

3

Análise da Estabilidade de Tensão em um Sistema Elétrico de Potência

O problema de estabilidade de tensão normalmente ocorre em sistemas muito carregados. Uma perturbação que leva ao colapso de tensão pode ser iniciada por uma variedade de causas. Adicionalmente às características da rede de transmissão e o nível de transferência de potência, os principais fatores que contribuem para o colapso de tensão são as gerações de potência reativa controlando o perfil de tensão, as características da carga, as características do dispositivo de compensação reativa, e a ação dos dispositivos de controle, como transformadores com tap variável [5].

Um sistema é seguro, do ponto de vista da estabilidade de tensão, se possui a capacidade de operar de forma estável e manter esta estabilidade após distúrbios e aumento de seu carregamento.

3.1

Caraterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão

O sistema simples de duas barras é apresentado na Figura 3.1.

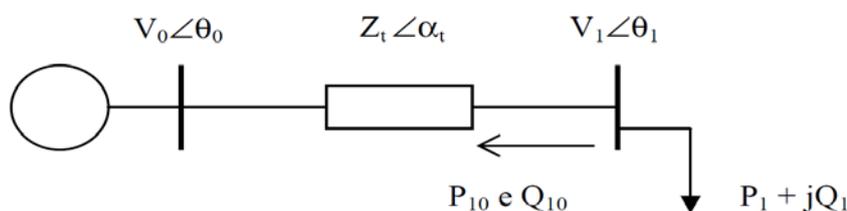


Figura 3.1- Sistema de Duas Barras

Partindo da expressão da potência aparente saindo da barra de carga para a barra de geração:

$$S_{10}^* = P_{10} - j * Q_{10} = \dot{V}_1^* * \dot{I}_{10} \quad (3.1)$$

$$S_{10}^* = \dot{V}_1^* * \left(\frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_0}{Z_t} \right) \quad (3.2)$$

$$S_{10}^* = \frac{V_1 \angle -\theta_1 * V_1 \angle \theta_1}{Z_t \angle \alpha_t} - \frac{V_1 \angle -\theta_1 * V_0 \angle \theta_0}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (3.3)$$

$$S_{10}^* = \frac{V_1^2}{Z_t} \angle -\alpha_t - \frac{V_1 V_0}{Z_t} \angle \theta_0 - \theta_1 - \alpha_t \quad (3.4)$$

Fazendo $\theta_0 - \theta_1 = -\theta_{10}$ então:

$$S_{10}^* = \frac{V_1^2}{Z_t} \cos(-\alpha_t) + j \frac{V_1^2}{Z_t} \sin(-\alpha_t) - \frac{V_1 V_0}{Z_t} \cos(-\theta_{10} - \alpha_t) - j \frac{V_1 V_0}{Z_t} \sin(-\theta_{10} - \alpha_t) \quad (3.5)$$

Separando as partes real e imaginária:

$$P_{10} = \frac{V_1^2}{Z_t} \cos(\alpha_t) - \frac{V_1 V_0}{Z_t} \cos(\theta_{10} + \alpha_t) \quad (3.6)$$

$$Q_{10} = \frac{V_1^2}{Z_t} \sin(\alpha_t) - \frac{V_1 V_0}{Z_t} \sin(\theta_{10} + \alpha_t) \quad (3.7)$$

Com um valor constante da tensão na barra de carga pode-se traçar a curva potência ativa ($P_D = -P_{10}$) versus ângulo da tensão na barra de carga (θ_1).

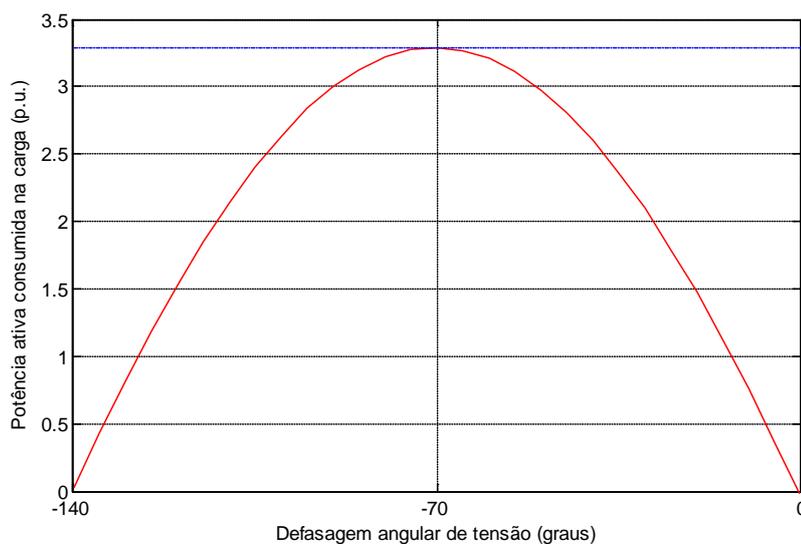


Figura 3.2-Potência Consumida na Carga vs Defasagem Angular

Na Figura 3.2 mostra-se a curva para um valor de tensão constante. Ao testar com diferentes valores de tensão pode-se observar na Figura 3.3 que para um valor particular de tensão existe uma potência máxima. Para maiores valores de tensão, os valores máximos de potência são menores.

