

Problema de Fluxo de Potência Modificado

A modelagem de um sistema elétrico de potência em regime permanente é feita através das equações nodais de potência ativa e reativa. Como são não lineares, são resolvidas pelo método de Newton-Raphson [6]. Na versão mais básica do problema de fluxo de carga, não são incluídos os dispositivos de controle, assim como também não são incluídos os limites da operação.

Para o objetivo deste trabalho, foram incluídos modelos de controle, conforme a necessidade. As equações referentes aos modelos são resolvidas simultaneamente com as equações nodais de potência, método de solução conhecido como *full* Newton [5].

Uma vantagem do uso do método *full* Newton é que não ocorre modificação da matriz Jacobiana usada para resolver o problema do fluxo de potência básico. São inseridas linhas adicionais correspondentes às equações de controle linearizadas e colunas associadas às variáveis de estado, conforme (4.1).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \hline \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \hline \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \hline \Delta x \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Com as novas equações de controle, novos resíduos (Δy) e, conseqüentemente, novas variáveis de estado (Δx) estão presentes em (4.1). Para o critério de convergência, é necessário o teste do resíduo (Δy). Testa-se, a cada iteração, o valor menor de Δy (diferença entre o especificado e o calculado)

compara-se com a tolerância. Se a diferença for menor que a tolerância, o algoritmo convergiu, e um novo ponto de operação foi obtido.

Como já mencionado, foi necessário modificar o problema do fluxo de potência, e a respectiva modelagem, de acordo com os objetivos deste trabalho.

4.1

Fluxo de Potência com Múltiplas Barras *Swing* (Despacho Proporcional)

No problema básico de fluxo de potência, uma única barra de geração assume as perdas ôhmicas da rede e outros eventos, tais como aumento de carga ativa e perda de geração. É a chamada barra *swing*.

Para uma modelagem mais realista, utiliza-se um modelo de múltiplas barras *swings* e, então, as perdas e as variações de geração e/ou carga são assumidas pelos múltiplos geradores escolhidos [9].

Considera-se somente uma barra de referência angular. Os outros ângulos das tensões nodais modificam-se durante as iterações do algoritmo de fluxo de potência até que o sistema convirja. A geração de potência ativa dos geradores escolhidos como *swing* deve manter a mesma proporção daquela do caso-base considerando a rede elétrica sem perdas ativas.

Inicialmente, é feita a escolha dos geradores que assumirão as mudanças de geração e/ou carga e as perdas ativas da rede.

Uma vez escolhido estes geradores, o critério da proporcionalidade é estabelecido. Sendo ng geradores que assumirão os eventos e as perdas ativas, as gerações serão proporcionais segundo as relações:

$$P_{G1} = \alpha_{12} \cdot P_{G2}$$

$$\begin{aligned}
P_{G2} &= \alpha_{23} \cdot P_{G3} \\
. \\
. \\
. \\
P_{Gng-1} &= \alpha_{(ng-1)(ng)} \cdot P_{Gng}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

A relação entre as gerações é estabelecida pelo fator $\alpha_{(i-1)(i)}$, sendo (i) e $(i-1)$ dois dos geradores que assumirão as mudanças e as perdas ativas. Os termos $\alpha_{(i-1)(i)}$ são obtidos das expressões:

$$\begin{aligned}
\alpha_{12} &= \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{P_{G1o}}{P_{G2o}} \\
\alpha_{23} &= \frac{\alpha_2}{\alpha_3} = \frac{P_{G2o}}{P_{G3o}} \\
. \\
. \\
. \\
\alpha_{(ng-1)(ng)} &= \frac{\alpha_{(ng-1)}}{\alpha_{ng}} = \frac{P_{G(ng-1)o}}{P_{Gngo}}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Onde o símbolo “o” representa o valor inicial especificado para esse gerador sem considerar as perdas.

As novas equações de controle a serem inseridas no sistema linearizado das equações de fluxo de potência são:

$$\begin{aligned}
g_1 &= P_{G1}^{(h)} - \alpha_{12} \cdot P_{G2}^{(h)} \\
\Delta g_1 &= -\Delta P_{G1}^{(h)} + \alpha_{12} \cdot \Delta P_{G2}^{(h)} \\
g_2 &= P_{G2}^{(h)} - \alpha_{23} \cdot P_{G3}^{(h)} \\
\Delta g_2 &= -\Delta P_{G2}^{(h)} + \alpha_{23} \cdot \Delta P_{G3}^{(h)} \\
. \\
. \\
. \\
g_{(ng-1)} &= P_{G(ng-1)}^{(h)} - \alpha_{(ng-1)(ng)} \cdot P_{Gng}^{(h)} \\
\Delta g_{(ng-1)} &= -\Delta P_{G(ng-1)}^{(h)} + \alpha_{(ng-1)(ng)} \cdot \Delta P_{Gng}^{(h)}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

As novas $ng - 1$ equações criadas mantêm a proporcionalidade entre as gerações.

Os resíduos referentes ao controle de tensão pelos geradores *swing* são:

$$\begin{aligned}\Delta g'_1 &= V_1^{esp} - V_1 \\ \Delta g'_2 &= V_2^{esp} - V_2 \\ &\vdots \\ \Delta g'_{ng} &= V_{ng}^{esp} - V_{ng}\end{aligned}\tag{4.5}$$

O resíduo referente à referência angular, onde i é um gerador swing, é:

$$\Delta \theta'_i = \theta_i^{esp} - \theta_i\tag{4.6}$$

As derivadas das novas equações são inseridas na matriz sem alterar a matriz Jacobiana referente às equações da formulação básica do problema de fluxo de potência, mas expandindo-a, como se observa em (4.7).

$$\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 (4.7)$$

onde k varia de um até o número de barras do sistema.

