta forma:

$$P_{ij}^{csc} = -\frac{V_i V_j}{x_{csc}} \text{sen}(\theta_{ij}), \quad (1)$$

$$P_{ji}^{csc} = -\frac{V_i V_j}{x_{csc}} \text{sen}(\theta_{ji}), \quad (2)$$

$$Q_{ij}^{csc} = -\frac{V_i^2}{x_{csc}} + \frac{V_i V_j}{x_{csc}} \cos(\theta_{ij}), \quad (3)$$

$$Q_{ji}^{csc} = -\frac{V_j^2}{x_{csc}} + \frac{V_i V_j}{x_{csc}} \cos(\theta_{ji}), \quad (4)$$

onde, $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, V_i , V_j , θ_i e θ_j , são respectivamente os módulos e ângulos das tensões das barras i e j .

As características dinâmicas internas do dispositivo CSC podem ser representadas por um modelo diferencial de primeira ordem (Del Rosso et al., 2003):

$$T_{csc} \dot{x}_{csc} = x_{csc}^0 + \Delta x_{csc} - x_{csc}, \quad (5)$$

para $x_{csc}^{min} \leq x_{csc} \leq x_{csc}^{max}$,

onde, x_{csc} é a reatância do CSC, x_{csc}^0 é a reatância de referência, Δx_{csc} é a reatância de controle T_{csc} é a constante de tempo do dispositivo. Para estudos de estabilidade transitória, é comum negligenciar as dinâmicas internas do dispositivo, ou seja, considerar que o mesmo atue de forma instantânea ($T_{csc} = 0$). Então, a equação (5) assume a seguinte forma:

$$x_{csc} = x_{csc}^0 + \Delta x_{csc}, \quad \text{para } x_{csc}^{min} \leq x_{csc} \leq x_{csc}^{max}. \quad (6)$$

Definindo:

$$B_{csc}^0 = -\frac{1}{x_{csc}^0}, \quad \text{e } u = \frac{\Delta x_{csc}}{x_{csc}^0 + \Delta x_{csc}}, \quad (7)$$

As equações dos fluxos de potência ativa e reativa no dispositivo CSC podem ser reescritas como se segue:

$$P_{ij}^{csc} = (1 - u) B_{csc}^0 V_i V_j \text{sen}(\theta_{ij}), \quad (8)$$

$$P_{ji}^{csc} = (1 - u) B_{csc}^0 V_i V_j \text{sen}(\theta_{ji}), \quad (9)$$

$$Q_{ij}^{csc} = (1 - u) (B_{csc}^0 V_i^2 - B_{csc}^0 V_i V_j \cos(\theta_{ij})), \quad (10)$$

$$Q_{ji}^{csc} = (1 - u) (B_{csc}^0 V_j^2 - B_{csc}^0 V_i V_j \cos(\theta_{ji})). \quad (11)$$

3 Função Energia Generalizada de Controle

O conceito de função energia apresentado por Chiang et al. (1988) tem sido amplamente utilizado para análise e projeto de controle de sistemas dinâmicos não-lineares. Este conceito foi desenvolvido sob a suposição de que os conjuntos limites de tais sistemas são compostos exclusivamente de pontos de equilíbrio hiperbólicos. Entretanto, a estrutura dos conjuntos limites de sistemas dinâmicos em geral podem ser muito complexas admitindo trajetórias caóticas, soluções quase-periódicas e órbitas fechadas. Como consequência, estes modelos de sistema dinâmicos não lineares não admitem uma função energia e como consequência a teoria de função energia não pode ser aplicada de forma geral. O conceito de função energia generalizada apresentado por Alberto (2006), que é uma generalização do conceito de função energia, surge como uma alternativa prática para a análise de sistemas dinâmicos não lineares que apresentam tais comportamentos complexos, fornecendo informações úteis sobre os seus conjuntos limites (Alberto, 2006; Alberto and Chiang, 2012a).