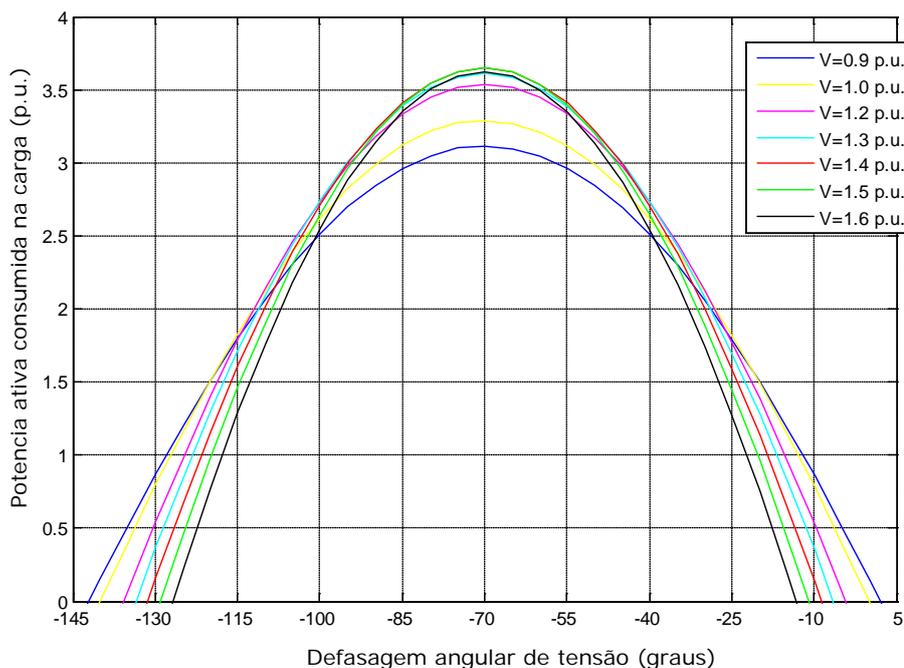


Figura 3.3- Potência Consumida na Carga vs Defasagem Angular em Diferentes Valores de Tensão

Está implícita a existência de uma fonte de potência reativa na barra 1 para manter o valor da tensão especificada. Assim, mesmo com esta fonte de potência reativa ilimitada na barra de carga, existe um limite máximo de carga ativa que pode ser alimentada pelo gerador através da linha de transmissão.

Na Figura 3.4 mostra-se o lugar geométrico das soluções de tensão para uma carga constante.

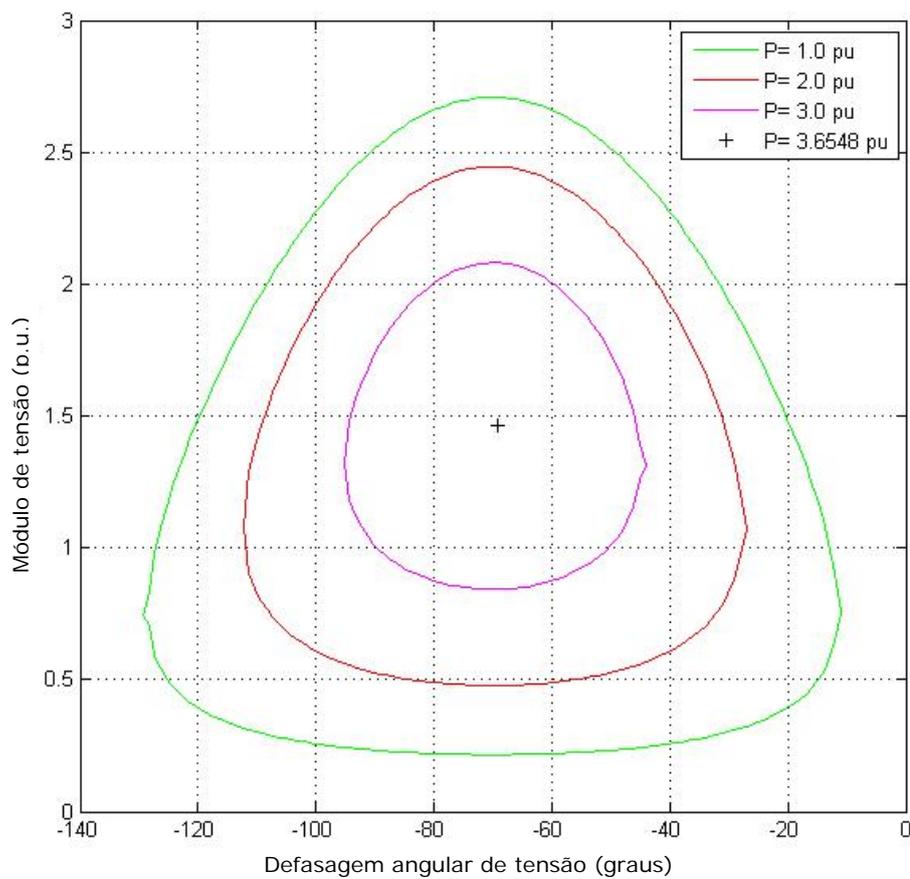


Figura 3.4- Lugar Geométrico das Soluções de Tensão com Valores de Potência Ativa Constante

Ao aumentar a carga ativa, o lugar geométrico diminui até tornar-se um único ponto. Isto significa que não existe solução de tensão para cargas maiores. Na Figura 3.4 mostra-se a existência de uma máxima carga ativa $P = 3.6548$.

Nas Figuras 3.3 e 3.4 pode-se observar o Limite de Estabilidade Estática Angular (LEEA) correspondendo a $\theta_1 = -\alpha_t = -70^\circ$. Observa-se que este limite pode ser atingido com qualquer valor de carga ativa.