São incluídas ng novas variáveis de estado que são as variações de geração ativa e reativa em cada barra de geração *swing*:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \Delta P_{G1} \\ \Delta x'_1 &= \Delta Q_{G1} \\ \Delta x_2 &= \Delta P_{G2} \\ \Delta x'_2 &= \Delta Q_{G2} \\ &\vdots \\ \Delta x_{ng} &= \Delta P_{Gng} \\ \Delta x'_{ng} &= \Delta Q_{Gng} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Em cada iteração, a nova variável de estado é atualizada:

$$\begin{aligned}
P_{G1}^{h+1} &= P_{G1}^h - \Delta P_{G1}^h \\
Q_{G1}^{h+1} &= Q_{G1}^h - \Delta Q_{G1}^h \\
P_{G2}^{h+1} &= P_{G2}^h - \Delta P_{G2}^h \\
Q_{G2}^{h+1} &= Q_{G2}^h - \Delta Q_{G2}^h \\
&\vdots \\
P_{Gn}^{h+1} &= P_{Gn}^h - \Delta P_{Gn}^h \\
Q_{Gn}^{h+1} &= Q_{Gn}^h - \Delta Q_{Gn}^h
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Os resíduos $(\Delta g_1, \Delta g_2, \dots, \Delta g_{n-1})$, diferença entre o desejado e o valor naquela iteração, são calculados resolvendo (4.7).

4.2

Problema de Fluxo de Potência com Regulação Primária

Após a ocorrência de um impacto normal no sistema, como um degrau positivo de carga, haverá uma variação da frequência e geração, dependente dos tipos de carga e dos tipos de controle existentes, atingindo um novo ponto de operação.

Tendo no sistema alguns geradores que possuem regulação primária para o controle de carga-frequência no sistema, estes tentarão a recuperação do balanço geração e carga, mas um novo ponto de equilíbrio será atingido com frequência diferente da nominal. A recuperação do balanço e as respectivas mudanças nas gerações ativas serão baseadas na energia de regulação de cada gerador.

A característica estática de regulação de ng geradores (os geradores que possuem regulação primária) é dada por:

$$\begin{aligned}
P_{G1} - P_{G1}^{esp} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) &= 0 \\
P_{G2} - P_{G2}^{esp} + \frac{1}{R_2} \cdot (f - f^{esp}) &= 0 \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&\vdots
\end{aligned} \tag{4.10}$$

$$P_{Gng} - P_{Gng}^{esp} + \frac{1}{R_{ng}} \cdot (f - f^{esp}) = 0$$

A energia de regulação $\frac{1}{R_i}$ do gerador i definirá a parcela que este vai assumir para suprir as variações de carga e perdas.

As tensões em cada gerador permanecem em seus valores especificados no caso base:

$$\begin{aligned} V_1 - V_1^{esp} &= 0 \\ V_2 - V_2^{esp} &= 0 \\ &\vdots \\ V_{ng} - V_{ng}^{esp} &= 0 \end{aligned} \tag{4.11}$$

A referência angular do sistema θ_i^{esp} também é mantida:

$$\theta_i - \theta_i^{esp} = 0 \tag{4.12}$$

As novas equações estão incluídas em (4.13).

$$\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}} \\ \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'} & \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}} \\ \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'} & \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}} \\ \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'} & \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 (4.13)$$

onde k varia de um até o número de barras do sistema.

Para o fluxo de potência com regulação primária, os novos resíduos são:

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= -P_{G1} + P_{G1}^{esp} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) \\ \Delta y_2 &= -P_{G2} + P_{G2}^{esp} + \frac{1}{R_2} \cdot (f - f^{esp}) \\ &\vdots \\ \Delta y_{ng} &= -P_{Gng} + P_{Gng}^{esp} + \frac{1}{R_{ng}} \cdot (f - f^{esp}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Os resíduos referentes ao controle de tensão pelos geradores com regulação primária são:

$$\Delta y_1' = V_1^{esp} - V_1$$

$$\begin{aligned}
\Delta y'_2 &= V_2^{esp} - V_2 \\
&\vdots \\
\Delta y'_{ng} &= V_{ng}^{esp} - V_{ng}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

O resíduo referente à referência angular, onde i é um gerador com regulação primária, é:

$$\Delta \theta'_i = \theta_i^{esp} - \theta_i \tag{4.16}$$

As variáveis de estado são:

$$\begin{aligned}
\Delta x_1 &= \Delta P_{G1} \\
\Delta x'_1 &= \Delta Q_{G1} \\
\Delta x_2 &= \Delta P_{G2} \\
\Delta x'_2 &= \Delta Q_{G2} \\
&\vdots \\
\Delta x_{ng} &= \Delta P_{Gng} \\
\Delta x'_{ng} &= \Delta Q_{Gng} \\
\Delta x_{2ng+1} &= \Delta f
\end{aligned} \tag{4.17}$$

A cada iteração h do algoritmo de fluxo de carga, além das correções de ângulo em todas as barras e de tensões em todas as barras, tem-se:

$$\begin{aligned}
P_{G1}^{h+1} &= P_{G1}^h - \Delta P_{G1}^h \\
Q_{G1}^{h+1} &= Q_{G1}^h - \Delta Q_{G1}^h \\
P_{G2}^{h+1} &= P_{G2}^h - \Delta P_{G2}^h \\
Q_{G2}^{h+1} &= Q_{G2}^h - \Delta Q_{G2}^h \\
&\vdots \\
P_{Gng}^{h+1} &= P_{Gng}^h - \Delta P_{Gng}^h \\
Q_{Gng}^{h+1} &= Q_{Gng}^h - \Delta Q_{Gng}^h \\
f^{h+1} &= f^h + \Delta f^h
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Nesta seção, por simplicidade, assumiu-se que todos os geradores têm regulação primária.

4.3

Problema de Fluxo de Potência com Regulação Primária e com Regulação Própria do Sistema

Na Seção 4.2 foi mostrada a modelagem do problema de fluxo de potência com regulação primária. Nessa modelagem as cargas não variavam com a frequência. Nessa seção, mostra-se a modelagem do fluxo de potência quando o sistema tem regulação própria, isto é, há variação de carga com a frequência.

Considera-se um sistema de n barras que contém nd barras com variação da carga com a frequência e ng barras de geração com regulação primária.

