

Estimação de Estado em Sistemas com Dispositivos TCSC via Método de Mínimos Quadrados Ponderados Desacoplado-Rápido

De Lima, Luan F. G. S. Lourenço, Elizete M. Tortelli, Odilon L.

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná,
Curitiba, Brasil (e-mail: luangomes@ufpr.br, elizete@eletrica.ufpr.br, odilon@eletrica.ufpr.br)

Abstract: This paper proposes a methodology for the inclusion of FACTS devices in the formulation of the state estimation problem for electrical power systems. The proposed method addresses the fast decoupled weighted least-squares formulation of the state estimation problem, modified to process transmission systems with TCSC FACTS controllers. The control parameter of the TCSC is inserted as a new state variable, being estimated together with the traditional state variables of the system. The inclusion of these devices in the decoupled formulation allows exploring its benefits and low computational cost, enabling the real-time operation of the proposed tool. The results point to good applicability of the proposed method, capable of accurately and efficiently estimating the control parameters of the TCSCs under different operating conditions.

Resumo: Este artigo propõe uma metodologia para a inclusão de dispositivos FACTS na formulação do problema de estimação de estado de sistemas elétricos de potência. A abordagem proposta diz respeito à formulação desacoplada-rápida do método de mínimos quadrados ponderados do problema de estimação de estado, modificado para processar sistemas de transmissão que contenham controladores FACTS do tipo TCSC. O parâmetro de controle do TCSC é inserido como uma nova variável de estado, sendo estimado em conjunto com as variáveis de estado tradicionais do sistema. A inclusão desses dispositivos na formulação desacoplada permite explorar seus benefícios e baixo custo computacional, viabilizando a operação em tempo real da ferramenta proposta. Os resultados apontam para uma boa aplicabilidade do método proposto, capaz de estimar com precisão e eficiência os parâmetros de controle dos TCSCs sob diferentes condições operativas.

Keywords: State Estimation; Fast Decoupled Weighted Least Squares; FACTS; Thyristor Controlled Series Capacitor; TCSC.

Palavras-chaves: Estimação de Estado; Mínimos Quadrados Ponderados Desacoplado-Rápido; FACTS Thyristor Controlled Series Capacitor; TCSC.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de semicondutores de potência expandiu o leque de possibilidades para os sistemas de potência. Entre essas estão os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), controladores baseados em dispositivos eletrônicos de potência, capazes de flexibilizar a operação dos sistemas elétricos, oferecendo uma série de vantagens quando comparados aos dispositivos de controle tradicionais baseados em mecanismos eletromecânicos (Acha *et al.*, 2004).

O controle eletrônico proporcionado pelos controladores FACTS permite controlar de forma rápida, contínua, precisa e eficiente diversas grandezas dos sistemas elétricos como: fluxos de corrente e potência, magnitudes e ângulos de fase de tensões, e também parâmetros físicos como impedâncias de linhas de transmissão e compensações de reativos (Tortelli, 2010), surgindo como uma alternativa viável para solucionar problemas tradicionalmente superados pela

construção de novas subestações, linhas de transmissão e centrais geradoras.

Nesse sentido, as ferramentas tradicionalmente utilizadas na análise, planejamento e operação da rede devem ser constantemente atualizadas para atender a novas exigências, como a incorporação dos controladores FACTS. É o caso dos estimadores de estado, ferramentas presentes na maioria dos centros de controle e operação das redes ao redor mundo (Monticelli, 1999).

A estimação de estado (EE) fornece uma estimativa do estado mais provável de operação do sistema, operando como um filtro entre as medidas obtidas da rede e as ações de controle apropriadas, que dependem de dados que reflitam com boa aproximação as condições de operação do sistema em determinado instante (Acha *et al.*, 2004).

Entre as diversas técnicas existentes para realizar a estimação de estado em sistemas de potência, os estimadores baseados na formulação desacoplado-rápido do método dos mínimos quadrados ponderados (EE-DR) foram objeto de pesquisa em diversas publicações ao longo das últimas décadas. Tal

abordagem propiciou o tipo de estimador de estado mais popular nos centros de operação e controle ao redor do mundo em função de sua eficiência computacional e precisão (Monticelli and Garcia, 1990).

A inclusão de dispositivos FACTS na formulação do problema de EE tem sido alvo de diversas pesquisas, entre as quais pode-se citar (Xu and Abur, 2004; Gomathi, Venkateshkumar and Ramachandran, 2010; Rakpenthai *et al.*, 2010; Li and Vanfretti, 2015; Chitsazan, Fadali and Trzynadlowski, 2020). No entanto, nenhuma delas explora as vantagens computacionais inerentes à formulação desacoplada do problema de EE.

Face às complexidades e dimensões cada vez maiores dos sistemas elétricos de potência, a popularização dos controladores FACTS, a grande importância atribuída à EE para a análise e operação de sistemas de potência e as grandes vantagens proporcionadas pela abordagem desacoplada-rápida, o presente trabalho propõe a extensão da abordagem linear (de Lima, Lourenço and Tortelli, 2019) para a formulação EE-DR de forma a torna-lo capaz de processar sistemas de transmissão portadores de controladores FACTS TCSC.