Mostram-se na Figura 3.5 as soluções de tensão para carga ativa e reativa constante.

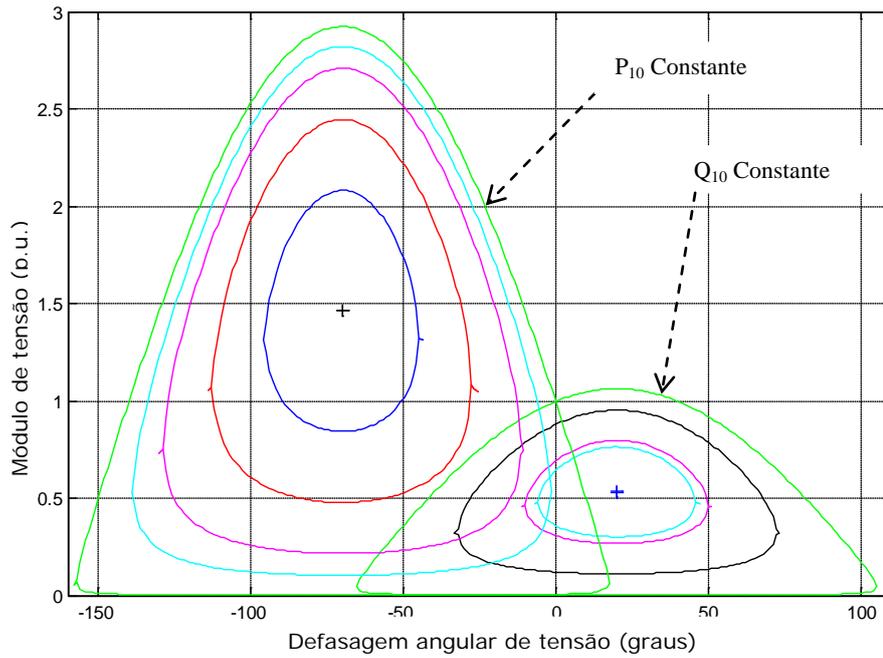


Figura 3.5- Lugar Geométrico das Soluções de Tensão com P_{10} , Q_{10} Constante.

Na Figura 3.7 para um par de valores de P_{10} e Q_{10} , correspondendo a certo fator de potência, tem-se a existência de duas soluções de tensão.

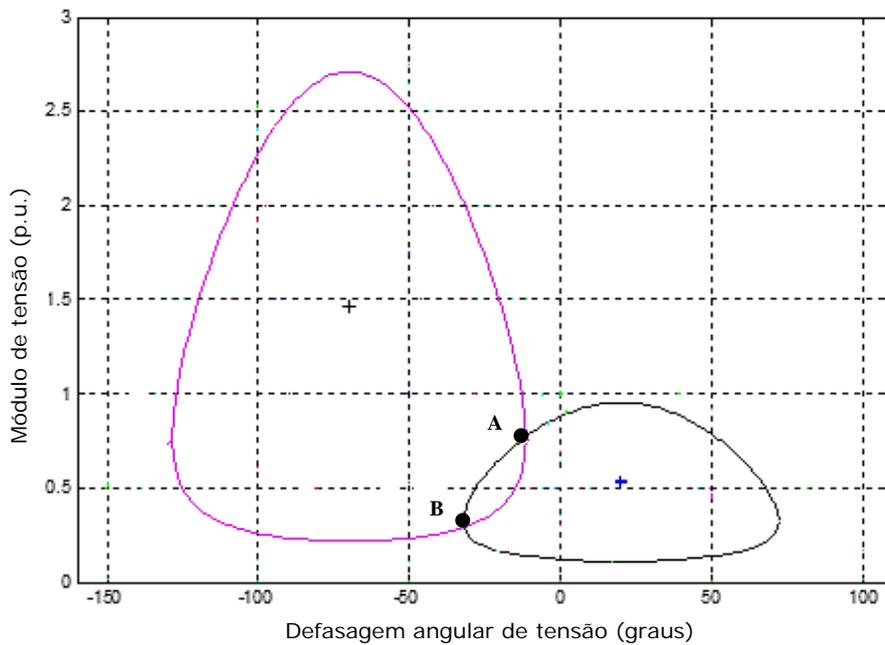


Figura 3.6- Existência de Duas Soluções de Tensão

Ao aumentar a carga na barra, as duas soluções de tensão aproximam-se até coincidirem em uma única solução, correspondendo à carga máxima. Não existe solução para cargas maiores, conforme a Figura 3.7.