A característica estática de regulação dos ng geradores em um sistema com regulação primária é, como já visto:

$$\begin{aligned}
 P_{G1} - P_{G1}^{esp} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) &= 0 \\
 P_{G2} - P_{G2}^{esp} + \frac{1}{R_2} \cdot (f - f^{esp}) &= 0 \\
 &\vdots \\
 P_{Gng} - P_{Gng}^{esp} + \frac{1}{R_{ng}} \cdot (f - f^{esp}) &= 0
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

A característica estática das nd barras de carga com regulação própria é:

$$\begin{aligned}
 P_{D1}^{esp} - P_{D1} - D_1 \cdot (f^{esp} - f) &= 0 \\
 P_{D2}^{esp} - P_{D2} - D_2 \cdot (f^{esp} - f) &= 0 \\
 &\vdots \\
 P_{Dnd}^{esp} - P_{Dnd} - D_{nd} \cdot (f^{esp} - f) &= 0
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Considera-se fixa a tensão em cada gerador e o ângulo da tensão de referência do sistema em seus valores especificados, como em (4.11) e (4.12).

Associados a (4.20), o sistema linearizado (4.13) deve ser estendido para incluir novos resíduos $\Delta y_d''$ e novas variáveis de estado $\Delta x_d''$, como em (4.21).

$$\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' \\ \Delta y_1'' \\ \vdots \\ \Delta y_{nd}'' \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_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_1''} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{nd}''} \\ \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 x_1''} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{nd}''} \\ \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_{ng}} & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial y_1}{\partial x_1''} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{nd}''} \\ \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 x_1''} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{nd}''} \\ \dots & \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_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1''} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{nd}''} \\ \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 x_1''} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{nd}''} \\ \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 x_1''} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{nd}''} \\ \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 x_1''} & \dots & \frac{\partial y_1''}{\partial x_{nd}''} \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial x_{2ng+1}} & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial x_1''} & \dots & \frac{\partial y_{nd}''}{\partial x_{nd}''} \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}' \\ \Delta x_1'' \\ \vdots \\ \Delta x_{nd}'' \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

onde k varia de um até o número de barras do sistema.

Os resíduos associados às barras de cargas com variação de frequência são:

$$\begin{aligned} \Delta y_1'' &= P_{D1}^{esp} - P_{D1} - D_1 \cdot (f^{esp} - f) \\ \Delta y_2'' &= P_{D2}^{esp} - P_{D2} - D_2 \cdot (f^{esp} - f) \\ &\vdots \\ \Delta y_{nd}'' &= P_{Dnd}^{esp} - P_{Dnd} - D_{nd} \cdot (f^{esp} - f) \end{aligned} \quad (4.22)$$

As variáveis de estado referentes às barras de carga com variação de frequência são:

$$\begin{aligned}
 \Delta x_1'' &= \Delta P_{D1} \\
 \Delta x_2'' &= \Delta P_{D2} \\
 &\vdots \\
 \Delta x_{nd}'' &= \Delta P_{Dnd}
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

As correções em cada iteração h para as barras com variação de carga com a frequência são:

$$\begin{aligned}
 P_{D1}^{h+1} &= P_{D1}^h - \Delta P_{D1}^h \\
 P_{D2}^{h+1} &= P_{D2}^h - \Delta P_{D2}^h \\
 &\vdots \\
 P_{Dnd}^{h+1} &= P_{Dnd}^h - \Delta P_{Dnd}^h
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

4.4

Problema de Fluxo de Potência com Regulação Secundária

Uma variação de carga produz uma mudança na frequência do sistema. A regulação primária ainda não é suficiente para garantir um erro em frequência em torno de zero. A regulação secundária é necessária.

Assumindo um sistema com na áreas de controle, considera-se para a modelagem do problema de fluxo de potência que o número de barras de geração com regulação secundária em uma área de controle j é ngj , e que uma barra de geração g na área j tem um fator de participação α_{gj} .

A atuação da regulação secundária é dependente da injeção do ECA (erro da área de controle) no bloco integrador do circuito de controle. Em uma área de controle j o ECA_j é definido como:

$$ECA_j = (B_j \cdot \Delta f - \Delta T_j) \quad (4.25)$$

O termo do intercâmbio na área j é:

$$T_j = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq j}}^{na} P_{jr} \quad (4.26)$$

onde P_{jr} é o intercâmbio de potência ativa entre as áreas j e r .

As novas equações de controle em uma área j com ngj geradores são:

$$\begin{aligned} (P_{G1j}^{esp} - P_{G1j}) - \alpha_{12j} (P_{G2j}^{esp} - P_{G2j}) &= 0 \\ (P_{G2j}^{esp} - P_{G2j}) - \alpha_{23j} (P_{G3j}^{esp} - P_{G3j}) &= 0 \\ \vdots & \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\left(P_{G(ngj-1)}^{esp} - P_{G(ngj-1)}\right) - \alpha_{(ngj-1)(ngj)_j} \left(P_{G(ngj)_j}^{esp} - P_{G(ngj)_j}\right) = 0$$

Em (4.27) definiu-se a proporcionalidade entre os geradores em regime permanente. O termo $\alpha_{(k-1)(k)_j}$ para uma barra de geração k na área j é a proporção dos fatores de participação de um gerador com o seguinte (os dois geradores com regulação secundária). Estes fatores são definidos na prática seguindo a estratégia de CAG adotada:

$$\begin{aligned} \alpha_{12_j} &= \frac{\alpha_{1_j}}{\alpha_{2_j}} \\ \alpha_{23_j} &= \frac{\alpha_{2_j}}{\alpha_{3_j}} \\ &\vdots \\ \alpha_{(ngj-1)(ngj)_j} &= \frac{\alpha_{(ngj-1)_j}}{\alpha_{(ngj)_j}} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Em cada área de controle existe um conjunto de equações similares a (4.27) modelando a resposta da regulação secundária.

Além dessas equações, as tensões em cada gerador nessa área tem que permanecer em seus valores especificados no caso-base:

$$\begin{aligned} V_1 - V_1^{esp} &= 0 \\ V_2 - V_2^{esp} &= 0 \\ &\vdots \\ V_{ngj} - V_{ngj}^{esp} &= 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

Os intercâmbios de potência entre áreas, assim como a frequência, têm que voltar aos seus valores especificados no caso-base. Assim, os ECAs têm que ser nulos após convergência. De (4.30):

$$B_j \cdot \Delta f - \Delta T_j = 0 \quad (4.30)$$

Para um sistema com duas ou mais áreas operando com controle de frequência e intercâmbios sabe-se que os ECAs são nulos se, e somente se, a frequência e os intercâmbios voltaram ao seus valores do caso-base.

