

4

Índices de Avaliação das Condições de Segurança de Tensão

4.1

Introdução

O objetivo é identificar se a tensão em uma barra i está na parte superior, na inferior e a distância à “ponta do nariz” da curva SV. A “ponta do nariz” corresponde à máxima quantidade de potência ativa e reativa que pode ser transmitida à carga ou transmitida a partir de um gerador. O carregamento da rede de transmissão é representado por condições nodais associadas ao máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode ser transmitida dos geradores para as cargas. Desenvolve-se uma ferramenta analítica de avaliação dessas condições nodais com base num modelo matemático simples, mas poderoso, de uma interpretação física direta do fenômeno. Índices abrangentes e significativos de avaliação são deduzidos [Prada R.B., Palomino E.G.C., dos Santos J.O.R., Bianco A., Pilotto L.A.S., 2002].

4.2

A Ferramenta Analítica

O sistema linearizado das equações estáticas de fluxo de carga é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Colocando as equações e variáveis relacionadas com a barra em análise para baixo, fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C & \vdots & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta V' \\ \vdots \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

As sub-matrizes [A], [B], [C] e [D] são as partições da matriz Jacobiano [J], onde:

[A] representa a matriz Jacobiana original do sistema, excluindo as linhas e colunas referentes à barra em análise.

[B] representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa do sistema em relação às variáveis dependentes da barra em estudo.

[C] representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação às outras variáveis dependentes do sistema.

[D] representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação às suas próprias variáveis dependentes.

Assume-se uma variação infinitesimal de carga ou geração ΔP_i e ΔQ_i somente para a barra i de um sistema multi-nó fazendo-se $\Delta P' = \Delta Q' = 0$. As relações de sensibilidade entre as injeções de potência ativa e reativa e a magnitude e o ângulo da tensão na barra i , levando em consideração o restante do sistema podem ser avaliadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\text{onde } [D'] = [D] - [C] \cdot [A^{-1}] \cdot [B] \quad (4.4)$$

A matriz [D'] relaciona P_i , Q_i , com θ_i e V_i , levando em consideração o restante do sistema. Tem dimensão 2x2. No sistema multi-nó: $[D'] \neq [D] \neq [J]$.

É demonstrado que o sinal do determinante e a magnitude da matriz [D'] indicam respectivamente, a região de operação e a distância ao máximo carregamento.

4.2.1

Magnitude do Determinante da Matriz [D']

4.2.1.1

Sistema Duas Barras

Em um sistema de duas barras o fluxo de potência que chega na barra i é igual à carga consumida. Considerando k como a barra de geração, o determinante da matriz [D'] é calculado por:

$$\det[D'] = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \quad (4.5)$$

onde:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (4.6)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (4.7)$$

Derivando (4.6) e (4.7) e substituindo as quatro derivadas em (4.5), obtém-se:

$$\begin{aligned} \det[D'] = & -V_i V_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2V_i^2 B_{ii} (V_k G_{ik} \sin \theta_{ik} - V_k B_{ik} \cos \theta_{ik}) \\ & - 2V_i^2 G_{ii} (V_k G_{ik} \cos \theta_{ik} + V_k B_{ik} \sin \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Fazendo $Y_{ik}^2 = (G_{ik}^2 + B_{ik}^2)$ e multiplicando ambos os lados de (4.8) por V_i :

$$\begin{aligned} \det[D'] V_i = & -[V_i V_k Y_{ik}]^2 + 2V_i^2 B_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] \\ & - 2V_i^2 G_{ii} [V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})] \end{aligned} \quad (4.9)$$

Por outro lado, a potência aparente injetada na barra i é dada por $S_i = P_i + jQ_i$.

