

3

Estudo da Barra de Geração [1]

3.1

Introdução

No Capítulo 2, tratou-se do máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga, limitando a máxima carga que pode ser alimentada, e do possível efeito contrário de ações de controle de tensão, por exemplo, quando da conexão de um capacitor na barra de carga. Neste capítulo trata-se do máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode sair da barra terminal do gerador, entrando na rede de transmissão ou distribuição, e do possível efeito contrário de ações de controle de tensão. No caso de geradores e compensadores síncronos, trata-se do controle de tensão através da tensão de excitação.

Dados os parâmetros da linha de transmissão e a tensão na barra de carga, verifica-se o lugar geométrico da tensão de geração para diferentes níveis de potência ativa e reativa, mantendo o fator de potência constante, saindo da barra de geração.

Para cada fator de potência na geração existe um lugar geométrico das tensões na barra de geração. Essas soluções pertencem à região A, à região B, ou à fronteira. A solução de tensão na barra de geração que pertence à fronteira é um único ponto que corresponde à máxima injeção de potência ativa (e reativa) para aquele fator de potência constante. Portanto, a fronteira é formada por um conjunto de pontos, cada um correspondendo à injeção máxima para cada fator de potência na geração.

3.2

Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração

Utilizando-se o circuito de 2 barras, mostrado na Figura 3.1, deduz-se as equações da potência ativa e reativa "saindo" da barra de geração.

$$\dot{S}_{GL}^* = P_{GL} - jQ_{GL} = \dot{V}_G^* \cdot \left(\dot{I}_{GL} + \dot{I}_{GT} \right) \quad (3.1)$$

$$\dot{V}_G^* = V_G \cdot \angle -\theta_G \quad (3.2)$$

$$\dot{I}_{GL} = \frac{(V_G \cdot \angle \theta_G - V_L \angle \theta_L)}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (3.3)$$

$$\dot{I}_{GT} = \frac{V_G \cdot \angle \theta_G}{Z_g \angle \alpha_g} \quad (3.4)$$

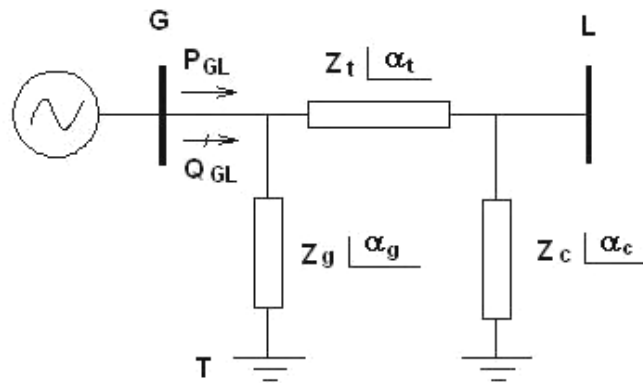


Figura 3.1 - Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração num Circuito de Duas Barras

Substituindo-se (3.2), (3.3) e (3.4) em (3.1), e separando a parte real e imaginária da potência aparente, fica:

$$P_{GL} = V_G^2 \cdot \left[\frac{\cos \alpha_t}{Z_t} + \frac{\cos \alpha_g}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.5)$$

$$Q_{GL} = V_G^2 \cdot \left[\frac{\sin \alpha_t}{Z_t} + \frac{\sin \alpha_g}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \cdot \sin(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.6)$$

De (3.5) e (3.6) é definido a equação da potência aparente de geração:

$$S_{GL} = \sqrt{(P_{GL})^2 + (Q_{GL})^2} \quad (3.7)$$

Para cada \$P_{GL}\$ constante, variando-se \$\theta_{GL}\$ em (3.5), pode-se calcular \$V_G\$ e, portanto, traçar-se a curva para P constante no plano \$\theta V\$.

Para cada Q_{GL} constante, variando-se θ_{GL} em (3.6), pode-se calcular V_G e, portanto, traçar-se a curva para Q constante no plano θV .