As equações de controle são incluídas em (4.31).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta y_{1j} \\ \Delta y_{1j} \\ \Delta y_{2j} \\ \Delta y_{2j} \\ \Delta y_j \\ \Delta y_{ngj} \\ \Delta y_j \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \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_{1j}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y_{1j}}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial x_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial x_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial x_{2j}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial x_{2j}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial x_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial x_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y_{2j}}{\partial x_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_j}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_j}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y_j}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y_j}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_j}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_j}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y_j}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y_j}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y_j}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y_{ngj}}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial x_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial x_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial x_{2j}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial x_{2j}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial x_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial x_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial x_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial y''}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y''}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y''}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y''}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial y''}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial y''}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial y''}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial y''}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial y''}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial V_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial x_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial x_{1j}}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial x_{2j}}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial x_{2j}}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial x_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial x_{ngj}}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial \theta}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial \theta}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \\ \dots & \frac{\partial \theta}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{1j}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{2j}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{2j}} & \dots & \frac{\partial \theta}{\partial x_{ngj}} & \frac{\partial \theta}{\partial x_{ngj}} & \dots & \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \Delta x_{1j} \\ \Delta x_{1j} \\ \Delta x_{2j} \\ \Delta x_{2j} \\ \vdots \\ \Delta x_{ngj} \\ \Delta x_{ngj} \\ \vdots \\ \Delta x_1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Então (4.31) inclui resíduos de potência ativa e reativa, como também os resíduos das equações de controle para regulação secundária. Os resíduos destas equações para uma área j são:

$$\begin{aligned} \Delta y_{1j} &= \alpha_{12j} \cdot (P_{G2j}^{esp} - P_{G2j}) - (P_{G1j}^{esp} - P_{G1j}) \\ \Delta y_{2j} &= \alpha_{23j} \cdot (P_{G3j}^{esp} - P_{G3j}) - (P_{G2j}^{esp} - P_{G2j}) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\Delta y_{ngjj} = \alpha_{(ng-1)(ng)_j} \cdot (P_{Gngj}^{esp} - P_{Gngj}) - (P_{G(ng-1)_j}^{esp} - P_{G(ng-1)_j})$$

Os resíduos referentes ao controle de tensão pelos geradores com regulação secundária são:

$$\begin{aligned} \Delta y'_1 &= V_1^{esp} - V_1 \\ \Delta y'_2 &= V_2^{esp} - V_2 \\ &\vdots \\ \Delta y'_{ngj} &= V_{ngj}^{esp} - V_{ngj} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Os resíduos referente ao ECA na área de controle j é:

$$\Delta y''_j = B_j \cdot (f^{esp} - f) - (T_j^{esp} - T_j) \quad (4.34)$$

O resíduo referente à frequência no sistema é:

$$\Delta y' = (f^{esp} - f) \quad (4.35)$$

Para as outras áreas, diferentes da área j , os resíduos são calculados de forma análoga. Para a última área de controle na não será definido o resíduo referente ao ECA posto que, ao definir os ECAs nas outras áreas de controle, haverá a recuperação da frequência, assim como os intercâmbios.

As novas variáveis de estado são:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \Delta P_{G1} \\ \Delta x_2 &= \Delta P_{G2} \\ &\vdots \\ \Delta x_{ng} &= \Delta P_{Gng} \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\Delta x'_1 = \Delta Q_{G1}$$

$$\Delta x'_2 = \Delta Q_{G2}$$

$$\vdots \quad (4.37)$$

$$\Delta x'_{ngj} = \Delta Q_{Gng}$$

$$\Delta x''_1 = \Delta f \quad (4.38)$$

A cada iteração h do algoritmo de fluxo de carga para regulação secundária, além das correções de ângulo e da tensão em todas as barras, tem-se:

$$\begin{aligned} P_{G1}^{h+1} &= P_{G1}^h - \Delta P_{G1}^h \\ P_{G2}^{h+1} &= P_{G2}^h - \Delta P_{G2}^h \\ &\vdots \\ P_{Gng}^{h+1} &= P_{Gng}^h - \Delta P_{Gng}^h \end{aligned} \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} Q_{G1}^{h+1} &= Q_{G1}^h - \Delta Q_{G1}^h \\ Q_{G2}^{h+1} &= Q_{G2}^h - \Delta Q_{G2}^h \\ &\vdots \\ Q_{Gng}^{h+1} &= Q_{Gng}^h - \Delta Q_{Gng}^h \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$f^{h+1} = f^h - \Delta f^h \quad (4.41)$$

4.5

Exemplo Ilustrativo

Na Figura 4.1 mostra-se o sistema que será usado nesta seção. Para todos os casos a barra 1 será escolhida como referência angular do sistema.

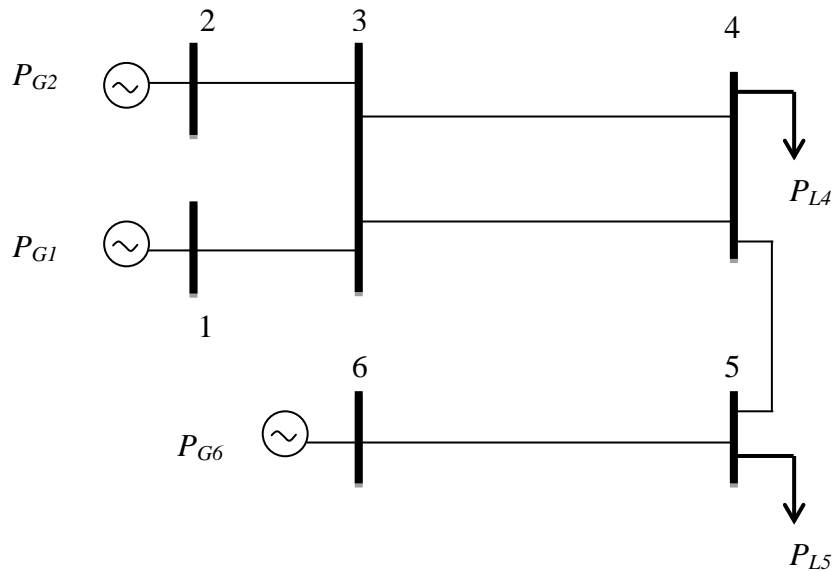


Figura 4.1- Diagrama Unifilar do Sistema-Exemplo de 6 Barras

4.5.1

Formulação do Fluxo de Potência com Múltiplas Barras *Swing*

Assume-se que os três geradores são tratados como geradores *swing*. Com esta consideração, o sistema linear resultante de (4.7) é:

