

## 5

### Efeito Contrário de Ações de Controle de Tensão

#### 5.1

##### Introdução

O controle de tensão nos terminais do gerador, executado pelos atuais algoritmos de fluxo de carga, é feito fixando-se o módulo da tensão e avaliando-se a necessidade de potência reativa. A tensão de excitação não aparece no problema e, portanto, a eficácia do controle de tensão não pode ser medida. É certo que a relação entre a tensão e a variação da potência reativa pode ser analisada, mas esta análise não é conclusiva acerca da eficácia do controle.

Para comprovar esta afirmação, na Figura 5.1 mostram-se duas curvas traçadas a partir de um mesmo ponto de operação mostrado na Tabela 5.2: i) variação da tensão terminal com a potência reativa que chega à barra terminal, curva  $V_G Q_G$  e ii) variação da tensão terminal com a tensão de excitação, curva  $V_G E_G$ . A preocupação é mostrar qualitativamente a questão.

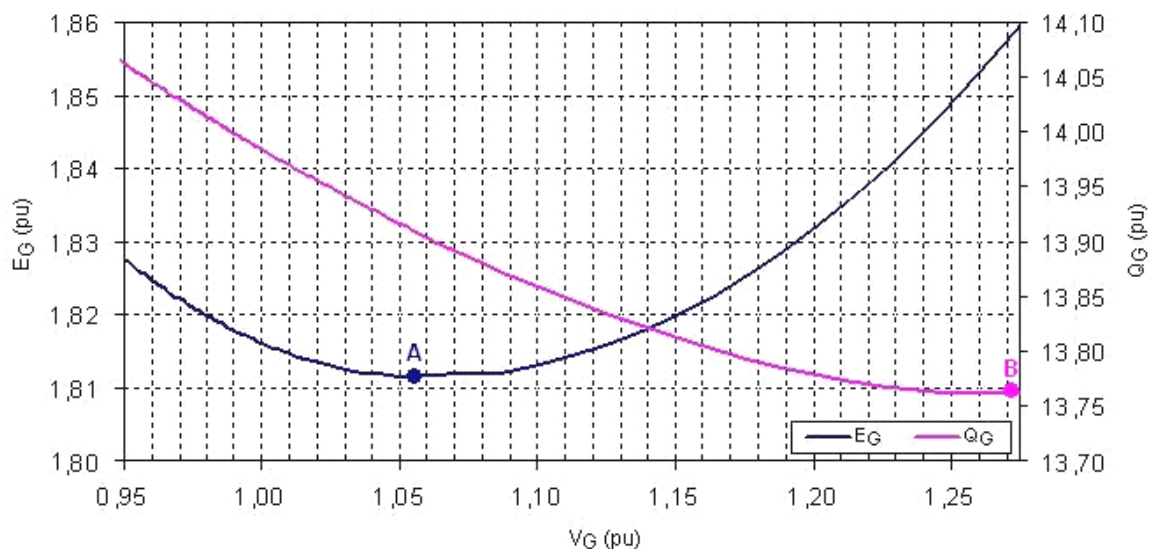


Figura 5.1 - Curvas Tensão de Excitação e Potência Reativa Versus a Tensão Terminal do Gerador

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 1,055 pu (ponto A na Figura 5.1); para o segundo caso

a tensão é de aproximadamente 1,275 pu (ponto B na Figura 5.2). Assim, as relações entre  $V_G$  e  $Q_G$  e entre  $V_G$  e  $E_G$  são as usuais somente para  $V_G > 1,275$  pu. Da mesma forma, as duas relações são opostas a usual para  $V_G < 1,055$  pu. Entre estes dois valores de  $V_G$ , tem-se a relação usual entre  $V_G$  e  $E_G$  e, relação oposta entre  $V_G$  e  $Q_G$ . Justifica-se, então, a necessidade de se estudar a relação entre  $V_G$  e  $E_G$ , ou em termos mais gerais, a relação entre a tensão controlada (terminal) e a grandeza controladora (excitação).

## 5.2

### O Porquê da Relação Oposta entre a Tensão de Excitação e a Tensão Terminal

Para as simulações numéricas, o gerador foi modelado por tensão  $E_G$  atrás da reatância síncrona  $X_s$ , como é adequado em estudos de regime permanente. A barra terminal do gerador com tensão  $V_G$  está ligada à barra de carga com tensão  $V_L$  por uma linha série de impedância  $Z_t$ . A barra de carga tem uma carga com fator de potência constante. Quando a corrente de excitação atinge seu limite, a tensão de excitação é fixada e a tensão terminal não é mais controlada. O diagrama unifilar é mostrado na Figura 5.2.