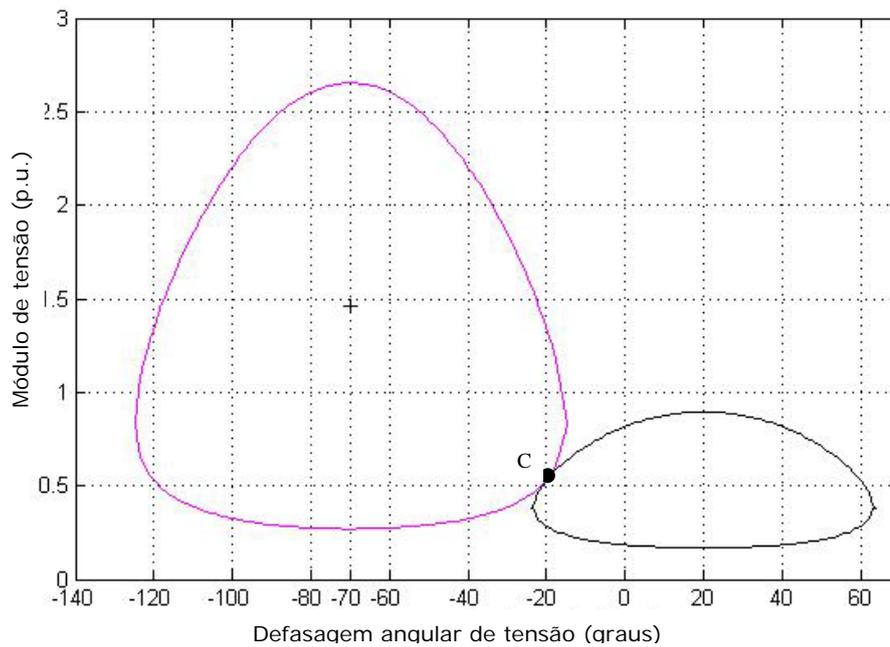


Figura 3.7- Solução Única no Ponto de Máximo Carregamento

Para cada fator de potência existe um máximo valor de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga.

O lugar geométrico das soluções únicas de tensão, uma para cada fator de potência, é conhecido como o Limite de Estabilidade de Tensão (LET), como mostrado na Figura 3.8.

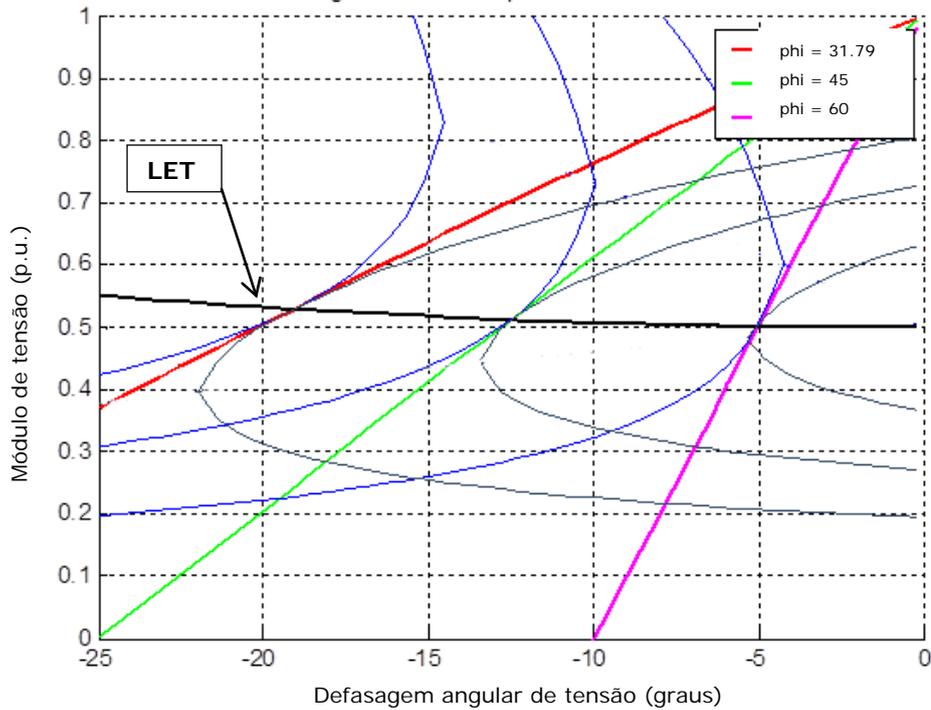


Figura 3.8- Pontos de Máximo Carregamento para Diferentes Fatores de Potência

O LET cruza o LEEA em um ponto, com fator de potência (ϕ) bastante capacitivo. É a máxima carga entre todas as máximas.

Mostra-se a curva ϕ constante no plano SV na Figura 3.9. Cada curva representa um fator de potência diferente.

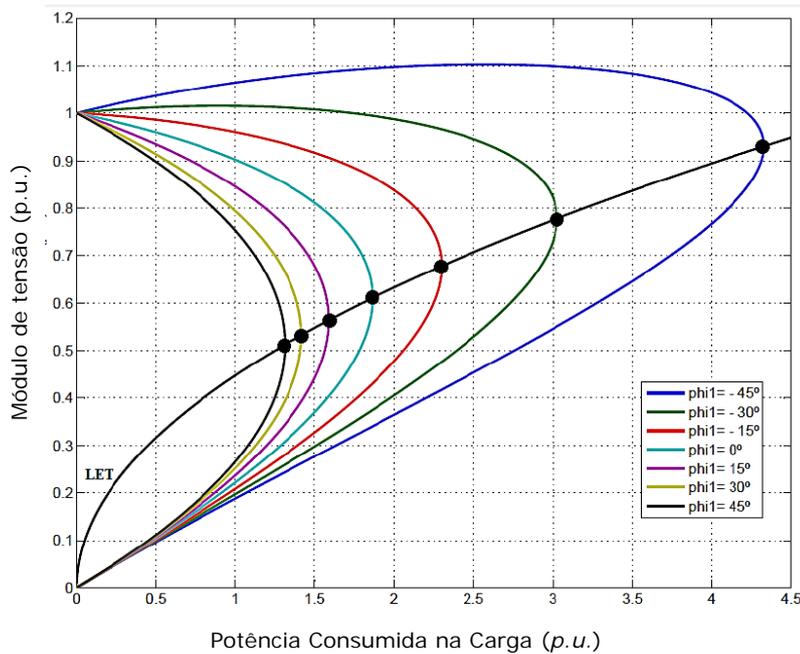


Figura 3.9- Características Potência Aparente vs Tensão

O ponto de máximo carregamento define duas regiões, as quais tem relação direta com as duas soluções mostradas na Figura 3.6.