2. ESTIMAÇÃO DESACOPLADA-RÁPIDA – EE-DR

A estimação de estado é proposta como uma ferramenta capaz de filtrar dados redundantes e eliminar medidas incorretas a fim de proporcionar estimativas confiáveis das variáveis de estado do sistema, proporcionando análises confiáveis de contingências para que manobras de correção apropriadas sejam determinadas para cada cenário (Monticelli, 1999). Considerando a formulação tradicional do problema de EE, o conjunto de variáveis de estado de um sistema é dado por:

$$\mathbf{x} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_j \ V_1 \ V_2 \ \dots \ V_j] \quad (1)$$

onde o índice j corresponde ao número de barras, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_j$ aos ângulos de fase e V_1, V_2, \dots, V_j aos módulos das tensões nas barras.

O estimador de estado processa o conjunto de medidas transmitido aos centros de controle e operação pelo sistema de supervisão e aquisição de dados SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*. O vetor \mathbf{z} de medidas, que agrupa as informações analógicas provenientes do SCADA pode ser expresso por (Kolosok and Tikhonov, 2017):

$$\mathbf{z} = [\mathbf{P}_{flow} \ \mathbf{Q}_{flow} \ \mathbf{P}_{inj} \ \mathbf{Q}_{inj} \ \mathbf{V}_{mag}] \quad (2)$$

onde:

\mathbf{P}_{flow} e \mathbf{Q}_{flow} são os vetores de medidas de fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente; \mathbf{P}_{inj} e \mathbf{Q}_{inj} são os vetores de medidas de injeções de potência ativa e reativa, respectivamente; \mathbf{V}_{mag} é o vetor de medidas de magnitudes de tensão.

A abordagem EE-DR explora o acoplamento $P\theta/QV$ observado em sistemas de transmissão, permitindo que as contribuições relativas às potências ativa e reativa possam ser processadas de forma independente (Monticelli and Garcia, 1990). Nessa abordagem, o vetor de medidas é particionado da seguinte forma:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_A \ \mathbf{z}_R]^T \quad (3)$$

O subscrito **A** se refere às medidas de potência ativa (injeções de potência ativa nas barras e fluxo de potência ativa nos ramos) e **R** às medidas de potência reativa (injeções de potência reativa nas barras, fluxos de potência reativa nos ramos e magnitudes de tensão nas barras). A partição aplicada ao conjunto de medidas em (3) é aplicada ao modelo de medição da formulação EE-DR, que passa a ser expresso como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_A \\ \mathbf{z}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_A(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}_R(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{e}_A \\ \mathbf{e}_R \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

\mathbf{h}_A e \mathbf{h}_R são vetores de funções não lineares que relacionam as medidas às variáveis de estado; \mathbf{e}_A e \mathbf{e}_R são vetores de erros aleatórios.

Assim, a matriz **R** de covariância dos erros das medidas é definida pelas variâncias atribuídas ao medidor correspondente a cada medida, ou seja:

$$\mathbf{R} = \text{diag} \{ \sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2 \} \quad (5)$$

O índice m em (5) corresponde ao número de medidas e σ_m^2 à variância produzida pelo m -ésimo medidor. Considerando os desacoplamentos realizados em (3) e (4), a matriz de covariância dos erros das medidas pode seguir o particionamento anterior, de forma que:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_A & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

Uma solução para o problema EE-DR é obtida ao resolver iterativamente o conjunto de equações normais, dadas por (Abur and Expósito, 2004):

$$[\mathbf{G}(\mathbf{x}^v)] \Delta \mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{T} \quad (7)$$

onde **G** é a chamada matriz ganho e **T** é o vetor do lado direito, definidos como segue. A matriz ganho dada por:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{AA} & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_{RR} \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde:

$$\mathbf{G}_{AA} = [\mathbf{H}_{AA}^0]^T \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{H}_{AA}^0 \quad (9)$$

$$\mathbf{G}_{RR} = [\mathbf{H}_{RR}^0]^T \mathbf{R}_R^{-1} \mathbf{H}_{RR}^0 \quad (10)$$

O vetor **T** é definido por:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA}^T \mathbf{R}_A^{-1} \Delta \mathbf{z}'_A \\ \mathbf{H}_{RR}^T \mathbf{R}_R^{-1} \Delta \mathbf{z}'_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_A \\ \mathbf{T}_R \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde:

$$\Delta \mathbf{z}'_A = \frac{\Delta \mathbf{z}_A}{\mathbf{V}} \quad (12)$$

$$\Delta \mathbf{z}'_R = \frac{\Delta \mathbf{z}_R}{\mathbf{V}} \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{z}_A = \mathbf{z}_A - \mathbf{h}_A(\hat{\mathbf{x}}) \quad (14)$$

$$\Delta \mathbf{z}_R = \mathbf{z}_R - \mathbf{h}_R(\hat{\mathbf{x}}) \quad (15)$$

