

5

Índices de Estabilidade de Tensão e o Controle Carga-Frequência

No caso mais simples, os índices de estabilidade de tensão calculados a partir do sistema linearizado das equações de fluxo de carga, consideram apenas um gerador assumindo as variações infinitesimais da injeção de potência na barra em análise e as consequentes variações das perdas ôhmicas e os impactos normais.

No Capítulo 4 foi modelado o problema de fluxo de potência, com equações associados ao controle de carga-frequência, para as diferentes estratégias de controle e pontos de operação.

Com estes novos sistemas linearizados, no presente capítulo mostra-se o cálculo dos índices de estabilidade de tensão.

Considera-se que o sistema opera com uma distribuição de geração correspondente ao despacho proporcional. Após a ocorrência de um impacto normal, como uma variação de carga, há uma etapa de transição, onde atua o controle de velocidade dos geradores (regulação primária e, posteriormente, secundária), para recuperar o equilíbrio geração/carga e a frequência do sistema. Depois da atuação desse controle, já recuperada a frequência e intercâmbios entre áreas, um novo despacho proporcional é calculado. Na Figura 5.1 ilustra-se a sequência temporal.

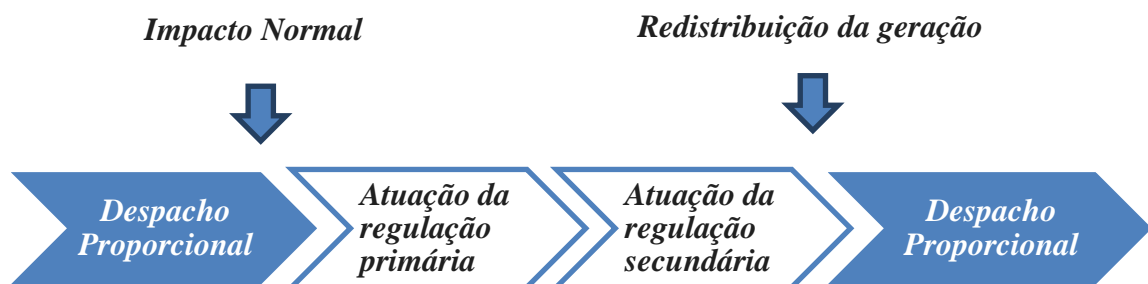


Figura 5.1- Sequência temporal da atuação do controle carga-frequência

5.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão Antes da Ocorrência de um Impacto Normal

Neste trabalho a modelagem do sistema em condição estável inclui múltiplas barras *swing*, cuja característica é assumir as variações de carga e/ou geração e das perdas ôhmicas de forma proporcional à distribuição de geração no caso-base.

O sistema linear para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão, calculado no ponto de operação inicial, correspondente ao despacho proporcional, é mostrado em (5.1).

Neste caso, observa-se que (5.1) é idêntico a (4.7), sistema linearizado das equações de fluxo de carga quando se consideram múltiplas barras *swing*.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta g_1 \\ \Delta g_2 \\ \vdots \\ \Delta g_{ng-1} \\ \Delta g_1' \\ \Delta g_2' \\ \vdots \\ \Delta g_{ng}' \\ \Delta \theta_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_1} & \frac{\partial P_k}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_1'} & \frac{\partial P_k}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1'} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_1}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_1}{\partial x_1'} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \frac{\partial g_2}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_2}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_2}{\partial x_1'} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_1} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_1'} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_1'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1'}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_1'}{\partial x_1'} & \frac{\partial g_1'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \frac{\partial g_2'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_2'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_2'}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2'}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_2'}{\partial x_1'} & \frac{\partial g_2'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial g_2'}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_1} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_1'} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_{ng}'} \\ \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1'} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_{ng} \\ \Delta x_1' \\ \Delta x_2' \\ \vdots \\ \Delta x_{ng}' \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Nas próximas duas seções mostra-se o cálculo de índices de estabilidade para barras de carga e de geração.