3.2

Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão

O objetivo é identificar a região de operação e distância entre o ponto de operação e o ponto de máximo carregamento.

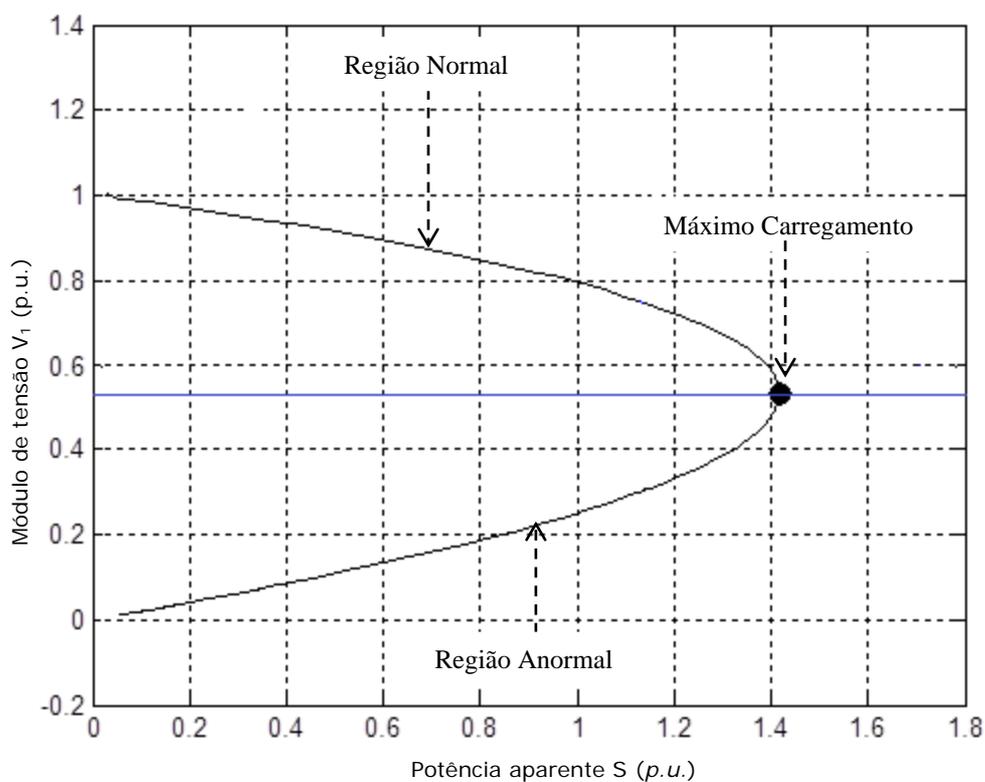


Figura 3.10- Regiões de Operação e o Máximo Carregamento

Na avaliação de qualquer sistema, a perda da estabilidade manifesta-se em certas áreas. Assim, a avaliação é feita em cada barra da rede.

Avaliando uma barra i no ponto de máximo carregamento, com um fator de potência qualquer, as curvas correspondentes a P_i e Q_i coincidem em um único ponto. Sua solução de tensão é única. Em um ponto de operação diferente, existem duas soluções.

Usa-se os vetores gradiente de P_i e Q_i para a avaliação. No máximo carregamento, os vetores gradientes encontram-se alinhados, como mostrado na Figura 3.11. Matematicamente:

$$\nabla P_i + \lambda \nabla Q_i = 0 \tag{3.8}$$

onde λ é um escalar.

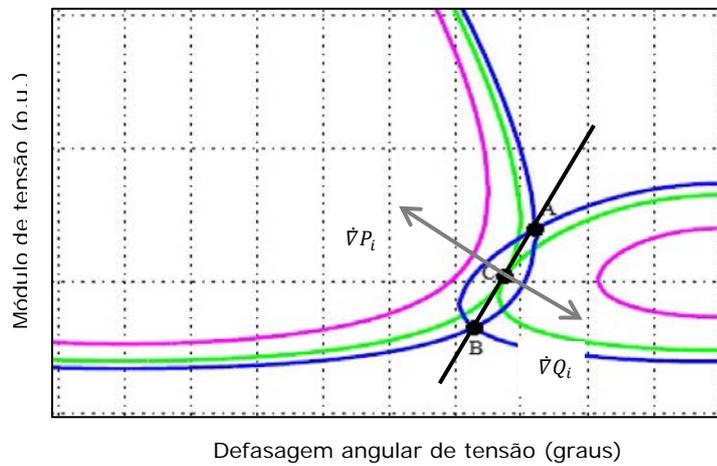


Figura 3.11- Vetores Gradiente no Ponto de Máximo Carregamento

De (3.8) obtém-se:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} + \lambda \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = 0 \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} + \lambda \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = 0 \tag{3.10}$$

3.2.1

Módulo do Determinante da Matriz $[D']$

Com (3.9) e (3.10) obtém-se:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = 0 \tag{3.11}$$

A condição de máximo carregamento (3.11) é igual ao determinante nulo de (3.12).

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\det[D] = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \quad (3.13)$$

onde P_i e Q_i são as componentes da potência líquida injetada:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.14)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} + B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.15)$$

onde k representa todas as barras ligadas com a barra em análise i .