\mathbf{H}_{AA} e \mathbf{H}_{RR} são as matrizes Jacobianas de medidas dos subproblemas ativo e reativo, respectivamente. \mathbf{H}_{AA}^0 e \mathbf{H}_{RR}^0 são as matrizes Jacobianas de medidas computadas no início do processo iterativo em condições de partida flat. Tais aproximações dão origem às matrizes ganho (9) e (10), constantes e desacopladas, calculadas e decompostas em fatores triangulares apenas uma única vez. As matrizes Jacobianas de medidas são computadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA} & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}_{inj_flow}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj_flow}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Uma estimativa para o vetor de variáveis de estado, $\hat{\mathbf{x}}$, é obtida ao resolver o sistema de equações normais, de forma que os desvios dos ângulos e magnitudes das tensões nas barras são obtidos separadamente à cada meia iteração. A convergência do problema é testada em função de uma tolerância pré-estabelecida para esses dois vetores (Monticelli and Garcia, 1990).

2.2 Funções de Medição

As equações não lineares que relacionam as injeções de potência ativa e reativa nas barras às variáveis de estado são dadas por:

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (17)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (18)$$

onde:

k e m são barras comuns do sistema; V_k e V_m são os módulos das tensões nas barras k e m ; θ_k e θ_m são os ângulos das tensões nas barras k e m , e $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$; G_{km} e B_{km} são elementos das matrizes nodais de condutâncias e susceptâncias, respectivamente.

As funções de medição generalizadas para os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos do sistema são dadas por:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \\ Q_{km} = -(a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - (a_{km} V_k) V_m \\ [g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde:

a_{km} é a relação de transformação do ramo; g_{km} e b_{km} são a condutância e a susceptância série do ramo, respectivamente; φ_{km} é a defasagem angular do ramo; b_{km}^{sh} é a susceptância *shunt* do ramo. As expressões para os fluxos de potência P_{mk} e Q_{mk} são obtidas ao inverter os índices k e m em (19) e (20).

3. O TCSC - THYRISTOR-CONTROLLED SERIES CAPACITOR

O módulo monofásico básico do TCSC, mostrado na Fig. 1, é composto por um TCR conectado paralelamente a uma capacitância fixa. Um TCSC real pode conter dois ou mais desses módulos básicos conectados em série (Acha *et al.*, 2004).

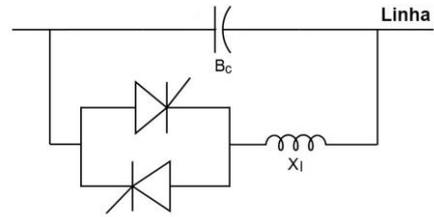


Fig. 1: Modelo monofásico simplificado do TCSC.

onde B_c é a susceptância do ramo capacitivo fixo; X_L é a reatância do ramo indutivo tiristorizado.

Em termos práticos, o modelo monofásico do TCSC pode ser representado como uma reatância equivalente variável conectada em série à uma linha de transmissão, cujo valor é ajustado automaticamente para que se mantenha um fluxo de potência especificado no ramo compensado pelo dispositivo (Acha *et al.*, 2004). O controle do ângulo de disparo do TCR permite controlar a reatância equivalente do TCSC, referida por x_{km}^{TCSC} , que pode assumir característica capacitiva ou indutiva, sendo ajustada a fim de fornecer regulação rápida e confiável no fluxo de potência ativa do ramo compensado pelo dispositivo (Tortelli, 2010).

3.1 Modelo em Regime Permanente

Considerando que um TCSC seja inserido para controlar o fluxo de potência no ramo $k-m$, uma barra de conexão adicional n é inserida no ponto de conexão entre o TCSC e o ramo, conforme ilustrado na Fig. 2.

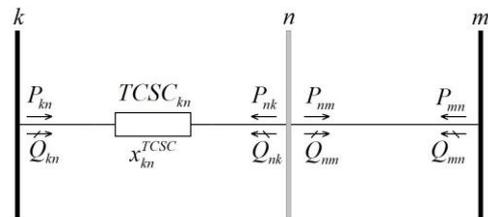


Fig. 2: TCSC responsável pelo controle do fluxo de potência ativa no ramo $k-m$.