De (4.6) e (4.7):

$$\begin{aligned} S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 = & V_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + V_i^2 V_k^2 Y_{ik}^2 + 2V_i^2 G_{ii} V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\ & - 2V_i^2 B_{ii} V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Fazendo $S_{i0}^2 = V_i^4 \cdot Y_{ii}^2$, e comparando (4.9) e (4.10) obtém-se finalmente:

$$\det[D']V_i = S_{i0}^2 - S_i^2 \quad (4.11)$$

O resultado obtido é muito importante para o estudo do carregamento da rede. Aumentando gradualmente o valor da potência injetada S_i , o máximo será alcançado quando S_i^2 for igual a S_{i0}^2 , fazendo com que o produto $\det[D']V_i$ seja igual a zero.

Assim, a condição de otimalidade "gradientes alinhados" do problema "maximizar $P(V,\theta)$ e $Q(V,\theta)$ sujeito a ϕ constante" é satisfeita com $\det[D']=0$, como foi demonstrado de (3.10) a (3.13).

Dessa forma, pode-se dizer que, para um sistema de duas barras:

- S_i^2 é a potência injetada ao quadrado na barra i no ponto de operação em análise.
- S_{i0}^2 é a estimativa da potência ao quadrado "máxima" que pode ser injetada na barra i (dado por $S_{i0}^2 = V_i^4 \cdot Y_{ii}^2$).
- $\det[D']V_i$ é o indicador da distância de S_i^2 a S_{i0}^2 .

4.2.1.2

Sistema Multi-Nó

Um importante resultado obtido para um sistema de duas barras agora é estendido ao sistema multi-nó. Seja $[D]$ a matriz que relaciona linearmente as injeções de potência ativa e reativa ao ângulo e módulo da tensão na barra i :

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

e seja:

$$\begin{bmatrix} -C.A^{-1}.B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Usando (4.12) e (4.13) em (4.4):

$$\det[D'] = \det \left[\begin{pmatrix} x & z \\ y & u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{pmatrix} \right] \quad (4.14)$$

$$\det[D'] = [x.u - y.z] + [x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3] \quad (4.15)$$

De (4.12) tem-se:

$$\det[D] = [x.u - y.z] \quad (4.16)$$

Substituindo (4.16) em (4.15):

$$\det[D'] = \det[D] + [x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3] \quad (4.17)$$

O resultado obtido para um sistema de duas barras, onde $[D'] \equiv [D]$, aqui repetido para comodidade, $\det[D].V_i = S_{i0}^2 - S_i^2$ (equação (4.11)) pode ser estendido. Multiplicando-se ambos lados de (4.17) por V_i :

$$\det[D'].V_i = \det[D].V_i - \Delta \det.V_i \quad (4.18)$$

onde:

$$\Delta \det.V_i = -\{[x.b_4 - y.b_3] + [b_1.u - b_2.z] + [b_1.b_4 - b_2.b_3]\}.V_i \quad (4.19)$$

Substituindo (4.11) em (4.18):

$$\det[D'].V_i = (S_{i0}^2 - \Delta \det.V_i) - S_i^2 \quad (4.20)$$

O novo termo $\Delta \det.V_i$ pode ser escrito a partir de (4.18):

$$\Delta \det.V_i = (\det[D] - \det[D']).V_i \quad (4.21)$$

Dessa forma, pode-se dizer que, para um sistema multi-nó:

- S_i^2 é a potência injetada ao quadrado na barra i no ponto de operação em análise,
- S_{io}^2 é a estimativa da potência ao quadrado "máxima" que poderia ser injetada para a barra i (dado por $S_{io}^2 = V_i^4 \cdot Y_{ii}^2$),
- $\Delta \det \cdot V_i$ está relacionada à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i (dado por $\Delta \det \cdot V_i = (\det[D] - \det[D']) \cdot V_i$),
- $S_m^2 = S_{io}^2 - \Delta \det \cdot V_i$ é definida como a estimativa da máxima potência aparente ao quadrado que poderia ser injetada na barra i, considerando todo o sistema. É possível que o índice S_m^2 possua valores negativos quando $S_{io}^2 < \Delta \det \cdot V_i$ e isso pode acontecer:
 - se o termo $S_{io}^2 = V_i^4 \cdot Y_{ii}^2$ for pequeno, isto é, se o elemento diagonal da matriz admitância da barra for pequeno,
 - se o termo $\Delta \det \cdot V_i = (\det[D] - \det[D']) \cdot V_i$ for grande, o que ocorre principalmente se $\det[D'] \cdot V_i < 0$.
- $S_m = \text{sign}(S_{io}^2 - \Delta \det \cdot V_i) \sqrt{|S_{io}^2 - \Delta \det \cdot V_i|}$ é uma estimativa da máxima potência aparente que estaria sendo injetada na barra i, calculada no ponto de operação em análise.