Resolvendo (3.13):

$$\begin{aligned} \det[D] = & -V_i V_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2V_i^2 B_{ii} (V_k G_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\ & - 2V_i^2 G_{ii} (V_k G_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k B_{ik} \sin \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Fazendo $Y_{ik}^2 = (G_{ik}^2 + B_{ik}^2)$ e multiplicando (3.16) por V_i

$$\begin{aligned} \det[D] * V_i = & -[V_i V_k Y_{ik}]^2 + 2V_i^2 B_{ii} (V_k G_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\ & - 2V_i^2 G_{ii} (V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})) \end{aligned} \quad (3.17)$$

A potência injetada na barra i é:

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (3.18)$$

De (3.14), (3.15) e (3.18):

$$\begin{aligned}
 S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 &= V_i^4(G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + V_i^2 V_k^2 Y_{ik}^2 \\
 &+ 2V_i^2 G_{ii}(V_i V_k(G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})) \\
 &- 2V_i^2 B_{ii}(V_i V_k(G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}))
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

Substituindo $G_{ii}^2 + B_{ii}^2 = Y_{ii}^2$ e (3.17) em (3.19)

$$\det[D] * V_i = V_i^4 Y_{ii}^2 - S_i^2
 \tag{3.20}$$

Chamando $V_i^4 Y_{ii}^2$ de S_{i0}^2 fica:

$$\det[D] * V_i = S_{i0}^2 - S_i^2
 \tag{3.21}$$

No máximo, $\det[D] * V_i = 0$ e $S_i^2 = S_{i0}^2$. Pode-se dizer que S_{i0}^2 é uma estimativa da potência máxima que poderia ser injetada na barra i calculada no ponto de operação em análise ao quadrado.

Assim, $\det[D] * V_i$ é um indicador de distância entre S_i^2 e S_{i0}^2 (no máximo, a distância é nula).

Para um sistema multi-nó, a matriz Jacobiana é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}
 \tag{3.22}$$

Para a análise da barra i :

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta P} \\ \overline{\Delta Q} \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \overline{\Delta \theta} \\ \overline{\Delta V} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix}
 \tag{3.23}$$

Assume-se uma variação de carga (ou geração) incremental ΔP_i e ΔQ_i somente para a barra i de um sistema multi-nó. Como é só para i então: $\overline{\Delta P} = 0$ e $\overline{\Delta Q} = 0$.

$$\begin{bmatrix} \overline{0} \\ \overline{0} \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \overline{\Delta V} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

A matriz Jacobiana do sistema multi-nó é dividida nas sub-matrizes A , B , C , D .

$$\begin{bmatrix} \overline{0} \\ \overline{0} \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\Delta \theta} \\ \overline{\Delta V} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Resolvendo, (3.25) fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = (D - CA^{-1}B) \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Comparando com o sistema de duas barras pode-se dizer que:

$$D' = D - CA^{-1}B \quad (3.27)$$

Em um sistema de duas barras $J = D = D'$. Para o sistema multi-nó:

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$-CA^{-1}B = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Depois de substituir (3.28) e (3.29) em (3.27) toma-se o determinante:

$$\det[D'] = \det \left[\begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \right] \quad (3.30)$$

Resolvendo:

$$\det[D'] = [x \cdot u - y \cdot z] + [x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3] \quad (3.31)$$

Mas:

$$\det[D] = [x \cdot u - y \cdot z] \quad (3.32)$$

$$\det[D'] = \det[D] + [x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3] \quad (3.33)$$

Chamando:

$$-\Delta \det = [x \cdot b_4 - y \cdot b_3] + [b_1 \cdot u - b_2 \cdot z] + [b_1 \cdot b_4 - b_2 \cdot b_3] \quad (3.34)$$

E substituindo (3.34) em (3.33):

$$\det[D'] = \det[D] - \Delta \det \quad (3.35)$$

Para obter o indicador de distância como em (3.21) multiplica-se pela tensão da barra em análise V_i .

$$\det[D'] \cdot V_i = \det[D] \cdot V_i - \Delta \det \cdot V_i \quad (3.36)$$

Substituindo (3.21) em (3.36)

$$\det[D'].V_i = S_{i0}^2 - S_i^2 - \Delta \det.V_i \quad (3.37)$$

Generaliza-se para um sistema multi-nó:

$$\det[D'].V_i = S_m^2 - S_i^2 \quad (3.38)$$

onde:

$$S_m^2 = S_{i0}^2 - \Delta \det.V_i \quad (3.39)$$

Em (3.38), S_i é a potência injetada na barra i no ponto de operação em análise, S_{i0} é a potência “*maximum maximorum*” que pode ser injetada na barra i , $\Delta \det.V_i$ é a potência relacionada com o sistema inteiro e a qual limita a injeção na barra i , S_m é a máxima potência que pode ser injetada na barra i e, então $\det[D'].V_i$ é a distância de S_i^2 até S_m^2 , Portanto $S_m - S_i$ é a margem entre a potência injetada e a máxima calculada para o ponto de operação em análise.

3.2.2

Sinal do Determinante da Matriz $[D']$

Um modo de identificar onde se encontra o ponto de operação de uma barra i é conhecer o ângulo entre os vetores gradientes de P_i e Q_i .