A barra adicional n é acrescentada corresponde ao nó/barramento de conexão entre o TCSC e a linha de transmissão em que este está conectado. As expressões para os fluxos de potência ativa e reativa no ramo do controlador são dadas por:

$$P_{kn}^{TCSC} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \text{sen } \theta_{kn} \quad (21)$$

$$Q_{kn}^{TCSC} = -V_k^2 B_{kk}^{TCSC} - V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \text{cos } \theta_{kn} \quad (22)$$

onde:

$$B_{kk}^{TCSC} = B_{nn}^{TCSC} = -\frac{1}{x_{kn}^{TCSC}} \quad (23)$$

$$B_{kn}^{TCSC} = B_{nk}^{TCSC} = \frac{1}{x_{kn}^{TCSC}} \quad (24)$$

As expressões para os fluxos de potência P_{nk}^{TCSC} e Q_{nk}^{TCSC} são obtidas ao inverter os índices k e n em (21) e (22). As parcelas de injeções de potências ativa e reativa nas barras terminais do controlador, influenciadas pela reatância equivalente do dispositivo, são dadas por:

$$P_k^{TCSC} = P_{kn}^{TCSC} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \text{sen } \theta_{kn} \quad (25)$$

$$Q_k^{TCSC} = Q_{kn}^{TCSC} = -V_k^2 B_{kk}^{TCSC} - V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \text{cos } \theta_{kn} \quad (26)$$

As expressões para as parcelas de injeções de potência ativa e reativa influenciadas pela reatância equivalente do dispositivo na barra adicional n , são obtidas ao inverter os índices k e n em (25) e (26).

3.2 Incorporação do TCSC na Formulação Desacoplada-Rápida do Problema de Estimação de Estado

O desenvolvimento de um estimador de estado baseado na formulação de mínimos quadrados ponderados desacoplado-rápido, capaz de processar sistemas de transmissão que contém o controlador FACTS TCSC dá origem ao algoritmo designado por TCSC-SE, cuja formulação é apresentada a seguir. As funções das medidas tomadas no ramo controlado pelo TCSC são ajustadas em função do controle exercido pelo dispositivo. Assim, as funções de medição referentes às injeções de potência ativa e reativa nas barras terminais do TCSC passam a ser expressas por:

$$P_k = P_k^{\text{Rede}} + P_k^{TCSC} \quad (27)$$

$$Q_k = Q_k^{\text{Rede}} + Q_k^{TCSC} \quad (28)$$

P_k^{Rede} e Q_k^{Rede} são as parcelas de injeção de potência ativa e reativa influenciadas pelos elementos passivos vizinhos à k , calculadas por (17) e (18), respectivamente. As expressões para as injeções de potência na barra adicional n são obtidas ao substituir o índice k por n em (27) e (28). Por se tratar de uma barra em que não há geração ou consumo de potências, têm-se a informação de que as injeções de potência ativa e reativa na barra n são nulas. Essa característica permite o uso de medidas virtuais de injeções de potência ativa e reativa nessa barra.

Levando em consideração a injeção de potência ativa (27), a submatriz Jacobiana de medidas de injeção de potência ativa pode ser expressa pela soma de duas parcelas:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj}} = \mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}} + \mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}} \quad (29)$$

A matriz $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}}$ é computada a partir das funções de medição de injeção de potência ativa das barras comuns vizinhas à barra k correspondente ao ramo do TCSC, da mesma forma proposta na formulação EE-DR tradicional. Já a matriz $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}}$ é computada a partir da função de medição de injeção de potência ativa nos ramos terminais do TCSC, dada por:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_n^{TCSC}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_n^{TCSC}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{TCSC}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Em função de suas características operacionais, a reatância equivalente do TCSC é inserida como uma nova variável de estado do subproblema ativo do TCSC-SE. Assim, em $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}}$ são tomadas as derivadas parciais das funções de medição em relação à nova variável de estado do problema, x_{kn}^{TCSC} . O mesmo raciocínio pode ser aplicado à submatriz Jacobiana de medidas de injeção de potência reativa:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj}} = \mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}} + \mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}} \quad (31)$$

Novamente, $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}}$ é computada de acordo com a formulação EE-DR tradicional, enquanto que $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}}$ é computada em função das derivadas parciais da função de medição de injeção de potência reativa influenciada pelo controle exercido pelo TCSC, dada por:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_k^{TCSC}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_k^{TCSC}}{\partial V_n} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_n^{TCSC}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_n^{TCSC}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Por se tratar de uma variável de estado inserida no subproblema ativo, as derivadas parciais em relação à x_{kn}^{TCSC} não participam do problema reativo. As colunas nulas em (30) e (32) se referem às derivadas parciais das funções de medição de injeções de potência em relação à θ_m e V_m , respectivamente, enquanto que as linhas nulas são referentes às funções de medição de injeções de potência em m , não nulas em $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}}$ e $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}}$. A mesma divisão feita para as submatrizes Jacobianas de injeções de potência se aplica às submatrizes Jacobianas de medidas de fluxos de potência:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}} = \mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}} + \mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}} \quad (33)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow}} = \mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,Rede}} + \mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,TCSC}} \quad (34)$$