5.1.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras PQ em um Sistema Modelado com Múltiplas Barras Swing

Em (5.1) se encontram todos os resíduos correspondentes à potência ativa e reativa numa barra PQ. Movendo linhas e colunas associadas à barra i em análise em (5.1) o sistema linearizado fica:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta g_1 \\ \vdots \\ \Delta g_{ng-1} \\ \Delta g_1' \\ \vdots \\ \Delta g_{ng}' \\ \Delta \theta_i' \\ \hline \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \dots \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_i} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_1}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_1}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_1}{\partial V_i} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_{ng-1}}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_1'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_1'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial g_1'}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial g_1'}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_1'}{\partial V_i} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_{ng}'}{\partial V_i} \\ \hline \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_i}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_i}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_i}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial x_{ng}'} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_{ng} \\ \Delta x_1' \\ \vdots \\ \Delta x_{ng}' \\ \hline \Delta \theta_i' \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

As linhas pontilhadas em (5.2) definem as sub-matrizes A , B , C e D . Fixando as variações de potência ativa e reativa em outras barras, e as variações nas equações de controle, calcula-se a matriz D' e, a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β .

5.1.2

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras de Geração em um Sistema Modelado com Múltiplas Barras *Swing*

No sistema linearizado com múltiplas *swing*, uma barra de geração i em análise é uma barra de tensão controlada. No entanto, na faixa de banda morta do controle de tensão, a tensão é variável. E então, no momento de análise dessa barra, a equação de controle de tensão de $\Delta g_i'$ e a variável de estado ΔQ_i são incluídas no sistema linear e, consequentemente, suas linhas e colunas. Depois disto, essa barra é analisada como se fosse uma barra PQ.

Deve ser notado que a barra de geração i em análise pode ser uma das barras *swing*.

Como já dito, esta barra *swing* é tratada como barra PQ quando em análise. Assim, ela não poderá contribuir para assumir variações de injeção de potência nela mesmo e nas perdas. O sistema passa a contar com menos uma barra *swing*. Assim, a reformulação do sistema linearizado é necessária.

Sejam as potências ativas geradas pelas barras *swing* $P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gi}, \dots, P_{G(ng)}$. No sistema linearizado os resíduos das equações de controle correspondentes são:

$$\begin{aligned} \Delta g_1 &= -\Delta P_{G1} + \alpha_{12} \cdot \Delta P_{G2} \\ \Delta g_2 &= -\Delta P_{G2} + \alpha_{23} \cdot \Delta P_{G3} \\ &\vdots \\ \Delta g_i &= -\Delta P_{Gi} + \alpha_{i(i+1)} \cdot \Delta P_{G(i+1)} \\ &\vdots \\ \Delta g_{(ng-1)} &= -\Delta P_{G(ng-1)} + \alpha_{(ng-1)ng} \cdot \Delta P_{G(ng)} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Para simular a perda de ação de controle da barra de geração i *swing*, retira-se a equação de controle, o resíduo e a variável de estado ΔP_{Gi} . Os resíduos das equações remanescentes são:

$$\begin{aligned} \Delta g_1 &= -\Delta P_{G1} + \alpha_{12} \cdot \Delta P_{G2} \\ \Delta g_2 &= -\Delta P_{G2} + \alpha_{23} \cdot \Delta P_{G3} \\ &\vdots \\ \Delta g_{(i-1)} &= -\Delta P_{G(i-1)} + \alpha_{(i-1)(i+1)} \cdot \Delta P_{G(i+1)} \\ &\vdots \\ \Delta g_{(ng-1)} &= -\Delta P_{G(ng-1)} + \alpha_{(ng-1)ng} \cdot \Delta P_{G(ng)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Observando (5.3) e (5.4) pode-se notar um novo termo $\alpha_{(i-1)(i+1)}$:

$$\alpha_{(i-1)(i+1)} = \frac{\alpha_{(i-1)}}{\alpha_{(i+1)}} = \frac{P_{G(i-1)o}}{P_{G(i+1)o}} \quad (5.5)$$

Após esta reformulação no sistema linearizado, calculam-se os índices como se fosse uma barra PQ.

Quando a barra de geração em análise for a barra de referência de ângulo de tensão, é necessário a mudança da referência para outra barra de geração.

5.2

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão Depois da Ocorrência de um Impacto Normal

Ao ocorrer um impacto normal no sistema, automaticamente atua o controle carga-frequência das unidades geradoras. A regulação primária atua até o sistema recuperar o equilíbrio entre carga e geração, e a regulação secundária até recuperar a frequência e os intercâmbios entre áreas.

O objetivo agora é calcular os índices de estabilidade de tensão nos pontos de operação após a atuação da regulação primária e da regulação secundária.

