

Avaliação e Aprimoramento de Metodologias para Representação de CER no Problema de Fluxo de Potência

João Pedro Peters Barbosa * João Alberto Passos Filho *

* Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: joao.peters@ieee.org, joao.passos@ufjf.br).

Abstract: This paper discusses, through a review of the main methodologies, the representation of static var compensators (SVCs) in the power flow problem. One of the methodologies, consisting of a *full* Newton formulation of the problem, considers the thyristor's firing angle as a state variable. The other methodology, also in *full* Newton formulation, proposes a model in which the SVC is represented considering the reactive power injected into the bus as a state variable. Furthermore, an improvement to the firing angle methodology is proposed in order to consider the voltage *droop* in the SVC's linear region of operation. All methodologies are validated through the study of two test systems. The first system is a 3 bus tutorial system and the second is the well-known IEEE 118 bus system. The results presented validate the methodologies under study and the improvement in the equation of the linear region of operation for the first methodology.

Resumo: Este artigo discute, por meio de revisão das principais metodologias, a representação de compensadores estáticos de potência reativa (CERs) no problema de fluxo de potência. Uma das metodologias, consistindo em uma formulação *full* Newton do problema, considera como variável de estado o ângulo de disparo dos tiristores. Já a outra metodologia, também em formulação *full* Newton, propõe um modelo no qual o CER é representado considerando a potência reativa injetada na barra como variável de estado. Além disso, é proposto um aprimoramento para a metodologia de ângulo de disparo de forma a se considerar o *droop* de tensão para a região linear de operação do CER. Todas as metodologias são validadas através do estudo de dois sistemas teste. O primeiro sistema é um sistema tutorial de 3 barras e o segundo é o conhecido sistema IEEE 118 barras. Os resultados apresentados validam as metodologias em estudo e o aprimoramento na equação da faixa linear de operação da primeira metodologia.

Keywords: Static VAR Compensator; Newton-Raphson Method; Power Flow; Control Device; FACTS; Voltage Control.

Palavras-chaves: Compensador Estático Reativo; Método de Newton-Raphson; Fluxo de Potência; Dispositivo de Controle; FACTS; Controle de Tensão.

1. INTRODUÇÃO

Estudos de Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) em regime permanente analisam diversas condições de operação e carregamento e, de forma a obter soluções para o funcionamento apropriado desses SEPs, nas mais variadas topologias, faz-se necessário o emprego de técnicas computacionais precisas e eficientes (Stott, 1974). A aplicação dessas técnicas computacionais na análise de fluxo de potência de SEPs fornece informações valiosas a respeito da magnitude das tensões e fases dos barramentos, resultados esses sujeitos ao cenário de geração, carga e topologia do sistema elétrico em estudo (da Costa et al., 1999).

De posse dos resultados da análise de fluxo de potência, pode-se dizer que, do ponto de vista de controle de tensão, um SEP possui condição operativa confiável sempre que os valores de magnitude de tensão de todos os barramentos variam entre limites mínimo e máximo pré-estabelecidos. No entanto, para atingir essa condição é necessário um

controle preciso sobre o fluxo, produção e absorção de potência reativa no sistema (Kundur, 1994; Ambriz-Perez et al., 2000).

Em se tratando de regulação de tensão, o Compensador Estático de Potência Reativa (CER) é um dos equipamentos elétricos capazes de participar ativamente dessa questão. Por meio de injeção ou absorção de potência reativa, condições sujeitas às características de topologia e demanda do SEP em que se encontra, a operação de um CER resulta em uma melhora significativa nas margens de estabilidade de tensão de barras específicas do SEP (Miller et al., 1982; Perez et al., 2000). Portanto, realizar uma modelagem precisa a respeito do funcionamento desse equipamento garante a obtenção de resultados mais confiáveis quanto à operação de SEPs.

Os CERs são dispositivos de controle relativamente recentes e fazem parte da família de equipamentos FACTS (do inglês *Flexible AC Transmission Systems*). Em uma modelagem mais tradicional do fluxo de potência, CERs são

retratados como Compensadores Síncronos. Esse modelo é considerado válido apenas para o caso em que a injeção ou absorção de potência reativa do equipamento está dentro dos limites do equipamento. Sabe-se, no entanto, que o CER pode atuar nas regiões limites de injeção ou absorção de potência reativa e, para isso, faz-se necessário o emprego de modelos mais precisos para esse equipamento.

De forma a atacar essa questão Ambriz-Perez et al. (2000) propõem dois novos modelos para o CER. Dentre eles, o de maior destaque se baseia no ângulo de disparo do tiristor presente no equipamento. Contando que a reatância equivalente do equipamento varia em função do ângulo de disparo do tiristor, tal modelo ajusta esse valor de reatância a depender da região operativa em que o dispositivo se encontra. Entretanto, simplificações quanto ao modelo do CER ainda são observadas neste trabalho.

Analogamente, outros modelos para representação de CERs no problema de fluxo de potência são encontrados na literatura. Examinando as curvas características de tensão do barramento controlado por corrente ou potência reativa injetada pelo CER na rede elétrica, Passos Filho (2000) propõe modelos em que o CER é representado por equações que descrevem suas três regiões operativas (capacitiva, linear e indutiva). Tanto para o caso da corrente quanto da potência reativa injetada pelo CER como nova variável de estado do problema de fluxo de potência, esses modelos foram validados e são atualmente empregados em simulações do programa ANAREDE, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

Considerando a complexidade na representação de equipamentos de controle na análise de fluxo de potência, o presente trabalho propõe um aprimoramento na modelagem de CER por ângulo de disparo desenvolvida por Ambriz-Perez et al. (2000). É apresentada uma contribuição na equação referente à potência reativa fornecida pelo CER de forma a considerar o *droop* de tensão da região operativa linear, destacada por Passos Filho (2000), no controle de tensão da barra controlada pelo equipamento.

