

3. Adequação das Ações de Controle de Tensão

3.1 Introdução

Casos reais de blecaute relatados na literatura, e caracterizados por depressão na tensão, indicam que os procedimentos normais para o controle de tensão tais como troca de tapes, chaveamento de capacitores, ajuste em compensadores síncronos e corte de carga, podem agravar o nível de tensão [32]. Usando sistemas de pequeno porte para fins demonstrativos, assim como sistemas reais de grande porte em pontos de operação reais, foi mostrado em [19, 20] que os controles de tensão local e remoto por geradores, compensadores síncronos, LTCs, SVCs, capacitores e reatores, podem levar o sistema ao colapso. Foi mostrado em [33] que para a mesma tensão de excitação existem duas possibilidades de valores de tensão terminal, desde que a “carga” nos terminais do gerador se comporte como “potência constante”. A instabilidade do controle automático de tensão, devido ao efeito oposto ao esperado na lógica do projeto do dispositivo de controle, pode causar tensões excessivamente baixas (ou altas) para a operação normal do sistema, acarretando, como por exemplo, o desligamento e/ou bloqueio de motores de indução.

Essas observações levam a concluir que se faz necessária a criação de uma ferramenta computacional capaz de relacionar as grandezas usadas para controlar a tensão, tais como tensão de excitação, tapes e admitâncias, com a tensão controlada, como já explicitado em [34]. A ferramenta deve determinar a adequação ou não de ações de controle de tensão.

3.2 Representação dos Controles de Tensão e Cálculo dos Índices

Em [19] foram criados índices que verificam a adequação de ações de controle de tensão. Esses índices relacionam a grandeza física efetivamente usada para controlar a tensão e a tensão a ser controlada. As equações de controle de tensão são representadas de forma linearizada em conjunto com as equações do

problema de fluxo de carga, matriz Jacobiana. A determinação desses índices será apresentada detalhadamente nas seções seguintes.

3.3 Controle de Tensão por Gerador e Compensador Síncrono

O controle de tensão nos terminais do gerador, realizado pelos programas de fluxo de carga atuais, é feito fixando-se o valor desejado de tensão e calculando-se a potência reativa gerada necessária. A tensão de excitação não aparece no problema e, portanto, a eficácia do controle de tensão não pode ser aferida. No máximo, pode-se estudar a relação entre as variações da potência reativa gerada e a tensão. Esta análise, entretanto, não é conclusiva quanto à eficácia do controle. Para comprovar esta afirmação, na Figura 3.1 mostram-se duas curvas traçadas a partir de um mesmo ponto de operação: i) variação da tensão terminal com a potência reativa que chega a barra terminal, curva VQ (em vermelho); ii) variação da tensão terminal com a tensão de excitação, curva VEg.

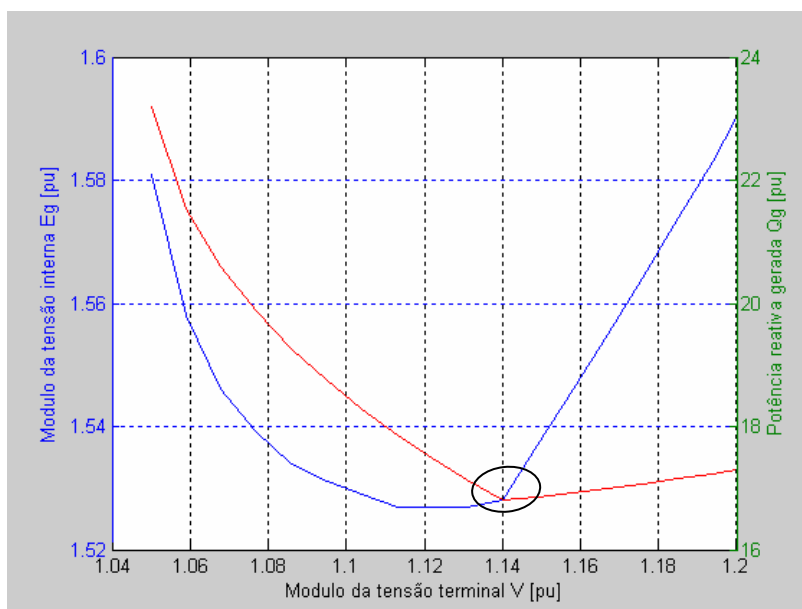


Figura 3.1 – Curvas VQ e VEg

Observa-se que os pontos de inflexão das duas curvas ocorrem em diferentes valores da tensão terminal. Para o primeiro caso, ocorre para tensão terminal igual aproximadamente a 1,14 pu (ponto em destaque na figura); para o segundo

caso a tensão é de aproximadamente 1,12 pu. Assim, as relações entre V e Q e entre V e E_g são as usuais somente para $V > 1,14$ pu. Da mesma forma, as duas relações são opostas a usual para $V < 1,12$ pu. Entre estes dois valores de V , tem-se a relação usual entre V e E_g e, relação oposta entre V e Q . Justifica-se, então, a necessidade de se estudar a relação entre V e E_g , ou em termos mais gerais, a relação entre a tensão controlada e a grandeza controladora.

3.3.1 Índice Tensão Interna vs. Tensão Terminal

O objetivo é encontrar um índice que expresse a relação entre o módulo da tensão na barra interna do gerador e o módulo da sua tensão terminal. O gerador (ou compensador síncrono) é modelado por uma tensão variável E_g na barra interna g atrás da reatância síncrona controlando a tensão V_0 na barra terminal 0 , conforme a Figura 3.2. Quando a tensão ou a corrente de excitação atinge o limite, a tensão de excitação E_g fica fixa e a tensão terminal V_0 deixa de ser controlada.

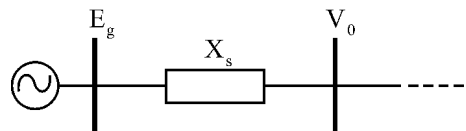


Figura 3.2 – Diagrama Unifilar do Modelo de Regime Permanente do Gerador ou Compensador Síncrono

Como a tensão que se deseja manter constante é a da barra 0 , pode-se dizer que, de acordo com a nomenclatura de barras usada em programas de fluxo de carga, a barra g é do tipo P e a barra 0 é do tipo PQV . Isto se a barra onde o gerador em questão estiver conectado não for definida como sendo de referência, quando então a barra passaria a ser denominada como sendo do tipo θ .

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga do sistema, montado de forma a evidenciar a relação entre E_g e V_0 , pode ser representado por (3.1).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta E_g \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde os vetores ΔP , ΔQ , $\Delta \theta$ e ΔV incluem todas as barras do sistema⁴. Logo, a matriz $[A]$ tem dimensão $2n \times 2n$, onde n é o número de barras da rede. A linha $[C]$ tem um único elemento não-nulo $\partial \Delta V_0 / \partial V_0 = 1$, enquanto que a coluna $[B]$ tem somente dois elementos não-nulos $\partial \Delta P_0 / \partial E_g$ e $\partial \Delta Q_0 / \partial E_g$. Se P_g e Q_g são variáveis, como ocorre para barras de referência, conseqüentemente não haverá linhas para estas grandezas em (3.1). O elemento da matriz $[D]$ é nulo. O erro da equação de controle é dado por: $\Delta V_0 = V_0^{\text{esp}} - V_0^{\text{cal}}$.

