

4

CER – Compensador Estático de Potência Reativa

4.1

Introdução

Compensadores estáticos de potência reativa (CERs) ou *Static var Compensators* (SVCs) são equipamentos de controle de tensão cuja frequência de uso tem aumentado no sistema elétrico nos últimos tempos. Seu uso é recente porque seu funcionamento é baseado na eletrônica de potência, cujo desenvolvimento foi iniciado com a descoberta do tiristor em 1957 e sua aplicação em sistemas de potência tornou-se possível a partir da metade da década de 80.

Sua função é gerar ou absorver potência reativa, para manter a tensão do sistema dentro dos parâmetros estudados, da mesma maneira que seu predecessor, o compensador síncrono, o faz. A principal vantagem do compensador estático sobre o este último é a ausência de partes rotativas, o que aumenta o rendimento e vida útil e minimiza a necessidade de manutenção.

Basicamente, o equipamento é composto de capacitores e/ou reatores variáveis que, compostos, resultam na impedância necessária para gerar a potência reativa de acordo com a tensão de referência a ser controlada.

Nos dias atuais, os compensadores estáticos têm sido as soluções com melhor relação custo/benefício quando é necessário um controle da tensão no ponto de instalação.

4.2

Reatância e Susceptância do CER[9]

O Compensador Estático de Potência Reativa, conforme já citado, consiste numa combinação de reatores ou capacitores fixos, capacitores chaveados a tiristores e reatores controlados a tiristores. A configuração mais utilizada, mostrada na Figura 4.1, é formada de um capacitor fixo (FC – *Fixed Capacitor*)

em paralelo com um reator controlado a tiristor (TCR – *Thyristor Controlled Reactor*), ambos mais conhecidos pelas siglas em inglês.

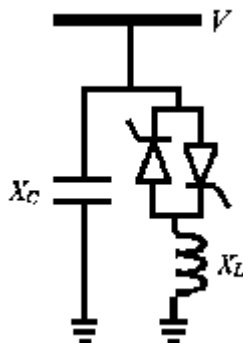


Figura 4.1 – Estrutura do CER

Do ponto de vista operacional, o CER é visto como uma reatância *shunt* variável (gerando ou absorvendo potência reativa), ajustada automaticamente em resposta à variação das condições de operação do sistema. Este ajuste é feito através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores do TCR, de forma a manter a magnitude de tensão da barra controlada no valor especificado.

A reatância variável do TCR é dada por (4.1), onde X_L é a reatância do reator e α é o ângulo de disparo dos tiristores.

$$X_{V(TCR)} = X_L \frac{p}{2(p - a) + \sin(2a)} \quad (4.1)$$

A susceptância² variável do TCR é dada por (4.2). Quando $\alpha = \pi/2$, $B_{V(TCR)}$ assume seu valor máximo, sendo igual a $\frac{1}{X_L}$; quando $\alpha = \pi$, $B_{V(TCR)}$ assume seu valor mínimo, sendo igual a zero.

$$B_{V(TCR)} = \frac{2(p - a) + \sin(2a)}{p X_L} \quad (4.2)$$

A reatância total do CER é formada pela combinação em paralelo da reatância fixa do capacitor (X_C) com a reatância variável do TCR, conforme equação (4.3):

² Inverso da reatância

$$X_{CER} = j X_{V(TCR)} // -j X_C = \frac{X_C X_{V(TCR)}}{X_C - X_{V(TCR)}} = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a)) - X_L} \quad (4.3)$$

Na Figura 4.2 é mostrada a reatância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores. O equipamento pode operar na região reativa ou capacitiva, de acordo com o valor de α . Pode ser observado também um valor de α onde ocorre ressonância de regime permanente, isto é, $X_{V(TCR)} = X_C$. Este valor é dependente da relação X_C/X_L .

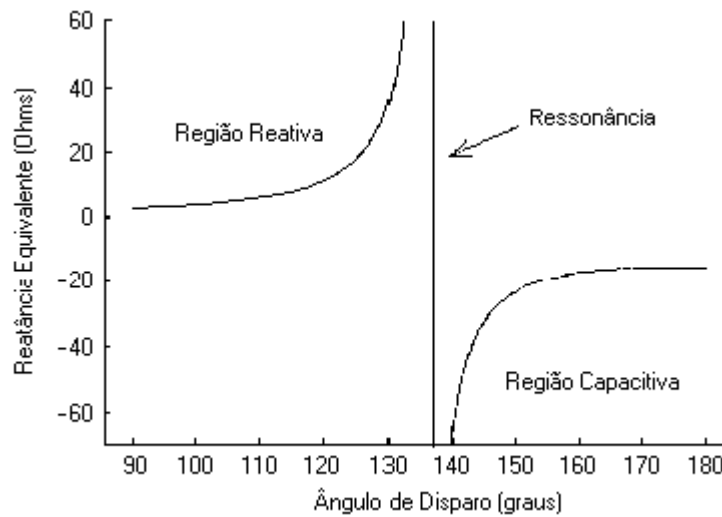


Figura 4.2 - Reatância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores ($X_C = 15 \Omega$ e $X_L = 2,56 \Omega$)