(4.42)

$\frac{\partial P}{\partial \theta}, \frac{\partial P}{\partial V}, \frac{\partial Q}{\partial \theta}, \frac{\partial Q}{\partial V}$. Observam-se também os termos da forma $\frac{\partial P}{\partial P_G}, \frac{\partial Q}{\partial P_G}, \frac{\partial g}{\partial \theta}, \frac{\partial g}{\partial V}$ e $\frac{\partial g}{\partial P_G}$.

$$\frac{\partial P}{\partial P_G} = \frac{\partial (P_G - P_L)}{\partial P_G} = 1 \quad (4.43)$$

E, caso contrário:

$$\frac{\partial P}{\partial P_G} = \frac{\partial(P_G - P_L)}{\partial P_G} = 0 \quad (4.44)$$

Os elementos da forma $\frac{\partial Q}{\partial P_G}$ são nulos:

$$\frac{\partial Q}{\partial P_G} = \frac{\partial(Q_G - Q_L)}{\partial P_G} = 0 \quad (4.45)$$

Os elementos da forma $\frac{\partial Q}{\partial Q_G}$ são:

$$\frac{\partial Q}{\partial Q_G} = \frac{\partial(Q_G - Q_L)}{\partial Q_G} = 1 \quad (4.46)$$

Os elementos das formas $\frac{\partial g}{\partial \theta}$ e $\frac{\partial g}{\partial V}$ são nulos.

$$\frac{\partial g}{\partial \theta} = \frac{\partial(P_{G_i} - \alpha_{i(i+1)} \cdot P_{G_i})}{\partial \theta} = 0 \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial g}{\partial V} = \frac{\partial(P_{G_i} - \alpha_{i(i+1)} \cdot P_{G_i})}{\partial V} = 0 \quad (4.48)$$

Os elementos $\frac{\partial g}{\partial P_G}$ são:

$$\frac{\partial g_1}{\partial P_{G_1}} = \frac{\partial(P_{G_1} - \alpha_{12} \cdot P_{G_2})}{\partial P_{G_1}} = 1 \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial P_{G_2}} = \frac{\partial(P_{G_1} - \alpha_{12} \cdot P_{G_2})}{\partial P_{G_2}} = -\alpha_{12} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial P_{G_6}} = \frac{\partial(P_{G_1} - \alpha_{12} \cdot P_{G_2})}{\partial P_{G_6}} = 0 \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial P_{G_1}} = \frac{\partial(P_{G_2} - \alpha_{26} \cdot P_{G_6})}{\partial P_{G_1}} = 0 \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial P_{G_2}} = \frac{\partial(P_{G_2} - \alpha_{26} \cdot P_{G_6})}{\partial P_{G_2}} = 1 \quad (4.53)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial P_{G_6}} = \frac{\partial(P_{G_2} - \alpha_{26} \cdot P_{G_6})}{\partial P_{G_6}} = -\alpha_{26} \quad (4.54)$$

Os elementos $\frac{\partial g'}{\partial V}$ são:

$$\alpha_{26} = \frac{\alpha_2}{\alpha_6} = \frac{P_{G2o}}{P_{G6o}} \quad (4.60)$$

O vetor de resíduos é:

$$\begin{aligned} \Delta P'_1 &= P_1^{esp} - P_1^{cal} = (P_{G_1} - P_{L_1}) - P_1^{cal} \\ \Delta P'_2 &= P_2^{esp} - P_2^{cal} = (P_{G_2} - P_{L_2}) - P_2^{cal} \\ \Delta P'_3 &= P_3^{esp} - P_3^{cal} = (P_{G_3} - P_{L_3}) - P_3^{cal} \\ \Delta P'_4 &= P_4^{esp} - P_4^{cal} = (P_{G_4} - P_{L_4}) - P_4^{cal} \\ \Delta P'_5 &= P_5^{esp} - P_5^{cal} = (P_{G_5} - P_{L_5}) - P_5^{cal} \\ \Delta P'_6 &= P_6^{esp} - P_6^{cal} = (P_{G_6} - P_{L_6}) - P_6^{cal} \end{aligned} \quad (4.61)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 &= Q_1^{esp} - Q_1^{cal} = (Q_{G_1} - Q_{L_1}) - Q_1^{cal} \\ \Delta Q_2 &= Q_2^{esp} - Q_2^{cal} = (Q_{G_2} - Q_{L_2}) - Q_2^{cal} \\ \Delta Q_3 &= Q_3^{esp} - Q_3^{cal} = (Q_{G_3} - Q_{L_3}) - Q_3^{cal} \\ \Delta Q_4 &= Q_4^{esp} - Q_4^{cal} = (Q_{G_4} - Q_{L_4}) - Q_4^{cal} \\ \Delta Q_5 &= Q_5^{esp} - Q_5^{cal} = (Q_{G_5} - Q_{L_5}) - Q_5^{cal} \\ \Delta Q_6 &= Q_6^{esp} - Q_6^{cal} = (Q_{G_6} - Q_{L_6}) - Q_6^{cal} \end{aligned} \quad (4.62)$$

$$\begin{aligned} \Delta g_1 &= -(P_{G1}^{esp} - P_{G1}^{cal}) + \alpha_{12} \cdot (P_{G2}^{esp} - P_{G2}^{cal}) \\ \Delta g_2 &= -(P_{G2}^{esp} - P_{G2}^{cal}) + \alpha_{26} \cdot (P_{G6}^{esp} - P_{G6}^{cal}) \end{aligned} \quad (4.63)$$

$$\begin{aligned} \Delta g'_1 &= V_1^{esp} - V_1^{cal} \\ \Delta g'_2 &= V_2^{esp} - V_2^{cal} \\ \Delta g'_3 &= V_3^{esp} - V_3^{cal} \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$\Delta \theta'_1 = \theta_1^{esp} - \theta_1^{cal} \quad (4.65)$$