Como se quer verificar as variações de tensão entre a barra interna do gerador (barra g) e a barra terminal (barra 0), faz-se $\Delta P = \Delta Q = 0$ em (3.1), e através da redução:

$$d'_{VE} = [D] - [C] * [A]^{-1} * [B] \quad (3.2)$$

obtém-se:

$$\Delta V_0 = d'_{VE} * \Delta E_g \quad (3.3)$$

Portanto, o sinal do índice d'_{VE} determina se a ação de controle tem o efeito esperado ou não:

- i. se $d'_{VE} > 0$, $\Delta E_g > 0$ implica em $\Delta V_0 > 0$, a ação de controle terá o efeito esperado;
- ii. se $d'_{VE} < 0$, $\Delta E_g > 0$ implica em $\Delta V_0 < 0$, a ação de controle terá efeito oposto ao esperado
- iii. se $d'_{VE} = 0$, $\Delta E_g > 0$ implica em $\Delta V_0 = 0$, a ação de controle não terá efeito algum.

⁴ A dimensão da matriz Jacobiana é $2n \times 2n$, onde n é o número de barras. O elemento $\partial P_i / \partial \theta_i$ para a barra de referência, assim como os elementos $\partial Q_i / \partial V_i$ para as barras de tensão controlada, são trocados por valores numéricos muito grandes. Assim, o ângulo da tensão na barra de referência e o módulo da tensão nas barras de tensão controlada ficam fixos e a geração ativa da barra de referência e a reativa das barras de tensão controlada ficam livres para variar, como desejado [35].

3.3.2 Exemplos Numéricos

3.3.2.1 Índice Tensão Interna vs. Tensão Terminal para Controle Local

Deseja-se calcular o índice que expressa a relação entre o módulo da tensão na barra interna do gerador e o módulo da sua tensão terminal. A região de operação da barra terminal 0 depende de dois fatores: i) o carregamento da linha, ii) valores relativos entre a reatância síncrona e a impedância da linha. Para efeito de ilustração, é utilizado o sistema de 3 barras apresentado na Figura 3.3, onde a reatância síncrona X_s é $0,04\angle 90^\circ$ pu e a impedância da linha de transmissão série Z_t corresponde a $0,001\angle 70^\circ$ pu.

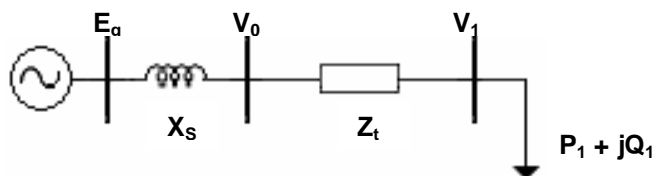


Figura 3.3 – Diagrama Unifilar de um Sistema com Gerador, Linha de Transmissão e Carga

Na Figura 3.4 são mostradas as tensões ao longo do circuito, da barra g até a barra 1 passando pela barra 0, considerando uma certa carga na barra 1. O eixo horizontal é a "distância elétrica" a partir da barra g. Uma variação da tensão interna E_g não tem qualquer efeito sobre a tensão em um certo ponto P em algum lugar do ramo de transmissão [19]. À esquerda do ponto P as tensões acompanham a variação da tensão E_g , enquanto que à direita do ponto P, ao contrário, as tensões sofrem variações opostas à variação de E_g .

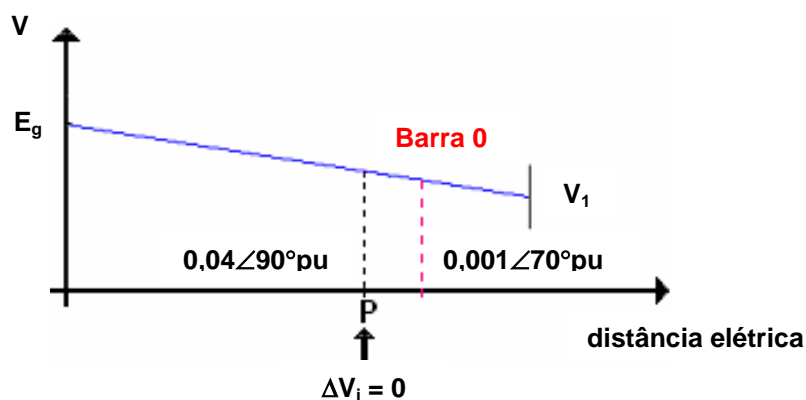


Figura 3.4 – Tensão ao Longo da Linha Desde a Barra g até a Barra 1

A localização do ponto P é definida em função da carga e da impedância do circuito. Pode estar entre as barras g e 1 e mesmo bem à direita da barra 1. Na Figura 3.4 a barra terminal 0 está à direita do ponto P, e isto significa que uma ação de controle de tensão realizada pelo gerador para controle da tensão nesta barra terá efeito oposto ao esperado. Na Tabela 3.1 mostra-se o ponto de operação correspondente.

Tabela 3.1 – Ponto de Operação Onde a Barra 0 Está à Direita do Ponto P

| | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| $E_g \angle \theta_g$ | 1,8160955 pu \angle 30,8368656° |
| $V_0 \angle \theta_0$ | 1,0 pu \angle 0,0° |
| $V_1 \angle \theta_1$ | 0,9790487 pu \angle -1,0° |
| $P_1 + j Q_1$ | (23,0209245 + j 13,29113695) pu |

Portanto, neste caso, a tensão interna do gerador E_g varia em sentido oposto à tensão da barra terminal V_0 , já que as ações de controle têm efeito oposto ao esperado. A sensibilidade entre ΔV_0 e ΔE_g deverá expressar este efeito. Montando-se o sistema linearizado (3.1) e fazendo-se a redução (3.2) com os respectivos valores numéricos, (3.3) resulta em:

$$d'_{VE} = \frac{\Delta V_0}{\Delta E_g} = -6,2763 \quad (3.4)$$

ou seja, $d'_{VE} < 0$ indicando que as variações das duas tensões estão em sentidos opostos, conforme se queria demonstrar.

Para confirmar esse resultado, é simulada uma ação de controle representada por um decréscimo na tensão interna do gerador E_g , de 1,8160955 para 1,8159375 pu. O novo ponto de operação, apresentado na Tabela 3.2, foi obtido após a resolução das equações não-lineares de fluxo de carga. Nota-se o efeito oposto ao esperado na barra 0. Quando o módulo da tensão da barra interna do gerador E_g diminui, o módulo da tensão terminal V_0 aumenta. Na Figura 3.5 ilustra-se o ocorrido: a barra 0 está à direita do ponto P e, portanto, a ação de controle teve efeito oposto ao esperado. O módulo da tensão na barra de carga V_1 também aumentou, já que esta barra 1 também está à direita do ponto P.

Considerando que $\Delta E_g = -0,0001580$ pu e que $d'_{VE} = -6,2763$, tem-se que $\Delta V_0 = 0,00099$ pu, o que concorda com a variação em V_0 observada da Tabela 3.1 para a 3.2 (de 1,000 para 1,001 pu).