Nesta seção, uma breve revisão dos conceitos de função energia generalizada (FEG) e função energia generalizada de controle (FEGC) é apresentado.

Considere o seguinte sistema autônomo não linear:

$$\dot{x} = f(x), \quad (12)$$

onde x é o vetor de variáveis de estado, $x \in \mathbb{R}^n$ e $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ uma função de classe C^1 , sendo $\phi(t, x_0)$ uma solução particular de (12) iniciando em x_0 , no instante $t = 0$ e defina $\phi_t(x_0) := \{\phi(t, x_0) \in \mathbb{R}^n : t \in \mathbb{R}\}$ a trajetória que passa através de x_0 .

Seja $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ uma função de classe C^r , $r \geq 1$, e defina o seguinte conjunto:

$$C := \{x \in \mathbb{R}^n : \dot{V}(x) \geq 0\}, \quad (13)$$

onde a derivada de V é positiva. O conjunto C é usualmente composto por uma coleção enumerável de componentes conexas C_i , onde C_i é a i -ésima componente conexa do conjunto C (Alberto, 2006).

A seguir apresenta-se a definição de função energia generalizada para o sistema (12) proposta em Alberto (2006).

Definição 1 (Função Energia Generalizada)

(Alberto, 2006) Uma função $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função energia generalizada do sistema (12) se:

(G1) O número de componentes conexas C_i de C é finito.

(G2) O conjunto C_i é limitado para todo i .

(G3) para cada $x \in \mathbb{R}^n$, se $V(\phi(t, x_0))$ é limitado para $t \geq 0$, então $\phi(t, x_0)$ é limitado para $t \geq 0$.

A definição de função energia generalizada permite que a derivada da função ao longo das trajetórias possa ser positiva nos conjuntos limitados C_i s (Alberto, 2006). A figura 2 ilustra este conceito.

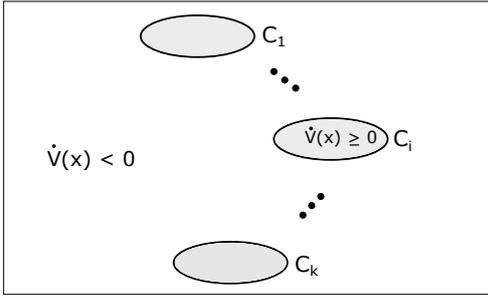


Figura 2: Função energia generalizada e seus conjuntos limitados C_i s.

Com o conceito de função energia generalizada é possível obter informações importantes a respeito dos conjuntos limites de sistemas não lineares, incluindo aqueles que apresentam comportamentos complexos em seus conjuntos limites.

A seguir o teorema 2, apresentado em Alberto and Chiang (2012a), mostra que a existência de uma função energia generalizada garante que os conjuntos limites do sistema estão localizados no conjunto $M = \{x \in \mathbb{R}^n : \dot{V}(x) = 0\}$, em que a derivada da função energia generalizada é zero, ou tem intersecção não vazia com conjuntos limitados C_i s onde a derivada da função energia generalizada é positiva.

Teorema 2 (Função Energia Generalizada e Conjuntos Limites)

(Alberto and Chiang, 2012a) Seja V uma função energia generalizada do sistema (12) e $M := \{x \in \mathbb{R}^n : \dot{V}(x) = 0\}$. Considere que a trajetória $\varphi(t, x_0)$ do sistema (12) é limitada para $t \geq 0$. Então:

- (i) existe um nível $L \in \mathbb{R}$ tal que $\omega(x_0) \subset (M \cap \{x \in \mathbb{R}^n : x \in V^{-1}(L)\})$;
- (ii) ou existe pelo menos uma componente conexa C_j de C tal que $\omega(x_0) \subset C_j \neq \emptyset$.

Para o sistema dinâmico não linear (12) que admite uma função energia generalizada, o teorema 2, fornece informações sobre a localização dos conjuntos limites de trajetórias limitadas.