Comparativamente, as metodologias desenvolvidas por Ambriz-Perez et al. (2000) e Passos Filho (2000) cumprem em sua totalidade com o objetivo de representação do dispositivo de controle na análise de fluxo de potência de SEPs. No entanto, a metodologia desenvolvida por Ambriz-Perez et al. (2000) é mais indicada em estudos de fluxo de potência voltados para análises de harmônicos e transitórios eletromagnéticos uma vez que tem-se conhecimento sobre a variável de ângulo de disparo do tiristor.

Além disso, o *droop* de tensão é uma característica importante a ser considerada na modelagem de CERs. Isso porque o equipamento é normalmente empregado com o objetivo de controlar barra com o perfil de tensão mais crítico do SEP em análise e, durante a operação de controle, a corrente, susceptância e potência reativa do CER variam em conformidade com o *droop* considerado (Taylor et al., 1994). Em geral, adotam-se valores entre 1% a 5% para a variável de *droop* (Taylor et al., 1994).

Neste trabalho é implementada a abordagem *full* Newton para representação dos CERs no problema de fluxo de potência, na qual as equações linearizadas do modelo são incorporadas à matriz Jacobiana. A metodologia proposta

foi avaliada em dois sistemas testes, sendo um sistema tutorial de 3 Barras e o sistema de médio porte IEEE 118 Barras. Os resultados encontrados foram validados via programa ANAREDE e comprovam a eficácia do aprimoramento realizado na metodologia de ângulo de disparo.

O presente trabalho será dividido da seguinte forma: na Seção 2 serão revisadas as principais metodologias para representação de CERs no problema de fluxo de potência. A metodologia proposta será apresentada na Seção 3, destacando a contribuição realizada para a metodologia de representação de CER por ângulo de disparo. Na Seção 4 serão apresentados os resultados, sendo realizada a validação das metodologias tradicionais e proposta com o programa ANAREDE. Por fim, na Seção 5 será apresentada as principais conclusões a respeito do trabalho e resultados obtidos.

2. METODOLOGIAS TRADICIONAIS

O surgimento do CER se deu por avanços tecnológicos na área de eletrônica de potência, por meio dos equipamentos FACTS, conforme mencionado anteriormente. Essa família de dispositivos elétricos de controle permitiu um aprimoramento na segurança e eficiência da operação de SEPs (Mathur and Varma, 2002). A respeito da configuração elétrica do CER, o equipamento é formado por uma reatância variável que é ajustada para as condições de injeção ou absorção de potência reativa da rede elétrica. Por conta da presença de tiristores, o CER possui rápida resposta de controle no suporte à regulação de tensão de SEPs (Kundur, 1994; Ambriz-Perez et al., 2000; Perez et al., 2000; Taylor et al., 1994).

Dentre as diversas topologias de CERs existentes na literatura, a FC-TCR (do inglês *Fixed-Capacitor Thyristor-Controlled Reactor*) é uma das mais empregadas em estudos e pesquisa (Kundur, 1994; Ambriz-Perez et al., 2000). Essa topologia pode ser vista em maior detalhe na Figura 1, em que o CER está conectado em derivação a um barramento de alta tensão (HVAC, do inglês *High Voltage Alternating Current*) de um SEP.

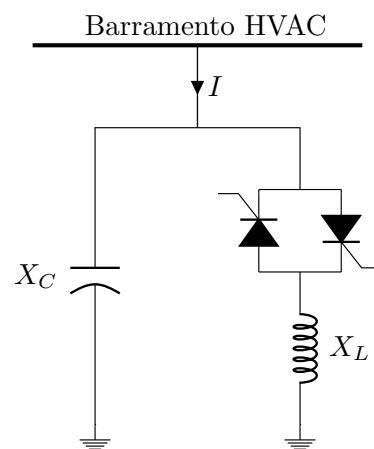


Figura 1. Topologia FC-TCR do CER.

A partir das características topológicas e operacionais desse equipamento foram desenvolvidos modelos matemáticos que descrevem seu funcionamento em SEPs. Dentre

os modelos existentes, serão apresentados nas subseções a seguir duas modelagens de maior relevância encontrados na literatura.

2.1 Modelagem do CER por ângulo de disparo

Conforme observado pela Figura 1, o tiristor conectado em série com a reatância indutiva é responsável por ajustar o valor dessa reatância e, consequentemente, o valor da reatância total equivalente do dispositivo de controle em função das características do SEP no qual o equipamento se encontra.