Tabela 3.2 – Ponto de Operação Após Decréscimo na Tensão Interna E_g

| | |
|-----------------------|-------------------------------------------------|
| $E_g \angle \theta_g$ | $1,8159375 \text{ pu} \angle 30,8048996^\circ$ |
| $V_0 \angle \theta_0$ | $1,001 \text{ pu} \angle 0,0^\circ$ |
| $V_1 \angle \theta_1$ | $0,9899709 \text{ pu} \angle -0,99795888^\circ$ |
| $P_1 + j Q_1$ | $(23,0209245 + j 13,29113695) \text{ pu}$ |

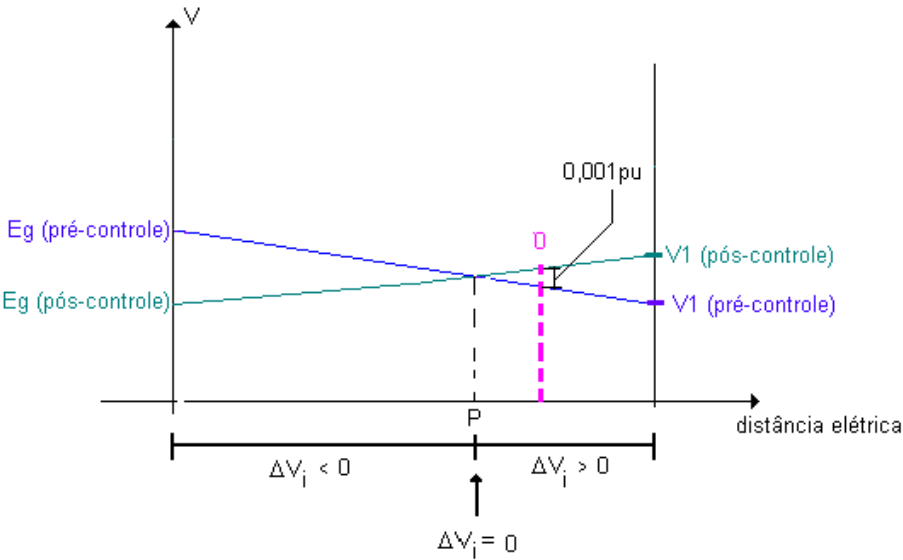


Figura 3.5 – Tensões ao Longo da Rede Antes e Depois da Ação de Controle

O exercício numérico é repetido para um ponto onde a barra terminal 0 está à esquerda do ponto P. Isto significa que a barra terminal se encontra em uma região de operação em que a ação de controle de tensão realizada pelo gerador sobre esta barra terá o efeito esperado. O ponto de operação é apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ponto de Operação onde a Barra 0 está à Esquerda do Ponto P

| | |
|-----------------------|----------------------------------------------|
| $E_g \angle \theta_g$ | $1,029021 \text{ pu} \angle 2,5925672^\circ$ |
| $V_0 \angle \theta_0$ | $1,0 \text{ pu} \angle 0,0^\circ$ |
| $V_1 \angle \theta_1$ | $0,9790487 \text{ pu} \angle -1,0^\circ$ |
| $P_1 + j Q_1$ | $(23,0209245 + j 13,29113695) \text{ pu}$ |

Para este ponto de operação, (3.3) resulta em:

$$d'_{VE} = \frac{\Delta V_0}{\Delta E_g} = 1,0447 \quad (3.5)$$

ou seja, $d'_{VE} > 0$ indicando que as variações das duas tensões ocorrem no mesmo sentido. Esse resultado pode ser comprovado aplicando-se uma variação em E_g e calculando-se a variação resultante em V_0 através da resolução das equações não-lineares de fluxo de carga, como foi feito quando o ponto de operação da Tabela 3.1 estava em análise.

3.3.2.2 Índice Tensão Interna vs. Tensão Terminal para Controle Remoto de Tensão

A representação do controle de tensão de uma barra remota, isto é, uma barra diferente da barra terminal 0, como por exemplo, controle da tensão da barra 1 do lado de alta tensão do transformador elevador, é feita trocando-se de lugar V_0 por V_1 em (3.1), atualizando as respectivas derivadas na matriz Jacobiana.

Usando o ponto de operação da Tabela 3.1, para o qual a barra 1 está à direita do ponto P da Figura 3.3, a tensão interna do gerador E_g varia em sentido oposto à tensão da barra de tensão controlada V_1 . A sensibilidade entre ΔE_g e ΔV_1 deverá expressar este efeito. Montando-se (3.1) modificado e fazendo-se a redução (3.2), com os respectivos valores numéricos, (3.3) resulta em:

$$d'_{VE} = \frac{\Delta V_1}{\Delta E_g} = -6,4163 \quad (3.6)$$

ou seja, $d'_{VE} < 0$, indicando que as variações das duas tensões estão em sentidos opostos, conforme se queria demonstrar.

O exercício numérico é repetido para um ponto onde a barra remota (barra 1) está à esquerda do ponto P. Isto significa que a barra remota se encontra em uma região de operação em que a ação de controle de tensão realizada pelo gerador sobre esta barra terá o efeito esperado. O ponto de operação é o mesmo da

Tabela 3.3. Para este ponto de operação, (3.3) resulta em:

$$d'_{VE} = \frac{\Delta V_1}{\Delta E_g} = 1,0582 \quad (3.7)$$

ou seja, $d'_{VE} > 0$, indicando que as variações das duas tensões ocorrem no mesmo sentido.

3.4 Controle de Tensão por LTCs

Nos programas atuais de fluxo de carga, o controle de tensão por LTC é feito fixando-se o valor desejado de tensão e calculando-se o valor do tape necessário. Se houver convergência do algoritmo e se a lógica deste controle estiver embutida no sistema de equações lineares, é possível verificar se o tape atuou para o lado esperado variando-se o valor da tensão controlada. Entretanto, se a lógica do controle for externa ao sistema de equações, quando então está programada a relação usual entre a variação de tapes e a variação da tensão a ser controlada, só haverá meios de se alcançar o valor da tensão a ser controlada se o sistema estiver na região normal de operação. Por outro lado, se o sistema estiver na região anormal de operação, a relação entre a variação de tapes e a variação da tensão a ser controlada será oposta a usual, e não haverá meios de se alcançar o valor da tensão a ser controlada. Há duas possibilidades: ou o algoritmo não converge ou o tape atinge um limite e o algoritmo converge com um outro valor de tensão. O objetivo é, então, verificar se a troca de tapes produz o efeito desejado no módulo da tensão.

3.4.1 Índice Tape vs. Tensão da Barra Controlada

O modelo π de um LTC colocado entre as barras 0 e 1 é mostrado na Figura 3.6, em qualquer local da rede elétrica, com relação de transformação $t_{01} : 1$ e controlando a tensão na barra 1. Deseja-se criar um índice que expresse a relação entre t_{01} e V_1 .

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga (3.8) é montado para evidenciar a relação entre o tape do LTC conectado entre as barras 0 e 1 e a tensão da barra 1.

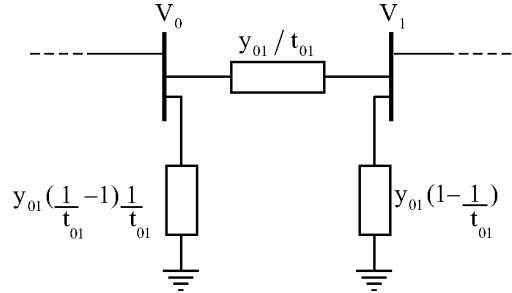


Figura 3.6 – Diagrama Unifilar de um LTC do Sistema

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta t_{01} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

onde os vetores ΔP , ΔQ , $\Delta \theta$ e ΔV incluem todas as barras do sistema. Logo, a matriz $[A]$ tem dimensão $2n \times 2n$ onde n é o número de barras da rede. A linha $[C]$ tem um único elemento não-nulo $\partial \Delta V_1 / \partial V_1 = 1$, enquanto que a coluna $[B]$ tem quatro elementos não-nulos $\partial \Delta P_0 / \partial t_{01}$, $\partial \Delta Q_0 / \partial t_{01}$, $\partial \Delta P_1 / \partial t_{01}$ e $\partial \Delta Q_1 / \partial t_{01}$. O elemento da matriz $[D]$ é nulo. A equação para o cálculo da variação da tensão controlada é: $\Delta V_1 = V_1^{\text{esp}} - V_1^{\text{cal}}$.