A principal diferença entre o conceito tradicional de função energia (Chiang et al., 1987) e função energia generalizada é que na função energia é imperativo que todos os seus conjuntos limites estejam contidos nos conjuntos onde a derivada da função energia ao longo das trajetórias do sistema seja igual a zero. O conceito de função energia generalizada relaxa essa suposição (Alberto and Chiang, 2012a).

Considere agora o seguinte o sistema autônomo controlado:

$$\dot{x} = F(x, u), \quad (14)$$

onde $x \in \mathbb{R}^n$ é vetor de variáveis de estado, $u \in \mathbb{R}^m$ é a entrada de controle e $F: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ uma função de classe C^1 . Suponha que a origem¹ seja um ponto de equilíbrio do sistema em malha aberta ($u = 0$), isto é, $F(0, 0) = 0$. Deseja-se obter uma lei de realimentação $u = h(x)$, tal que a origem do sistema em malha fechada (14) seja assintoticamente estável.

$$\dot{x} = F(x, h(x)). \quad (15)$$

Definição 3 (Função Energia Generalizada de Controle)

(Silva et al., 2009) Uma função $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ de classe C^1 , é uma função energia generalizada de Controle de (14), se existir uma lei de realimentação de controle $u = h(x)$, de classe C^1 , tal que $W(x) = V(x, h(x))$ seja uma Função Energia Generalizada do sistema em malha fechada (15).

Como consequência da existência de uma função energia generalizada de controle o próximo teorema proposto por Silva et al. (2009), garante a estabilidade assintótica de conjuntos atrativos e permite obter uma estimativa da região de estabilidade desses conjuntos.

Teorema 4 (Estabilidade e Região de Estabilidade do Sistema em Malha Fechada via Função Energia Generalizada de Controle)

(Silva et al., 2009) Considere que o sistema (14) admita uma função energia generalizada de controle V . Seja $L \in \mathbb{R}$ um número real tal que a componente conexa $S_c(L)$ de $\{x \in \mathbb{R}^n : W(x) < L\}$ seja limitada. Suponha que $\sup_{x \in C \cap S_c(L)} W(x) :=$

¹Não há perda de generalidade em estudar a estabilidade da origem.

$l < L$. Então $S_c(l) := \{x \in S_c(L) : W(x) \leq l\}$ contém um conjunto H invariante e assintoticamente estável e $S_c(L)$ é uma estimativa da região de estabilidade de H . Além disso, H tem intersecção não vazia com o conjunto $C \cap S_c(l)$.

Mesmo com derivadas positivas, o teorema (4) mostra a existência de um conjunto assintoticamente estável, oferecendo alguma informação da sua localização e uma estimativa da região de estabilidade. Maiores detalhes a respeito do que foi exposto nesta seção podem ser encontrados em Alberto (2006); Silva et al. (2009); Silva et al. (2010).

4 Controle Não Lineares para Dispositivo CSC via FEGC

Considere um sistema formado por um gerador conectado a um barramento infinito por meio de uma linha de transmissão, onde se encontra instalado um dispositivo CSC, figura 3.

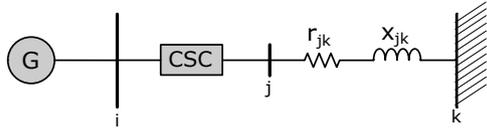


Figura 3: Sistema gerador vs barramento infinito com dispositivo CSC instalado.