5.2.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão Depois da Atuação da Regulação Primária

Nesta seção barras de geração com regulação primária são modeladas. Tendo em conta que o sistema atingiu um novo ponto de operação (após a atuação da regulação primária), são calculados os índices de estabilidade de tensão.

O sistema linearizado (5.6) foi apresentado na Seção 4.2 como (4.13). A característica deste sistema linear é que as barras de geração que tem regulação

primária assumirão as variações de carga e/ou geração e das perdas ôhmicas proporcionalmente às suas energias de regulação.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_2' \\ \vdots \\ \Delta y_{ng} \\ \Delta y_{ng}' \\ \vdots \\ \Delta \theta_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_1} & \frac{\partial P_k}{\partial x_1'} & \frac{\partial P_k}{\partial x_2} & \frac{\partial P_k}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1'} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_2} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_1}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_1'} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1'} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_2} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial y_2}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_2}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_1'} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_2}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial y_2'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_2'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_2'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2'}{\partial x_1'} & \frac{\partial y_2'}{\partial x_2} & \frac{\partial y_2'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial y_2'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_2'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_2'}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1'} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_2} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1'} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_2} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1'} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_2} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_2'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{2ng+1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_1' \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_2' \\ \vdots \\ \Delta x_{ng} \\ \Delta x_{ng}' \\ \vdots \\ \Delta x_{2ng+1} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Nas próximas duas seções mostra-se o cálculo dos índices de estabilidade para barras de carga e de geração.

5.2.1.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras PQ em um Sistema Modelado com Regulação Primária

Em (5.6) se encontram todos os resíduos correspondentes às barras PQ. Movendo linhas e colunas associadas à barra i em análise em (5.6) o sistema linearizado fica:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1' \\ \vdots \\ \Delta y_{ng} \\ \Delta y_{ng}' \\ \vdots \\ \Delta \theta_i' \\ \hline \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_1} & \frac{\partial P_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_1}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial y_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial y_1}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial y_1'}{\partial \theta_i} & \frac{\partial y_1'}{\partial V_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial \theta_i} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial V_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_i}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial x_1} & \frac{\partial P_i}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_i}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial x_1} & \frac{\partial Q_i}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_i}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_1' \\ \vdots \\ \Delta x_{ng} \\ \Delta x_{ng}' \\ \vdots \\ \frac{\Delta x_{2ng+1}}{\Delta \theta_i} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

As linhas pontilhadas indicam as novas sub-matrizes A , B , C e D . Fixando todos os resíduos, exceto os resíduos ΔP_i e ΔQ_i , calcula-se a matriz D' e, a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β .

5.2.1.2

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras de Geração em um Sistema Modelado com Regulação Primária

Em uma barra de tensão controlada, na prática, o valor da tensão não permanece constante porque esta sempre varia em torno seu valor especificado. Como já dito, o cálculo dos índices será feito como se fosse para uma barra PQ.

Em (5.8) e (5.9) se encontram explícitos os resíduos das equações estáticas para uma barra de geração i com regulação primária.

$$\Delta y_i = -P_{Gi} + P_{Gi}^{esp} + \frac{1}{R_i} \cdot (f - f^{esp}) \quad (5.8)$$

$$\Delta y'_i = V_i^{esp} - V_i \quad (5.9)$$

Para fazer o cálculo dos índices de estabilidade movem-se linhas e colunas associadas à barra i . Depois faz-se $\Delta P_k = 0$ e $\Delta Q_k = 0$, onde k representa todas as barras exceto i , e $\Delta y_c = 0$ e $\Delta y'_c = 0$, onde c são as barras de geração com regulação primária.

Como a barra de geração i com regulação primária tem controle de tensão e controle carga-frequência, ao fazer-se a análise da mesma, esta barra perde todo tipo de controle. Para simular a perda de controle de tensão, retira-se o resíduo $\Delta y'_i$ e a correspondente variável de estado ΔQ_i .

Para simular a perda do controle de carga-frequência para o cálculo do índice, a barra de geração i é tratada como barra PQ. Assim, ela não poderá contribuir para assumir variações de injeção de potência nela mesma e nas perdas. O sistema passa a contar com menos uma barra com regulação primária.