Sendo assim, Ambriz-Perez et al. (2000) propuseram a modelagem do CER, por injeção de potência reativa, tendo em vista as equações que representam a reatância em função do ângulo de disparo do tiristor. Admitindo α como a variável de ângulo de disparo do tiristor, que varia linearmente entre 90° e 180° , a reatância indutiva equivalente para o equipamento na frequência fundamental é descrita por Kundur (1994); Miller et al. (1982) como:

$$X_{Leq}(\alpha) = \frac{X_L \cdot \pi}{2 \cdot (\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha)}, \quad (1)$$

de forma que a reatância total equivalente do dispositivo de controle é dada por:

$$X_{eq}(\alpha) = \frac{X_C \cdot X_L}{\frac{X_C}{\pi} \cdot [2 \cdot (\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha)] - X_L}. \quad (2)$$

Em (2), é possível observar a relação da reatância total equivalente X_{eq} em função do ângulo de disparo α . Essa relação é representada graficamente pela Figura 2, na qual a reatância do CER apresenta comportamento predominante indutivo para a região à esquerda da assíntota positiva e comportamento predominante capacitivo para a região à direita da assíntota negativa. Além disso, a depender da razão entre as reatâncias capacitiva e indutiva que compõem o CER, o mesmo apresenta ressonância em regime permanente para um dado valor de α . Para o exemplo da Figura 2, o valor de ressonância é observado para ângulo α^0 igual a 113.83° , considerando reatâncias capacitiva e indutiva com valores absolutos iguais a 50Ω e 25Ω , respectivamente.

Para o problema de fluxo de potência, no entanto, é de interesse obter uma expressão para a susceptância equivalente do equipamento. No modelo em questão, considerando a convenção positiva para a potência reativa injetada na rede, a susceptância equivalente é dada por:

$$B_{eq}(\alpha) = -\frac{\frac{X_C}{\pi} \cdot [2 \cdot (\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha)] - X_L}{X_C \cdot X_L}. \quad (3)$$

Da mesma forma como feito para (2) na Figura 2, a característica da susceptância equivalente B_{eq} em função do ângulo de disparo α é exemplificada graficamente pela Figura 3. Em comparação com a Figura 2, é possível observar que a susceptância equivalente apresenta comportamento contínuo. Isso permite uma melhor linearização do modelo do CER quando incorporado na matriz Jacobiana.

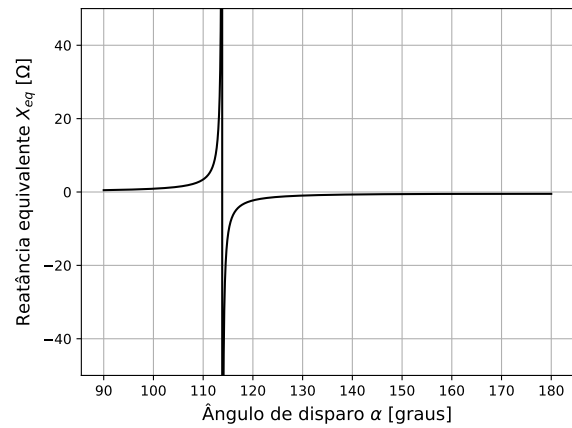


Figura 2. Reatância equivalente do CER em função do ângulo de disparo do tiristor.

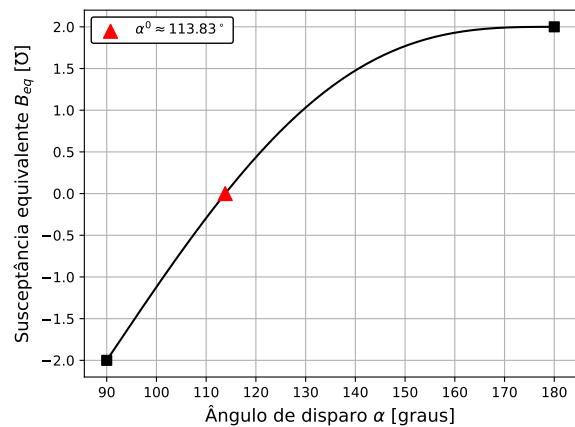


Figura 3. Susceptância equivalente do CER em função do ângulo de disparo do tiristor.

Em destaque na Figura 3 são observados pontos em formato de triângulo e quadrado ao longo do gráfico. O ponto triangular está relacionado ao ângulo α^0 em que ocorre a ressonância em regime permanente e também correspondente à susceptância equivalente nula. Para esse valor de ângulo de disparo o CER não injeta nem absorve potência reativa da rede. Já os pontos em formatos de quadrados estão relacionados aos ângulos de disparos mínimo e máximo, que são equivalentes às potências reativas mínima e máxima para a tensão de barra igual a $1 p.u.$, respectivamente.

A partir da equação (3), a potência reativa injetada ou absorvida pelo CER conectado à barra k é determinada por:

$$Q_{gk} = V_k^2 \cdot B_{eq}(\alpha), \quad (4)$$

tal que, sua implementação no problema de fluxo de potência é realizada sem equação de controle adicional, substituindo apenas a variável de estado V por α . Como resultado de linearização de (4), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{gk} \\ \Delta Q_{gk} \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q_{gk}}{\partial \alpha} \end{bmatrix}^i \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \end{bmatrix}^i, \quad (5)$$

em que i corresponde à iteração atual do processo iterativo e:

$$\frac{\partial Q_{gk}}{\partial \alpha} = \frac{2 \cdot V_k^2}{X_L} \cdot (1 - \cos(2\alpha)). \quad (6)$$

Ao final de cada iteração, a variável de estado α é atualizada e calcula-se o novo valor para a susceptância equivalente em (3).

Adicionalmente, de forma a compreender melhor o comportamento operativo do CER, é possível traçar um gráfico que relaciona a magnitude de tensão da barra controlada V_m em função da potência reativa injetada ou absorvida por esse equipamento conectado a uma barra k (Q_{gk}). Sabendo-se que o comportamento operativo do CER depende diretamente da condição operativa do SEP em que se encontra, essa característica operacional do dispositivo de controle é melhor representada na Figura 4.