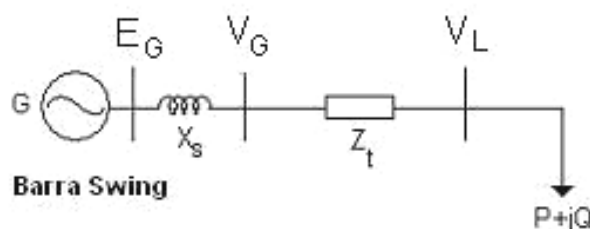


Figura 5.2 - Modelo do Gerador, Linha de Transmissão e Carga

A potência elétrica gerada em dois pontos de operação “K” e “K+1” pode ser escrita como [Prada, R.B., Lafitte J.L., Medeiros L., Ferreira, L.F., Lima, M.P., 2007]:

$$P_{GL}^k = \frac{E_G^k \cdot V_G^k}{X_s} \cdot (\sin \delta)^k \quad (5.1)$$

$$P_{GL}^{k+1} = \frac{E_G^{k+1} \cdot V_G^{k+1}}{X_s} \cdot (\sin \delta)^{k+1} \quad (5.2)$$

Pode expressar-se (5.2) em função das variações de  $\Delta P_{GL}^{k+1}$ ,  $\Delta E_G^{k+1}$ ,  $\Delta V_G^{k+1}$  e  $(\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}$ :

$$P_{GL}^k + \Delta P_{GL}^{k+1} = \frac{1}{X_s} \cdot (E_G^k + \Delta E_G^{k+1}) \cdot (V_G^k + \Delta V_G^{k+1}) \cdot [(\text{sen}\delta)^k + (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}] \quad (5.3)$$

Como o interesse é na relação entre  $E_G$  e  $V_G$ , assume-se que as perdas na resistência da linha não variam e que a carga consome a mesma potência e então, faz-se  $\Delta P_{GL}^{k+1} = 0$ . Operando (5.1) e (5.3) obtém-se a variação da tensão na barra terminal do gerador:

$$\Delta V_G^{k+1} = -V_G^k \cdot \frac{\text{NUM}}{\text{DEN}} \quad (5.4)$$

onde:

$$\text{NUM} = [\Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen}\delta)^k + E_G^k \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1} + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}] \quad (5.5)$$

$$\text{DEN} = [E_G^k \cdot (\text{sen}\delta)^k + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen}\delta)^k + E_G^k \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1} + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}] \quad (5.6)$$

### 5.2.1

#### Exemplo Numérico

Para exemplificar como funciona (5.4) e poder explicar a possibilidade da existência da relação oposta entre a tensão de excitação e a tensão terminal do gerador, consideram-se variações na tensão de excitação do gerador, com referência aos pontos de operação dos casos-base mostrados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 - Ponto de Operação na Região Normal da Curva SV

|                                   |                               |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| $E_G (\text{pu}) \angle \theta_0$ | $1,1591 \angle 2,6000^\circ$  |
| $V_G (\text{pu}) \angle \theta_G$ | $1,0000 \angle -9,3817^\circ$ |
| $V_L (\text{pu}) \angle \theta_L$ | $0,9948 \angle -9,6414^\circ$ |
| $P_L$                             | 6,00 pu                       |
| $Q_L$                             | 3,30 pu                       |
| $Z_t$                             | $0,001 \angle 70^\circ$ pu    |
| $X_s$                             | $0,04 \angle 90^\circ$ pu     |

Tabela 5.2 - Ponto de Operação na Região Anormal da Curva SV

|                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| $E_G(\text{pu})\angle\theta_0$ | $1,8160\angle 30,8360^\circ$ |
| $V_G(\text{pu})\angle\theta_G$ | $1,0005\angle 0,0175^\circ$  |
| $V_L(\text{pu})\angle\theta_L$ | $0,9796\angle -0,9812^\circ$ |
| $P_L$                          | 23,02 pu                     |
| $Q_L$                          | 13,29 pu                     |
| $Z_t$                          | $0,001\angle 70^\circ$ pu    |
| $X_s$                          | $0,04\angle 90^\circ$ pu     |

As variações na tensão de excitação são  $\Delta E_G = +0,0403$  pu e  $\Delta E_G = +0,0067$  pu, como mostradas na Tabela 5.3, e observam-se as variações na tensão terminal do gerador na mesma tabela, como relatado a seguir.