Como deseja-se verificar somente as variações da tensão da barra controlada e as variações do tape do LTC entre as barras 0 e 1, faz-se $\Delta P = \Delta Q = 0$, e através da redução:

$$d'_{VT} = [D] - [C] * [A]^{-1} * [B] \quad (3.9)$$

obtém-se:

$$\Delta V_1 = d'_{VT} * \Delta t_{01} \quad (3.10)$$

No programa de análise de redes ANAREDE⁵, o modelo usado tem variação de tapes no lado primário do LTC, e relação de transformação $t : 1$ [36]. Portanto, quando o tape aumenta a tensão do secundário diminui.

⁵ Cedido pelo CEPEL para fins de ensino e pesquisa.

Conforme definido, o índice d'_{VT} indica a relação entre a variação do tape no primário e a variação de tensão na barra controlada no secundário. Quando o efeito da ação de controle tem efeito oposto ao esperado, estas variações ocorrem no mesmo sentido e o valor do índice é positivo. Este resultado pode gerar confusão, já que o costume é observar valores positivos quando se está na região normal de operação. Por isso, é conveniente trocar o sinal do índice. Assim, com modelos de LTC em que o tape no primário controla a tensão no secundário, (3.10) deverá ser utilizada como:

$$\Delta V_1 = d'_{VT} * (-\Delta t_{01}) \quad (3.11)$$

Caso o modelo do LTC seja de tape no primário controlando a tensão do primário, a relação de transformação a ser utilizada é $1 : (1 / t)$ e então, um aumento no tape causa o aumento da tensão no primário. Como as variações são na mesma direção, (3.10) é recomendada.

3.4.2 Exemplos Numéricos

3.4.2.1 Índice Tape do LTC vs. Tensão da Barra Controlada Localmente

O objetivo é verificar se a troca de tapes produz o efeito desejado no módulo da tensão controlada. O sistema mostrado na Figura 3.7 é usado somente para fins ilustrativos, já que os valores de tensão estão totalmente fora da faixa usual de operação. A impedância do LTC é $0,2 \angle 90^\circ$ pu para relação de transformação nominal e a impedância da linha de transmissão série é $0,01 \angle 70^\circ$ pu.

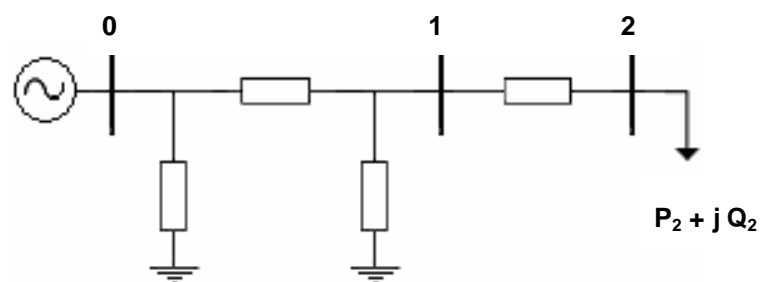


Figura 3.7 – Diagrama Unifilar do Sistema com Gerador, LTC, Linha de Transmissão e Carga

Deseja-se calcular o índice que expressa a relação entre t_{01} e V_1 , isto é, entre o tap do LTC entre as barras 0 e 1 e a tensão da barra 1. Inicialmente analisa-se o caso onde a barra controlada 1 encontra-se em uma região onde a ação de controle de tensão realizada pelo transformador sobre ela terá efeito oposto ao esperado. Na Tabela 3.4 é mostrado o ponto de operação correspondente.

Tabela 3.4 – Ponto de Operação Onde a Barra Controlada Está na Região Anormal

| | |
|-----------------------|----------------------------------|
| t_{01} | 1,0000 pu |
| $V_0 \angle \theta_0$ | 1,0000 pu $\angle 0,0^\circ$ |
| $V_1 \angle \theta_1$ | 0,4885 pu $\angle -34,973^\circ$ |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 0,4636 pu $\angle -37,602^\circ$ |
| $P_2 + j Q_2$ | (1,1400 + j 0,8083) pu |

Atribuindo valores numéricos a (3.8), fazendo-se a redução (3.9), chega-se a:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t_{01}} = +1,6552 \quad (3.12)$$

Conforme (3.11), $d'_{VT} = \frac{-\Delta V_1}{\Delta t_{01}}$, e então, $d'_{VT} < 0$ indicando então que as ações têm efeito oposto ao esperado.

O mesmo exercício é repetido agora para um ponto de operação na região normal de operação, mostrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Ponto de Operação Onde a Barra Controlada Está na Região Normal

| | |
|-----------------------|----------------------------------|
| t_{01} | 1,0000 pu |
| $V_0 \angle \theta_0$ | 1,0000 pu $\angle 0,0^\circ$ |
| $V_1 \angle \theta_1$ | 0,6618 pu $\angle -25,028^\circ$ |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 0,6433 pu $\angle -26,423^\circ$ |
| $P_2 + j Q_2$ | (1,1400 + j 0,8083) pu |

Atribuindo valores numéricos a (3.8), fazendo-se a redução (3.9), chega-se a:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t_{01}} = -4,0988 \quad (3.13)$$

Conforme (3.11), $d'_{VT} = \frac{-\Delta V_1}{\Delta t_{01}}$, e então, $d'_{VT} > 0$ indicando então que as ações têm efeito esperado.

3.4.2.2 Índice Tape do LTC vs. Tensão da Barra Controlada Remotamente

Deseja-se calcular o índice que expressa a relação entre t_{01} e V_2 isto é, entre o tape do LTC entre as barras 0 e 1 e a tensão da barra 2 controlada remotamente por ele.

Com o mesmo ponto de operação mostrado na Tabela 3.4, chega-se a:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta t_{01}} = 1,7469 \quad (3.14)$$

Como $d'_{VT} = \frac{-\Delta V_2}{\Delta t_{01}}$, então $d'_{VT} < 0$ indicando então que as ações têm o efeito oposto ao esperado. Esse resultado não surpreende, pois a barra 1 já tinha índice negativo e, portanto, estava à direita do ponto P. Como a barra 2 está à direita da barra 1, então necessariamente, está à direita do ponto P.

O mesmo procedimento é repetido para um ponto de operação na região normal. Este ponto é o da Tabela 3.5 e chega-se a:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta t_{01}} = -4,2234 \quad (3.15)$$

Como $d'_{VT} = \frac{-\Delta V_2}{\Delta t_{01}}$, então $d'_{VT} > 0$ indicando então que as ações têm o efeito esperado. Esse resultado não poderia ser previsto, pois a barra 1 tinha índice positivo e, portanto, estava à esquerda do ponto P. Não se sabia, em princípio, se a barra 2 estaria também à esquerda do ponto P ou à sua direita.

3.5 Controle de Tensão por Capacitor e Reator

Ao contrário do caso do gerador e do caso do LTC com lógica de controle de tensão externa ao sistema de equações linearizadas, os programas de fluxo de carga são capazes de verificar a influência da introdução / remoção de capacitores e reatores sobre a tensão. Basta executar duas vezes o algoritmo com valores diferentes de susceptância. A fim de se evitar essa prática de tentativa e erro, desenvolve-se um índice que forneça a resposta desejada.

3.5.1 Índice Susceptância vs. Tensão Terminal

Para ilustrar este caso, supõe-se um capacitor ou reator em derivação, modelado como sendo uma susceptância e conectado a uma certa barra 1 de um sistema qualquer. Procura-se um índice capaz de relacionar a variação da susceptância na barra 1 com a tensão desta barra.