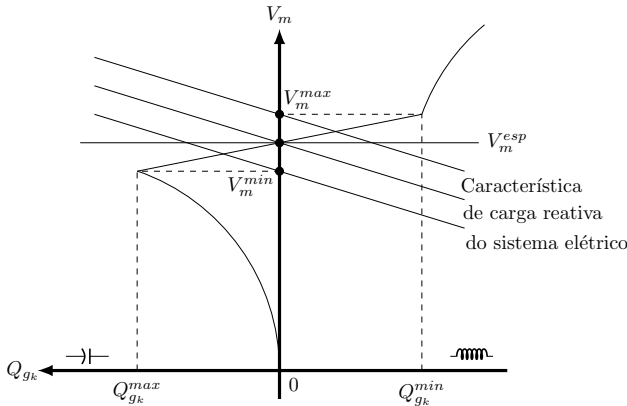


Figura 4. Característica de tensão controlada por potência reativa do CER.

A partir desse gráfico foi desenvolvida a modelagem do CER por injeção de potência reativa (Passos Filho, 2000). Mais detalhes sobre essa modelagem são apresentados a seguir.

2.2 Modelagem do CER por injeção de potência reativa

Na Figura 4 é possível visualizar as três regiões operativas distintas do CER. A região na qual a característica capacitiva é predominante é delimitada pelo valor de potência reativa máxima (Q_{gk}^{max}) e magnitude de tensão mínima da barra controlada (V_m^{min}). Já a região na qual a característica indutiva é predominante, o limite é dado pela potência reativa mínima (Q_{gk}^{min}) e tensão máxima da barra controlada (V_m^{max}). Por sua vez, a região com característica predominante linear está limitada pelas regiões capacitiva e indutiva e apresenta uma leve inclinação (ou *droop*).

Em se tratando de uma operação ideal, o CER é capaz de atender ao valor de tensão especificada da barra controlada (V_m^{esp}) para quaisquer valores de potência reativa. No entanto, por conta de restrições físicas, isso não ocorre, prevalecendo o *droop* de tensão da região linear.

O modelo do CER por ângulo de disparo permite que a característica operativa da Figura 4 seja observada. Porém, não é possível ajustar o comportamento da região linear para diferentes valores de tensão mínima e máxima do barramento controlado. Por isso, fez-se necessário adaptar o modelo presente.

Considerando agora as modelagens de CER elaborado por Passos Filho (2000), essa mesma restrição não é observada. Os modelos propõem equações referentes às regiões operativas do equipamento tais quais permanece ativa apenas a que expressa o comportamento do CER em determinado momento operativo. Para a modelagem considerando a potência reativa como nova variável de estado, as equações que regem o comportamento do CER nas regiões indutiva, linear e capacitiva observadas na Figura 4 são expressas respectivamente por:

$$Q_{gk} = B_{min} \cdot V_k^2, \quad (7)$$

$$V_m = V_m^{esp} + r \cdot Q_{gk}, \quad (8)$$

$$Q_{gk} = B_{max} \cdot V_k^2, \quad (9)$$

tal que:

$$B_{min} = B_{eq}(\alpha = 90^\circ) = \frac{Q_{gk}^{min}}{(V_k^{max})^2}, \quad (10)$$

$$B_{max} = B_{eq}(\alpha = 180^\circ) = \frac{Q_{gk}^{max}}{(V_k^{min})^2}. \quad (11)$$

Do conjunto de equações detalhadas acima, tem-se que V_k , V_k^{max} e V_k^{min} como a tensão nodal, máxima e mínima do barramento k ao qual o CER está conectado. Em (8) a variável “ r ” que confere o *droop* de tensão da região linear é expressa por:

$$r = \frac{V_m^{min} - V_m^{max}}{Q_{gk}^{max} - Q_{gk}^{min}}. \quad (12)$$

Considerando que para a modelagem do CER as potências reativas mínima e máxima são conhecidas, determinar um valor para a variável de *droop* “ r ” permite adequar a operação do CER na regulagem de tensão da barra controlada (Taylor et al., 1994). É por meio dessa variável que o modelo do CER por ângulo de disparo será aperfeiçoado, sendo apresentado na próxima seção.

A metodologia descrita é resumida através da equação genérica (13) que representa o sistema linear resolvido a cada iteração do método de Newton-Raphson.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & \frac{\partial P}{\partial x} \\ M & L & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (13)$$

Os elementos das submatrizes H , N , M e L com dimensão $(nb \times nb)$, são dados pelas derivadas de \underline{P} em relação a $\underline{\theta}$ e \underline{V} e \underline{Q} em relação a $\underline{\theta}$ e \underline{V} , respectivamente, como descrito em Stott and Alsac (1974). \underline{x} são as novas variáveis de

estado consideradas e y as correspondentes equações de controle. A equação de controle é definida em função da faixa de operação capacitiva, linear ou indutiva.

3. MODELAGEM POR ÂNGULO DE DISPARO APRIMORADA

Dada a modelagem do CER por ângulo de disparo desenvolvida por Ambriz-Perez et al. (2000), determina-se como objetivo do CER o controle de tensão de uma barra m do SEP em estudo a um valor especificado (V_m^{esp}). Para isso, são elaboradas equações de controle que adequam o comportamento operativo do equipamento. Para as regiões capacitiva e indutiva, a equação de controle a ser implementada é expressa por:

$$y = \alpha - \alpha_{lim}, \quad (14)$$

sendo que para essas regiões o valor de α é igual ao valor de α_{lim} (90° ou 180°).