A reformulação do sistema linearizado é necessária. Retira-se a linha Δy_i e a coluna ΔP_{Gi} e o sistema linear fica:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1' \\ \vdots \\ \Delta y_i \\ \Delta y_i' \\ \vdots \\ \Delta y_{ng} \\ \Delta y_{ng}' \\ \vdots \\ \Delta \theta_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_1} & \frac{\partial P_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_i} & \frac{\partial P_k}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_1}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_i} & \frac{\partial y_1}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_i} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{2ng+1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_i}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_i}{\partial x_1} & \frac{\partial y_i}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_i}{\partial x_i} & \frac{\partial y_i}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial y_i}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_i}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_i}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial y_i'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_i'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_i'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_i'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_i'}{\partial x_i} & \frac{\partial y_i'}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial y_i'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_i'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_i'}{\partial x_{2ng+1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_i} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{2ng+1}} \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_i} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{2ng+1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_i} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_i'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{2ng+1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_1' \\ \vdots \\ \Delta x_{ng} \\ \Delta x_{ng}' \\ \vdots \\ \Delta x_{2ng+1} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

As linhas contínuas sobre a matriz em (5.10) indicam as linhas e colunas retiradas. Movendo linhas e colunas associadas à barra i em análise, delimitam-se as sub-matrizes A , B , C , D para obter a matriz D' e, conseqüentemente, a margem M e o ângulo β .

Quando a barra de geração em análise for a barra de referência de ângulo de tensão, é necessária a mudança da referência para outra barra de geração.

Nesta seção barras de geração com regulação secundária são modeladas. Tendo em conta que o sistema atingiu um novo ponto de operação (após a atuação da regulação secundária) são calculados os índices de estabilidade de tensão.

O sistema linearizado foi apresentado na Seção 4.4 como (4.31). A característica desse sistema linearizado é que as barras de geração com regulação secundária assumirão as variações de carga e/ou geração e das perdas ôhmicas de

5.2.2.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão em Barras PQ em um Sistema Modelado com Regulação Secundária

Em (5.11) se encontram todos os resíduos correspondentes às barras PQ. Movendo linhas e colunas associadas à barra i em análise em (5.11), o sistema linearizado fica:

[illegible]

As linhas pontilhadas indicam as novas sub-matrizes A , B , C e D . Fixando todos os resíduos, exceto da barra i , pode-se calcular a matriz D' e, a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β .

5.2.2.2

Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão em Barras de Geração em um Sistema Modelado com Regulação Secundária

O procedimento no cálculo de índices de barras de geração é similar ao da regulação primária. Movem-se linhas e colunas associadas à barra i , depois faz-se $\Delta P_k = 0$ e $\Delta Q_k = 0$, onde k representa todas as barras, exceto a barra i .

A barra de geração i com regulação secundária tem controle de tensão e carga-frequência. Ao fazer-se a análise da mesma, esta barra perde todo tipo de controle. Para simular a perda de controle de tensão, retira-se o resíduo $\Delta y'_i$ e a variável de estado ΔQ_i .

Para simular a perda do controle de carga-frequência, a barra de geração i é tratada como barra PQ. Assim, ela não poderá contribuir para assumir variações de injeção de potência nela mesma e nas perdas. O sistema passa a contar com menos uma barra com regulação secundária.

A reformulação do sistema linearizado é necessária. Retira-se a equação de controle correspondente à barra de geração i e sua variável de estado ΔP_{Gi} .

Para continuar a modelagem, supõe-se uma única área de controle j com ng geradores com regulação secundária $P_{G1j}, P_{G2j}, \dots, P_{Gij}, \dots, P_{Gngj}$ e cada gerador com fator de participação $\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{ij}, \dots, \alpha_{ngj}$. Ao retirar a equação de controle correspondente à barra i , o gerador P_{Gij} não poderá assumir variações de injeção de potência nem perdas. Assim, o fator de participação α_{ij} perde o sentido. O sistema passa a contar com menos uma barra com regulação secundária e os fatores de participação são $\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{(i-1)j}, \alpha_{(i+1)j}, \dots, \alpha_{ngj}$. E, então:

$$\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^{ng} \alpha_{rj} \neq 1$$

(5.13)

É necessário redefinir os fatores de participação de maneira que:

$$\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^{ng} \alpha'_{rj} = 1$$

(5.14)

Onde para uma barra com regulação secundária l qualquer:

$$\alpha'_{lj} = \frac{\alpha_{lj}}{\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^{ng} \alpha_{rj}}$$

(5.15)

Com os novos fatores de participação, passa-se à reformulação dos resíduos.