A susceptância total do CER é dada pela equação (4.4). Na Figura 4.3 é mostrada a susceptância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores, onde pode ser observado que a variação de B_{CER} ocorre sem descontinuidades, nas duas regiões de operação.

$$B_{CER} = -j B_{V(TCR)} // j B_C = \frac{X_{V(TCR)} - X_C}{X_C - X_{V(TCR)}} = \frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \quad (4.4)$$

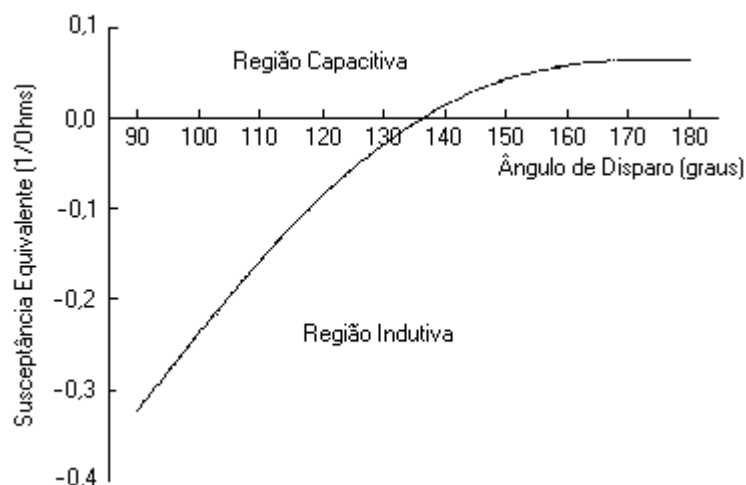


Figura 4.3 - Susceptância equivalente do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores ($X_C = 15 \, \Omega$ e $X_L = 2,56 \, \Omega$)

Na solução do fluxo de potência, é mais prático utilizar as equações baseadas em B_{CER} do que as baseadas em X_{CER} . Enquanto $B_{V(TCR)}$ varia entre 0 e $1/X_L$, $X_{V(TCR)}$ varia entre X_L e ∞ .

4.3 Modelagem do CER nos Programas de Fluxo de Potência

A Figura 4.4 mostra a curva característica VI de regime permanente do CER (modelo de injeção de corrente) e a Figura 4.5 mostra a respectiva curva característica VQ (modelo de potência reativa injetada). V_{esp} é a tensão quando a potência reativa injetada pelo CER é nula.

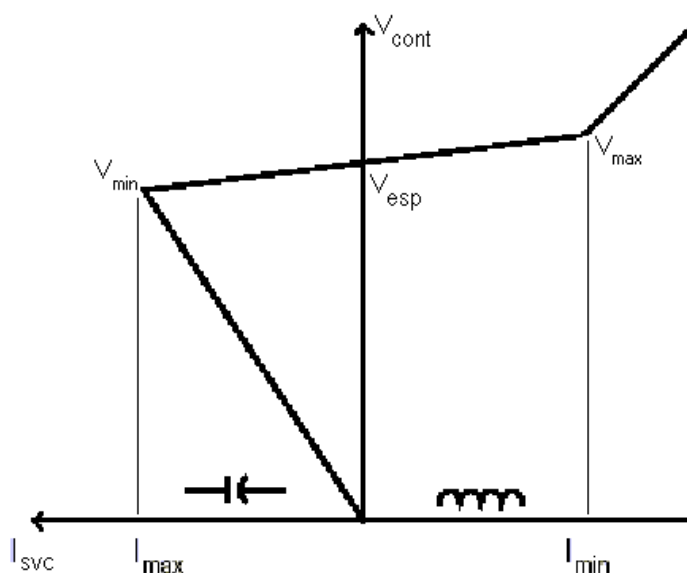


Figura 4.4 – Característica VI em Regime Permanente do CER [11]

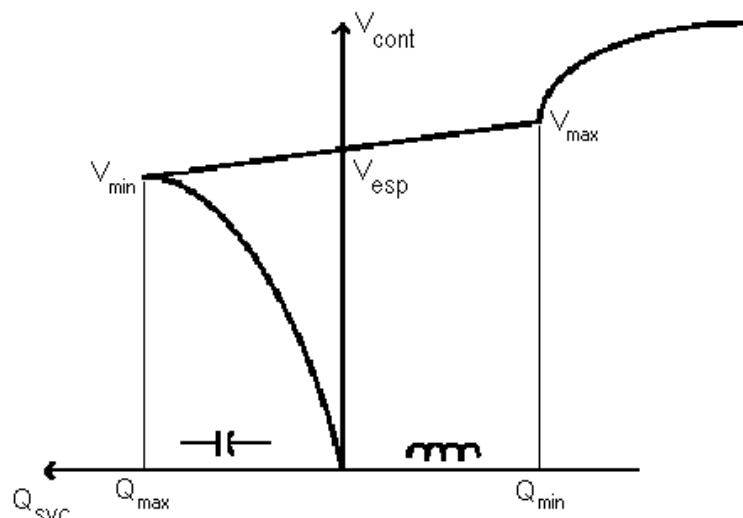


Figura 4.5 – Característica VQ em Regime Permanente do CER [11]

São definidas três regiões de operação para o CER:

- i. capacitiva, onde o equipamento se comporta puramente como um capacitor;
- ii. linear, onde a potência reativa ou corrente injetada é função da tensão na barra controlada e
- iii. indutiva, onde o equipamento se comporta puramente como um indutor.