As dinâmicas do gerador são determinadas pelo modelo clássico:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i, \quad (16)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = -D_i \omega_i + P_{mi} - P_{ei}, \quad (17)$$

onde, M_i é a constante de inercia, D_i é a constante de amortecimento, P_{mi} potência mecânica e P_{ei} potência elétrica ativa. As potências elétricas geradas ativa e reativa são dadas por:

$$P_{ei} = G_{gi} E_i^2 - G_{gi} E_i V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - B_{gi} E_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i), \quad (18)$$

$$Q_{ei} = B_{gi} V_i^2 - B_{gi} E_i V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - G_{gi} E_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i), \quad (19)$$

onde,

$$B_{gi} = -\frac{x'_{di}}{x'_{di}{}^2 + r_{ai}{}^2}, \quad G_{gi} = \frac{r_{ai}}{x'_{di}{}^2 + r_{ai}{}^2}, \quad (20)$$

sendo que r_{ai} é a resistência de armadura e x'_{di} é a reatância transitória do gerador, E_i e V_i , são respectivamente, os módulos da tensão interna e terminal do gerador.

O balanço de potência nas barras do sistema é:

$$0 = P_{ei} - P_{ij}^{csc}, \quad (21)$$

$$0 = Q_{ei} - Q_{ij}^{csc}, \quad (22)$$

$$0 = -P_{ji}^{csc} - P_{jk}^{Line}, \quad (23)$$

$$0 = -Q_{ji}^{csc} - Q_{jk}^{Line}. \quad (24)$$

Os fluxos de potência do dispositivo são estabelecidos pelas equações (8)-(9)-(10)-(11). Os fluxos de potência ativa e reativa na linha são dados por:

$$P_{jk}^{Lin} = G_{jk} V_j^2 - G_{jk} V_j V_k \cos(\theta_{jk}) - B_{jk} V_j V_k \sin(\theta_{jk}), \quad (25)$$

$$Q_{jk}^{Lin} = -B_{jk} V_j^2 + B_{jk} V_j V_k \cos(\theta_{jk}) - G_{jk} V_j V_k \sin(\theta_{jk}). \quad (26)$$

onde,

$$B_{jk} = -\frac{x_{jk}}{x_{jk}^2 + r_{jk}^2}, \quad G_{jk} = \frac{r_{jk}}{x_{jk}^2 + r_{jk}^2}, \quad (27)$$

sendo que x_{jk} e r_{jk} , respectivamente, são a reatância e a resistência da linha de transmissão.

O conjunto de equações diferenciais não lineares (16)-(17) e o conjunto de equações algébricas não lineares (21)-(22)-(23)-(24) caracterizam o comportamento dinâmico do sistema proposto. Vamos regularizar as dinâmicas desse conjunto de equações algébrico-diferenciais por meio da teoria de sistemas singularmente perturbados (Chiang and Alberto, 2015). Então, temos o seguinte sistema singularmente perturbado associado ao sistema algébrico-diferencial (16)-(17)-(21)-(22)-(23)-(24):

$$\varepsilon_{\theta i} \dot{\theta}_i = P_{ei} - P_{ij}^{csc}, \quad (28)$$

$$\varepsilon_{vi} \dot{v}_i = Q_{ei} - Q_{ij}^{csc}, \quad (29)$$

$$\varepsilon_{\theta j} \dot{\theta}_j = -P_{ji}^{csc} - P_{jk}^{Lin}, \quad (30)$$

$$\varepsilon_{vj} \dot{v}_j = -Q_{ji}^{csc} - Q_{jk}^{Lin}, \quad (31)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i, \quad (32)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = -D_i \omega_i + P_{mi} - P_{ei}, \quad (33)$$

onde, $v = \ln(V)$ e $\varepsilon_{\theta i}$, ε_{vi} , $\varepsilon_{\theta j}$ e ε_{vj} são números positivos suficientemente pequenos. Esta regularização fornece uma maneira de construir funções energia e funções energia generalizada.