Já para a região linear, a equação de controle adotada se baseia em (8) e é expressa por:

$$y = V_m - V_m^{esp} - r \cdot Q_{gk}. \quad (15)$$

Em se tratando da abordagem *full* Newton, as equações de controle também são linearizadas e incorporadas ao sistema de equações do problema de fluxo de potência. A depender da região operativa em que o CER se encontra, diferentes resultados de linearização da equação de controle são obtidos. Para as regiões capacitiva ou indutiva, a equação de controle em (14) é linearizada por:

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha} = 1. \quad (16)$$

Já para a região linear, dada a equação de controle em (15), a linearização resultante é:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial V_m} = 1, \\ \frac{\partial y}{\partial V_k} = -2 \cdot r \cdot V_k \cdot B_{eq}(\alpha), \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha} = -r \cdot \frac{2 \cdot V_k^2}{X_L} \cdot (1 - \cos(2\alpha)). \end{cases} \quad (17)$$

Vale ressaltar algumas observações quanto às derivadas da potência reativa do CER. A derivada $\partial Q_{gk}/\partial \alpha$ deve ser incorporada com valor negativo à matriz Jacobiana. Da mesma forma, a derivada $\partial Q_{gk}/\partial V_k$ deve ser subtraída do valor presente na diagonal principal da matriz Jacobiana. Essas derivadas são obtidas diretamente a partir da equação (4).

Para o tratamento da variável de estado α no problema de fluxo de potência, faz-se necessária a adoção de certos critérios, os quais serão apresentados a seguir. Inicialmente, é alterado o tipo da barra à qual o CER está conectado, denominando-a como *PVB*. Para o caso em que o valor

da variável de estado se mantém dentro dos limites especificados, a barra continua sendo *PVB*. No entanto, caso α ultrapasse um dos limites, seu valor é fixado no limite violado e a barra passa a ser do tipo *PQ*. De forma a evitar o descontrole de transição do tipo da barra, é proposta a comparação de α a um valor de tolerância. Para isso sugere-se empregar um valor próximo à 10^{-3} .

Em seguida, ao final de cada iteração e atualização das variáveis de estado, é avaliada a condição de troca do tipo de barra e equação de controle. A condição para alteração do tipo *PVB* para *PQ* é dada pela variável α , conforme mencionado anteriormente. Já para o critério de “*backoff*” são analisadas conjuntamente as variáveis α e V_m . Para o caso em que ambas extrapolam os respectivos limites inferior ou superior, o “*backoff*” é realizado retornando a barra para tipo *PVB* e fixando a tensão da barra controlada no valor especificado. Os limites de α influenciam diretamente nas magnitudes de tensão mínima e máxima da barra controlada, como apresentado a seguir:

$$V_m^{min} = V_m^{esp} + r \cdot V_k^2 \cdot B_{eq}(\alpha = 90^\circ), \quad (18)$$

$$V_m^{max} = V_m^{esp} + r \cdot V_k^2 \cdot B_{eq}(\alpha = 180^\circ). \quad (19)$$

Estas equações são implementadas no problema de fluxo de potência da mesma forma como descrito na equação (13).

4. RESULTADOS

Para testes e validação da metodologia proposta foram utilizados dois SEPs: o primeiro é um sistema tutorial de 3 barras e o segundo um sistema de médio porte IEEE 118 barras. A modelagem do CER será avaliada por meio da solução do fluxo de potência contínuo, sendo apresentadas as curvas de magnitude de tensão por incremento de carga das barras analisadas em cada SEP em estudo.

Foram realizadas simulações na linguagem de programação *Python* e os resultados obtidos foram validados através da utilização da versão acadêmica do programa ANAREDE, disponibilizada pelo CEPEL. Adotou-se uma tolerância de 10^{-6} p.u. para o resíduo de todas as equações do problema e, para todos os casos analisados, especificou-se valor de magnitude de tensão para a barra controlada igual ao valor fornecido no dado de barra do SEP em estudo.

4.1 Sistema tutorial 3 barras

Inicialmente, para se validar a metodologia proposta, foi utilizado o sistema tutorial descrito por (Kundur, 1994, p. 968). Trata-se de um SEP de alta tensão desenvolvido para estudos sobre condição de máximo carregamento. A topologia adaptada desse sistema é apresentada na Figura 5 e os dados de barra e de linha adotados estão detalhados nas Tabelas 1 e 2.

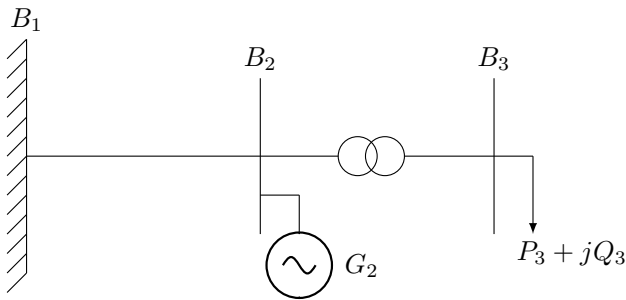
Para esse sistema o gerador presente na barra B_2 atua como Compensador Síncrono. Aplicando o fluxo contínuo, é visto que a barra B_3 , onde a carga se encontra conectada, possui o perfil de tensão mais crítico. Tendo em vista o Compensador operando de forma a controlar a

Tabela 1. Dados de barra do sistema tutorial 3 barras.