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga é montado para evidenciar a relação entre b_{sh} e V_1 , isto é, entre a susceptância do capacitor ou reator conectado à barra 1 e a tensão desta barra:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta b_{sh} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde os vetores ΔP , ΔQ , $\Delta \theta$ e ΔV incluem todas as barras do sistema. A equação de balanço de potência reativa da barra 1 é função da susceptância b_{sh} . As derivadas em relação a susceptância b_{sh} em (3.16) não são nulas somente para $\partial Q_1 / \partial b_{sh}$ na matriz $[B]$. A linha $[C]$ tem um único elemento não-nulo $\partial \Delta V_1 / \partial V_1 = 1$, enquanto que o elemento da matriz $[D]$ é nulo. O erro da equação de controle é calculado por: $\Delta V_1 = V_1^{esp} - V_1^{cal}$.

Considerando-se $\Delta P = \Delta Q = 0$ em (3.16) e, através da redução (3.17).

$$d'_{vb} = [D] - [C] * [A]^{-1} * [B] \quad (3.17)$$

Obtém-se:

$$\Delta V_1 = d'_{vb} * \Delta b_{sh} \quad (3.18)$$

Um aumento / diminuição da admitância em derivação deve corresponder a um aumento / diminuição da tensão controlada. O índice d'_{vb} calculado adequadamente deve ser positivo quando a ação de controle tiver o efeito esperado, e negativo quando a ação de controle apresentar efeito oposto ao esperado.

3.5.2 Exemplos Numéricos

3.5.2.1 Índice Susceptância vs. Tensão Terminal

Para ilustrar será utilizado um sistema de 5 barras apresentado na Figura 3.8. O LTC entre as barras 1 e 3, controlando a tensão na barra 3, e o LTC entre as barras 2 e 4, controlando a tensão na barra 4, têm impedância igual a $0,02 \angle 90^\circ$ pu para a relação de transformação nominal. As linhas de transmissão têm impedância igual a $0,04 \angle 90^\circ$ pu.

Procura-se o índice capaz de relacionar a variação da susceptância do capacitor da barra 5 com a tensão desta barra.

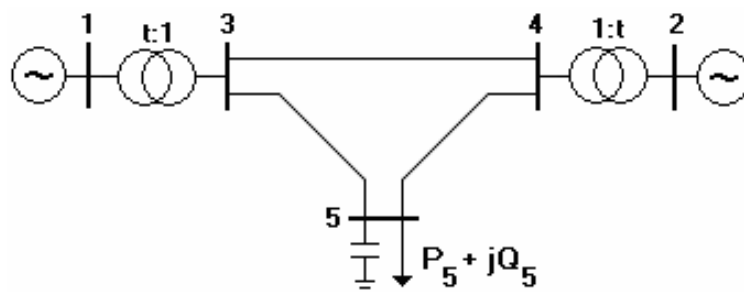


Figura 3.8 – Diagrama Unifilar do Sistema de 5 Barras

Tabela 3.6 – Ponto de Operação com a Barra 5 na Região Normal

| | |
|-----------------------|-------------------------------------|
| $V_1 \angle \theta_1$ | 1,050 pu \angle 0,0 ⁰ |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 1,010 pu \angle 7,6 ⁰ |
| $V_3 \angle \theta_3$ | 1,000 pu \angle -2,3 ⁰ |
| $V_4 \angle \theta_4$ | 1,000 pu \angle 0,8 ⁰ |
| $V_5 \angle \theta_5$ | 1,018 pu \angle -9,8 ⁰ |
| $P_5 + j Q_5$ | (8,00 + j 3,00) pu |

Para o ponto de operação da Tabela 3.6, onde $P_1 = 200$ MW, $P_2 = 600$ MW, $t_{13} = 0,8$ pu e $t_{24} = 0,9$ pu, a barra 5 se encontra na região normal de operação. Um aumento da susceptância do capacitor da barra 5 resultará em um aumento da tensão desta barra. De fato, ao aumentar o banco de capacitores de 440 Mvar para 500 Mvar (potência reativa gerada quando a tensão é a nominal) verificou-se, através da resolução das equações não-lineares de fluxo de carga, que a tensão da barra aumentou de 1,018 pu para 1,033 pu.

Para o ponto de operação da Tabela 3.7, onde $P_1 = 1090,08$ MW, $P_2 = 600$ MW, $t_{13} = 0,8$ e $t_{24} = 0,9$ pu, a barra 5 se encontra na região anormal de operação. Um aumento da susceptância do capacitor nesta barra provoca uma redução da tensão da mesma. De fato, aumentou-se o capacitor de 440 para 500 Mvar e verificou-se, através da resolução das equações não-lineares de fluxo de carga, que a tensão da barra caiu de 0,5707 para 0,5637 pu.

Tabela 3.7 – Ponto de Operação com a Barra 5 na Região Anormal

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| $V_1 \angle \theta_1$ | 1,0500 pu \angle 0,00 ⁰ |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 1,0100 pu \angle -7,47 ⁰ |
| $V_3 \angle \theta_3$ | 0,9837 pu \angle -9,72 ⁰ |
| $V_4 \angle \theta_4$ | 0,9175 pu \angle -14,16 |
| $V_5 \angle \theta_5$ | 0,5707 pu \angle -50,44 |
| $P_5 + j Q_5$ | (16,90 + j 6,34) pu |

Com o ponto de operação na região normal apresentado na Tabela 3.6, (3.16) é montado e através da redução (3.17), obtém-se para (3.18):

$$d'_{vb} = \frac{\Delta V_5}{\Delta b_{sh}} = 0,0258 \quad (3.19)$$

isto é, $d'_{vb} > 0$ indicando que as duas variações ocorrem no mesmo sentido e que a ação de controle tem o efeito esperado.

Para o ponto de operação na região anormal apresentado na Tabela 3.8, (3.16) é montado e através da redução (3.17), obtém-se para (3.18):

$$d'_{vb} = \frac{\Delta V_5}{\Delta b_{sh}} = -0,0123 \quad (3.20)$$

isto é, $d'_{vb} < 0$ indicando que as duas variações ocorrem em sentidos opostos e que a ação de controle não tem o efeito esperado.

Observa-se nos dois pontos de operação que o sinal do índice, positivo para ação de controle bem sucedida, e negativo para ação de controle mal sucedida, é coerente com os resultados obtidos resolvendo-se as equações de fluxo de carga.

3.5.2.2 Índice Susceptância vs. Tensão Remota

O sistema de 5 barras apresentado no item anterior não é adequado para ser usado como sistema-teste pelo fato de que as duas barras conectadas à barra 5, onde se encontra o capacitor, já estão controladas pelos transformadores entre as barras 1 e 3 & 2 e 4. O sistema a ser utilizado é então o de 3 barras mostrado na Figura 3.9. A linha de transmissão entre as barras 1 e 2 tem impedância de $0,2 \angle 70^\circ$ pu, enquanto que a da linha entre as barras 2 e 3 vale $0,01 \angle 70^\circ$ pu. A susceptância do capacitor é de 1,0 pu.

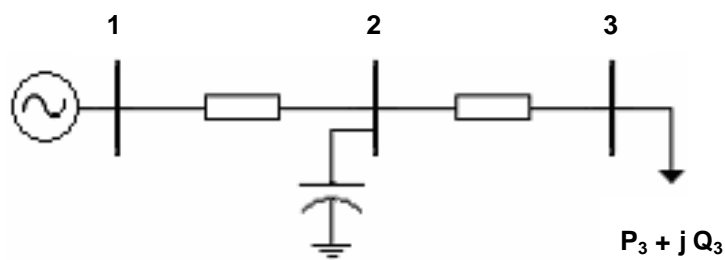


Figura 3.9 – Diagrama Unifilar do Sistema de 3 Barras

O ponto de operação do sistema de 3 barras é apresentado na Tabela 3.8. A barra 3, controlada remotamente, encontra-se na região anormal de operação.