Tabela 5.3 - Pontos de Operação para Dois Níveis de Tensão na Barra Terminal do Gerador

| Na Região Superior da Curva SV |                 |                 |                        |                     |                     |                            |                                   |                            |                            |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $P_{GL}^k$<br>(pu)             | $V_G^k$<br>(pu) | $E_G^k$<br>(pu) | $(\text{sen}\delta)^k$ | $V_G^{k+1}$<br>(pu) | $E_G^{k+1}$<br>(pu) | $(\text{sen}\delta)^{k+1}$ | $(\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}$ | $\Delta E_G^{k+1}$<br>(pu) | $\Delta V_G^{k+1}$<br>(pu) |
| 5,00                           | $A_1$           |                 |                        | $A_2$               |                     |                            | -0,0165                           | +0,0403                    | +0,0500                    |
|                                | 1,0000          | 1,1591          | 0,2071                 | 1,0500              | 1,1994              | 0,1906                     |                                   |                            |                            |
| Na Região Interior da Curva SV |                 |                 |                        |                     |                     |                            |                                   |                            |                            |
| $P_{GL}^k$<br>(pu)             | $V_G^k$<br>(pu) | $E_G^k$<br>(pu) | $(\text{sen}\delta)^k$ | $V_G^{k+1}$<br>(pu) | $E_G^{k+1}$<br>(pu) | $(\text{sen}\delta)^{k+1}$ | $(\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}$ | $\Delta E_G^{k+1}$<br>(pu) | $\Delta V_G^{k+1}$<br>(pu) |
| 3,02                           | $B_1$           |                 |                        | $B_2$               |                     |                            | +0,0249                           | +0,0067                    | -0,0504                    |
|                                | 1,0005          | 1,8160          | 0,5068                 | 0,9501              | 1,8227              | 0,5317                     |                                   |                            |                            |

#### a) Ponto de operação na parte superior da curva

Considerando os valores de “A<sub>2</sub>” da Tabela 5.3 em relação ao caso-base A<sub>1</sub>:

$$\Delta V_G^{k+1} = -V_G^K \cdot \frac{\begin{matrix} + \\ \frac{\Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen}\delta)^k}{E_G^k \cdot (\text{sen}\delta)^k + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen}\delta)^k} \end{matrix} + \begin{matrix} - \\ \frac{E_G^k \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1} + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}}{E_G^k \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1} + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}} \end{matrix}}{\begin{matrix} + \\ \frac{\Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen}\delta)^k}{E_G^k \cdot (\text{sen}\delta)^k + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen}\delta)^k} \end{matrix} + \begin{matrix} - \\ \frac{E_G^k \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1} + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}}{E_G^k \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1} + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen}\delta)^{k+1}} \end{matrix}}$$

onde os sinais + e - sobre a fórmula indicam se o termo é, respectivamente, positivo ou negativo. Substituindo valores:

$$\Delta V_G^{k+1} = -V_G^K \cdot [-0,05] \text{ pu}$$

A elevação da tensão ( $\Delta V_G^{k+1} > 0$ ) acontece enquanto o efeito de variações negativas do seno do ângulo de potência  $(\Delta \text{sen}\delta)^{k+1} < 0$  predomina sobre as

variações positivas do módulo da tensão interna do gerador  $\Delta E_G^{k+1} > 0$ .

Então, no ponto k+1,  $V_G^{k+1} = V_G^k + \Delta V_G^{k+1} = +1,05$  pu, o que confere com o valor mostrado na Tabela 5.3. Portanto, a tensão na barra terminal aumenta conforme aumenta a tensão de excitação.

#### b) Ponto de operação na parte inferior da curva

Considerando os valores de “B<sub>2</sub>” da Tabela 5.3 em relação ao caso-base B<sub>1</sub>:

$$\Delta V_G^{k+1} = -V_G^k \cdot \frac{\begin{matrix} + \\ \boxed{E_G^k \cdot (\Delta \text{sen} \delta)^{k+1}} \end{matrix} + \begin{matrix} + \\ \boxed{\Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen} \delta)^k + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen} \delta)^{k+1}} \end{matrix}}{\begin{matrix} + \\ \boxed{E_G^k \cdot (\text{sen} \delta)^k + E_G^k \cdot (\Delta \text{sen} \delta)^{k+1}} \end{matrix} + \begin{matrix} + \\ \boxed{\Delta E_G^{k+1} \cdot (\text{sen} \delta)^k + \Delta E_G^{k+1} \cdot (\Delta \text{sen} \delta)^{k+1}} \end{matrix}}$$