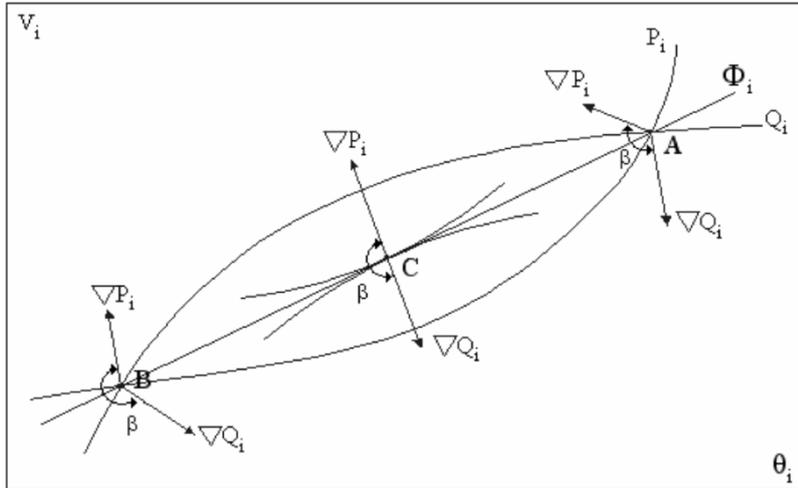


Figura 3.12- Ângulo entre os Vetores Gradientes Conforme a Região onde se Encontram

Na Figura 3.12 considera-se uma barra i com um fator de potência ϕ_i . Mostram-se os diferentes pontos de operação conforme a região. O ponto A encontra-se na região normal de operação (parte superior da curva ϕ constante no plano SV), o ponto B encontra-se na região anormal de operação (parte inferior da curva ϕ constante no plano SV), e o ponto C corresponde ao máximo carregamento.

Em cada ponto A , B e C pode-se observar o ângulo β . Pode-se escrever:

$$\dot{V}P_i = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \hat{\theta} + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \hat{V} + 0 \cdot \hat{k} \tag{3.40}$$

$$\dot{V}Q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \cdot \hat{\theta} + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cdot \hat{V} + 0 \cdot \hat{k} \tag{3.41}$$

onde $\hat{\theta}$, \hat{V} e \hat{k} são vetores direcionais ortogonais.

O produto vetorial de (3.40) e (3.41) é:

$$\dot{V}P_i \times \dot{V}Q_i = \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right) - \left(\frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right) \right] \cdot \hat{k} \tag{3.42}$$

Pode-se dizer de (3.13)

$$\nabla P_i \times \nabla Q_i = \det [D'] \cdot \hat{k} \quad (3.43)$$

Toma-se o módulo do produto vetorial:

$$|\nabla P_i \times \nabla Q_i| = |\nabla P_i| \cdot |\nabla Q_i| \cdot \sin \beta \quad (3.44)$$

onde β é o ângulo entre os vetores gradientes ∇P_i e ∇Q_i . Comparando (3.43) e (3.44), o sinal do $\det[D']$ é função do seno do ângulo β .

$$\det(D') > 0 \leftrightarrow \sin \beta > 0 \text{ isto é } 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

$$\det(D') < 0 \leftrightarrow \sin \beta < 0 \text{ isto é } 0^\circ > \beta > -180^\circ$$

$$\det(D') = 0 \leftrightarrow \sin \beta = 0 \text{ isto é } \beta = \pm 180^\circ \text{ ou } \beta = 0$$

Quando β encontra-se entre 0° e 180° , diz-se que o ponto de operação está na região normal de operação, se β encontra-se entre -180° e 0° diz-se que o ponto de operação está na região anormal, e quando β é igual a $\pm 180^\circ$ então os vetores ∇P_i e ∇Q_i diz-se que o ponto de operação é o de máximo carregamento.

Portanto:

$\det(D') > 0 \rightarrow$ ponto de operação na parte superior da curva ϕ constante no plano SV

$\det(D') < 0 \rightarrow$ ponto de operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV

$\det(D') = 0 \rightarrow$ ponto de operação de máximo carregamento na curva ϕ constante no plano SV

3.2.3

Interpretação dos Índices

- a) Ângulo β : Traduz a dificuldade do sistema de suportar a injeção na barra. Quando β este próximo a 180° significa que o máximo esta próximo,

mesmo que a margem de potência seja grande, nesse caso um aumento da injeção S_i acarretaria em uma diminuição grande substancial de S_m .

- b) Margem de Potência: de (3.39), $S_{i0}^2 - \Delta det.V_i$ é chamado de S_m^2 e, em situações muito particulares, pode ser negativo. Assim, para manter essa informação, S_m é definida como:

$$S_m = \text{ sinal de } (S_i^2 - \Delta det.V_i) \cdot \sqrt{|S_i^2 - \Delta det.V_i|} \quad (3.45)$$

Então, o valor $(S_m - S_i)$ é a margem de potência em MVA entre a potência que está sendo injetada e a máxima potência estimada para o ponto de operação em análise.

Para a interpretação do tamanho da margem tomam-se os casos:

- $S_m = 10$ e $S_i = 1$: neste caso, a margem é nove vezes o que esta sendo injetado.
- $S_m = 100$ e $S_i = 99$: neste caso a margem é 0,01 do que está sendo injetado.