4.2.2

Sinal do Determinante da Matriz [D']

Os vetores gradiente de potência ativa e reativa podem ser escritos como:

$$\dot{V}P = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cdot \vec{i} + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \cdot \vec{j} + 0 \cdot \vec{k} \quad \text{e} \quad \dot{V}Q = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \cdot \vec{i} + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cdot \vec{j} + 0 \cdot \vec{k} \quad (4.22)$$

onde $\vec{i}$, $\vec{j}$ e $\vec{k}$ são vetores unitários de uma base ortonormal.

O produto vetorial é:

$$\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P} \times \dot{\mathbf{V}}\mathbf{Q} = \left[\left(\frac{\partial \mathbf{P}_i}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial \mathbf{Q}_i}{\partial \mathbf{V}_i} \right) - \left(\frac{\partial \mathbf{P}_i}{\partial \mathbf{V}_i} \cdot \frac{\partial \mathbf{Q}_i}{\partial \theta_i} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (4.23)$$

Substituindo (4.5) em (4.23):

$$\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P} \times \dot{\mathbf{V}}\mathbf{Q} = \det[\mathbf{D}'] \vec{k} \quad (4.24)$$

Como

$$\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P} \times \dot{\mathbf{V}}\mathbf{Q} = |\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P}| \cdot |\dot{\mathbf{V}}\mathbf{Q}| \cdot \sin\beta \quad \text{na direção } \vec{k} \quad (4.25)$$

onde β é o ângulo entre $\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P}$ e $\dot{\mathbf{V}}\mathbf{Q}$, tem-se que:

$$\det[\mathbf{D}'] = |\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P}| \cdot |\dot{\mathbf{V}}\mathbf{Q}| \cdot \sin\beta \quad (4.26)$$

Como o sinal de $\det[\mathbf{D}']$ é função somente de β , tem-se:

$$\det[\mathbf{D}'] > 0 \text{ se } \sin\beta > 0, \rightarrow 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

$$\det[\mathbf{D}'] < 0 \text{ se } \sin\beta < 0, \rightarrow 0^\circ > \beta > -180^\circ$$

$$\det[\mathbf{D}'] = 0 \text{ se } \sin\beta = 0, \rightarrow \beta = \pm 180^\circ, \beta = 0^\circ$$

Observa-se na Figura 4.1 que, tomando $\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P}_i$ como eixo de referência, na região superior da curva SV sempre ocorre $0^\circ < \beta < 180^\circ$ e na região inferior da mesma curva sempre ocorre $0^\circ > \beta > -180^\circ$. No ponto máximo, os vetores gradientes $\dot{\mathbf{V}}\mathbf{P}_i$ e $\dot{\mathbf{V}}\mathbf{Q}_i$ estão alinhados, e então o ângulo β formado por esses dois vetores é $\pm 180^\circ$ ou 0° .

Portanto, $\det[\mathbf{D}'] > 0$ caracteriza a parte superior da curva SV e $\det[\mathbf{D}'] < 0$ caracteriza a parte inferior da mesma curva, enquanto que $\det[\mathbf{D}'] = 0$ caracteriza a fronteira entre essas duas regiões, isto é, a “ponta do nariz”.

E ainda, é fácil perceber que o ângulo β pode complementar a avaliação do carregamento da rede, indicando a região de operação e a distância angular até o máximo.