Agora, considere a seguinte função escalar como candidata a função energia generalizada de controle:

$$\begin{aligned}
W = & \frac{1}{2}M_i\omega_i^2 - P_{mi}\delta_i - \frac{1}{2}B_{gi}V_i^2 + B_{gi}E_iV_i \cos(\delta_i - \theta_i) \\
& + \frac{1}{2}B_{csc}^0V_i^2 + \frac{1}{2}B_{csc}^0V_j^2 - B_{csc}^0V_iV_j \cos(\theta_{ij}) \\
& - \frac{1}{2}B_{jk}V_j^2 + B_{jk}V_jV_k \cos(\theta_{jk}) - \beta P_{Li}\omega_i + \alpha
\end{aligned} \tag{34}$$

onde $P_{Li} = P_{mi} + E_iV_iB_{gi} \sin(\delta_i - \theta_i)$, β é um parâmetro a ser determinado e α é uma constante arbitrária. A candidata a FEGC W foi inspirada nas ideias desenvolvidas em Bretas and Alberto (2000); Alberto et al. (2002); Bretas and Alberto (2003); Silva et al. (2003); Silva et al. (2005); Alberto and Chiang (2012b).

Considerando a função (34), derivando-a ao longo das órbitas do sistema, equações (28)-(29)-(30)-(31)-(32)-(33), verifica-se que:

$$\dot{W} = -\Lambda^T Q \Lambda + P \Lambda + u H^T \Lambda \tag{35}$$

onde,

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{v}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{v}_2 \\ \omega \\ P_{Li} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} B_{csc}^0V_iV_j \sin(\theta_{ij}) \\ B_{csc}^0V_i^2 - B_{csc}^0V_iV_j \cos(\theta_{ij}) \\ B_{csc}^0V_iV_j \sin(\theta_{ji}) \\ B_{csc}^0V_j^2 - B_{csc}^0V_iV_j \cos(\theta_{ji}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{36}$$

$$P = \begin{bmatrix} G_{gi}E_i^2 - G_{gi}E_iV_i \cos(\delta_i - \theta_i) \\ -G_{gi}E_iV_i \sin(\delta_i - \theta_i) \\ -G_{jk}V_j^2 + G_{jk}V_jV_k \cos(\theta_{jk}) \\ G_{jk}V_jV_k \sin(\theta_{jk}) \\ -G_{gi}E_i^2 + G_{gi}E_iV_i \cos(\delta_i - \theta_i) \\ \beta M^{-1}(G_{gi}E_i^2 - G_{gi}E_iV_i \cos(\delta_i - \theta_i)) \end{bmatrix} \tag{37}$$

$$Q = \begin{bmatrix} T & S(\beta) \\ S(\beta)^T & R(\beta) \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\theta i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{vi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\theta j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{vj} \end{bmatrix} \tag{38}$$

$$R(\beta) = \begin{bmatrix} D_i + \beta B_{gi}E_iV_i \cos(\delta_i - \theta_i) & -\frac{1}{2}\beta D_i M_i^{-1} \\ -\frac{1}{2}\beta D_i M_i^{-1} & \beta M_i^{-1} \end{bmatrix} \tag{39}$$

$$S(\beta) = \begin{bmatrix} -\beta B_{gi}E_iV_i \cos(\delta_i - \theta_i) & 0 \\ \beta B_{gi}E_iV_i \sin(\delta_i - \theta_i) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{40}$$

O objetivo é escolher uma lei de controle ($u = h(\delta, \omega, \theta, v)$) que satisfaça as exigências da FEGC. Para isso considere a seguinte lei de controle:

$$\mathbf{u} = -k P_{ij}^{csc} \omega_i. \tag{41}$$

Substituindo a lei de controle \mathbf{u} em (42), temos:

$$\dot{W} = -\Lambda^T Q' \Lambda + P \Lambda \tag{42}$$

onde,

$$Q' = \begin{bmatrix} T & (S(\beta) + \Omega) \\ (S(\beta) + \Omega)^T & R(\beta) \end{bmatrix}, \tag{43}$$

sendo que,

$$\Omega = K \frac{x_{csc}}{x_{csc}^0} \begin{bmatrix} (P_{ij}^{csc})^2 & 0 \\ P_{ij}^{csc} \cdot Q_{ij}^{csc} & 0 \\ -(P_{ij}^{csc})^2 & 0 \\ P_{ij}^{csc} \cdot Q_{ji}^{csc} & 0 \end{bmatrix} \tag{44}$$