Nos dois casos, a distância entre o máximo carregamento (S_m) e a injeção de potência na barra i é 9, mas esse valor tem significado diferente em cada caso. Para o cálculo correto destas margens é preciso uma base. Se o ponto de operação está na região normal, o cálculo é:

$$M = \frac{S_m - S_i}{S_m} \quad (3.46)$$

Se o ponto de operação esta na região anormal, o cálculo é:

$$M = \frac{S_m - S_i}{S_i} \quad (3.47)$$

3.3

Modelagem da Carga no Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão

Como visto anteriormente, a avaliação das condições de estabilidade de tensão é associada à potência ativa e reativa, chegando ou saindo da barra em análise. São avaliadas pelo sinal e módulo do determinante da matriz D' . Na Seção 3.2.2 definiram-se as regiões de operação e a fronteira correspondendo ao máximo carregamento.

3.3.1

Caraterística da Carga

Considerando condição estável e frequência nominal, a caraterística da carga pode ser aproximada a um polinômio:

$$P_d = (100 - a - b + a.V + b.V^2) \cdot \frac{P_0}{100} \quad (3.49)$$

$$Q_d = (100 - a - b + a.V + b.V^2) \cdot \frac{Q_0}{100} \quad (3.50)$$

Resolvendo o problema de fluxo de potência pelo método de Newton, as equações nodais linearizadas são:

$$\Delta P = \frac{dP}{d\theta} \Delta\theta + \left(-\frac{dP_d}{dV} + \frac{dP}{dV} \right) \Delta V \quad (3.51)$$

$$\Delta Q = \frac{dQ}{d\theta} \Delta\theta + \left(-\frac{dQ_d}{dV} + \frac{dQ}{dV} \right) \Delta V \quad (3.52)$$

Os elementos diagonais são:

$$\frac{dP_d}{dV} = \frac{a+2bV}{100} P_0 \quad (3.53)$$

$$\frac{dQ_d}{dV} = \frac{c+2dV}{100} Q_0 \quad (3.54)$$

Se a carga não depende da tensão $a = b = c = d = 0$ e, então, $\frac{dP_d}{dV}$ e $\frac{dQ_d}{dV}$ são nulas.

3.3.2

Modelagem da Carga no Cálculo dos Índices

Quando o determinante da matriz D' é nulo, isto significa que a máxima transmissão de potência aparente foi atingida.

A máxima transmissão de potência é única, isto é, independe da modelagem da carga porque a máxima transmissão é uma característica da rede. Portanto, a modelagem da carga é considerada só no problema de fluxo de potência para obter o ponto de operação (a modelagem de carga não deve estar presente na matriz Jacobiano usada para o cálculo de D'). Do ponto de vista numérico, é o mesmo que considerar a modelagem da carga como potência constante.

Suponha uma carga reativa dependente da tensão. Há um elemento $\frac{dQ_l}{dV_l}$ na diagonal da matriz Jacobiana usada na solução do fluxo de potência. Depois da convergência, se a mesma matriz Jacobiana é usada para obter a matriz D' , um resultado nulo para o determinante de D' não significa que a máxima transmissão de potência foi atingida. Na Figura 3.13 o limite máximo correspondente à modelagem com potência constante é C_p , e o limite correspondente à modelagem com impedância constante é C_z . Pode se observar que, usando a matriz Jacobiana incluindo a modelagem com impedância constante, o suposto ponto máximo fica na região anormal e longe do ponto de máximo carregamento.

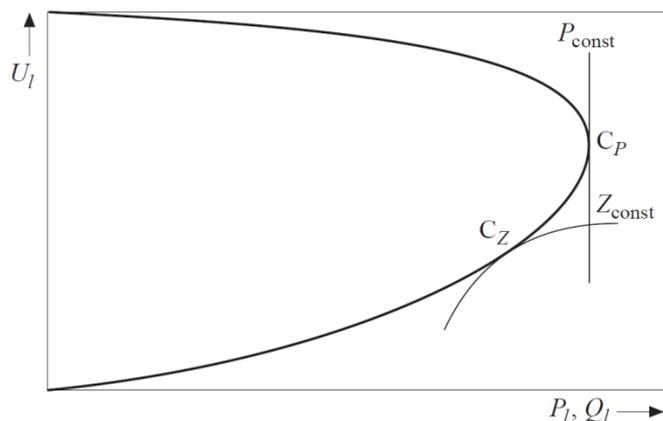


Figura 3.13- Limite estático de estabilidade de tensão para potência e impedância constante [17]

3.4

Conclusões

Neste capítulo apresentou-se a análise da estabilidade de tensão em sistemas elétricos. Esta análise foi baseada nas equações elétricas de cada sistema. Primeiramente analisou-se um sistema de duas barras (unidade geradora – carga). Durante a caracterização do fenômeno, o sistema mudou constantemente em tensão e carga, estes valores levaram a generalizar lugares geométricos característicos definindo-se os seguintes limites: i) LEEA (Limite de Estabilidade Estática Angular), este limite coincide com a reta vertical igual ao ângulo da impedância da rede, ii) LET (Limite de Estabilidade de Tensão) que é a curva de todas as soluções únicas. Esta última divide em região normal e anormal. Com isto pode-se ter uma ideia de como responderá o sistema frente a uma ação de controle.

Mediante a premissa que no sistema estimou-se o máximo carregamento (Única solução em tensão e ângulo) definiu-se dois índices importantes, estes são: i) margem de potência, que estima que tão longe está o ponto de operação do máximo carregamento, ii) ângulo β que é a dificuldade do sistema de suportar a injeção de potência, este ajuda a detectar que tão perto está o ponto de operação do máximo carregamento.

Na última parte lembra-se da característica da carga, e como esta é considerada no cálculo do ponto de operação e no cálculo dos índices de estabilidade, marcando uma grande diferença.