No sistema linearizado os resíduos das equações de controle correspondentes à área j são:

$$\begin{aligned} \Delta y_{1j} &= \alpha_{12j} \cdot (P_{G2j} - P_{G2j}^{esp}) - (P_{G1j} - P_{G1j}^{esp}) \\ \Delta y_{2j} &= \alpha_{23j} \cdot (P_{G3j} - P_{G3j}^{esp}) - (P_{G2j} - P_{G2j}^{esp}) \\ &\vdots \\ \Delta y_{ij} &= \alpha_{(i)(i+1)j} \cdot (P_{G(i+1)j} - P_{G(i+1)j}^{esp}) - (P_{G(i)j} - P_{G(i)j}^{esp}) \\ &\vdots \\ \Delta y_{(ng-1)j} &= \alpha_{(ng-1)(ng)j} \cdot (P_{Gngj} - P_{Gngj}^{esp}) - (P_{G(ng-1)j} - P_{G(ng-1)j}^{esp}) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Para simular a perda do controle da barra de geração i com regulação secundário, como já mencionado, retira-se a equação de controle, o resíduo e a variável de estado ΔP_{Gi} . Os resíduos das equações remanescentes são:

$$\begin{aligned}
 \Delta y_{1j} &= \alpha'_{12j} \cdot (P_{G2j} - P_{G2j}^{esp}) - (P_{G1j} - P_{G1j}^{esp}) \\
 \Delta y_{2j} &= \alpha'_{23j} \cdot (P_{G3j} - P_{G3j}^{esp}) - (P_{G2j} - P_{G2j}^{esp}) \\
 &\vdots \\
 \Delta y_{(i-1)j} &= \alpha'_{(i-1)(i+1)j} \cdot (P_{G(i+1)j} - P_{G(i+1)j}^{esp}) - (P_{G(i-1)j} - P_{G(i-1)j}^{esp}) \\
 &\vdots \\
 \Delta y_{(ng-1)j} &= \alpha'_{(ng-1)(ng)j} \cdot (P_{Gngj} - P_{Gngj}^{esp}) - (P_{G(ng-1)j} - P_{G(ng-1)j}^{esp})
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Observando (5.16) e (5.17) pode-se notar um novo termo $\alpha'_{(i-1)(i+1)j}$:

$$\alpha'_{(i-1)(i+1)j} = \frac{\alpha'_{(i-1)j}}{\alpha'_{(i+1)j}} \tag{5.18}$$

Depois dessa reformulação no sistema linearizado calculam-se os índices como se a barra i fosse uma barra PQ.

Caso a área de controle tenha uma única barra de geração com regulação secundária, para o cálculo dos índices de estabilidade dessa barra, se retira o resíduo do ECA nessa área ($\Delta y_j''$), porque a única barra de geração que encontrava-se controlando a relação entre os resíduos da frequência e do intercâmbio passou a ser barra PQ.

Quando a barra de geração em análise for a barra de referência de ângulo de tensão, é necessária a mudança da referência para outra barra de geração.

O sistema da Figura 4.1 e os diferentes sistemas lineares obtidos nas Seções 5.1 e 5.2 são usados para calcular os índices de estabilidade, antes de um impacto normal e depois da atuação de cada tipo de controle.

Cálculo dos Índices de Estabilidade Antes de Um Impacto Normal

[illegible]

Cálculo dos Índices de Estabilidade Antes do Impacto Normal – Tratamento para Barras PQ

[illegible]

As linhas pontilhadas indicam as novas sub-matrizes A , B , C e D . Fixando todos os resíduos, exceto os resíduos ΔP_5 e ΔQ_5 , calcula-se a matriz D' e a partir desta os índices de estabilidade margem M e o ângulo β . O mesmo tratamento é feito para todas as barras tipo PQ.