Quando V_{cont} estiver entre V_{max} e V_{min} o CER opera na região controlável e seu comportamento é definido por uma reta. Esta faixa de controle linear é determinada pela susceptância máxima do indutor e pela susceptância total devido aos bancos de capacitores em serviço e à capacidade de filtragem [10].

Se a tensão onde o CER está conectado é inferior a V_{min} , os tiristores do TCR estão bloqueados e o CER opera na região capacitiva. Quando a tensão é maior que V_{max} , o ângulo de disparo dos tiristores é mínimo e o CER opera na região indutiva. Nestas duas últimas regiões, o equipamento se comporta como uma reatância fixa localizada na barra e perde a capacidade de controle e funciona simplesmente como capacitor ou um indutor.

A representação dos controles no problema do fluxo de potência pode ser feita através de equações adicionais que incorporam a relação entre a ação de cada controle e as respectivas variáveis controladas, formando uma matriz Jacobiana aumentada. Para a representação do Compensador Estático de Potência Reativa no programa ANAREDE[11], a potência reativa injetada na

barra do CER é considerada como variável dependente. Para tornar o sistema de equações possível e determinado, é adicionada a este uma equação de controle representando o comportamento do dispositivo. Esta equação é função do ponto de operação do equipamento e da modelagem de controle adotada. Na formulação não há qualquer tipo de inserção de barras, mantendo a topologia original do sistema.

Da faixa linear da Figura 4.4

$$V_{cont} = V_{esp} + X_{SL} I_{CER} \quad (4.5)$$

A inclinação da reta X_{SL} e V_{esp} são definidas matematicamente:

Então:

$$X_{SL} = \frac{V_{min} - V_{max}}{I_{max} - I_{min}} \quad (4.6)$$

$$V_{esp} = \frac{V_{max} I_{max} - V_{min} I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (4.7)$$

Pode ser observado que a inclinação X_{SL} é negativa, pois I_{CER} cresce para a esquerda, sendo esta uma função decrescente (quando I_{CER} aumenta, V_{cont} diminui). No programa ANAREDE, este dado de entrada é positivo. O sinal negativo de X_{SL} é considerado internamente, ou seja, em (4.5) o sinal é negativo ao invés de positivo.

Nas faixas não controladas, o equipamento se comporta como uma reatância fixa conectada na barra. Para o modelo de injeção de corrente, as equações de controle (4.8), (4.9) e (4.10) são similares, sendo dados B_{min} , X_{SL} e B_{max} :

i. Faixa Capacitiva ($V_{\text{cont}} < V_{\text{min}}$):

$$Q_{\text{CER}} - B_{\text{max}} V_t^2 = 0 \quad (4.8)$$

ii. Faixa Linear ($V_{\text{min}} < V_{\text{cont}} < V_{\text{max}}$):

$$V_{\text{cont}} - V_{\text{esp}} - X_{\text{SL}} I = 0 \quad (4.9)$$

iii. Faixa Indutiva ($V_{\text{cont}} > V_{\text{max}}$):

$$Q_{\text{CER}} - B_{\text{min}} V_t^2 = 0 \quad (4.10)$$

onde,

i. V_t é a tensão da barra conectada ao CER (no controle de tensão local, $V_t = V_{\text{cont}}$)

ii. Q_{CER} é a potência reativa gerada/absorvida pelo CER

Da faixa linear da Figura 4.5:

$$V_{\text{cont}} = V_{\text{esp}} + X_{\text{SL}} Q_{\text{CER}} \quad (4.11)$$

A inclinação da reta X_{SL} e V_{esp} são definidas matematicamente:

$$X_{\text{SL}} = \frac{V_{\text{min}} - V_{\text{max}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}} \quad (4.12)$$

$$V_{\text{esp}} = \frac{V_{\text{max}} Q_{\text{max}} - V_{\text{min}} Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}} \quad (4.13)$$

Para o modelo de injeção de potência reativa são válidas as seguintes equações de controle:

i. Faixa Capacitiva ($V_{\text{cont}} < V_{\text{min}}$):

$$Q_{\text{CER}} - B_{\text{max}} V_t^2 = 0 \quad (4.14)$$

ii. Faixa Linear ($V_{\text{min}} < V_{\text{cont}} < V_{\text{max}}$):

$$V_{\text{cont}} - V_{\text{esp}} - X_{\text{SL}} Q_{\text{CER}} = 0 \quad (4.15)$$

iii. Faixa Indutiva ($V_{\text{cont}} > V_{\text{max}}$):

$$Q_{\text{CER}} - B_{\text{min}} V_t^2 = 0 \quad (4.16)$$

No caso do controle de tensão remoto, devem ser consideradas nas equações das faixas capacitivas e indutivas, a tensão da barra conectada ao CER ao invés da tensão da barra controlada. Pode ser observado também que as equações de controle nas faixas de operação capacitiva e indutiva são iguais para ambos os tipos de modelo.