Fazendo a inversa de (4.58) e multiplicando-a pelo vetor de resíduos, obtém-se as correções das variáveis de estado. Pode-se, então, atualizar as variáveis de estado em cada iteração h :

$$\begin{aligned}
\theta_1^{h+1} &= \theta_1^h + \Delta\theta_1^h \\
\theta_2^{h+1} &= \theta_2^h + \Delta\theta_2^h \\
\theta_3^{h+1} &= \theta_3^h + \Delta\theta_3^h \\
\theta_4^{h+1} &= \theta_4^h + \Delta\theta_4^h \\
\theta_5^{h+1} &= \theta_5^h + \Delta\theta_5^h \\
\theta_6^{h+1} &= \theta_6^h + \Delta\theta_6^h
\end{aligned} \tag{4.66}$$

$$\begin{aligned}
V_1^{h+1} &= V_1^h + \Delta V_1^h \\
V_2^{h+1} &= V_2^h + \Delta V_2^h \\
V_3^{h+1} &= V_3^h + \Delta V_3^h \\
V_4^{h+1} &= V_4^h + \Delta V_4^h \\
V_5^{h+1} &= V_5^h + \Delta V_5^h \\
V_6^{h+1} &= V_6^h + \Delta V_6^h
\end{aligned} \tag{4.67}$$

$$\begin{aligned}
P_{G1}^{h+1} &= P_{G1}^h + \Delta P_{G1}^h \\
Q_{G1}^{h+1} &= Q_{G1}^h + \Delta Q_{G1}^h \\
P_{G2}^{h+1} &= P_{G2}^h + \Delta P_{G2}^h \\
Q_{G2}^{h+1} &= Q_{G2}^h + \Delta Q_{G2}^h \\
P_{G6}^{h+1} &= P_{G6}^h + \Delta P_{G6}^h \\
Q_{G6}^{h+1} &= Q_{G6}^h + \Delta Q_{G6}^h
\end{aligned} \tag{4.68}$$

O algoritmo continuará fazendo as correções até satisfazer o critério de convergência:

$$[\Delta P, \Delta Q, \Delta g] < tol \tag{4.69}$$

Quando (4.69) é satisfeita, o novo ponto de operação é obtido.

4.5.2

Formulação do Fluxo de Potência com Regulação Primária

O sistema da Figura 4.1 tem três barras de geração com regulação primária e o sistema linearizado resultante de (4.13) é:

$$\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 & 0 & H_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{28} & 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 & H_{69} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{69} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{77} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{710} \\ 0 & L_{71} & 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 & H_{88} & 0 & 0 & 0 & N_{810} \\ 0 & 0 & 0 & L_{82} & 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 & H_{99} & 0 & N_{910} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{96} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{110} & 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 (4.70)$$

Os elementos da matriz Jacobiana clássica estão na parte superior direita da matriz de (4.70). Nas outras partes, outros elementos são gerados pelas derivadas das equações de controle:

$$H_{77} = \frac{\partial \left(P_{G1} - P_{G1}^{esp} + \frac{1}{R_1} (f - f^{esp}) \right)}{\partial P_{G1}} = 1 \quad (4.71)$$

$$H_{88} = \frac{\partial \left(P_{G2} - P_{G2}^{esp} + \frac{1}{R_2} (f - f^{esp}) \right)}{\partial P_{G2}} = 1 \quad (4.72)$$

$$H_{99} = \frac{\partial \left(P_{G6} - P_{G6}^{esp} + \frac{1}{R_6} (f - f^{esp}) \right)}{\partial P_{G6}} = 1 \quad (4.73)$$

$$H_{17} = \frac{\partial (P_1^{esp} - (P_{G1} - P_{L1}))}{\partial P_{G1}} = -1 \quad (4.74)$$

$$H_{28} = \frac{\partial (P_2^{esp} - (P_{G2} - P_{L2}))}{\partial P_{G2}} = -1 \quad (4.75)$$

$$H_{69} = \frac{\partial (P_6^{esp} - (P_{G6} - P_{L6}))}{\partial P_{G6}} = -1 \quad (4.76)$$

$$L_{71} = \frac{\partial(V_1 - V_1^{esp})}{\partial V_1} = 1 \quad (4.77)$$

$$L_{82} = \frac{\partial(V_2 - V_2^{esp})}{\partial V_2} = 1 \quad (4.78)$$

$$L_{96} = \frac{\partial(V_6 - V_6^{esp})}{\partial V_6} = 1 \quad (4.79)$$

$$L_{17} = \frac{\partial(Q_1^{esp} - (Q_{G1} - Q_{L1}))}{\partial Q_{G1}} = -1 \quad (4.80)$$

$$L_{28} = \frac{\partial(Q_2^{esp} - (Q_{G2} - Q_{L2}))}{\partial Q_{G2}} = -1 \quad (4.81)$$

$$L_{69} = \frac{\partial(Q_6^{esp} - (Q_{G6} - Q_{L6}))}{\partial Q_{G6}} = -1 \quad (4.82)$$

$$N_{710} = \frac{\partial\left(P_{G1} - P_{G1}^{esp} + \frac{1}{R_1}(f - f^{esp})\right)}{\partial f} = \frac{1}{R_1} \quad (4.83)$$

$$N_{810} = \frac{\partial\left(P_{G2} - P_{G2}^{esp} + \frac{1}{R_2}(f - f^{esp})\right)}{\partial f} = \frac{1}{R_2} \quad (4.84)$$

$$N_{910} = \frac{\partial\left(P_{G6} - P_{G6}^{esp} + \frac{1}{R_6}(f - f^{esp})\right)}{\partial f} = \frac{1}{R_6} \quad (4.85)$$

$$J_{110} = \frac{\partial(\theta_1 - \theta_1^{esp})}{\partial \theta_1} = 1 \quad (4.86)$$