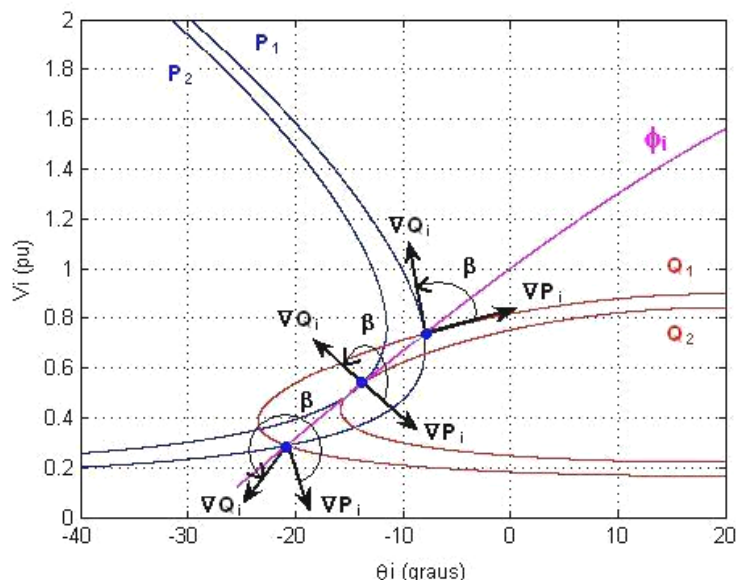


Figura 4.1 - Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano θV

4.2.3

Margem de Potência

O valor $(S_m - S_i)$ é a diferença de potência em MVA entre a potência que está sendo injetada e a máxima potência estimada para o ponto de operação em análise. O problema de interpretação do tamanho do índice é resolvido usando-se S_i e S_m . A margem é grande ou pequena? Pode ser grande em uma barra e pequena para outra? Por exemplo, se $S_m = 10$ e $S_i = 1$, então a margem é 9 vezes o que está sendo injetado. Se, por outro lado, $S_i = 99$ e $S_m = 100$, então a margem é aproximadamente 0,01 do que está sendo injetado.

Na região superior da curva SV da Figura 4.2, a margem de potência $(S_m - S_i)$ é um valor positivo e deve ser lido como a quantidade em MVA que poderia ser "adicionada" a S_i para atingir a estimativa do máximo S_m . Pode-se definir uma margem em pu ou em percentual. Esta margem será igual à unidade quando a potência injetada na barra i é nula ($S_i = 0$), e tende a zero à medida que a injeção tende ao valor máximo ($S_i = S_m$). Esta margem é definida como:

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \text{ em pu de } S_m, \text{ ou} \quad (4.27)$$

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \times 100 \% \text{ em percentual de } S_m \quad (4.28)$$

Na região inferior da curva SV da Figura 4.2, a margem de potência ($S_m - S_i$) é um valor negativo e deve ser lido como a quantidade em MVA que deveria ser "retirada" de S_i para atingir a estimativa do máximo S_m . Pode-se definir uma margem em pu ou em percentual. Esta margem será igual a zero quando a injeção na barra i é máxima ($S_i = S_m$) e tende a -1 quando S_m tende a zero. Esta margem é definida como:

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \text{ em pu de } S_i, \text{ ou} \quad (4.29)$$

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \times 100 \% \text{ em percentual de } S_i \quad (4.30)$$

No ponto de operação correspondente ao máximo carregamento, ($S_m - S_i$) é nulo e, portanto, não há nada a adicionar ou retirar de S_i para atingir S_m .