5.3.1.2**Cálculo dos Índices de Estabilidade Antes do Impacto Normal – Tratamento para Barras de Geração**

Usa-se a barra 2 para o cálculo. Tomando (5.19) e reformula-se o sistema linear retirando a ação de controle de potência da barra 2, então (5.21) substitui (5.22) e (5.23):

$$\Delta g_1 = -\Delta P_{G1} + \alpha_{16} \cdot \Delta P_{G6} \quad (5.21)$$

$$\Delta g_1 = -\Delta P_{G1} + \alpha_{12} \cdot \Delta P_{G2} \quad (5.22)$$

$$\Delta g_2 = -\Delta P_{G2} + \alpha_{26} \cdot \Delta P_{G6} \quad (5.23)$$

Retira-se também o controle de tensão da barra 2:

$$\Delta g'_2 = V_2^{esp} - V_2 \quad (5.24)$$

Depois de reformular o sistema linear e mover a linha e a coluna associada à barra 2, o sistema fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1' \\ \Delta P_3' \\ \Delta P_4' \\ \Delta P_5' \\ \Delta P_6' \\ \Delta Q_1' \\ \Delta Q_3' \\ \Delta Q_4' \\ \Delta Q_5' \\ \Delta Q_6' \\ \Delta g_1' \\ \Delta g_1' \\ \Delta g_3' \\ \Delta \theta_2' \\ \Delta P_2' \\ \Delta Q_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_3} & \frac{\partial P_1}{\partial V_4} & \frac{\partial P_1}{\partial V_5} & \frac{\partial P_1}{\partial V_6} & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_3}{\partial V_1} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_5} & \frac{\partial P_3}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_4}{\partial V_1} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_5} & \frac{\partial P_4}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_5}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_5}{\partial V_1} & \frac{\partial P_5}{\partial V_3} & \frac{\partial P_5}{\partial V_4} & \frac{\partial P_5}{\partial V_5} & \frac{\partial P_5}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_5}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_6}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_5} & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_6} & \frac{\partial P_6}{\partial V_1} & \frac{\partial P_6}{\partial V_3} & \frac{\partial P_6}{\partial V_4} & \frac{\partial P_6}{\partial V_5} & \frac{\partial P_6}{\partial V_6} & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{\partial P_6}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_6}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_6} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_6} & 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_6} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_6} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_6} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_6} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_6} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial Q_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_5}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_4} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_5} & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_6} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_4} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_5} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_6} & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{\partial Q_6}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_6}{\partial V_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\alpha_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

As linhas pontilhadas indicam as novas sub-matrizes A , B , C e D . Fixando os valores dos resíduos exceto da barra 2 obtém-se o D' e a partir desta os índices de estabilidade margem M e o ângulo β . O mesmo tratamento é feito para as outras barras *swing*.

Para o cálculo dos índices para a barra de referência (neste caso barra 1) somente é necessário a mudança da referência.

5.3.2

Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Primária

O sistema linearizado após a regulação primária foi apresentado na Seção 4.5.2, em (4.70). Substituindo os valores dos elementos calculados em (4.71) até (4.86), o sistema linearizado fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1' \\ \Delta Q_1' \\ \Delta P_2' \\ \Delta Q_2' \\ \Delta P_3' \\ \Delta Q_3' \\ \Delta P_4' \\ \Delta Q_4' \\ \Delta P_5' \\ \Delta Q_5' \\ \Delta P_6' \\ \Delta Q_6' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_6' \\ \Delta y_6' \\ \Delta \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{55} & L_{55} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{65} & N_{65} & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{1}{R_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{1}{R_6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Nas próximas duas seções mostram-se o cálculo dos índices de estabilidade para barras de carga e de geração.

5.3.2.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Primária – Tratamento para Barras PQ

Usa-se a barra 5 para o cálculo. Em (5.26) movem-se linha e coluna associadas à barra 5 e o sistema linear fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1' \\ \Delta Q_1' \\ \Delta P_2' \\ \Delta Q_2' \\ \Delta P_3' \\ \Delta Q_3' \\ \Delta P_4' \\ \Delta Q_4' \\ \Delta P_6' \\ \Delta Q_6' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_6' \\ \Delta y_6' \\ \Delta \theta' \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{1}{R_6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix}$$

(5.27)

As linhas pontilhadas indicam as novas sub-matrizes A , B , C e D . Fixando os valores dos resíduos exceto ΔP_5 e ΔQ_5 , calcula-se a matriz D' e a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β . O mesmo tratamento é feito todas as barras tipo PQ.