4.4 Equações de Controle para o Cálculo dos Índices

No cálculo dos índices de adequação de controle de tensão, deve ser relacionada a grandeza física efetivamente usada para controlar a tensão e a tensão a ser controlada. No caso dos CERs há duas alternativas:

- i. índice susceptância x tensão terminal (ou remota)
- ii. índice ângulo de disparo dos tiristores x tensão terminal (ou remota)

Os dois índices devem ser equivalentes em termos qualitativos, pois de acordo com (4.3) e os respectivos resultados mostrados na Figura 4.3, o ângulo de disparo dos tiristores e a susceptância do CER variam sempre no mesmo sentido.

As equações de controle mostradas em (4.9) e (4.15) não são adequadas para o cálculo do índice susceptância x tensão terminal (ou remota) na faixa de controle linear, pois relacionam, respectivamente, a corrente injetada e a potência reativa gerada pelo CER com a tensão controlada. Neste caso, é usada (4.17) para o modelo de injeção de corrente e (4.18) para o modelo de injeção de potência reativa.

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t = 0 \quad (4.17)$$

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2 = 0 \quad (4.18)$$

Onde:

- i. X_{SL} de (4.17) é dado por (4.6),
- ii. X_{SL} de (4.18) é dado por (4.12).

Para o cálculo do índice ângulo de disparo dos tiristores x tensão terminal (ou remota) são usadas as equações (4.19) e (4.20). A equação (4.19), obtida de (4.3) e (4.17), é usada para a faixa de controle linear do modelo de injeção de

corrente e a equação (4.20), obtida de (4.4) e (4.18), é usada para a faixa de controle linear do modelo de injeção de potência reativa.

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_t = 0 \quad (4.19)$$

$$V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_t^2 = 0 \quad (4.20)$$

Onde:

- i. X_{SL} de (4.19) é dado por (4.6),
- ii. X_{SL} de (4.20) é dado por (4.12).

Nas faixas não lineares, a capacidade de controle é perdida e o equipamento se comporta como uma reatância fixa localizada na barra, sendo usadas as equações (4.14) e (4.16).

4.5

Estrutura da Matriz Jacobiana e Cálculo dos Índices

4.5.1

Índice Susceptância x Tensão Terminal (ou Remota)

A matriz Jacobiana resumida utilizada para cálculo deste índice, que considera a susceptância do CER como variável dependente, é mostrada em (4.21):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_{CER} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial q} & \frac{\partial P}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial q} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial B_{CER}} \\ 0 & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V} & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta V \\ \Delta B_{CER} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Para o modelo de injeção de corrente é usada a equação de controle (4.22), enquanto que para o modelo de injeção de potência é usada a equação

de controle (4.23). As derivadas de (4.21) para composição dos dois modelos são mostradas na equações (4.24) a (4.37).

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} (B_{CER} V_t) - V_{cont} \quad (4.22)$$

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} (B_{CER} V_t^2) - V_{cont} \quad (4.23)$$

onde,

- i. $B_{CER} V_t$ é a corrente do CER
- ii. $B_{CER} V_t^2$ é a potência reativa gerada pelo CER

4.5.1.1

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial V_{cont}} = 1 - X_{SL} B_{CER} \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.26)$$

4.5.1.2

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{SVC} V_t)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t)}{\partial V_t} = -X_{SL} B_{CER} \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.30)$$

4.5.1.3 Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t^2 \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial V_{cont}} = 1 - 2X_{SL} B_{CER} V_t \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.33)$$

4.5.1.4 Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial B_{CER}} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_t^2 \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial (V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_t^2)}{\partial V_t} = -2X_{SL} B_{CER} V_t \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial B_{CER}} = -V_t^2 \quad (4.37)$$

Considerando $\Delta P = \Delta Q = 0$ e utilizando (4.38), o sistema (4.21) é reduzido para dimensão (1x1). A matriz $[D']$ resultante desta redução relaciona a tensão controlada com a susceptância do CER, conforme (4.39) e (4.40).

$$[D'] = [D] - [C][A]^{-1}[B] \quad (4.38)$$

$$\Delta V_{CER} = [D'] \Delta B_{CER} \quad (4.39)$$

$$\frac{\Delta V_{CER}}{\Delta B_{CER}} = [D'] \quad (4.40)$$

Um aumento/diminuição da admitância *shunt* do CER deve corresponder a um aumento/diminuição da tensão controlada. O índice calculado adequadamente deve ser positivo quando a ação de controle tem efeito esperado, e negativo quando a ação de controle tem efeito oposto ao esperado [7].

4.5.2

Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Terminal (ou Remota)

A matriz Jacobiana resumida utilizada no cálculo deste índice, considerando o ângulo de disparo dos tiristores do TCR como variável dependente, é mostrada em (4.41):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_{CER} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial q} & \frac{\partial P}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial q} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial a} \\ 0 & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V} & \frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta V \\ \Delta a \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Para o modelo de injeção de corrente, é utilizada a equação de controle (4.42) e para o modelo de injeção de potência reativa é utilizada a equação de controle (4.43). As derivadas de (4.41) são mostradas nas equações de (4.44) a (4.57).