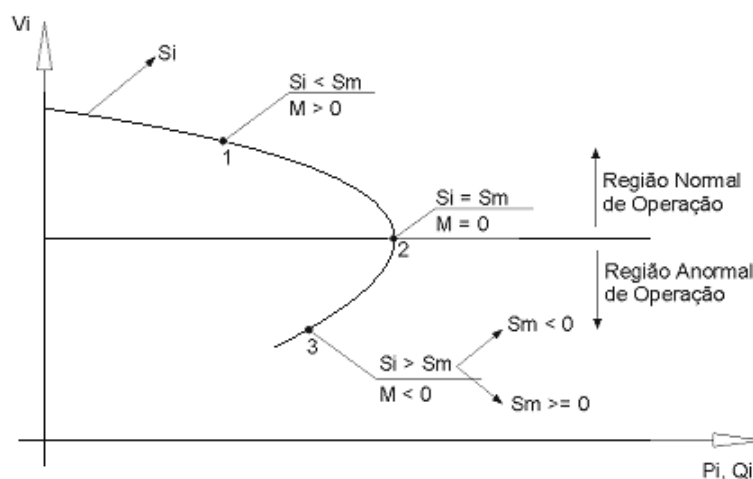


Figura 4.2 - Sinal da Margem na Curva SV

Em sistemas multi-nó pode acontecer que, na região inferior da curva SV, além da margem ser negativa, ser menor que -100 % (quando $S_m < 0$ isto implica que $M < -100 \%$), [dos Santos, J.O.R., França, R.F., Prada, R.B., Ferreira, L.C.A., Bianco, A., 2003]. Esse resultado, que ocorre somente em casos de

carregamentos extremos, indica que seria necessário reduzir toda a injeção na barra em análise e em barras adjacentes.

4.2.4

Índice de Influência

Um outro índice que é útil relaciona as margens de potência entre dois pontos de operação, por exemplo, antes e depois de uma ação de controle. Ficaria caracterizada a eficácia ou não desta ação. Esse índice também pode ser usado para avaliar o efeito de variações de carga, de contingências, e de qualquer outro evento. É definido como:

$$II_i = (\text{ sinal } \beta_{0_i}) \cdot \left[\frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \right] \quad (4.31)$$

onde:

II_i índice de influência da ação de controle sobre a margem da barra i

M_{0_i} margem de potência na barra i no ponto de operação de referência

M_{1_i} margem de potência na barra i num outro ponto de operação

$\text{ sinal } \beta_{0_i}$ sinal do índice β na barra i no ponto de operação de referência

A definição do índice também pode ser escrita como:

$$II_i = \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \quad \text{quando } M_{0_i} > 0 \quad (4.32)$$

$$II_i = 1 - \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} \quad \text{quando } M_{0_i} < 0 \quad (4.33)$$

O movimento do ponto de operação descrito na curva SV da Figura 4.3 corresponde à deterioração do sistema e, conseqüentemente, do índice de

influência. Obviamente o movimento contrário ao da Figura 4.3 corresponde à melhoria das condições do sistema.

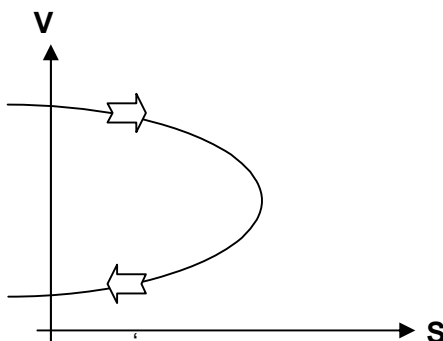


Figura 4.3 - Movimento dos Pontos de Operação Correspondendo à Deterioração da Margem

Se o ponto B da Figura 4.4 é o ponto de operação de referência, uma ação de controle eficaz faz com que o ponto se desloque na direção do ponto A; a margem M_1 é maior que a margem original M_0 e o índice II é positivo. Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se aproxima do ponto C; a margem M_1 é menor que a margem original M_0 e o índice II é negativo ($II=-1$ em C).

Se o ponto D da Figura 4.4 é o ponto de operação de referência, uma ação de controle eficaz faz com que o ponto se desloque na direção do ponto C; a margem M_1 é maior (menos negativa) que a margem original M_0 e o índice II é positivo ($II=+1$ em C). Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se aproxima do ponto E; a margem M_1 é menor (mais negativa) que a margem original M_0 e o índice II é negativo. Na prática, tomar ações de controle de tensão na região inferior da curva SV é muito difícil.