Tabela 3.8 – Ponto de Operação na Região Anormal

| | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| $V_1 \angle \theta_1$ | 1,0000 pu $\angle 0,0^\circ$ |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 0,2554 pu $\angle -33,1107^\circ$ |
| $V_3 \angle \theta_3$ | 0,2255 pu $\angle -39,8443^\circ$ |
| $P_3 + j Q_3$ | (0,9099 + j 0,5253) pu |

Para o ponto de operação considerado, (3.18) é expressa numericamente por:

$$d'_{vb} = \frac{\Delta V_3}{\Delta b_{sh}} = -0,0099 \quad (3.21)$$

ou seja, $d'_{vb} < 0$ indicando que as duas variações ocorrem em sentidos opostos e que a ação de controle não tem o efeito esperado.

Na Tabela 3.9 mostra-se o ponto de operação do sistema de 3 barras operando na região normal.

Tabela 3.9 – Ponto de Operação na Região Normal

| | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| $V_1 \angle \theta_1$ | 1,0000 pu $\angle 0,0^\circ$ |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 1,0095 pu $\angle -11,7043^\circ$ |
| $V_3 \angle \theta_3$ | 1,0015 pu $\angle -12,0870^\circ$ |
| $P_3 + j Q_3$ | (0,9099 + j0,5253) pu |

Para o ponto de operação considerado, (3.18) é expressa numericamente por:

$$d'_{vb} = \frac{\Delta V_3}{\Delta b_{sh}} = 0,2778 \quad (3.22)$$

ou seja, $d'_{vb} > 0$ indicando que as duas variações ocorrem no mesmo sentido e que a ação de controle tem o efeito esperado.

3.6 Controle de Tensão por SVC

No cálculo dos índices de adequação de controle de tensão deseja-se relacionar a grandeza física efetivamente usada para o controle e a tensão a ser controlada. No caso dos SVCs têm-se duas alternativas: i) índice susceptância vs. tensão terminal; ii) índice ângulo de disparo dos tiristores vs. tensão terminal. Os dois índices devem ser equivalentes em termos qualitativos, pois se sabe que o ângulo de disparo dos tiristores e a susceptância do SVC variam sempre no mesmo sentido (ver Figura 3.13).

As equações de controle usadas em programas de fluxo de carga [37] não são adequadas para o cálculo dos índices mencionados, pois relacionam a corrente injetada, ou a potência reativa gerada pelo SVC, dependendo do modo de controle, com a tensão controlada. Para o caso do índice susceptância vs. tensão terminal, usa-se (3.23) para a faixa de controle linear no modo "injeção de corrente" e, (3.24) para a faixa de controle linear no modo "injeção de potência reativa" [38].

$$V_{\text{cont}} - V_{\text{esp}} - X_{\text{SL}} * B_{\text{SVC}} * V_t = 0 \quad (3.23)$$

$$V_{\text{cont}} - V_{\text{esp}} - X_{\text{SL}} * B_{\text{SVC}} * V_t^2 = 0 \quad (3.24)$$

onde X_{SL} de (3.23) é dado por:

$$X_{\text{SL}} = \frac{V_{\text{min}} - V_{\text{max}}}{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}} \quad (3.25)$$

enquanto que X_{SL} de (3.24) é dado por:

$$X_{\text{SL}} = \frac{V_{\text{min}} - V_{\text{max}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}} \quad (3.26)$$

Para o índice ângulo de disparo dos tiristores vs. tensão terminal usa-se (3.27) para a faixa de controle linear no modo "injeção de corrente" e (3.28) para a faixa de controle linear no modo "injeção de potência reativa" [38].

$$V_{\text{contr}} - V_{\text{esp}} - X_{\text{SL}} * \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} * (2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha))}{X_C X_L} \right) * V_t = 0 \quad (3.27)$$

$$V_{\text{contr}} - V_{\text{esp}} - X_{\text{SL}} * \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} * (2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha))}{X_C X_L} \right) * V_t^2 = 0 \quad (3.28)$$

Fora da faixa de controle linear, quando a tensão não é controlada, o equipamento se comporta como uma reatância fixa conectada à barra. Usa-se então (3.29) e (3.30), tanto para o modo "injeção de corrente" como para "injeção de potência", sendo dados B_{\min} e B_{\max} [37, 38]:

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

$$Q_{\text{SVC}} - B_{\max} * V_t^2 = 0 \quad (3.29)$$

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

$$Q_{\text{SVC}} - B_{\min} * V_t^2 = 0 \quad (3.30)$$

onde V_t é a tensão da barra conectada ao SVC.

3.6.1 Índice Susceptância vs. Tensão Terminal

O sistema de equações linearizadas (3.31) usado no cálculo deste índice, considerando-se a susceptância do SVC como variável independente, é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_{\text{SVC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta B_{\text{SVC}} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

onde os vetores ΔP , ΔQ , $\Delta \theta$ e ΔV incluem todas as barras do sistema. Logo, a matriz $[A]$ tem dimensão $2n \times 2n$ onde n é o número de barras da rede. A linha $[C]$ tem um único elemento não-nulo $\partial \Delta V_{\text{SVC}} / \partial V_1 = 1$, supondo o SVC conectado à

barra 1, enquanto que a coluna $[B]$ tem também um único elemento não-nulo $\partial \Delta Q_1 / \partial B_{SVC}$. O elemento da matriz $[D]$ é $\partial \Delta V_{SVC} / \partial B_{SVC}$.

Para o modo "injeção de corrente" usa-se (3.32) para se determinar o erro da equação de controle, enquanto que para o modo "injeção de potência" é usada a equação (3.33).

$$\Delta V_{SVC} = V_{esp} + X_{SL} * B_{SVC} * V_t - V_{cont} \quad (3.32)$$

$$\Delta V_{SVC} = V_{esp} + X_{SL} * B_{SVC} * V_t^2 - V_{cont} \quad (3.33)$$

onde, $B_{SVC} * V_t$ é a corrente do SVC e $B_{SVC} * V_t^2$ é a potência reativa gerada pelo SVC.

Considerando-se $\Delta P = \Delta Q = 0$, (3.31) é reduzido para dimensão (1×1) . Relacionando a tensão controlada com a susceptância do SVC tem-se:

$$\Delta V_{SVC} = d'_{VB} * \Delta B_{SVC} \quad (3.34)$$

onde

$$d'_{VB} = \frac{\partial \Delta V_{SVC}}{\partial B_{SVC}} \quad (3.35)$$

Um aumento / diminuição da admitância em derivação do SVC 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.