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_t - V_{cont} \quad (4.42)$$

$$\Delta V_{CER} = V_{esp} + X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_t^2 - V_{cont} \quad (4.43)$$

4.5.2.1

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial a} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial a} = -X_{SL} \left(\frac{\frac{X_C}{p} + 2 \cos(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial V_{cont}} = 1 - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial a} = \frac{V_t^2 (-2 + 2 \cos(2a))}{p X_L} \quad (4.46)$$

4.5.2.2

Modelo de injeção de corrente - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial a} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial a} = -X_{SL} \left(\frac{\frac{X_C}{p} + 2 \cos(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \right)}{\partial V_t} = -X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial a} = \frac{V_t^2}{p} \frac{(-2 + 2 \cos(2a))}{X_L} \quad (4.50)$$

4.5.2.3

Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Local ($V_{cont}=V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial a} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial a} = -X_{SL} \left(\frac{\frac{X_C}{p} + 2 \cos(2a)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial V_{cont}} = 1 - 2X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial a} = \frac{V_t^2}{p} \frac{(-2 + 2 \cos(2a))}{X_L} \quad (4.53)$$

4.5.2.4

Modelo de injeção de potência - Controle de Tensão Remoto ($V_{cont} \neq V_t$)

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial a} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial a} = -X_{SL} \left(\frac{\frac{X_C}{p} + 2 \cos(2 * a)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_{cont}} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial V_{cont}} = 1 \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial \Delta V_{CER}}{\partial V_t} = \frac{\partial \left(V_{cont} - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t^2 \right)}{\partial V_t} = -2X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p}(p-a) + \sin(2a)}{X_C X_L} \right) V_t \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial a} = \frac{V_t^2}{p} \frac{(-2 + 2 \cos(2a))}{X_L} \quad (4.57)$$

Considerando $\Delta P = \Delta Q = 0$ e utilizando (4.38), o sistema (4.41) é reduzido para dimensão (1x1). A matriz $[D']$ resultante desta redução relaciona a tensão controlada com o ângulo de disparo dos tiristores do TCR:

$$\Delta V_{CER} = [D'] \Delta a \quad (4.58)$$

$$\frac{\Delta V_{CER}}{\Delta a} = [D'] \quad (4.59)$$

O aumento/diminuição do ângulo de disparo dos tiristores do CER deve resultar no aumento/diminuição do módulo da tensão controlada, conforme pode ser visto na Figura 4.6. Na figura, quando V_{ref} está no ponto 0, o CER opera no ponto a. Deslocando V_{ref} para o ponto 1, o CER passa a operar no ponto b.

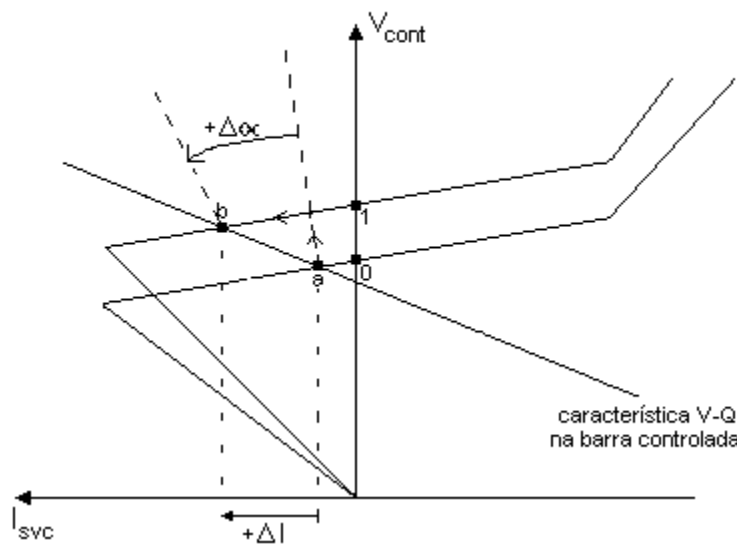


Figura 4.6 – Efeito esperado da variação de α sobre V_{cont}

Pode ser observado na Figura 4.7 um comportamento oposto ao esperado: houve aumento de V_{ref} do ponto 0 para 1 e a operação do CER passou do ponto a para o b. Há aumento de V_{cont} e a diminuição de α .