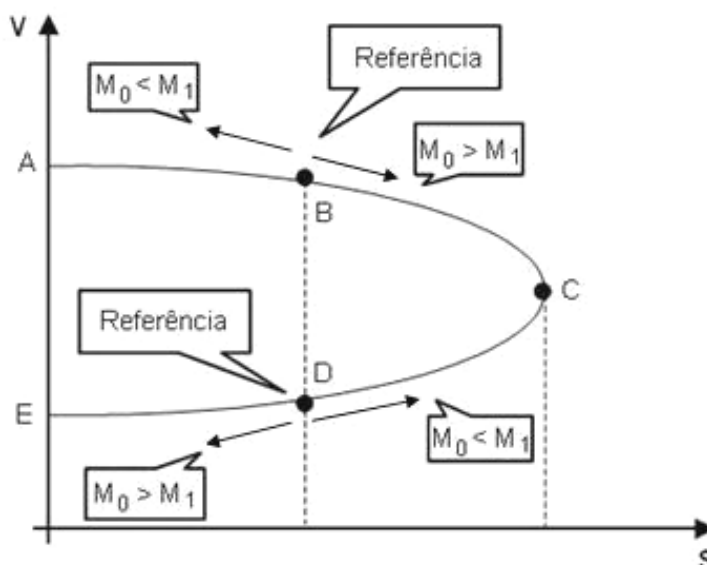


Figura 4.4 - Curva SV para Análise do Índice de Influência

4.3

O Papel do Gerador *Swing*

4.3.1

Localização e Importância

No problema de fluxo de carga, todas as gerações de potência ativa são consideradas fixas, exceto uma correspondente a um gerador. Sua produção serve para fechar o balanço de potência ativa após o conhecimento de todas as tensões em módulo e ângulo, ou em outras palavras, após o conhecimento das perdas ativas na rede de transmissão. Por ter essa função, puramente matemática, ele é conhecido como gerador *swing*, *slack* ou flutuante.

Quando o gerador *swing* deixa de ter capacidade de alterar sua produção, p.ex. a carga aumentou e sua geração chegou ao máximo, ele passa a ser um gerador como os outros, com produção fixa, e um outro gerador é nomeado como *swing*. No sistema de equações linearizadas (4.1), é introduzida a equação do antigo gerador *swing* e retirada a equação do novo gerador *swing*. A matriz $[J]$, e conseqüentemente $[D']$ em (4.4), fica modificada pela exclusão de uma linha e a inclusão de outra linha. Obviamente, o valor do determinante de $[D']$ se altera. Portanto, os índices de avaliação do carregamento da rede de transmissão podem ter valores diferentes dependendo da localização da barra *swing*.

É muito importante ressaltar que, como os índices são calculados em um ponto de operação, a barra *swing* serve para responder à variação infinitesimal de carga ativa na barra em análise, assim como à conseqüente variação infinitesimal das perdas ativas na transmissão.

Assim, espera-se obter um valor maior do determinante da matriz $[D']$ para uma certa barra da rede quando eletricamente perto do gerador *swing*, e um valor menor quando afastada deste. A fim de diminuir o efeito da escolha da localização da barra *swing*, recomenda-se utilizar aspectos práticos do sistema em teste. Por exemplo, escolher como *swing* todos os geradores que estejam tomando carga da área da barra em análise (múltiplas barras *swing*) [de Castro, M.R.V., 2007].

Se não há barra *swing*, todas as gerações ativas são fixas e não há a possibilidade de aumentar-se infinitesimalmente a carga. A análise para todas as barras do sistema indicaria determinante da matriz $[D']$ nulo.

4.3.2

A Similaridade com Barras PV

O sistema de equações linearizadas também contém as equações nodais de balanço de potência reativa para todas as barras do sistema, exceto aquelas correspondentes a todas as barras de tensão controlada. Estas têm capacidade de alterar sua produção para fechar o balanço de potência reativa após o conhecimento de todas as tensões em módulo e ângulo, ou em outras palavras, após o conhecimento das perdas reativas na rede de transmissão. Usualmente, o gerador *swing* é de tensão controlada.

Enquanto um gerador fecha o balanço de potência ativa, vários geradores, preferencialmente todos, fecham o balanço de potência reativa. Suas equações nodais de potência reativa não fazem parte do sistema de equações linearizadas em (4.1), como já dito. Toda vez que um gerador perde sua capacidade de alterar sua produção de potência reativa torna-se um gerador com produção de potência reativa fixa e sua equação é incluída no sistema de equações linearizadas. Conseqüentemente, o valor do determinante da matriz $[D']$ em (4.4) se altera.