O vetor de resíduos é:

$$\begin{aligned} \Delta P'_1 &= P_1^{esp} - P_1^{cal} = (P_{G1} - P_{L1}) - P_1^{cal} \\ \Delta P'_2 &= P_2^{esp} - P_2^{cal} = (P_{G2} - P_{L2}) - P_2^{cal} \\ \Delta P'_3 &= P_3^{esp} - P_3^{cal} = (P_{G3} - P_{L3}) - P_3^{cal} \\ \Delta P'_4 &= P_4^{esp} - P_4^{cal} = (P_{G4} - P_{L4}) - P_4^{cal} \\ \Delta P'_5 &= P_5^{esp} - P_5^{cal} = (P_{G5} - P_{L5}) - P_5^{cal} \\ \Delta P'_6 &= P_6^{esp} - P_6^{cal} = (P_{G6} - P_{L6}) - P_6^{cal} \end{aligned} \quad (4.87)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q'_1 &= Q_1^{esp} - Q_1^{cal} = (Q_{G1} - Q_{L1}) - Q_1^{cal} \\ \Delta Q'_2 &= Q_2^{esp} - Q_2^{cal} = (Q_{G2} - Q_{L2}) - Q_2^{cal} \\ \Delta Q'_3 &= Q_3^{esp} - Q_3^{cal} = (Q_{G3} - Q_{L3}) - Q_3^{cal} \\ \Delta Q'_4 &= Q_4^{esp} - Q_4^{cal} = (Q_{G4} - Q_{L4}) - Q_4^{cal} \\ \Delta Q'_5 &= Q_5^{esp} - Q_5^{cal} = (Q_{G5} - Q_{L5}) - Q_5^{cal} \end{aligned} \quad (4.88)$$

$$\Delta Q'_6 = Q_6^{esp} - Q_6^{cal} = (Q_{G_6} - Q_{L_6}) - Q_6^{cal}$$

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= P_{G_1}^{esp} - P_{G_1}^{cal} - \frac{1}{R_1} \cdot (f^{cal} - f^{esp}) \\ \Delta y_2 &= P_{G_2}^{esp} - P_{G_2}^{cal} - \frac{1}{R_2} \cdot (f^{cal} - f^{esp}) \\ \Delta y_6 &= P_{G_6}^{esp} - P_{G_6}^{cal} - \frac{1}{R_6} \cdot (f^{cal} - f^{esp})\end{aligned}\tag{4.89}$$

$$\begin{aligned}\Delta y'_1 &= V_1^{esp} - V_1^{cal} \\ \Delta y'_2 &= V_2^{esp} - V_2^{cal} \\ \Delta y'_3 &= V_3^{esp} - V_3^{cal}\end{aligned}\tag{4.90}$$

$$\Delta \theta'_1 = \theta_1^{esp} - \theta_1^{cal}\tag{4.91}$$

Fazendo a inversa da matriz em (4.70) e multiplicando-a pelo vetor de resíduos, obtém-se as correções das variáveis de estado e que, então, são atualizadas em cada iteração h .

$$\begin{aligned}\theta_1^{h+1} &= \theta_1^h + \Delta \theta_1^h \\ \theta_2^{h+1} &= \theta_2^h + \Delta \theta_2^h \\ \theta_3^{h+1} &= \theta_3^h + \Delta \theta_3^h \\ \theta_4^{h+1} &= \theta_4^h + \Delta \theta_4^h \\ \theta_5^{h+1} &= \theta_5^h + \Delta \theta_5^h \\ \theta_6^{h+1} &= \theta_6^h + \Delta \theta_6^h\end{aligned}\tag{4.92}$$

$$\begin{aligned}V_1^{h+1} &= V_1^h + \Delta V_1^h \\ V_2^{h+1} &= V_2^h + \Delta V_2^h \\ V_3^{h+1} &= V_3^h + \Delta V_3^h \\ V_4^{h+1} &= V_4^h + \Delta V_4^h \\ V_5^{h+1} &= V_5^h + \Delta V_5^h \\ V_6^{h+1} &= V_6^h + \Delta V_6^h\end{aligned}\tag{4.93}$$

$$\begin{aligned}P_{G1}^{h+1} &= P_{G1}^h + \Delta P_{G1}^h \\ Q_{G1}^{h+1} &= Q_{G1}^h + \Delta Q_{G1}^h \\ P_{G2}^{h+1} &= P_{G2}^h + \Delta P_{G2}^h\end{aligned}$$

$$Q_{G2}^{h+1} = Q_{G2}^h + \Delta Q_{G2}^h \quad (4.94)$$

$$P_{G6}^{h+1} = P_{G6}^h + \Delta P_{G6}^h$$

$$Q_{G6}^{h+1} = Q_{G6}^h + \Delta Q_{G6}^h$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \quad (4.95)$$

O algoritmo continuará fazendo as correções até satisfazer o critério de convergência:

$$[\Delta P, \Delta Q, \Delta y, \Delta y'] < tol \quad (4.96)$$

Quando (4.96) é satisfeita, o novo ponto de operação após a regulação primária é obtido.

4.5.3

Formulação do Fluxo de Potência com Regulação Primária e com Regulação Própria

Além da atuação da regulação primária, as cargas nas barras 4 e 5 variarão com a frequência. A característica estática para estas cargas é:

$$P_{D4}^{esp} - P_{D4} - D_4 \cdot (f^{esp} - f) = 0 \quad (4.97)$$

$$P_{D5}^{esp} - P_{D5} - D_5 \cdot (f^{esp} - f) = 0 \quad (4.98)$$

Assim, como em (4.21), (4.97) e (4.98) são incluídas na formação (4.99), como uma extensão de (4.70).

$$\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' \\ \Delta y_4' \\ \Delta y_5' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{28} & 0 & 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 & 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 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{411} & 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 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{512} \\ 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 & 0 & 0 & H_{65} & N_{65} & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{69} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{69} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{77} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{710} & 0 \\ 0 & L_{71} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{88} & 0 & 0 & 0 & N_{810} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{82} & 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 & 0 & H_{99} & 0 & N_{910} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{96} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{110} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{1110} & H_{1111} & 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 \\ \Delta P_{D_4} \\ \Delta P_{D_5} \end{bmatrix}$$

(4.99)