A tangente do ângulo do fator de potência na geração é:

$$\tan \phi = \frac{Q_{GL}}{P_{GL}} \quad (3.8)$$

Substituindo-se (3.5) e (3.6) em (3.8) e colocando-se em evidência a tensão na barra de geração V_G :

$$V_G = \frac{V_L [\sin(\theta_{GL} + \alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t)]}{\left[\sin(\alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \cos(\alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \frac{Z_t}{Z_g} \cdot \cos(\alpha_g) + \frac{Z_t}{Z_g} \cdot \sin(\alpha_g) \right]} \quad (3.9)$$

Para ϕ constante, variando-se θ_{GL} em (3.9), pode-se calcular V_G e, portanto, traçar-se a curva para ϕ constante no plano θV .

3.3

Tensão Crítica na Barra de Geração

Se os fluxos de potência ativa P_{GL} e reativa Q_{GL} correspondem à máxima potência saindo da barra de geração para ângulo do fator de potência ϕ , isto pode ser traduzido matematicamente: os vetores gradiente ∇P_{GL} e ∇Q_{GL} estão alinhados sob a mesma direção, como mostrado na Figura 3.2. Então, a seguinte relação pode ser escrita, onde λ é um escalar:

$$\nabla P_{GL} - \lambda \nabla Q_{GL} = 0 \quad (3.10)$$

A condição de otimalidade "gradientes alinhados" do problema "maximizar $P(V_G, \theta_G)$ e $Q(V_G, \theta_G)$ sujeito a $\phi = \arctg(Q_{GL}/P_{GL}) = \text{constante}$ " pode, então, ser reescrita como:

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} - \lambda \frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} - \lambda \frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} = 0 \quad (3.12)$$

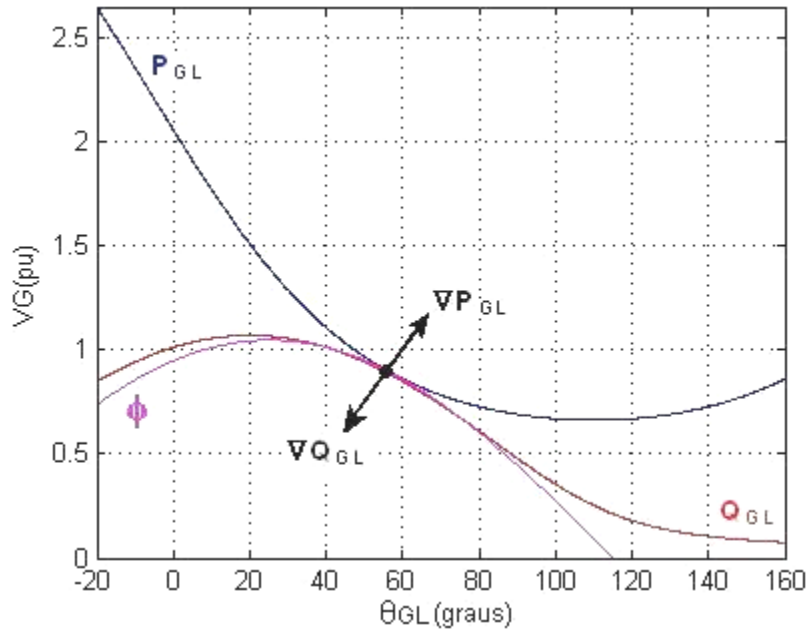


Figura 3.2 - Gradientes ∇P_{GL} e ∇Q_{GL} alinhados no Máximo Carregamento

Isto é equivalente ao determinante da matriz Jacobiano das duas equações de fluxo de carga correspondente à barra de geração, ser igualado à zero, isto é:

$$\left(\frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} * \frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} \right) - \left(\frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} * \frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} \right) = 0 \quad (3.13)$$

Os componentes do vetor gradiente de potência ativa em relação ao ângulo e ao módulo da tensão na barra de geração são:

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} = \left(\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \cdot \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} = 2 \cdot V_G \cdot \left[\frac{\cos \alpha_t}{Z_t} + \frac{\cos \alpha_g}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.15)$$