Se não houver barras de tensão controlada por geração variável de potência reativa, todas as gerações reativas são fixas e deixa de haver a possibilidade de aumentar-se infinitesimalmente a carga. A análise para todas as barras do sistema indicaria determinante da matriz $[D']$ nulo.

4.4

Ordenação de Barras Críticas

Na Figura 4.5 é mostrado o fluxograma do processo de avaliação das condições de estabilidade de tensão em todas as barras da rede elétrica e logo é feito o reforço das condições de segurança de tensão na barra identificada como crítica. Toda barra com índices β e M negativos (como definido na Seção 4.2) ou,

menores que a margem mínima de potência $M_{\text{mínimo}}$ estabelecida pelo operador do sistema, são barras críticas. Os critérios para definir $M_{\text{mínimo}}$ é função das características do sistema elétrico brasileiro e da realidade econômica das empresas que o integram. Nesta tese é considerado $M_{\text{mínimo}} = 0 \%$, o que corresponde ao ponto de máximo carregamento que sai de uma barra de geração ou chega a uma barra de carga.

Se forem várias barras críticas, é necessário definir a ordem de prioridade de que barras devem ser reforçadas primeiro. Os problemas de estabilidade de tensão aparecem principalmente em barras PV e PQ devido ao alto carregamento que sai ou entra nelas e ao controle inverso da tensão [Prada, R.B., dos Santos, J.O.R., Greenhalgh, A.B., Seelig, B.H.T., Palomino, E.G.C., 2001]. Para um mesmo ponto de operação podem ser identificadas tanto barras PV e PQ como críticas.

O problema da estabilidade do controle automático de tensão, devido ao efeito oposto esperado na lógica do projeto do dispositivo de controle, pode causar tensões excessivamente baixas (ou altas) para a operação normal do sistema, acarretando, p.ex. o desligamento e/ou bloqueio de motores de indução. Por essa razão e por serem as responsáveis de manter um bom perfil de tensão na rede, as barras de tensão controlada do tipo PV têm prioridade de reforço entre as barras críticas e, na hora de ordenação por criticidade são as primeiras a serem consideradas. Se não existe nenhuma barra crítica do tipo PV, esta deve ser procurada entre as barras do tipo PQ.

Uma barra *swing* é de tensão controlada e deve ser considerada na hora da ordenação por criticidade como barra PV.

Depois de identificada a barra crítica, seja do tipo PV ou PQ, se procede ao reforço desta barra. Se existem mais de uma barra crítica, escolhe-se aquela que tiver a menor margem de potência ponderada [Moura, R.D., Prada, R.B., 2005] definida em (4.34) e calculado como:

$$M_i^P = M_i \cdot \left| \frac{S_{m_i}^o}{S_m^o} \right| \quad (4.34)$$

onde:

- M_i é a margem de potência em pu ou em percentual calculada com (4.27 ou 4.28) se aquela barra estiver na região superior da curva SV ou com (4.29 ou 4.30) se estiver na região inferior da curva SV,
- $R_{II_i} = \left| \frac{S_{m_i}^o}{S_m^o} \right|$ é o índice de importância da barra i ,
- $S_{m_i}^o$ é a potência máxima que pode ser injetada na barra i (caso-base),
- S_m^o é a potência máxima que pode ser injetada dentre todas as barras do sistema (caso-base).

O índice R_{II_i} leva em conta a influência do sistema na barra i em análise com relação à estimativa e localização do máximo carregamento. As barras adjacentes à barra i em análise podem influenciar a forma, localizada ou distribuída, da redução total da margem de potência do sistema. Não é igual uma barra com índices negativos de 23 kV do que outra de 500 kV também com índices negativos. Sem dúvidas, a segunda barra é mais importante do que a primeira, portanto, este índice R_{II_i} atua como um peso que acentua a devida importância da barra i .

O processo iterativo acaba quando não existem mais barras críticas ou quando o operador considera que todas as margens de potência são aceitáveis.