Barra	Tipo	Tensão	Fase	P_g	Q_g	Q_g^{min}	Q_g^{max}	P_L	Q_L	Sh
B_1	Slack	1.00	0.0	717.7	-144.0	$-\infty$	∞			
B_2	PV	1.00	0.0	0.0		-200.0	200.0			
B_3	PQ	1.00	0.0					400.0		100.0

Tabela 2. Dados de linha do sistema tutorial 3 barras.

De	Para	R%	X%	Mvar	Tap
B_1	B_2	0.34095	3.9751	415.2	
B_2	B_3	0.0	5.34		1.0



$$Q_{gk}^{violado} \neq B_{eq}^{fixo} \cdot V_k^2. \quad (20)$$

Figura 5. Topologia do sistema tutorial 3 barras. Adaptado de (Kundur, 1994, p. 968).

tensão da barra B_3 , a curva de magnitude de tensão por incremento de carga do SEP para essa barra de carga pode ser vista em destaque na cor azul na Figura 6.

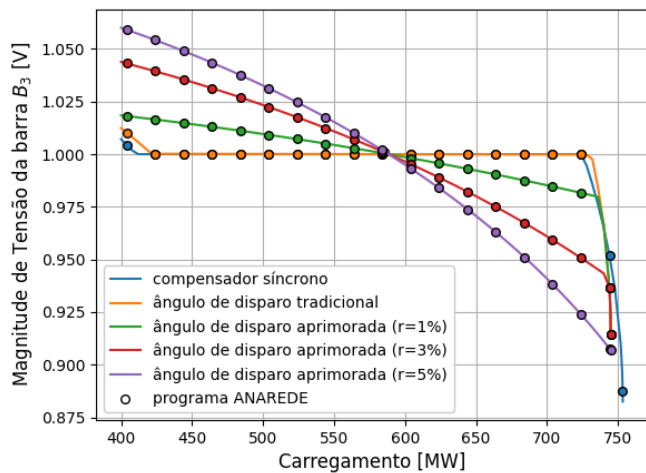


Figura 6. Curva de magnitude de tensão da barra B_3 por incremento de carga do SEP.

Pode-se observar na imagem que o Compensador Síncrono representa corretamente o CER operando na região linear, controlando a tensão da barra B_3 no valor especificado. No entanto, sua representação se diferencia quando tem que operar nas regiões limítrofes de injeção ou absorção de potência reativa. Isso porque, nessas regiões, a potência reativa injetada ou absorvida pelo Compensador permanece fixa no valor violado, mínimo ou máximo. Para o CER, entretanto, apenas a susceptância equivalente B_{eq} permanece fixa, sendo $\alpha = 90^\circ$ ou $\alpha = 180^\circ$. Essa questão é matematicamente detalhada em (20):

Dado a questão sobre utilização de Compensador Síncrono destacada acima, propõe-se substituir o gerador presente na barra B_2 por um CER capaz de operar controlando ativamente a magnitude de tensão da barra B_3 . Os limites mínimo e máximo de geração de potência reativa vistos para o gerador na Tabela 1 são mantidos para o CER.

Adotando a modelagem do CER por ângulo de disparo, desenvolvida por Ambriz-Perez et al. (2000), o perfil de tensão por incremento de carga do SEP observado para a barra B_3 é apresentado na Figura 6 na cor laranja. Na aplicação dessa metodologia, é visto que a tensão da barra controlada predomina igual ao valor especificado durante o processo de incremento de carga. Além disso, é possível observar que o perfil de tensão da barra controlada quando o CER atua nas regiões indutiva ou capacitiva se diferencia da aplicação do Compensador Síncrono, o que é justificado em (20). De forma geral, essa metodologia para representação do CER apresenta resultados corretos. No entanto, apesar dessa metodologia controlar a tensão no valor especificado para a região linear de operação do CER, sabe-se que essa condição é ideal e não ocorre por conta de limitações físicas do dispositivo de controle, conforme comentado anteriormente.

A modelagem do CER por ângulo de disparo é validada via ANAREDE, sendo atribuído valor nulo para o *droop* de tensão da região linear de operação do CER. Para essa condição, as magnitudes de tensão mínima e máxima da barra controlada são iguais à tensão especificada para controle. No entanto, nas regiões indutiva e capacitiva de operação do CER, é visto que a magnitude de tensão da barra controlada extrapola esses mesmos limites.

Em contrapartida, empregar a modelagem desenvolvida por Passos Filho (2000), com valor de *droop* não nulo, resulta em uma operação mais próxima à encontrada na realidade. Para o caso em que o *droop* da região linear de operação do CER é igual a 1%, 3% ou 5%, por exemplo, os valores de magnitude de tensão mínima e máxima, calculadas a cada iteração pelas equações (18) e (19), resultam em valores diferentes da tensão especificada. Implementar o *droop* de tensão na modelagem do CER proporciona uma maior flexibilidade de operação pelo dispositivo de controle, sem que os limites sejam violados.

Dessa forma, adotando-se os valores de *droop* de tensão comentados acima na modelagem de CER aprimorada de Ambriz-Perez et al. (2000), conforme apresentado na Seção 3. Executando a simulação de fluxo continuado no SEP em análise, as novas magnitudes de tensão da barra controlada

B_3 podem ser observadas em destaque na Figura 6 nas cores verde, vermelho e roxo, respectivamente.