Os componentes do vetor gradiente de potência reativa em relação ao ângulo e ao módulo da tensão na barra de geração são:

$$\frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} = -\left(\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t}\right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} = 2 \cdot V_G \cdot \left[\frac{\text{sen} \alpha_t}{Z_t} + \frac{\text{sen} \alpha_g}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L}{Z_t} \right) \cdot \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.17)$$

Substituindo-se (3.14), (3.15), (3.16) e (3.17) em (3.13) fica:

$$V_G^C = \frac{V_L}{2 \cdot \left[\cos(\theta_{GL}) + \left(\frac{Z_t}{Z_g} \right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t - \alpha_g) \right]} \quad (3.18)$$

que é o módulo da tensão na barra de geração quando o fluxo de potência que sai dela é máximo.

Para obter-se o valor do ângulo da tensão nessa condição de máximo, substitui-se o módulo da tensão crítica de (3.18) na outra condição de otimalidade do problema, ou seja, em (3.9).

Após manipulações algébricas e trigonométricas chega-se à fórmula:

$$\text{tg}(2 \cdot \theta_{GL}^C) = \left(\frac{\text{sen}(-\phi + \alpha_t) + (Z_t / Z_g) \cdot \text{sen}(-\phi + 2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)}{-\cos(-\phi + \alpha_t) - (Z_t / Z_g) \cdot \cos(-\phi + 2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)} \right) \quad (3.19)$$

A defasagem angular crítica entre a barra terminal do gerador e a barra de carga θ_{GL}^C pode ocorrer em qualquer dos quatro quadrantes, mas somente uma está associada à condição da máxima potência gerada e que garante alimentar a carga. Tudo depende do ângulo do fator de potência da geração e dos parâmetros do circuito π .

A partir dos resultados obtidos em [1], pode-se concluir de suas análises que para um circuito série de duas barras, a defasagem angular crítica entre a barra do gerador e a barra de carga pode ser calculada como:

$$\theta_{GL}^C = \frac{(\phi - \alpha_t)}{2} \quad (3.20)$$

Deve-se notar que, em (3.20), o ângulo do fator de potência na geração ϕ , encontra-se no segundo ou terceiro quadrante. A análise foi feita considerando que a barra G e a barra L, respectivamente, trabalham como gerador e carga; e só assim a relação (3.20) é correta.

3.4

Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão em Barras de Tensão Controlada

A avaliação das chamadas "condições de estabilidade de tensão" consiste em comparar a geração no ponto de operação em análise com a geração máxima possível que poderia estar entrando na rede. Também é importante determinar se o ponto de operação está na parte superior (região normal de operação) ou inferior da curva SV (região anormal de operação).

Usando-se os valores de tensão em módulo e ângulo crítico definidos, respectivamente, em (3.18) e (3.19) é fácil determinar os valores da máxima geração, substituindo-os em (3.5) e (3.6):

$$P_{GL}^C = V_G^{C^2} \left[\frac{\cos \alpha_t}{Z_t} + \frac{\cos \alpha_g}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G^C}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL}^C + \alpha_t) \quad (3.21)$$

$$Q_{GL}^C = V_G^{C^2} \left[\frac{\sin \alpha_t}{Z_t} + \frac{\sin \alpha_g}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L \cdot V_G^C}{Z_t} \right) \cdot \sin(\theta_{GL}^C + \alpha_t) \quad (3.22)$$

De (3.21) e (3.22) é definido a máxima potência aparente de geração:

$$S_{GL}^C = \sqrt{(P_{GL}^C)^2 + (Q_{GL}^C)^2} \quad (3.23)$$

Então, para saber as condições de carregamento do circuito, calcula-se a "distância" entre a geração no ponto de operação em análise e máxima geração, como já dito. Utiliza-se o conceito de "margem de potência":

$$M = (S_{GL}^C - S_{GL}) \text{ em MVA} \quad (3.24)$$

A margem pode ser expressa em valores por unidade para dar significado à comparação entre diferentes pontos de operação:

Se o ponto de operação em análise está na parte superior da curva SV, tem-se:

$$M = \left(1 - \frac{S_i}{S_i^C} \right) \text{ em pu de } S_m \quad (3.25)$$

Se o ponto está na parte inferior da curva SV, tem-se:

$$M = \left(\frac{S_i^C}{S_i} - 1 \right) \text{ em pu de } S_i \quad (3.26)$$

Obviamente $M=0$ se $S_{GL}^C = S_{GL}$ na “ponta do nariz” da curva SV. Para determinar se o ponto de operação pertence à parte superior ou inferior da curva SV, o seguinte procedimento resolve a questão:

Substitui-se θ_{GL} do ponto de operação em análise na fórmula do módulo da tensão crítico V_G^C em (3.18), como ilustrado na Figura 3.3 e na Figura 3.4. Compara-se o valor encontrado V_G^{C*} com o módulo de tensão V_G no ponto de operação em análise:

- se $V_G > V_G^{C*}$ o ponto pertence à parte superior da curva SV, como na Figura 3.3,
- se $V_G < V_G^{C*}$, pertence à parte inferior, como na Figura 3.4,
- se $V_G = V_G^{C*}$ o ponto pertence à máxima potência que sai da barra do gerador.

Nesse último caso, também se tem $\theta_G = \theta_G^C$ e $V_G = V_G^{C*} = V_G^C$.

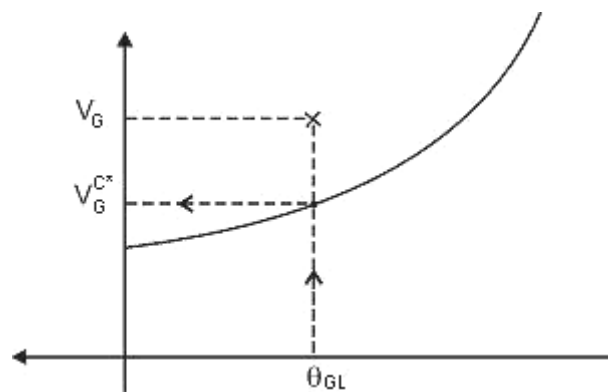


Figura 3.3 - Localização do Ponto de Operação na Parte Superior da Curva SV

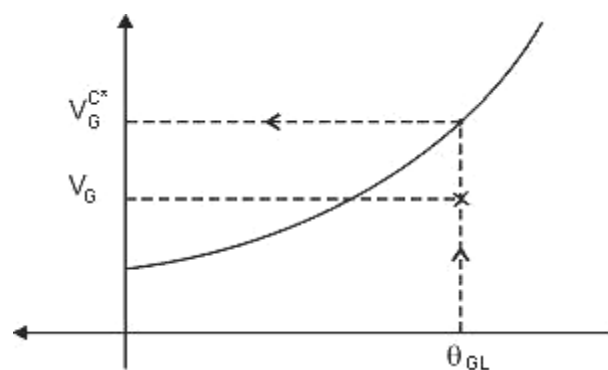


Figura 3.4 - Localização do Ponto de Operação na Parte Inferior da Curva SV

3.5

Conclusões

Neste capítulo, baseado no sistema de duas barras, foi desenvolvido um estudo para a barra de geração. Foi verificado que existe uma solução analítica para tensão crítica, em módulo e ângulo, na barra de geração, resultado da solução das condições de otimalidade do problema de otimização: “maximize o fluxo de potência ativa e reativa que sai da barra de geração para um dado fator de potência”. Desta forma, é possível comparar a geração no ponto de operação em análise com a geração máxima possível que poderia estar entrando na rede.

Foi mencionado o possível efeito contrário de ações de controle de tensão em barras de tensão controlada. Para o sistema de 2 barras foi descrito um procedimento para verificar se o ponto de operação pertence a região normal,

anormal ou se pertence a ponta do nariz. Portanto, as barras PV têm importância fundamental no carregamento da rede, podem ser responsáveis por casos de colapso de tensão e necessitam ser estudadas.