onde:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

As matrizes $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}}$ e $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,Rede}}$ são computadas em função das derivadas parciais das funções de medição de fluxos de potência no ramo $n-m$, conforme feito na formulação do método EE-DR tradicional. Novamente, as colunas nulas em (35) e (36) se referem às derivadas parciais das funções de medição de fluxos de potência em relação à θ_m e V_m , respectivamente, enquanto que as linhas nulas são referentes às funções de medição dos fluxos de potência no ramo $n-m$, não nulas em $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}}$ e $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,Rede}}$. A submatriz Jacobiana de medidas de magnitude de tensão é computada conforme a formulação EE-DR tradicional:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Vmod}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_k}{\partial V_k} & \frac{\partial V_k}{\partial V_m} & \frac{\partial V_k}{\partial V_n} \\ \frac{\partial V_m}{\partial V_k} & \frac{\partial V_m}{\partial V_m} & \frac{\partial V_m}{\partial V_n} \\ \frac{\partial V_n}{\partial V_k} & \frac{\partial V_n}{\partial V_m} & \frac{\partial V_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Conforme descrito anteriormente, o método EE-DR se destaca em termos de custo e eficiência computacionais. Essa vantagem está associada à utilização de matrizes ganho desacopladas e constantes, computadas e decompostas em fatores triangulares apenas uma vez no início do processo iterativo. A inserção da reatância equivalente do TCSC como uma nova variável de estado para o problema de EE acarreta na necessidade de atualizar os elementos das matrizes jacobianas de medidas referentes às medidas influenciadas pelo controle desempenhado pelo dispositivo. Por consequência, a utilização de matrizes ganho completamente constantes acaba por afetar as características de convergência do método proposto.

Para contornar esse problema, as matrizes jacobianas utilizadas no cálculo das matrizes ganho do TCSC-SE passam a ser compostas por duas parcelas: uma constante, computada apenas uma vez ao início do processo iterativo em condições de partida flat ($\mathbf{H}_{AA}^{\text{Rede}^0}$ e $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Rede}^0}$) e outra atualizada a cada iteração em função dos valores das reatâncias equivalentes dos controladores ($\mathbf{H}_{AA}^{\text{TCSC}}$ e $\mathbf{H}_{RR}^{\text{TCSC}}$), da seguinte forma:

$$\mathbf{H}_{AA}^0 = \mathbf{H}_{AA}^{\text{Rede}^0} + \mathbf{H}_{AA}^{\text{TCSC}} \quad (38)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^0 = \mathbf{H}_{RR}^{\text{Rede}^0} + \mathbf{H}_{RR}^{\text{TCSC}} \quad (39)$$

onde:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{TCSC}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}} \\ \mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{TCSC}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}} \\ \mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,TCSC}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (41)$$

As matrizes ganho dos subproblemas ativo e reativo são então calculadas a cada iteração por (9) e (10), respectivamente.

4. SIMULAÇÕES E TESTES

4.1 Sistema Teste e Casos de Simulação

A avaliação da metodologia proposta é feita ao aplicar o algoritmo TCSC-SE ao sistema-teste de transmissão de 118 barras do IEEE, cujos dados estão dispostos em (Christie, 1999). O conjunto de medidas fornecido ao estimador é obtido pela solução do problema do fluxo de carga para sistemas com TCSC. A fim de simular os erros intrínsecos ao processo de medição, comuns em sistemas de transmissão reais, erros aleatórios classificados como ruído normal são inseridos no conjunto de medidas fornecido ao estimador, conforme a metodologia apresentada em (Coelho, Portelinha and Lourenço, 2016). Assim, os valores das variáveis de estado determinados pelo cálculo do fluxo de potência são usados como referência para validação dos valores estimados pelo algoritmo TCSC-SE.

Em função da sua natureza, pressupõe-se que os TCSCs sejam instalados em “ramos críticos”, cujas capacidades de transmissão de potência ativa deseja-se controlar. No presente trabalho são considerados críticos os ramos em que os fluxos de potência ativa em condições normais de operação mais se aproximam do limite teórico de transmissão de potência ativa, dado pelo inverso da reatância do ramo em pu. Os ramos críticos do sistema sob análise são identificados como 3–12, 25–27 e 24–70.

Os casos de simulação são obtidos ao especificar os fluxos de potência ativa dos ramos críticos em valores inferiores e superiores aos do caso base, em que não há controladores FACTS no sistema. Na Tabela 1 são apresentados os fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos em cada cenário de simulação do TCSC-SE. Os valores estão expressos em pu.

Tabela 1. Fluxos de potência ativa especificados em cada caso de simulação para o sistema IEEE 118 barras

P_{crit}^{esp}	Base	Caso I-1	Caso I-2	Caso C-1	Caso C-2
P_{3-12}^{esp}	1,3007	1,1706	1,1056	1,4308	1,4958
P_{25-27}^{esp}	1,3558	1,2202	1,1524	1,4914	1,5592
P_{24-70}^{esp}	0,6688	0,6019	0,5685	0,7357	0,7691

Em todas as simulações realizadas, considera-se a existência de medidas de magnitude de tensão e injeções de potência ativa e reativa em todas as barras de geração, bem como nas barras de carga com maiores quantidades de potência demandada. Além disso, considera-se a existência de pelo menos uma medida de fluxo de potência ativa e/ou reativa em cada um dos ramos do sistema.