Da Figura 6, todas as metodologias de representação do CER foram validadas via ANAREDE. As linhas cheias apresentam o resultado de simulação em *Python* enquanto que os círculos, nas respectivas cores, apresentam os resultados de simulação em ANAREDE, para as diferentes representações de CER em destaque.

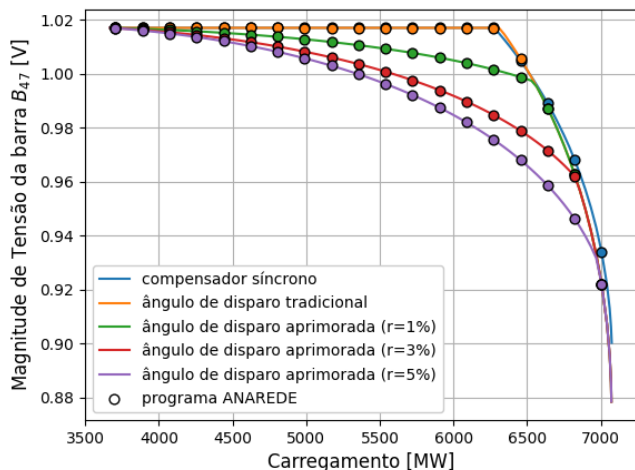


Figura 7. Curva de magnitude de tensão da barra B_{47} por incremento de carga do SEP.

4.2 Sistema IEEE 118 barras

De forma a comprovar o aprimoramento na modelagem por ângulo de disparo, foi utilizado o sistema IEEE 118 barras IEEE (2022). Sua topologia é apresentada na Figura 8 e seus dados de barra e de linha estão compartilhados em IEEE (2022).

Aplicando o fluxo continuado nesse sistema, é visto que a barra de número 47 apresenta o perfil de tensão mais crítico. Dessa forma, propõe-se empregar um CER nessa barra com o objetivo de controlar a tensão da própria barra.

Novamente, foram realizadas simulações aplicando as diferentes metodologias de representação de CER discutidas neste artigo. Adotando-se equipamentos com limites mínimo e máximo de potência reativa iguais a -200 Mvar e 200 Mvar, os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 7.

Inicialmente, foi implementada a representação de CER por Compensador Síncrono. O resultado, destacado em cor azul na Figura 7, é satisfatório para o caso do estar CER atuando na região linear de operação. No entanto, conforme argumentado anteriormente e apresentado em (20), utilizar dessa representação resulta em erros para as regiões limítrofes de operação do dispositivo de controle.

Em seguida, foi implementada a modelagem via ângulo de disparo de Ambriz-Perez et al. (2000) para representação do CER. O resultado obtido está destacado em cor laranja na Figura 7. É possível observar que para essa metodologia

o CER é capaz de injetar ou absorver potência reativa a fim de controlar a tensão da barra de controle no valor especificado durante boa parte da simulação do incremento de carga.

Por fim, implementou-se a metodologia por ângulo de disparo considerando o *droop* de tensão para a região linear de operação do CER. Os resultados nas cores verde, vermelho e roxo apresentam a modificação atribuída à modelagem tradicional, considerando valores de *droop* iguais a 1%, 3% e 5%, respectivamente. Para os diferentes valores de *droop* implementados à metodologia aprimorada, é possível observar uma maior flexibilidade para a operação do CER, em que os limites de tensão mínimo e máximo não são violados.

Da Figura 7, novamente, as metodologias de representação do CER foram validadas via ANAREDE. As linhas cheias apresentam o resultado de simulação em *Python* enquanto que os círculos, nas respectivas cores, apresentam os resultados de simulação em ANAREDE, para as diferentes representações de CER em destaque.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma revisão das principais metodologias para a representação de compensadores estáticos de potência reativa no problema de fluxo de potência foi realizada. A partir das metodologias em estudo foi proposta uma contribuição à metodologia por ângulo de disparo desenvolvida por Ambriz-Perez et al. (2000), no qual é considerado o *droop* de tensão para a região linear de operação do dispositivo de controle. Para a validação das metodologias em estudo, todos os resultados obtidos via simulação desenvolvida na linguagem *Python* foram comparados por meio do programa ANAREDE.

Adicionalmente, em se tratando das metodologias estudadas, foi destacada a vantagem de modelar o CER por ângulo de disparo em casos de estudo de harmônicos e transitórios eletromagnéticos. Nesse modelo em questão, entretanto, a variável de estado adotada (α) tende a ser mais sensível do que a variável de estado adotada no modelo por injeção de potência reativa (Q_{gk}). Esse fato é comprovado pela curva detalhada na Figura 3, em que pequenas variações em α podem provocar variações maiores na susceptância equivalente e, conseqüentemente, na geração de potência reativa. Além disso, como mencionado na Seção 3, deve-se sempre fixar α no valor de limite extrapolado para quando o CER atua na região capacitiva ou indutiva. Caso contrário, a simulação poderá convergir para valores fora da região de desejada, ou até mesmo divergir. Diferentemente, no modelo por injeção de potência reativa não se faz necessário fixar a variável de estado no limite violado, uma vez que Q_{gk} tende a ser mais robusta.

Em análise de máximo carregamento, pode-se concluir que a representação de CER por Compensador Síncrono apresentou os resultados mais otimistas, porém também os mais irrealistas. Além disso, não houve disparidades quanto ao ponto de máximo carregamento observado para as modelagens de CER implementadas, nem quanto ao número de iterações necessárias para a conclusão das simulações.