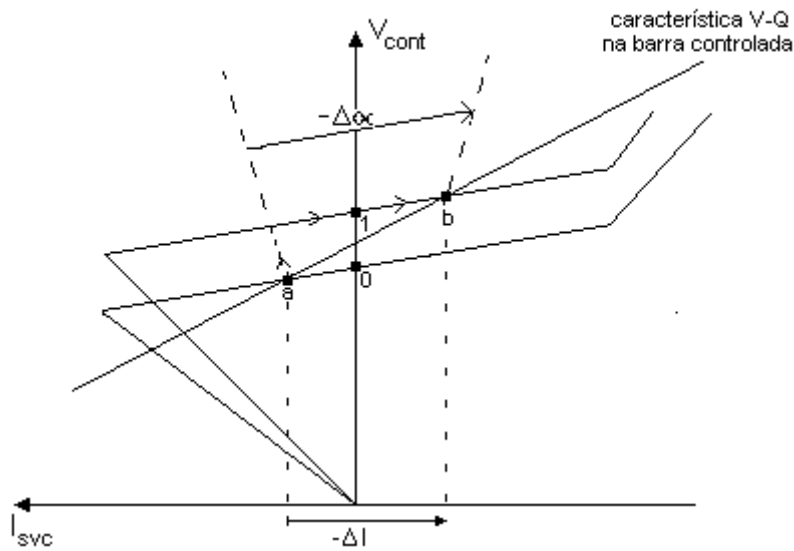


Figura 4.7 – Efeito oposto ao esperado da variação de α sobre V_{cont}

4.6 Exemplo Numérico [9]

Para exemplo, será considerado o sistema de 5 barras da Figura 4.8, onde o CER, composto por um banco de capacitores fixos em paralelo com reatores controlados a tiristores, controla a tensão da barra 5. Os dados de linha deste sistema são mostrados na Tabela 4.12. Os tapes dos LTCs são fixos.

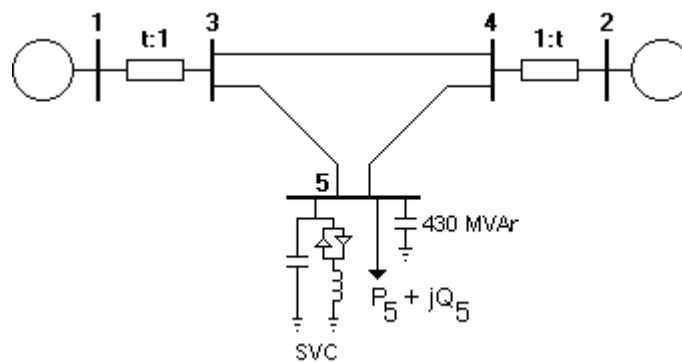


Figura 4.8 – Sistema de 5 Barras com CER

Tabela 4.1 – Dados de Linha do Sistema de 5 Barras

De	Para	Resistência(%)	Reatância(%)	Susceptância(%)
1	3	0,00	2,00	0,00
2	4	0,00	2,00	0,00
3	4	0,00	4,00	0,00
3	5	0,00	4,00	0,00
4	5	0,00	4,00	0,00

Dados do CER:

- i. $X_{SL} = -2,00\%^3$,
- ii. $Q_{\min} = -50$ Mvar (para $V = 1$ p.u.),
- iii. $Q_{\max} = 50$ Mvar (para $V = 1$ p.u.).

Para uma potência base de 100 MVA:

- i. $B_{\min} = -0,5$ p.u.,
- ii. $B_{\max} = 0,5$ p.u.

Quando a potência gerada pelo CER é máxima, os tiristores estão bloqueados ($\alpha = 180^\circ$), não permitindo a passagem de corrente pelo TCR. Pode ser calculada a reatância do capacitor pela equação (4.60):

$$X_c = \frac{1}{B_{\max}} = 2,0 \text{ p.u.} \quad (4.60)$$

Quando a potência absorvida pelo CER é máxima ($Q_{\min}$), os tiristores estão permitindo a condução máxima de corrente indutiva ($\alpha = 90^\circ$), sendo neste ponto a susceptância do CER igual a susceptância do reator em paralelo com a susceptância do capacitor. Logo, a susceptância do reator pode ser calculada por (4.61), e sua reatância por (4.62):

$$B_L = B_{CER(Q_{\min})} - B_C = -1,0 \text{ p.u.} \quad (4.61)$$

$$X_L = -\frac{1}{B_L} = 1,0 \text{ pu} \quad (4.62)$$

³ No programa ANAREDE o sinal negativo deste parâmetro é considerado internamente. Deve ser usado o valor 2,00%.

Os gráficos da Figura 4.9 e da Figura 4.10 foram traçados a partir de (4.4). A Figura 4.9 mostra as susceptâncias do capacitor fixo e do TCR em função do ângulo de disparo dos tiristores, enquanto que a Figura 4.10 mostra a susceptância total do CER, formada pela combinação de ambas susceptâncias.

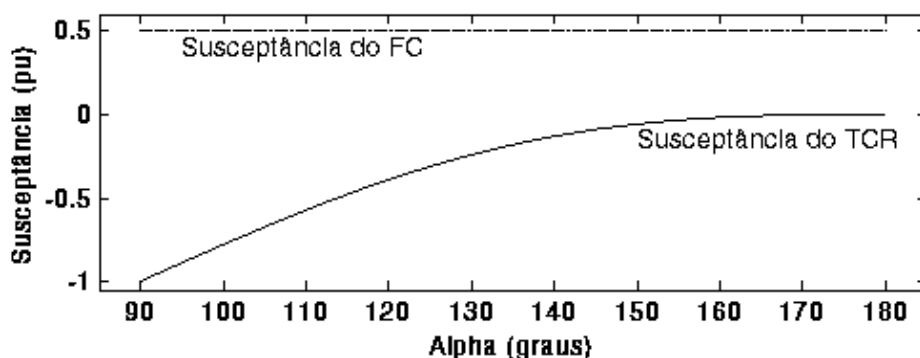


Figura 4.9 – Susceptâncias do FC, TCR em função do ângulo de disparo dos tiristores