onde os sinais + e - sobre a fórmula indicam se o termo é, respectivamente, positivo ou negativo. Substituindo valores:

$$\Delta V_G^{k+1} = -V_G^k \cdot [+0,0504] \text{ pu}$$

A diminuição da tensão ( $\Delta V_G^{k+1} < 0$ ) acontece enquanto o efeito de variações positivas do módulo da tensão interna do gerador  $\Delta E_G^{k+1} > 0$  predomina sobre as possíveis variações negativas do seno do ângulo de potência  $(\Delta \text{sen} \delta)^{k+1} < 0$  ou quando ambas variações são positivas, como é o caso neste exemplo.

Então, no ponto k+1,  $V_G^{k+1} = V_G^k + \Delta V_G^{k+1} = + 0,9501$  pu, o que confere com o valor mostrado na Tabela 5.3. Portanto, a tensão na barra terminal diminui conforme aumenta a tensão de excitação.

Mostrou-se analítica e numericamente que a tensão na barra terminal e a tensão de excitação pode apresentar relação direta ou inversa.

### 5.3

#### Índice: Tensão Interna x Terminal

O objetivo é estabelecer uma relação de sensibilidade entre a tensão de excitação do gerador / compensador com a tensão controlada por ela [Seelig, B.H.T., Greenhalgh, A.B., Prada, R.B., Bianco, A., 2004]. Obtém-se um índice capaz de apontar se uma ação de controle de tensão pode ter efeito oposto ao esperado.

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga do sistema é mostrado em (5.7), onde a variável  $V_G$ , tensão terminal, é controlada através de (5.8). A matriz Jacobiano  $[J]$  é estendida por linha, para considerar a equação de controle da tensão  $V_G$  através da tensão de excitação  $E_G$ , e por coluna, para considerar a nova variável  $E_G$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \text{---} \\ \Delta V_G \end{bmatrix} = [J_{\text{est}}] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \text{---} \\ \Delta E_G \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\Delta V_G = V_G^{\text{esp}} - V_G^{\text{calc}} \quad (5.8)$$

Considerando  $\Delta P = \Delta Q = 0$ , já que se deseja verificar as variações  $\Delta V_G$  e  $\Delta E_G$ , e colocando-se  $\Delta V_G$  para baixo, conforme mostrado em (5.9), (5.7) pode ser reduzido para dimensão (1x1) como é mostrado em (5.10).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \text{---} \\ \Delta V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & \\ & J & & \\ & & & K \\ \text{---} & & & \\ L & & & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \text{---} \\ \Delta E_G \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$[\Delta V_G] = \left[ \frac{\partial V_G}{\partial E_G} \right] \cdot [\Delta E_G] \quad (5.10)$$

onde o índice de adequação da ação de controle de tensão  $\frac{\partial V_G}{\partial E_G}$  de dimensão (1x1) é calculado como:

$$\frac{\partial V_G}{\partial E_G} = [M] - [L][J]^{-1}[K] \quad (5.11)$$

De (5.10), tem-se:

$$\frac{\partial V_G}{\partial E_G} = \frac{\Delta V_G}{\Delta E_G} \quad (5.12)$$

Se  $\frac{\partial V_G}{\partial E_G} > 0$ , então  $\Delta E_G$  e  $\Delta V_G$  tem o mesmo sinal, indicando que a ação de controle tem o efeito esperado.

Se  $\frac{\partial V_G}{\partial E_G} < 0$ , então  $\Delta E_G$  e  $\Delta V_G$  tem diferentes sinais, indicando que para uma variação da tensão de excitação  $\Delta E_G$  em um sentido, tem-se uma variação da tensão terminal  $\Delta V_G$  no sentido contrário.

No caso de múltiplos geradores, os índices formam a diagonal de uma matriz e os elementos fora da diagonal representam a interação entre os vários controles de tensão [R.B. Prada, L.J. de Souza, 2006].

### 5.3.1

#### Exemplo Numérico

Estuda-se a relação entre a tensão de excitação  $E_G$  e a tensão terminal  $V_G$  do gerador que são, respectivamente, a grandeza controladora e a controlada. Para isso, inclui-se a barra interna e a reatância síncrona do gerador no problema de fluxo de carga. Portanto, através da análise dessa relação deve-se saber se a ação de controle tem o efeito esperado ou não.