Admitindo que a tensão do sistema é limitada, x_{csc} e a matriz Ω são limitadas, então para uma região de operação com β e as perdas do sistema (28) suficientemente pequenos, todas as condições do teorema apresentado em (Siqueira, 2017, pag. 118) são satisfeitas para o modelo dinâmico (28)-(29)-(30)-(31)-(32)-(33) e, portanto, a função (34) é uma função energia generalizada de controle para o sistema em malha fechada.

5 Exemplo Numérico

Considere o sistema apresentado na figura 3. O modelo dinâmico desse sistema está descrito na seção 4. O Gerador está fornecendo potência ao sistema e no instante $t = 1$ [s] ocorre um curto-circuito trifásico no barramento infinito. O defeito é retirado após um intervalo de tempo, restaurando a topologia inicial do sistema (sistema pós-falta igual ao sistema pré-falta). Os parâmetros do sistema são: $P_{mi} = 1$ [pu], $M_i = 0,0318$ [pu], $E_i = 1,11$ [pu], $r_{ai} = 0,001$ [pu], $x'_{di} = 0,2$ [pu], $D_i = 0,015$ [pu], $r_{jk} = 0,035$, $x_{jk} = 0,7$, $x_{tcsc}^0 = -0,2$ [pu], $x_{tcsc}^{min} = -0,4$ [pu] e $x_{tcsc}^{max} = -0,1$ [pu]. A seguir a estabilidade nas condições apresentadas será analisada.

De acordo com a seção 4 temos a seguinte lei de controle para o dispositivo CSC:

$$\mathbf{u} = -kP_{ij}^{csc}\omega_i. \quad (45)$$

O tempo crítico de eliminação da perturbação para o sistema sem controle foi de 206 [ms]. Para o sistema considerando o CSC com a lei de controle \mathbf{u} , com $k = 0,035$, o tempo crítico de eliminação da perturbação foi de 252 [ms]. O gráfico da figura 4 apresenta o comportamento dinâmico do sistema para a perturbação descrita com um tempo de eliminação da falta de 206 [ms].

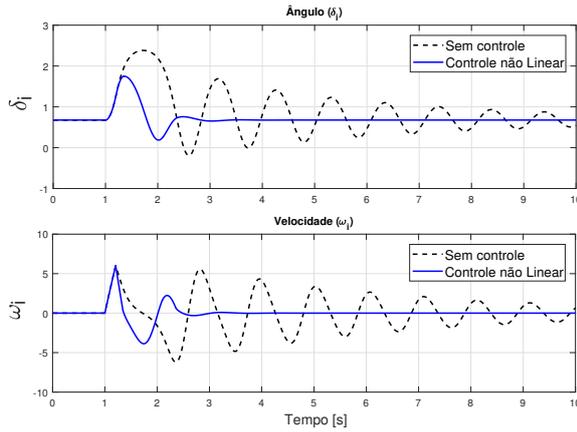


Figura 4: Comportamento dinâmico do sistema com a atuação do controle não linear.

O gráfico da figura 5 apresenta o comportamento dinâmico da reatância do dispositivo CSC atuando com a lei de controle \mathbf{u} .

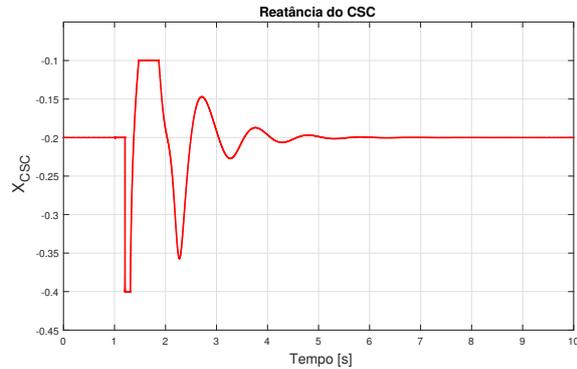


Figura 5: Comportamento dinâmico do dispositivo CSC.