Os resultados obtidos para os quatro casos apresentados na Tabela 1 são apresentados nas próximas subseções. O número de iterações indicado foi obtido considerando uma tolerância de 10^{-4} . Em razão do porte do sistema, são apresentados apenas os resultados obtidos para as reatâncias equivalentes dos TCSCs e variáveis de estado associadas às suas barras terminais e barras vizinhas.

4.2 Caso Base

No Caso Base, considera-se que não há controladores FACTS no sistema. Dessa forma, o algoritmo TCSC-SE fornecerá uma estimativa para as variáveis de estado tradicionais do sistema. Ambos os valores, de referência calculados pelo fluxo de potência e os estimados pelo algoritmo TCSC-SE, são apresentados na Tabela 2. Nesse caso de simulação o TCSC-SE obteve a solução convergida em seis meias-iterações ativas e cinco meias-iterações reativas.

Tabela 2. Resultados para o caso base do sistema IEEE 118 barras

Barra	V_{calc} (pu)	V_{est} (pu)	θ_{calc} (rad)	θ_{est} (rad)
3	0,99261	0,99269	-0,15700	-0,15699
12	0,99000	0,99008	-0,39020	-0,39016
24	0,99200	0,99208	-0,76627	-0,76614
25	1,05000	1,05006	-0,50646	-0,50637
27	0,96800	0,96807	-0,71296	-0,71285
70	0,98400	0,98408	-1,05487	-1,05467

Os resultados apresentados na Tabela 2 permitem verificar que o TCSC-SE é capaz de obter uma boa estimativa para as variáveis de estado do sistema no caso em que não há TCSCs nos ramos críticos. A comparação numérica entre os resultados calculados e estimados permite verificar a eficiência do método para esse caso de simulação.

4.3 Caso I-1

No Caso I-1, os fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos são 10% inferiores aos obtidos no caso base. Nesse sentido, espera-se que as reatâncias equivalentes dos TCSCs assumam característica indutiva, elevando o comprimento elétrico dos ramos controlados a fim de limitar o fluxo de potência ativa que flui nos mesmos. Os resultados obtidos para o caso I-1 são apresentados na Tabela 3. Nesse caso de simulação o TCSC-SE obteve a solução convergida em oito meias-iterações ativas e sete meias-iterações reativas.

Tabela 3. Resultados para o caso I-1 do sistema IEEE 118 barras

Barra	V_{calc} (pu)	V_{est} (pu)	θ_{calc} (rad)	θ_{est} (rad)
3	0,99028	0,99014	-0,15344	-0,15349
12	0,99000	0,98990	-0,40390	-0,40405
24	0,99200	0,99191	-0,77140	-0,77164
25	1,05000	1,04994	-0,50859	-0,50880
27	0,96800	0,96792	-0,73641	-0,73664
70	0,98400	0,98390	-1,07628	-1,07659
119	0,99770	0,99760	-0,20398	-0,20406
120	1,04090	1,04082	-0,54852	-0,54874
121	0,98816	0,98807	-0,81892	-0,81915
$TCSC_{crit}$	x_{calc}^{TCSC} (pu)	x_{est}^{TCSC} (pu)		
3-12	0,04263	0,04265		
25-27	0,03575	0,03576		
24-70	0,07735	0,07733		

Os resultados apresentados na Tabela 3 demonstram que o TCSC-SE é capaz de estimar as variáveis de estado do sistema com boa precisão. O mesmo ocorre para as barras de conexão associadas aos TCSCs, identificadas pelos números 119, 120 e 121. Verifica-se um aumento de duas meias-iterações ativas e reativas necessárias para a convergência do TCSC-SE quando comparado ao caso base. Isso reflete o aumento de complexidade inerente à inserção das reatâncias equivalentes dos TCSCs como novas variáveis de estado na formulação do problema.

4.4 Caso I-2

No Caso I-2, os fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos são 20% inferiores aos obtidos no caso base. Os resultados obtidos para o caso I-2 do sistema são apresentados na Tabela 4. Nesse caso de simulação o TCSC-SE obteve a solução convergida em oito meias-iterações ativas e sete meias-iterações reativas.

Tabela 4. Resultados para o caso I-2 do sistema IEEE 118 barras

Barra	V_{calc} (pu)	V_{est} (pu)	θ_{calc} (rad)	θ_{est} (rad)
3	0,98961	0,98956	-0,15228	-0,15232
12	0,99000	0,98997	-0,40919	-0,40928
24	0,99200	0,99197	-0,77304	-0,77317
25	1,05000	1,05000	-0,50855	-0,50868
27	0,96800	0,96799	-0,74705	-0,74718
70	0,98400	0,98401	-1,08530	-1,08541
119	0,99892	0,99890	-0,22091	-0,22099
120	1,03644	1,03641	-0,56864	-0,56877
121	0,98681	0,98680	-0,84216	-0,84230
$TCSC_{crit}$	x_{calc}^{TCSC} (pu)	x_{est}^{TCSC} (pu)		
3-12	0,06131	0,06132		
25-27	0,05671	0,05671		
24-70	0,11892	0,11895		

A análise dos resultados apresentados na Tabela 4 indica que, novamente, o TCSC-SE foi capaz de estimar as variáveis de estado do sistema com boa precisão. Ao comparar os resultados apresentados na Tabela 4 com os resultados obtidos para o caso I-1, verifica-se que não há alterações significativas nas características de convergência do TCSC-SE. Não obstante, o aumento na complexidade do problema de EE causado pela inserção das novas variáveis de estado se mantém evidente quando os números de meias-iterações necessárias para obtenção das soluções nos casos indutivos são comparados aos do caso base.