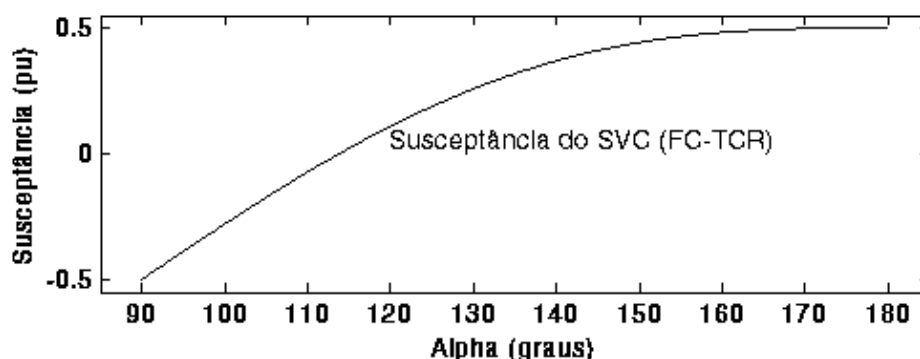


Figura 4.10 – Susceptância do CER em função do ângulo de disparo dos tiristores

4.6.1

Cálculo do Índice Susceptância x Tensão Terminal

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga do sistema-teste para o cálculo deste índice, considerando a estrutura atual da matriz Jacobiana, é mostrado em (4.63). A equação de controle de V_5 , para a faixa de controle linear, é mostrada em (4.64). Para o teste, foi considerado o modelo de injeção de potência reativa.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} & \frac{\partial P_2}{\partial q_3} & \frac{\partial P_2}{\partial q_4} & \frac{\partial P_2}{\partial q_5} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} & \frac{\partial P_2}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial q_2} & \frac{\partial P_3}{\partial q_3} & \frac{\partial P_3}{\partial q_4} & \frac{\partial P_3}{\partial q_5} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_4}{\partial q_2} & \frac{\partial P_4}{\partial q_3} & \frac{\partial P_4}{\partial q_4} & \frac{\partial P_4}{\partial q_5} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_5}{\partial q_2} & \frac{\partial P_5}{\partial q_3} & \frac{\partial P_5}{\partial q_4} & \frac{\partial P_5}{\partial q_5} & \frac{\partial P_5}{\partial V_3} & \frac{\partial P_5}{\partial V_4} & \frac{\partial P_5}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_3}{\partial q_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial q_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial q_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial q_5} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_4}{\partial q_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial q_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial q_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial q_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_5}{\partial q_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial q_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial q_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial q_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial B_{CER}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta V_5}{V_5} & \frac{\partial \Delta V_5}{\partial B_{CER}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta B_{CER} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

$$\Delta V_5 = V_{esp} + X_{SL} B_{CER} V_5^2 - V_5 \quad (4.64)$$

Derivando os termos que envolvem ΔV_5 e ΔB_{CER} :

$$\frac{\partial (V_5 - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_5^2)}{\partial B_{CER}} = -X_{SL} V_5^2 \quad (4.65)$$

$$\frac{\partial (V_5 - V_{esp} - X_{SL} B_{CER} V_5^2)}{\partial V_5} = 1 - 2(X_{SL} B_{CER} V_5) \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial Q_5}{\partial B_{CER}} = -V_5^2 \quad (4.67)$$

4.6.2

Cálculo do Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Terminal

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga do sistema-teste para o cálculo deste índice, considerando a estrutura atual da matriz Jacobiana, é mostrado em (4.68). A equação de controle de V_5 , para a faixa de controle linear, é mostrada em (4.69). É considerado o modelo de injeção de potência reativa.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} & \frac{\partial P_2}{\partial q_3} & \frac{\partial P_2}{\partial q_4} & \frac{\partial P_2}{\partial q_5} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} & \frac{\partial P_2}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial q_2} & \frac{\partial P_3}{\partial q_3} & \frac{\partial P_3}{\partial q_4} & \frac{\partial P_3}{\partial q_5} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_4}{\partial q_2} & \frac{\partial P_4}{\partial q_3} & \frac{\partial P_4}{\partial q_4} & \frac{\partial P_4}{\partial q_5} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial P_5}{\partial q_2} & \frac{\partial P_5}{\partial q_3} & \frac{\partial P_5}{\partial q_4} & \frac{\partial P_5}{\partial q_5} & \frac{\partial P_5}{\partial V_3} & \frac{\partial P_5}{\partial V_4} & \frac{\partial P_5}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_3}{\partial q_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial q_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial q_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial q_5} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_4}{\partial q_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial q_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial q_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial q_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_5} & 0 \\ \frac{\partial Q_5}{\partial q_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial q_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial q_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial q_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial a} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta V_5}{V_5} & \frac{\partial \Delta V_5}{\partial a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta a \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

$$\Delta V_5 = V_{esp} + X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_5^2 - V_5 \quad (4.69)$$