É utilizado o sistema-teste da Figura 5.2 com pontos de operação na região normal (Tabela 5.1) e anormal (Tabela 5.2), isto é, na parte superior e na inferior da curva SV. O ponto de operação na região anormal deve-se ao excesso de carregamento do sistema. Nas curvas mostradas nas Figuras 5.3 e 5.4 observa-se as variações do módulo da tensão na barra interna e do módulo da tensão na barra terminal. O ponto assinalado corresponde ao caso-base.

Comprova-se a relação direta e oposta entre a tensão na barra interna e a tensão na barra terminal do gerador, respectivamente nas Figuras 5.3 e 5.4. No caso da relação oposta, seria equivalente a dizer que o acréscimo na tensão de excitação provocaria a redução na tensão terminal. Já no caso da relação direta, a tensão de excitação e a tensão terminal variam no mesmo sentido. Esse resultado é coerente com o índice positivo  $\partial V_G / \partial E_G = 1,3$  na região superior e negativo  $\partial V_G / \partial E_G = -6,3$  na região inferior da curva SV.

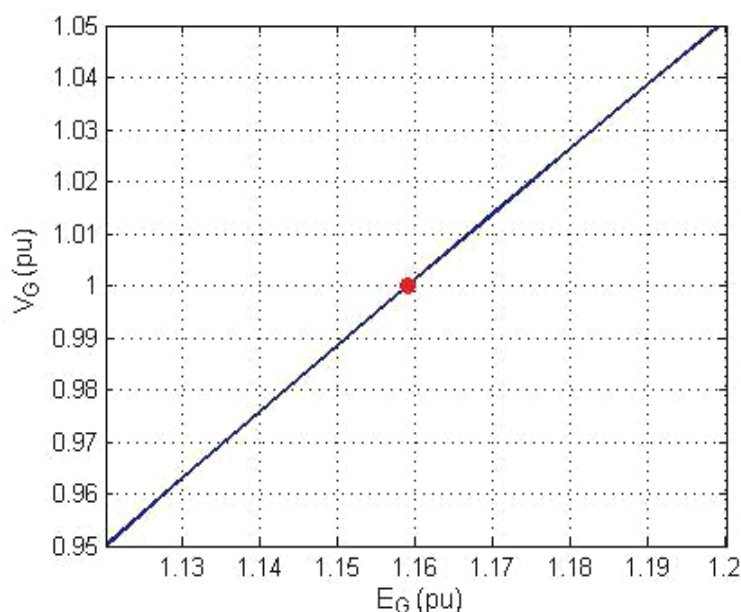


Figura 5.3 - Variações das Tensões Interna e Terminal a Partir de Um Ponto na Região Normal de Operação

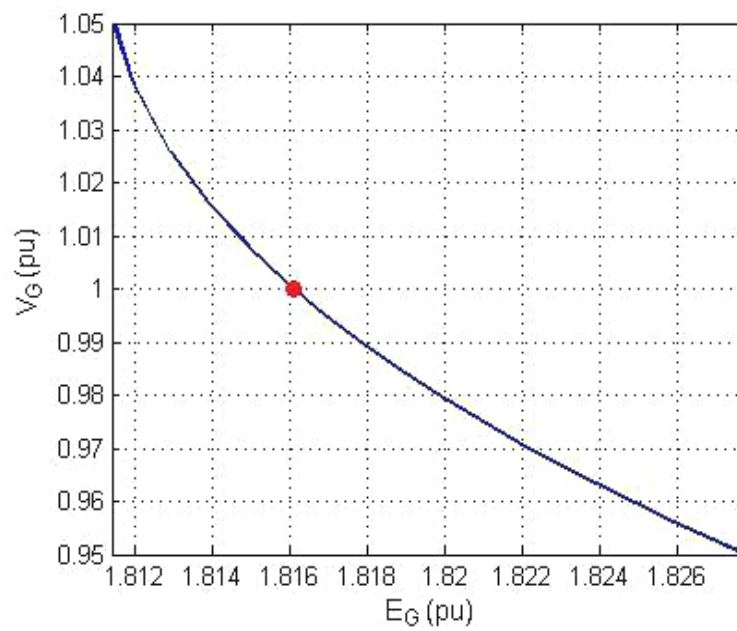


Figura 5.4 - Variações das Tensões Interna e Terminal a partir de Um Ponto na Região Anormal de Operação