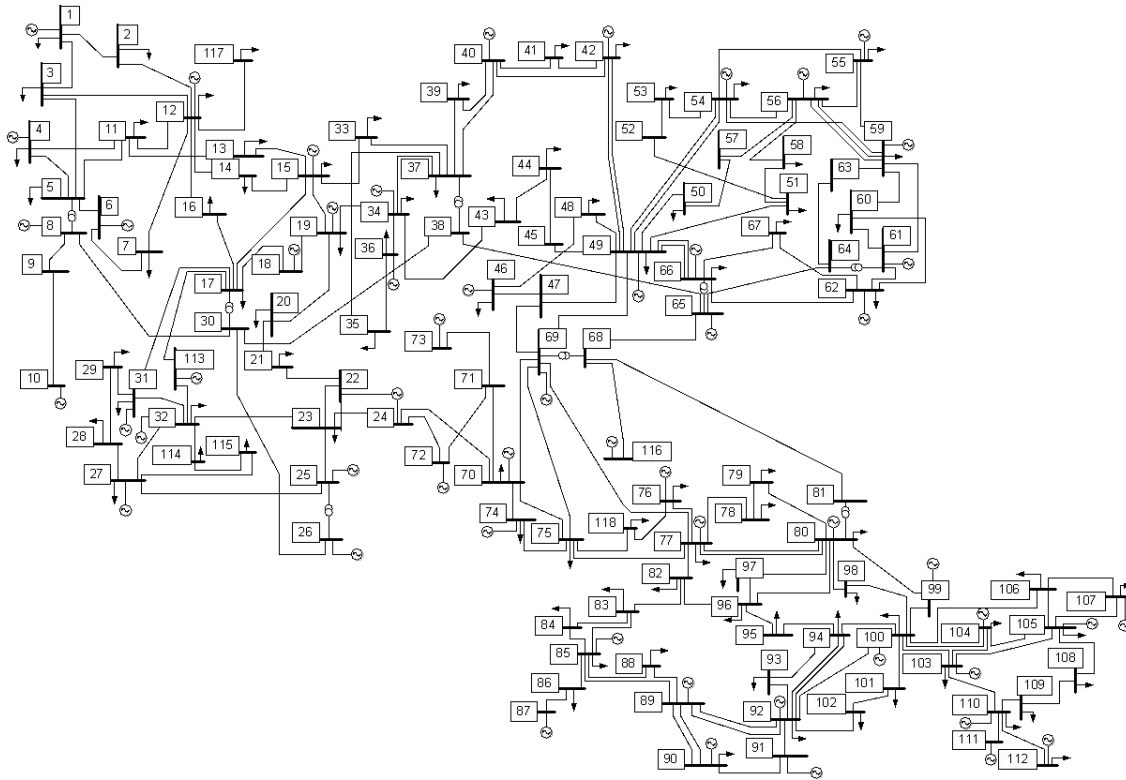


Figura 8. Topologia do sistema iee 118 barras. Adaptado de IEEE (2022).

No estudo realizado, foram utilizados dois sistemas elétricos teste. O primeiro sistema foi o sistema tutorial 3 barras, desenvolvido por Kundur (1994) e utilizado para análise de condição de máximo carregamento. O segundo sistema estudado foi o conhecido IEEE 118 barras, sistema de médio porte utilizado em estudos de estabilidade de tensão.

Como resultado final, pôde ser verificada a eficiência das metodologias tradicionais, assim como pôde ser validada a contribuição realizada para a metodologia por ângulo de disparo. Ambas metodologias apresentaram boas condições numéricas de convergência, sendo que a modelagem por ângulo de disparo apresentou em geral uma iteração a mais ou iterações iguais durante as simulações realizadas.

Para trabalhos futuros, serão realizados estudos a respeito da aplicação da formulação sigmoide na modelagem de diferentes equipamentos elétricos, explorando seus benefícios no âmbito de análise de incertezas de parâmetros em simulações de fluxo de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, do CNPq, do INERGE, da FAPEMIG e da UFJF/PPEE.

REFERÊNCIAS

Ambriz-Perez, H., Acha, E., and Fuerte-Esquivel, C. (2000). Advanced svc models for newton-raphson load flow and newton optimal power flow studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1), 129–136. doi:10.1109/59.852111.

da Costa, V.M., Martins, N., and Pereira, J.L.R. (1999). Developments in the newton raphson power flow formulation based on current injections. *IEEE Transactions on power systems*, 14(4), 1320–1326.

IEEE (2022). University of washington electrical engineering. power systems test case archive. <http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf118/ieee118cdf.txt>. Acessado em: 05 de Fevereiro de 2022.

Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill, Inc.

Mathur, R.M. and Varma, R.K. (2002). *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. John Wiley & Sons.

Miller, T.J.E. et al. (1982). *Reactive power control in electric systems*, volume 2. Wiley New York.

Passos Filho, J.A. (2000). Modelagem e incorporação de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência. *Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil: Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. UFJF*.

Perez, M., Messina, A., and Fuerte-Esquivel, C. (2000). Application of facts devices to improve steady state voltage stability. In *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134)*, volume 2, 1115–1120. IEEE.

Stott, B. and Alsac, O. (1974). Fast decoupled load flow. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, (3), 859–869.

Stott, B. (1974). Review of load-flow calculation methods. *Proceedings of the IEEE*, 62(7), 916–929.

Taylor, C.W., Scott, G., and Hammad, A. (1994). Static var compensator models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(1), 229–240. doi:10.1109/59.317606.