Assim como em 4.6.1, são calculadas as derivadas:

$$\frac{\partial \Delta V_5}{\partial a} = \frac{\partial \left[V_5 - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_5^2 \right]}{\partial a} = \frac{X_{SL} V_5^2 (-2 + 2 \cos(2a))}{p X_L} \quad (4.70)$$

$$\frac{\partial \Delta V_5}{\partial V_5} = \frac{\partial \left[V_5 - V_{esp} - X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_5^2 \right]}{\partial V_5} = 1 - 2 X_{SL} \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \sin(2a))}{X_C X_L} \right) V_5 \quad (4.71)$$

$$\frac{\partial Q_5}{\partial a} = \frac{V_5^2 (-2 + 2 \cos(2a))}{p X_L} \quad (4.72)$$

4.6.3

Resultados de 4.6.1 e 4.6.2

Considerando $\Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = \Delta Q_3 = \Delta Q_4 = \Delta Q_5 = 0$ e utilizando (4.38), os sistemas (4.63) e (4.68) são reduzidos para dimensão (1x1), obtendo os índices de adequação relativos ao CER. Tomando o ponto de operação inicial da Tabela 4.2 e ajustando para o ponto da Tabela 4.3, onde é aumentado V_{esp} para 1,028 pu, seguem os resultados.

Tabela 4.2 – Ponto de operação inicial na região normal de operação

$V_1 \angle \theta_1$	1050 $\angle$ 0,0
$V_2 \angle \theta_2$	1010 $\angle$ 7,6
$V_3 \angle \theta_3$	1000 $\angle$ - 2,3
$V_4 \angle \theta_4$	1000 $\angle$ 0,8
$V_5 \angle \theta_5$	1017 $\angle$ - 9,8
Q_{CER}	6,6 Mvar
V_{esp}	1,018
B_{CER}	0,0638 pu
α	117,36° = 2,0483 rad
t_{13}	1,053
t_{24}	1,002

Tabela 4.3 – Efeito do aumento de V_{esp} no ponto de operação da Tabela 4.2

$V_1 \angle \theta_1$	1,050 $\angle$ 0,0
$V_2 \angle \theta_2$	1,010 $\angle$ 7,6
$V_3 \angle \theta_3$	1,002 $\angle$ - 2,3
$V_4 \angle \theta_4$	1,002 $\angle$ 0,7
$V_5 \angle \theta_5$	1,023 $\angle$ - 9,8
Q_{CER}	23,2 Mvar
V_{esp}	1,028
B_{CER}	0,221685 pu
α	127,33° = 2,2223 rad
t_{13}	1,053
t_{24}	1,002

No ponto de operação da Tabela 4.3 pode ser observado o aumento da tensão controlada V_5 , da susceptância do CER e do ângulo de disparo dos tiristores.

Este resultado é coerente com os índices positivos mostrados em (4.73) e (4.74), que indicam que a ação de controle tem o efeito esperado.

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta B_{CER}} = 0,0630 \quad (4.73)$$

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta a} = 0,0633 \quad (4.74)$$

Para o ponto de operação da Tabela 4.4, aumentando V_{esp} para 0,573 pu, é obtido o ponto de operação da Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Ponto de operação inicial na região anormal de operação

$V_1 \angle \theta_1$	$1,050 \angle 0,0$
$V_2 \angle \theta_2$	$1,010 \angle -7,5$
$V_3 \angle \theta_3$	$0,983 \angle -9,7$
$V_4 \angle \theta_4$	$0,917 \angle -14,2$
$V_5 \angle \theta_5$	$0,570 \angle -50,5$
Q_{CER}	5,3 Mvar
V_{esp}	0,571
b_{CER}	0,1631 pu
α	$123,36^\circ = 2,1531 \text{ rad}$
t_{13}	0,800
t_{24}	0,900

Tabela 4.5 – Efeito do Aumento de V_{esp} no ponto de Operação da Tabela 4.4

$V_1 \angle \theta_1$	$1,050 \angle 0,0$
$V_2 \angle \theta_2$	$1,010 \angle -7,4$
$V_3 \angle \theta_3$	$0,985 \angle -9,7$
$V_4 \angle \theta_4$	$0,919 \angle -14,1$
$V_5 \angle \theta_5$	$0,574 \angle -50,1$
Q_{CER}	-5,6 Mvar
V_{esp}	0,573
b_{CER}	-0,1700 pu
α	$105,20^\circ = 1,8361 \text{ rad}$
t_{13}	0,800
t_{24}	0,900

Pode ser observado o aumento da tensão controlada V_5 e a diminuição da susceptância do CER e do ângulo de disparo dos tiristores, efeito contrário ao esperado.

Este resultado é coerente com os índices negativos mostrados em (4.75) e (4.76), indicando que a ação de controle tem efeito oposto ao esperado.

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta B_{CER}} = -0,0057 \quad (4.75)$$

$$\frac{\Delta V_5}{\Delta a} = -0,0051 \quad (4.76)$$

4.7

Análise dos Resultados

Similar ao capítulo 3, foi demonstrada a atuação de um CER num sistema elétrico. Para um ponto na região normal de operação, que produz o efeito esperado, o aumento da susceptância ou do ângulo de disparo do CER causa um aumento da tensão da barra que o CER está conectado (ou barra controlada remotamente). Logicamente, a causa inversa (diminuição da susceptância ou do ângulo de disparo do CER) causa uma diminuição na barra controlada pelo CER. Para a região anormal de operação, os efeitos são inversos.

Foi demonstrado ainda o cálculo do índice que classifica a região de operação em que o CER se encontra.