3.6.2 Índice Ângulo de Disparo vs. Tensão Terminal

O sistema de equações linearizadas (3.36) é usado no cálculo deste índice, considerando-se o ângulo de disparo dos tiristores como variável independente.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V_{SVC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

onde os vetores ΔP , ΔQ , $\Delta \theta$ e ΔV incluem todas as barras do sistema. Para o modo "injeção de corrente", usa-se (3.37) para se determinar o erro da equação de controle:

$$\Delta V_{SVC} = V_{esp} - V_{cont} + X_{SL} * \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} * (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) * V_t \quad (3.37)$$

Para o modo "injeção de potência reativa" usa-se (3.38) para se calcular o erro da equação de controle.

$$\Delta V_{SVC} = V_{esp} - V_{cont} + X_{SL} * \left(\frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} * (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \right) * V_t^2 = 0 \quad (3.38)$$

Considerando-se $\Delta P = \Delta Q = 0$, (3.36) é reduzido para dimensão (1 x 1). Relacionando a tensão controlada com o ângulo de disparo dos tiristores tem-se:

$$\Delta V_{SVC} = d'_{V\alpha} * \Delta \alpha \quad (3.39)$$

onde

$$d'_{V\alpha} = \frac{\partial \Delta V_{SVC}}{\partial \alpha} \quad (3.40)$$

O aumento / diminuição do ângulo de disparo dos tiristores do SVC deve resultar no aumento / diminuição do módulo da tensão controlada, conforme pode ser visto na Figura 3.10. Nela, quando V_{ref} está no ponto 0, o SVC opera no ponto a. Deslocando-se V_{ref} para o ponto 1, o SVC passa a operar no ponto b.

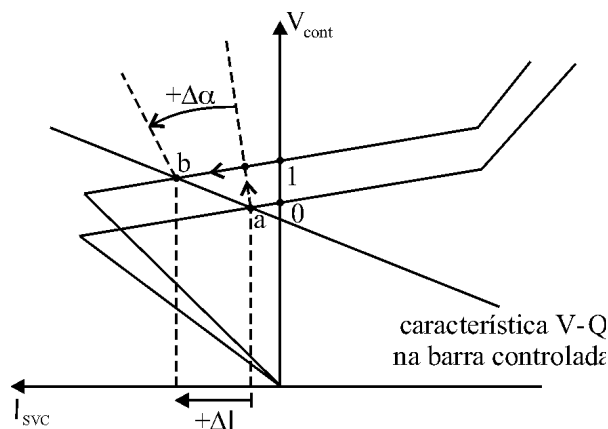


Figura 3.10 – Efeito Esperado da Variação de α sobre V_{cont}

Observa-se na Figura 3.11 um comportamento oposto ao esperado. Aumentou-se V_{ref} do ponto 0 para 1 e a operação do SVC passou do ponto a para o b. Observa-se o aumento de V_{cont} e a diminuição de α .

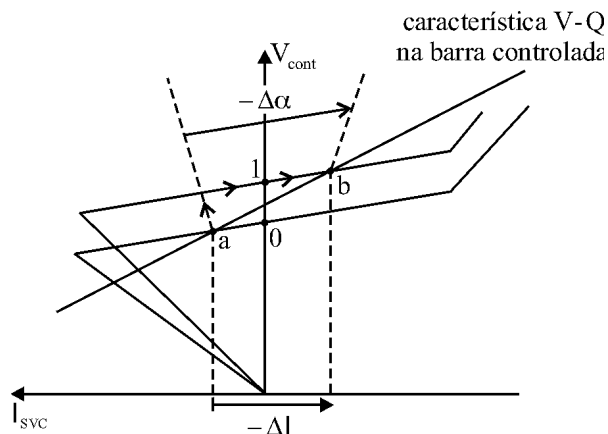


Figura 3.11 – Efeito Oposto ao Esperado da Variação de α sobre V_{cont}

3.6.3 Exemplos Numéricos

É considerado o sistema de 5 barras mostrado na Figura 3.12, onde o SVC, composto por um banco de capacitores fixos (FC) em paralelo com reatores controlados a tiristores (TCR), controla a tensão da barra 5. Os dados de linha deste sistema são os mesmos do sistema da Figura 3.8. Os tapes dos LTCs são fixos.

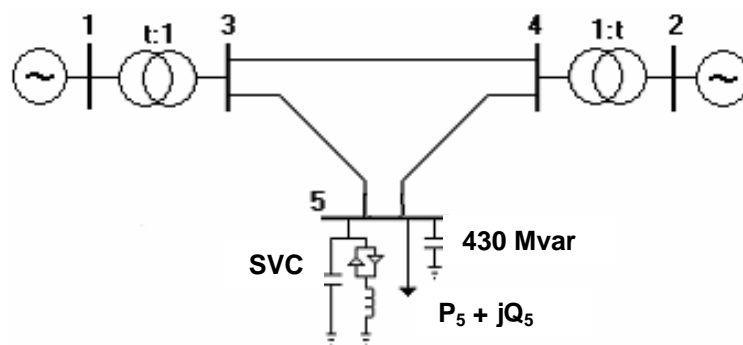


Figura 3.12 – Diagrama Unifilar do Sistema de 5 Barras com SVC

Os dados do SVC são: $X_{SL} = -2,00\%^6$, $Q_{\min} = -50$ Mvar (para $V = 1$ pu), $Q_{\max} = 50$ Mvar (para $V = 1$ pu). Considerando-se uma potência base de 100 MVA, têm-se $B_{\min} = -0,5$ pu e $B_{\max} = 0,5$ pu.

Quando a potência gerada pelo SVC é máxima (Q_{\max}), os tiristores estão bloqueados ($\alpha = 180^\circ$), não permitindo a passagem de corrente pelo TCR. Pode-se então calcular a reatância do capacitor:

$$X_C = \frac{1}{B_{\max}} = 2,0 \text{ pu} \quad (3.41)$$

Quando a potência absorvida pelo SVC é máxima (Q_{\min}), os tiristores estão permitindo a condução máxima de corrente indutiva que flui pelo indutor ($\alpha = 90^\circ$), sendo neste ponto a susceptância do SVC igual a susceptância do reator em paralelo com a susceptância do capacitor. Logo, a susceptância do reator pode ser calculada por (3.42), e sua reatância por (3.43).

$$B_L = B_{\text{SVC}(Q_{\min})} - B_C = -1,0 \text{ pu} \quad (3.42)$$

$$X_L = -\frac{1}{B_L} = 1,0 \text{ pu} \quad (3.43)$$

Os gráficos mostrados na Figura 3.13 foram construídos usando-se (3.44). São mostradas as susceptâncias do FC e do TCR em função do ângulo de disparo dos tiristores, assim como a susceptância total do SVC, formada pela combinação destas duas susceptâncias.

$$B_{\text{SVC}} = -jB_{V(\text{TCR})} // jB_C = \frac{X_{V(\text{TCR})} - X_C}{X_C - X_{V(\text{TCR})}} = \frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} * (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{X_C X_L} \quad (3.44)$$

⁶ No programa de análise de redes ANAREDE, o sinal negativo deste parâmetro é considerado internamente. Deve-se usar o valor 2,00%.