4.5 Caso C-1

Com o intento de verificar a aplicabilidade do TCSC-SE para os casos em que os controladores operam na região capacitiva, procede-se com a simulação para o caso C-1, em que os fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos são 10% superiores aos do caso base. Espera-se que as reatâncias equivalentes dos controladores se ajustem de forma a reduzir o comprimento elétrico dos ramos críticos, elevando as capacidades de transmissão dos mesmos. Os resultados obtidos para o caso C-1 são apresentados na Tabela 5. Para esse caso de simulação, o TCSC-SE obteve a solução convergida treze meias-iterações ativas e doze meias-iterações reativas.

Tabela 5. Resultados para o caso C-1 do sistema IEEE 118 barras

Barra	V_{calc} (pu)	V_{est} (pu)	θ_{calc} (rad)	θ_{est} (rad)
3	0,99394	0,99416	-0,15868	-0,15859
12	0,99000	0,99014	-0,38416	-0,38398
24	0,99200	0,99212	-0,76686	-0,76655
25	1,05000	1,05010	-0,51058	-0,51034
27	0,96800	0,96810	-0,69609	-0,69582
70	0,98400	0,98413	-1,04208	-1,04171
119	0,98937	0,98966	-0,13560	-0,13563
120	1,05915	1,05925	-0,47133	-0,47112
121	0,99597	0,99610	-0,72837	-0,72806
$TCSC_{crit}$	x_{calc}^{TCSC} (pu)	x_{est}^{TCSC} (pu)		
3-12	-0,01586	-0,01580		
25-27	-0,02926	-0,02924		
24-70	-0,05168	-0,05168		

Os resultados apresentados na Tabela 5 permitem verificar que o TCSC-SE é capaz de estimar as variáveis de estado do sistema com boa precisão no caso em que os controladores presentes no sistema operam para elevar moderadamente a capacidade de transmissão dos ramos controlados. Em comparação aos casos indutivos, o aumento de cinco meias-iterações ativas e reativas necessárias para a obtenção da solução convergida no caso C-1 indica que as características de convergência do TCSC-SE foram afetadas.

O impacto nas características de convergência do TCSC-SE se evidencia pelo aumento de 5 meias-iterações ativas e 5 meias-iterações reativas se comparado ao caso I-1. Isso pode ser justificado pois, ao operar na região capacitiva, o TCSC

reduz (em módulo) a reatância equivalente do ramo em que está inserido, reduzindo também sua relação X/R . Isso acaba por afetar a característica de convergência do TCSC-SE, que está sujeito às mesmas limitações dos métodos desacoplados tradicionalmente empregados na análise e operação de sistemas elétricos de potência.

4.6 Caso C-2

A fim de verificar a aplicabilidade do TCSC-SE para um caso de compensação capacitiva ainda maior, é realizada a simulação para o caso C-2, em que os controladores devem elevar a capacidade de transmissão das linhas controladas em 20%. Os resultados obtidos para o caso C-2 são apresentados na Tabela 6. Para esse caso de simulação o TCSC-SE obteve a solução convergida em treze meias-iterações ativas e doze meias-iterações reativas.

Tabela 6. Resultados para o caso C-2 do sistema IEEE 118 barras

Barra	V_{calc} (pu)	V_{est} (pu)	θ_{calc} (rad)	θ_{est} (rad)
3	0,99514	0,99539	-0,16014	-0,16008
12	0,99000	0,99017	-0,37959	-0,37946
24	0,99200	0,99215	-0,76622	-0,76596
25	1,05000	1,05014	-0,51153	-0,51136
27	0,96800	0,96815	-0,68658	-0,68634
70	0,98400	0,98416	-1,03401	-1,03367
119	0,98622	0,98659	-0,11819	-0,11832
120	1,06369	1,06383	-0,45282	-0,45265
121	0,99849	0,99863	-0,70642	-0,70619
$TCSC_{crit}$	x_{calc}^{TCSC} (pu)	x_{est}^{TCSC} (pu)		
3-12	-0,02752	-0,02741		
25-27	-0,04203	-0,04204		
24-70	-0,07697	-0,07696		

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6 pode-se verificar que o TCSC-SE foi capaz de estimar correta e precisamente as variáveis de estado do sistema no caso C-2, com desempenho similar ao obtido no caso C-1, uma vez que os números de meias-iterações ativas e reativas necessárias para obtenção da solução convergida manteve-se inalterado. Apesar disso, o impacto nas características de convergência do TCSC-SE para os casos em que os controladores operam no modo capacitivo ainda é significativo e bem evidente.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um novo estimador de estado baseado na formulação EE-DR, capaz de processar sistemas de transmissão com controladores TCSC. As características operacionais e funcionais do TCSC favorecem o desacoplamento do problema, de modo que sua reatância equivalente é inserida como uma variável de estado no problema ativo do método EE-DR, dando origem formulação proposta, designada por TCSC-SE.