5.3.2.2

Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Primária – Tratamento para Barras de Geração

Usa-se a barra 2 para o cálculo. Tomando (5.26), reformula-se o sistema linear retirando a ação de controle de potência da barra 2:

$$\Delta y_2 = -P_{G2} + P_{G2}^{esp} + \frac{1}{R_2} \cdot (f - f^{esp}) \quad (5.28)$$

Retira-se também o controle de tensão da barra 2:

$$\Delta y'_2 = V_2^{esp} - V_2 \quad (5.29)$$

Consequentemente, retira-se as variáveis de estado $\Delta x_2 = \Delta P_{G2}$, $\Delta x'_2 = \Delta Q_{G2}$. Movem-se a linha e a coluna associadas à barra 2. O sistema linear fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P'_1 \\ \Delta Q'_1 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta P'_6 \\ \Delta Q'_6 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y'_1 \\ \Delta y_6 \\ \Delta y'_6 \\ \Delta \theta' \\ \Delta P'_2 \\ \Delta Q'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ J_{31} & L_{31} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{32} & L_{32} \\ 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{55} & L_{55} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{65} & N_{65} & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{1}{R_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ 0 & 0 & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

As linhas pontilhadas em (5.30) indicam as sub-matrizes A , B , C e D .
Fixando as variações de potência ativa e reativa, exceto na barra 2, e as variações

nas equações de controle, calcula-se a matriz D' e a partir desta os índices de estabilidade margem M e o ângulo β . O mesmo procedimento é feito para todas as barras de geração com regulação primária.

No cálculo dos índices da barra de referência somente é necessário mudar a referência para outra barra de geração.

5.3.3

Cálculo dos Índices de Estabilidade em Uma Única Área de Controle Depois da Atuação da Regulação Secundária

O sistema linearizado após a regulação secundária em uma única área de controle foi apresentado na Seção 4.5.4.1 em (4.109). Substituindo os valores dos elementos calculados em (4.110) até (4.124), o sistema linearizado fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1' \\ \Delta Q_1' \\ \Delta P_2' \\ \Delta Q_2' \\ \Delta P_3' \\ \Delta Q_3' \\ \Delta P_4' \\ \Delta Q_4' \\ \Delta P_5' \\ \Delta Q_5' \\ \Delta P_6' \\ \Delta Q_6' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_6' \\ \Delta \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{55} & L_{55} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{65} & N_{65} & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\alpha_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\alpha_{26} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Nas próximas duas seções mostra-se o cálculo de índices de estabilidade para barras de carga e de geração.

5.3.3.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras PQ

Usa-se a barra 5 para mostrar o cálculo. Em (5.31) movem-se a linha e a coluna associadas à barra 5 e o sistema linear fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1' \\ \Delta Q_1' \\ \Delta P_2' \\ \Delta Q_2' \\ \Delta P_3' \\ \Delta Q_3' \\ \Delta P_4' \\ \Delta Q_4' \\ \Delta P_6' \\ \Delta Q_6' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_6' \\ \Delta \theta' \\ \hline \Delta P_5' \\ \Delta Q_5' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\alpha_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\alpha_{26} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

As linhas pontilhadas indicam as sub-matrizes A , B , C e D . Fixando as variações de potência ativa e reativa nas barras, exceto na barra 5, calcula-se a matriz D' e, a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β .

5.3.3.2

Cálculo dos Índices de Estabilidade Apos Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras de Geração

Usa-se a barra 2 para mostrar o cálculo. Tomando (5.31), reformula-se o sistema linear retirando a ação de controle de carga da barra 2 e, então, (5.33) substitui (5.34) e (5.35):

$$\Delta y_1 = \Delta P_{G1} - \alpha_{16} \cdot \Delta P_{G6} \quad (5.33)$$

$$\Delta y_1 = \Delta P_{G1} - \alpha_{12} \cdot \Delta P_{G2} \quad (5.34)$$

$$\Delta y_2 = \Delta P_{G2} - \alpha_{26} \cdot \Delta P_{G6} \quad (5.35)$$

Consequentemente, a variável de estado ΔP_{G2} não estará presente no sistema linear. Retira-se também o controle de tensão da barra 2:

$$\Delta y'_2 = \Delta V_2 \quad (5.36)$$

Depois de reformular o sistema linear e mover a linha e coluna associada à barra 2, o sistema fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P'_1 \\ \Delta Q'_1 \\ \Delta P'_3 \\ \Delta Q'_3 \\ \Delta P'_4 \\ \Delta Q'_4 \\ \Delta P'_5 \\ \Delta Q'_5 \\ \Delta P'_6 \\ \Delta Q'_6 \\ \Delta y'_1 \\ \Delta y'_1 \\ \Delta y'_1 \\ \Delta y'_6 \\ \Delta \theta'_1 \\ \Delta P'_2 \\ \Delta Q'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ J_{31} & L_{31} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{32} & L_{32} \\ 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{55} & L_{55} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{65} & N_{65} & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\alpha_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ 0 & 0 & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta Q_{G1} \\ \Delta P_{G6} \\ \Delta Q_{G6} \\ \Delta f \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Definidas as sub-matrizes A , B , C e D pelas linhas pontilhadas, fixam-se os valores dos resíduos, exceto os da barra 2, e calcula-se a matriz D' e, a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β .

5.3.4

Cálculo dos Índices de Estabilidade em Duas Áreas de Controle Depois da Atuação da Regulação Secundária

O sistema linearizado após a regulação secundária em duas áreas de controle foi apresentado na Seção 4.5.4.2 em (4.133). Substituindo os valores dos elementos calculados em (4.138) até (4.158), o sistema fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta P_6 \\ \Delta Q_6 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_2' \\ \Delta y_3 \\ \Delta y_3' \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{55} & L_{55} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{65} & N_{65} & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\alpha_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{84} & D_{84} & C_{85} & D_{85} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -B_1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

Nas próximas duas seções mostra-se o cálculo dos índices de estabilidade para barras de carga e de geração.

5.3.4.1

Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras PQ

Usa-se a barra 5 da área 2 para mostrar o cálculo. Em (5.38) movem-se a linha e coluna associadas à barra 5. O sistema linearizado fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta P_6 \\ \Delta Q_6 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \\ \Delta \theta \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{45} & N_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{45} & L_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & H_{65} & N_{65} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & J_{65} & L_{65} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\alpha_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{84} & D_{84} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -B_1 & C_{85} & D_{85} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

As linhas pontilhadas definem as sub-matrizes A , B , C e D com as quais calcula-se a matriz D' e, a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β .

5.3.4.2**Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras de Geração**

O sistema apresentado na Figura 4.2 tem duas áreas de controle, as duas têm geradores com regulação secundária e, como exemplo, usa-se a barra 2 da área 1.

Retira-se a ação de controle de carga na barra 2:

$$\Delta y_1 = \Delta P_{G1} - \alpha_{12} \cdot \Delta P_{G2} \quad (5.40)$$

Consequentemente, a variável de estado ΔP_{G2} também não estará presente no sistema linear.

Como na área 1 a variação de injeção de carga e perdas é compartilhada entre os geradores das barras 1 e 2, ao calcular os índices da barra 2, só a barra 1 participará do controle de carga, então retiramos a ação de controle da barra 2.

Retira-se também o controle de tensão:

$$\Delta y'_2 = \Delta V_2 \quad (5.41)$$

A variável de estado ΔQ_{G2} também deve ser retirada.

Depois de reformular o sistema linear, movem-se a linha e a coluna associada à barra 2 e o sistema fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1' \\ \Delta Q_1' \\ \Delta P_3' \\ \Delta Q_3' \\ \Delta P_4' \\ \Delta Q_4' \\ \Delta P_5' \\ \Delta Q_5' \\ \Delta P_6' \\ \Delta Q_6' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_1' \\ \Delta y_3' \\ \Delta \theta' \\ \Delta P_2' \\ \Delta Q_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ J_{31} & L_{31} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{32} & L_{32} \\ 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{55} & L_{55} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{65} & N_{65} & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{84} & D_{84} & C_{85} & D_{85} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ 0 & 0 & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ \Delta f \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}$$

(5.42)

Definidas as sub-matrizes A , B , C e D pode-se obter a matriz D' e, a partir desta, os índices de estabilidade margem M e o ângulo β .

5.4

Conclusões

Neste capítulo mostrou-se como calcular os índices de estabilidade de tensão em um sistema elétrico com controle de carga/frequência para barras de carga e para barras de geração participantes do controle.

Os índices podem ser calculados antes de um impacto normal, após a atuação da regulação primária e após a atuação da regulação secundária. Pode-se considerar sistemas com uma ou mais áreas de controle.