Como pode-se observar, a lei de controle melhorou a dinâmica do sistema, diminuindo as oscilações e fazendo com que o sistema convirja mais rapidamente para o ponto de equilíbrio.

Para avaliarmos de fato a contribuição do controlador na estabilidade do sistema, vamos verificar o quanto a lei de controle proposta está aumentando a região de estabilidade do sistema, além

disto, vamos obter uma estimativa da região de estabilidade via função energia generalizada de controle. Para isto, considere a função energia generalizada de controle (34). A figura 6 apresenta a comparação entre a região de estabilidade do sistema sem controle e com controle não linear \mathbf{u} no plano formado pelos pontos de equilíbrio estável $(0,49; 1,04; 0,66; 1,10; 0,66; 0,00)$, equilíbrio instável $(2,26; 0,58; 2,57; 1,11; 2,57; 0,00)$ e $p_1 (-0,50; 0,40; -1,24; 0,30; 0,50; 6,00)$,

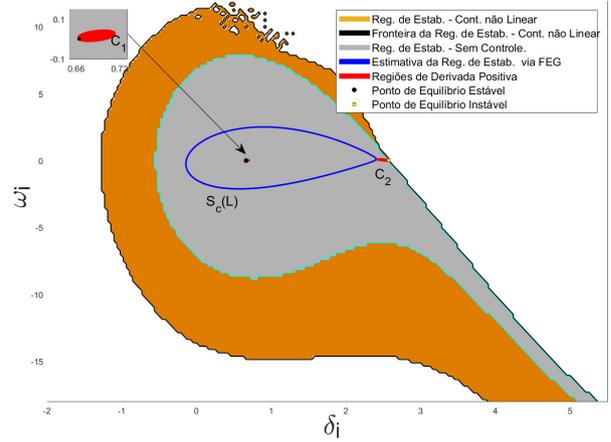


Figura 6: Comparação entre as regiões de estabilidade sistema sem controle e com o controle não linear.

Além da comparação entre as regiões de estabilidade do sistema com e sem controle, a figura 6 apresenta uma estimativa desta região via função (34), com $L = 0,674$, satisfazendo o teorema 4.

Pode-se verificar que a lei de controle não linear aumentou de forma significativa a região de estabilidade do sistema, mostrando que o controle atua de forma efetiva no sentido de aumentá-la.

6 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Neste trabalho, a síntese de uma lei de controle não linear para um dispositivo CSC foi desenvolvida. Esta lei de controle não linear foi composta por sinais que independem da topologia do sistema. Como análise inicial um teste foi feito em um sistema máquina vs barramento infinito. Neste teste foi possível avaliar a influência do controle não linear projetado no comportamento dinâmico do sistema. Nele constatamos que a lei de controle proposta aumentou de forma significativa a região de estabilidade do sistema, melhorando o comportamento dinâmico do mesmo.

Embora neste trabalho o dispositivo CSC tenha sido estudado, o principal objetivo foi demonstrar como a teoria de função energia generalizada de controle é aplicável para o desenvolvimento de controladores para sistemas elétricos

de potência, podendo-se estender as ideias apresentadas para uma extensa lista de dispositivos modernos, tais como, SVC, STATCOM, UPFC, HVDC etc.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa sob os números 2011/23345-8 e 2014/50851-0.