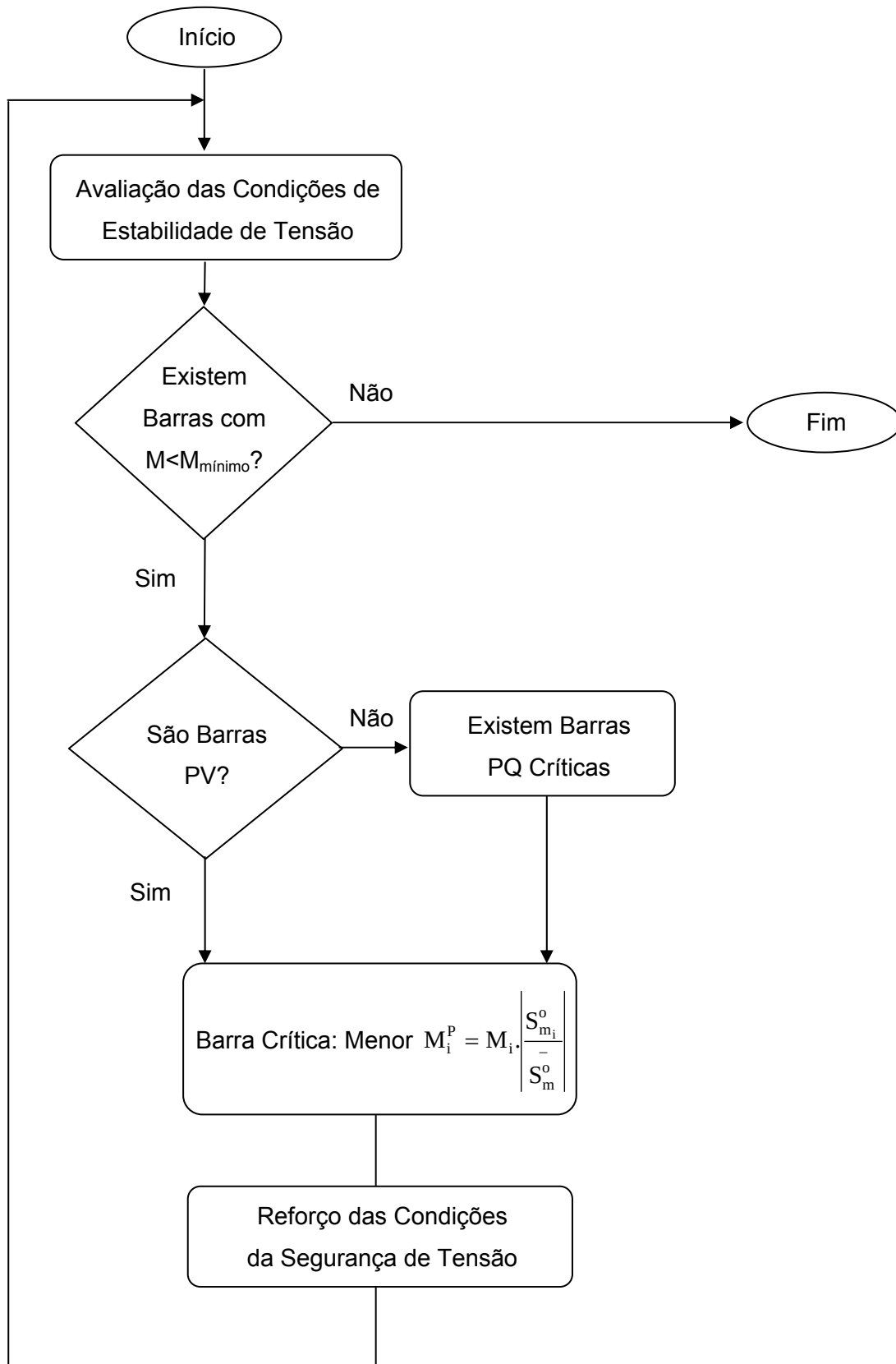


Figura 4.5 - Ordenação das Barras Críticas