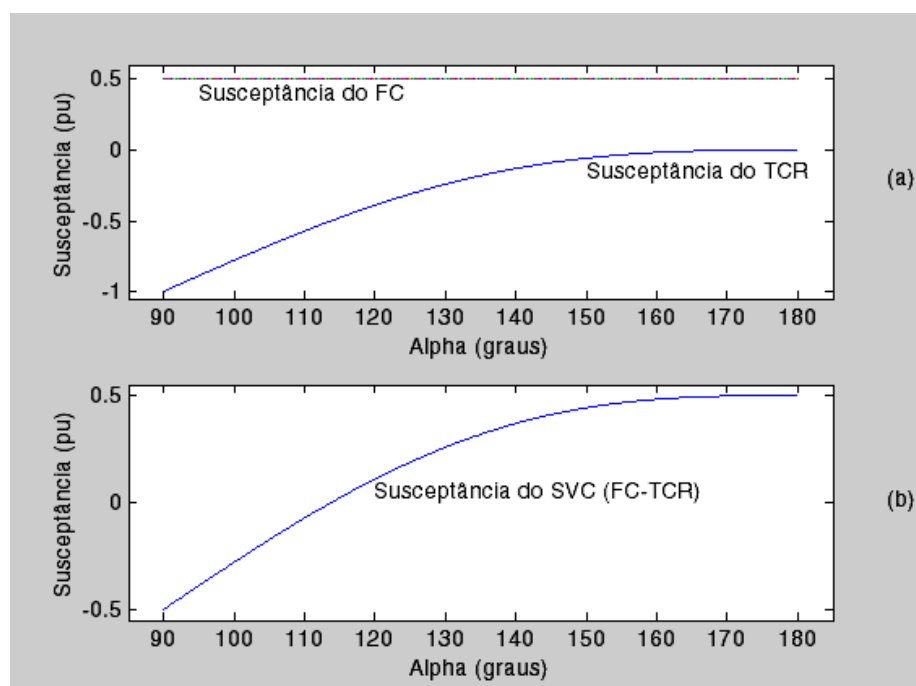


Figura 3.13 – Susceptâncias do FC, TCR e SVC em Função do Ângulo de Disparo dos Tiristores

No ponto de operação pertencente à região de operação definida como normal, mostrado na Tabela 3.10, e no qual $V_{esp} = 1,018$ pu, têm-se:

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = 0,0630 \quad (3.45)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = 0,0633 \quad (3.46)$$

A ação de controle que consiste em aumentar V_{esp} para 1,028 pu, resulta no ponto de operação mostrado na terceira coluna da Tabela 3.10, onde se observa o aumento da tensão controlada V_5 , da susceptância do SVC e do ângulo de disparo dos tiristores. Este resultado é coerente com os índices positivos mostrados em (3.45) e (3.46), que indicam que a ação de controle tem o efeito esperado.

Tabela 3.10 – Efeito do Aumento de V_{esp} no Ponto de Operação da Região Normal

| V_{esp} | 1,018 pu | 1,028 pu |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| $V_1 \angle \theta_1$ | 1,050 pu \angle 0,0° | 1,050 pu \angle 0,0° |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 1,010 pu \angle 7,6° | 1,010 pu \angle 7,6° |
| $V_3 \angle \theta_3$ | 1,000 pu \angle 2,3° | 1,000 pu \angle 2,3° |
| $V_4 \angle \theta_4$ | 1,000 pu \angle 0,8° | 1,002 pu \angle 0,7° |
| $V_5 \angle \theta_5$ | 1,017 pu \angle -9,8° | 1,023 pu \angle -9,8° |
| Q_{SVC} | 6,6 Mvar | 23,2 Mvar |
| B_{SVC} | 0,0638 pu | 0,221685 pu |
| α | 117,36° | 127,33° |
| t_{13} | 1,053 pu | 1,053 pu |
| t_{24} | 1,002 pu | 1,002 pu |

No ponto de operação mostrado na segunda coluna da Tabela 3.11, têm-se:

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = -0,0057 \quad (3.47)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = -0,0051 \quad (3.48)$$

A ação de controle que consiste em aumentar V_{esp} para 0,573 pu, fornece o ponto de operação mostrado na terceira coluna da Tabela 3.11, onde se observa um aumento da tensão controlada V_5 e a diminuição da susceptância do SVC e do ângulo de disparo dos tiristores. Este resultado é coerente com os índices negativos mostrados em (3.47) e (3.48), que indicam que a ação de controle tem efeito oposto ao esperado.

Tabela 3.11 – Efeito do Aumento de V_{esp} no Ponto de Operação da Região Anormal

| V_{esp} | 0,571 pu | 0,573 pu |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| $V_1 \angle \theta_1$ | 1,050 pu \angle 0,0° | 1,050 pu \angle 0,0° |
| $V_2 \angle \theta_2$ | 1,010 pu \angle -7,5° | 1,010 pu \angle -7,4° |
| $V_3 \angle \theta_3$ | 0,983 pu \angle -9,7° | 0,985 pu \angle -9,7° |

| V_{esp} | 0,571 pu | 0,573 pu |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| $V_4 \angle \theta_4$ | 0,917 pu $\angle -14,2^0$ | 0,919 pu $\angle -14,1^0$ |
| $V_5 \angle \theta_5$ | 0,570 pu $\angle -50,5^0$ | 0,574 pu $\angle -50,1^0$ |
| Q_{SVC} | 5,3 Mvar | -5,6 Mvar |
| B_{SVC} | 0,1631 pu | -0,1700 pu |
| α | 123,36° | 105,20° |
| t_{13} | 0,800 pu | 0,800 pu |
| t_{24} | 0,900 pu | 0,900 pu |

Não foi possível obter uma equação explícita para o ângulo α de disparo dos tiristores do TCR. Para obter este ângulo, variou-se α entre 90° e 180° em (3.44), e então, foram montadas tabelas com α e os valores correspondentes de B_{SVC} . O valor procurado de α é o correspondente na tabela ao valor calculado de B_{SVC} .

A partir dos dados do ponto de operação inicial mostrado na Tabela 3.10, têm-se:

$$\Delta V_5 = 0,0060 \text{ pu} ; \Delta B_{SVC} = 0,1579 \text{ pu} ; \Delta \alpha = 0,1740 \text{ rad} \therefore$$

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = 0,0380 \quad (3.49)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = 0,0345 \quad (3.50)$$

A partir dos dados do ponto de operação após o aumento de V_{esp} , mostrado na Tabela 3.11, têm-se:

$$\Delta V_5 = 0,0040 \text{ pu} ; \Delta B_{SVC} = -0,3331 \text{ pu} ; \Delta \alpha = -0,3170 \text{ rad} \therefore$$

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = -0,0120 \quad (3.51)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = -0,0126 \quad (3.52)$$

Comparando-se os valores calculados em (3.45) e (3.46):

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = 0,0630 \quad (3.53)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = 0,0633 \quad (3.54)$$

com os obtidos através do fluxo de carga em (3.49) e (3.50):

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = 0,0380 \quad (3.55)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = 0,0345 \quad (3.56)$$

Observa-se uma diferença, que pode ser devida:

- i. ao procedimento de cálculo, já que (3.45) e (3.46) foram obtidas a partir do sistema de equações lineares no ponto de operação original, enquanto que (3.49) e (3.50) foram obtidas através das equações não-lineares, resolvidas através de um processo iterativo com uma certa precisão e;
- ii. à interação do controle de tensão promovido pelo SVC com o controle de tensão através dos geradores do sistema.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado à diferença verificada entre (3.47) e (3.48):

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = -0,0057 \quad (3.57)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = -0,0051 \quad (3.58)$$

e com os obtidos através do fluxo de carga em (3.51) e (3.52):

$$d'_{VB} = \frac{\Delta V_5}{\Delta B_{SVC}} = -0,0120 \quad (3.59)$$

e

$$d'_{V\alpha} = \frac{\Delta V_5}{\Delta \alpha} = -0,0126 \quad (3.60)$$

3.7 Conclusões

Foram criados índices que verificam a eficácia de ações de controle de tensão. Os índices relacionam a grandeza física efetivamente usada para controlar a tensão e a tensão a ser controlada que pode ser local ou remota. Foram estudados geradores e compensadores síncronos, LTCs, SVCs e capacitores e reatores em paralelo. Em inúmeros testes numéricos os índices apresentaram resultados qualitativamente coerentes com aqueles obtidos pela resolução (analítica, iterativa por Newton ou iterativa continuada) das equações de fluxo de potência.

A ferramenta proposta neste trabalho complementa a análise da ação de controle através de simulação no domínio do tempo que não fornece sensibilidades e pode ser computacionalmente proibitiva.