A aplicabilidade do TCSC-SE é verificada com base nas simulações conduzidas no sistema IEEE 118 barras. Em

todos os casos simulados, a metodologia proposta foi capaz de estimar com grande precisão as magnitudes e ângulos das tensões nas barras em conjunto com as reatâncias equivalentes dos controladores sob diferentes condições operativas.

Os resultados confirmam que as aproximações inseridas no cálculo da matriz ganho do TCSC-SE não comprometem a precisão do método, porém podem desacelerar sua convergência. Ainda assim, a versão desacoplada proposta se apresenta como uma alternativa bem mais atrativa do ponto de vista computacional se comparada à formulação tradicional completa.

Assim como o método EE-DR tradicional, as características de convergência do TCSC-SE são fortemente dependentes do acoplamento $P\theta/QV$ e da relação X/R dos ramos do sistema, limitando sua aplicação aos sistemas de transmissão. Essa limitação fica evidente nos casos de simulação capacitivos (C-1 e C-2), onde as características de convergência do TCSC-SE sofrem impacto significativo em função da compensação série capacitiva fornecida pelos TCSCs.

As variáveis de estado associadas às barras adicionais de conexão dos controladores, estimadas pelo TCSC-SE, fornecem informações relevantes ao operador sem que sejam necessários cálculos adicionais após a obtenção de uma solução convergida para o problema de EE. Tais informações são úteis para que seja verificada a queda de tensão provocada pelo dispositivo, bem como o nível de compensação reativa fornecida pelo mesmo, por exemplo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – e ao Ministério da Educação do Brasil por fornecerem apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Abur, A. and Expósito, A. G. (2004) *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. 1st edn, Power Engineering. 1st edn. Boca Raton: CRC Press.
- Acha, E. et al. (2004) *FACTS: modelling and simulation in power networks*, Wiley-Blackwell, New York. Edited by Wiley-Blackwell. New York.
- Chitsazan, M. A., Fadali, M. S. and Trzynadlowski, A. M. (2020) ‘State Estimation for Large-Scale Power Systems and FACTS Devices Based on Spanning Tree Maximum Exponential Absolute Value’, *IEEE Transactions on Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 35(1), pp. 238–248. doi: 10.1109/TPWRS.2019.2934705.
- Christie, R. D. (1999) *Power System Test Case Archive*, University of Washington. Available at: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/>.
- Coelho, C. S. S., Portelinha, R. K. and Lourenço, E. M. (2016) ‘Gerador de medidas trifásico para estudos de estimação de estados em sistemas de distribuição emergentes’, in *IEEE Induscon 2016*. Curitiba: IEEE Induscon 2016, p. 6.
- Gomathi, V., Venkateshkumar, C. and Ramachandran, V. (2010) ‘State Estimation of Power System with Interline Power Flow Controller’, *ACEEE International Journal on Electrical and Power Engineering*, 1(2), pp. 56–60.
- Kolosok, I. N. and Tikhonov, A. V. (2017) ‘Identification of parameters of the FACTS models for power system state estimation’, *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings*, pp. 0–5. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076262.
- Li, W. and Vanfretti, L. (2015) ‘A PMU-based state estimator for networks containing FACTS devices’, in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/PTC.2015.7232725.
- de Lima, L. F. G. S., Lourenço, E. M. and Tortelli, O. L. (2019) ‘State Estimation of Power Systems With TCSCs Using the Linearized WLS Algorithm’, in *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895436.
- Monticelli, A. (1999) *State Estimation in Electric Power Systems: a Generalized Approach*. 1st edn. New York: Springer.
- Monticelli, A. and Garcia, A. (1990) ‘Fast Decoupled State Estimators’, *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(2), pp. 556–564. doi: 10.1109/59.54566.
- Rakpenthai, C. et al. (2010) ‘An interior point method for WLAV state estimation of power system with UPFCs’, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Elsevier, 32(6), pp. 671–677. doi: 10.1016/j.ijepes.2009.11.026.
- Tortelli, O. L. (2010) *Alocação e Operação de Controladores FACTS em Sistemas Elétricos de Potência*. Universidade Estadual de Campinas.
- Xu, B. and Abur, A. (2004) ‘State estimation of systems with UPFCs using the interior point method’, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3), pp. 1635–1641. doi: 10.1109/TPWRS.2004.831703.