Referências

- Acha, E. (2004). *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*, Wiley, New York, NY.
- Alberto, L. F. C. (2006). Caracterização e Estimativas da Área de Atração de Sistemas Dinâmicos não Lineares. Tese (Livre Docência em Análise de Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- Alberto, L. F. C. and Chiang, H. D. (2012a). Characterization of stability region for general autonomous nonlinear dynamical systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **57**(6): 1564–1569.
- Alberto, L. F. C. and Chiang, H. D. (2012b). Towards development of generalized energy functions for electric power systems, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, San Diego, CA, pp. 1–6.
- Alberto, L., Silva, F. and Bretas, N. (2002). Extended lyapunov functions for power systems detailed models, *Power Systems Computation Conference (PSCC)*.
- Bretas, N. and Alberto, L. (2000). Energy function for power systems with transmission losses: extension of the invariance principle, *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings*, Vol. 1, IEEE, Perth, WA, pp. 145–150 vol.1.
- Bretas, N. and Alberto, L. (2003). Lyapunov function for power systems with transfer conductances: extension of the invariance principle, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(2): 769 – 777.
- Chiang, H. and Alberto, L. (2015). *Stability Regions of Nonlinear Dynamical Systems: Theory, Estimation, and Applications*, Cambridge University Press.
- Chiang, H.-D. (1989). Study of the existence of energy functions for power systems with losses, *IEEE Transactions on Circuits and Systems* **36**(11): 1423–1429.
- Chiang, H.-D., Hirsch, M. and Wu, F. (1988). Stability regions of nonlinear autonomous dynamical systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **33**(1): 16–27.
- Chiang, H.-D., Wu, F. and Varaiya, P. (1987). Foundations of direct methods for power system transient stability analysis, *IEEE Transactions on Circuits and Systems* **34**(2): 160–173.
- Del Rosso, A., Canizares, C. and Dona, V. (2003). A study of tesc controller design for power system stability improvement, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(4): 1487 – 1496.
- Ghandhari, M., Andersson, G. and Hiskens, I. A. (2001). Control lyapunov functions for controllable series devices, *IEEE Transactions on Power Systems* **16**(4): 689–694.
- Ghandhari, M., Andersson, G., Pavella, M. and Ernst, D. (2001). A control strategy for controllable series capacitor in electric power systems, *Automatica* **37**(10): 1575 – 1583.
- Hingorani, N. and Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York : IEEE Press.
- Kuiava, R., Ramos, R. A. and Bretas, N. G. (2007). Robust design of a tesc supplementary controller to damp inter-area oscillations, *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1–8.
- Mathur, R. and Varma, R. (2002). *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*, 1 edn, Wiley-IEEE Press.
- Noroozian, M., Ghandhari, M., Andersson, G., Gronquist, J. and Hiskens, I. (2001). A robust control strategy for shunt and series reactive compensators to damp electromechanical oscillations, *IEEE Transactions on Power Delivery* **16**(4): 812 –817.
- Rodrigues, H., Alberto, L. and Bretas, N. (2000). On the invariance principle: generalizations and applications to synchronization, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications* **47**(5): 730 –739.
- Silva, F., Alberto, L. and Bretas, N. (2003). Extended lyapunov function for power systems

with transmission losses, *IEEE Power Tech Conference Proceedings*, Vol. 3, IEEE, Bologna, pp. 6 pp. Vol.3–.

Silva, F., Alberto, L., London, J.B.A., J. and Bretas, N. (2005). Smooth perturbation on a classical energy function for lossy power system stability analysis, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* **52**(1): 222–229.

Silva, F. H., Alberto, L. F. and Bretas, N. G. (2010). Função energia generalizada uniforme de controle para estabilização de sistema não lineares com incertezas, *CBA: Congresso Brasileiro de Automatica* pp. 5234–5240.

Silva, F. H., Guedes, R. B., Alberto, L. F. and Bretas, N. G. (2009). Função energia generalizada de controle para estabilização de sistemas não lineares, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* **20**: 133 – 145.

Siqueira, D. S. (2017). Aplicação de funções energia generalizadas de Controle no Projeto de Reguladores para TCSCs em Sistemas Elétricos de Potência. Tese (Doutorado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Zhang, X., Rehtanz, C. and Pal, B. (2012). *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*, Power Systems, Springer Berlin Heidelberg.