Além dos elementos em (4.70) tem-se novos elementos:

$$H_{411} = \frac{\partial(P_4^{esp} - (P_{G4} - P_{L4}))}{\partial P_{L4}} = 1 \quad (4.100)$$

$$H_{512} = \frac{\partial(P_5^{esp} - (P_{G5} - P_{L5}))}{\partial P_{L5}} = 1 \quad (4.101)$$

$$H_{1111} = \frac{\partial(P_{D4}^{esp} - P_{D4} - D_4 \cdot (f^{esp} - f))}{\partial P_{D4}} = -1 \quad (4.102)$$

$$H_{1212} = \frac{\partial(P_{D5}^{esp} - P_{D5} - D_5 \cdot (f^{esp} - f))}{\partial P_{D5}} = -1 \quad (4.103)$$

$$N_{1110} = \frac{\partial(P_{D4}^{esp} - P_{D4} - D_4 \cdot (f^{esp} - f))}{\partial f} = -D_4 \quad (4.104)$$

$$N_{1210} = \frac{\partial(P_{D5}^{esp} - P_{D5} - D_5 \cdot (f^{esp} - f))}{\partial f} = -D_5 \quad (4.105)$$

Os resíduos associados às barras de carga com variação com a frequência são:

$$\begin{aligned} \Delta y_4'' &= P_{D4}^{esp} - P_{D4}^{cal} - D_4 \cdot (f^{esp} - f) \\ \Delta y_5'' &= P_{D5}^{esp} - P_{D5}^{cal} - D_5 \cdot (f^{esp} - f) \end{aligned} \quad (4.106)$$

Resolvendo o sistema linear (4.99), obtém-se as correções das novas variáveis de estado:

$$\begin{aligned} P_{D4}^{h+1} &= P_{D4}^h + \Delta P_{D4}^h \\ P_{D5}^{h+1} &= P_{D5}^h + \Delta P_{D5}^h \end{aligned} \quad (4.107)$$

4.5.4

Formulação do Fluxo de Potência com Regulação Secundária

4.5.4.1

Uma Única Área de Controle

Nesta formulação o sistema da Figura 4.1 corresponde a uma única área de controle.

Supõe-se que todos os geradores deste sistema têm regulação secundária.

Como não há intercâmbio entre áreas o ECA é:

$$ECA = \Delta f \quad (4.108)$$

Para o caso de uma única área de controle e para o exemplo em estudo, (4.31) fica como (4.109):

$$\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_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 & H_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{28} & 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 & H_{69} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{69} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{77} & 0 & H_{78} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{71} & 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 & H_{88} & 0 & H_{89} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{82} & 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 & N_{910} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{96} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{110} & 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 (4.109)$$

Na parte superior esquerda da matriz se encontram os elementos da matriz Jacobiana clássica. Os outros elementos são as derivadas das equações de controle:

$$H_{77} = \frac{\partial((P_{G1}-P_{G1}^{esp})-\alpha_{12}(P_{G2}-P_{G2}^{esp}))}{\partial P_{G1}} = 1 \quad (4.110)$$

$$H_{78} = \frac{\partial((P_{G1}-P_{G1}^{esp})-\alpha_{12}(P_{G2}-P_{G2}^{esp}))}{\partial P_{G2}} = -\alpha_{12} \quad (4.111)$$

$$H_{88} = \frac{\partial((P_{G2}-P_{G2}^{esp})-\alpha_{26}(P_{G6}-P_{G6}^{esp}))}{\partial P_{G2}} = 1 \quad (4.112)$$

$$N_{810} = \frac{\partial((P_{G2}-P_{G2}^{esp})-\alpha_{26}(P_{G6}-P_{G6}^{esp}))}{\partial P_{G6}} = -\alpha_{26} \quad (4.113)$$

$$H_{17} = \frac{\partial(P_1^{esp}-(P_{G1}-P_{L1}))}{\partial P_{G1}} = -1 \quad (4.114)$$

$$H_{28} = \frac{\partial(P_2^{esp}-(P_{G2}-P_{L2}))}{\partial P_{G2}} = -1 \quad (4.115)$$

$$H_{69} = \frac{\partial(P_6^{esp}-(P_{G6}-P_{L6}))}{\partial P_{G6}} = -1 \quad (4.116)$$

$$L_{71} = \frac{\partial(V_1-V_1^{esp})}{\partial V_1} = 1 \quad (4.117)$$

$$L_{82} = \frac{\partial(V_2-V_2^{esp})}{\partial V_2} = 1 \quad (4.118)$$

$$L_{96} = \frac{\partial(V_6 - V_6^{esp})}{\partial V_6} = 1 \quad (4.119)$$

$$L_{17} = \frac{\partial(Q_1^{esp} - (Q_{G1} - Q_{L1}))}{\partial Q_{G1}} = -1 \quad (4.120)$$

$$L_{28} = \frac{\partial(Q_2^{esp} - (Q_{G2} - Q_{L2}))}{\partial Q_{G2}} = -1 \quad (4.121)$$

$$L_{69} = \frac{\partial(Q_6^{esp} - (Q_{G6} - Q_{L6}))}{\partial Q_{G6}} = -1 \quad (4.122)$$

$$N_{610} = \frac{\partial(f - f^{esp})}{\partial f} = 1 \quad (4.123)$$

$$J_{110} = \frac{\partial(\theta_1 - \theta_1^{esp})}{\partial \theta_1} = 1 \quad (4.124)$$

O vetor de resíduos é:

$$\begin{aligned} \Delta P'_1 &= P_1^{esp} - P_1^{cal} = (P_{G1} - P_{L1}) - P_1^{cal} \\ \Delta P'_2 &= P_2^{esp} - P_2^{cal} = (P_{G2} - P_{L2}) - P_2^{cal} \\ \Delta P'_3 &= P_3^{esp} - P_3^{cal} = (P_{G3} - P_{L3}) - P_3^{cal} \\ \Delta P'_4 &= P_4^{esp} - P_4^{cal} = (P_{G4} - P_{L4}) - P_4^{cal} \\ \Delta P'_5 &= P_5^{esp} - P_5^{cal} = (P_{G5} - P_{L5}) - P_5^{cal} \\ \Delta P'_6 &= P_6^{esp} - P_6^{cal} = (P_{G6} - P_{L6}) - P_6^{cal} \end{aligned} \quad (4.125)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q'_1 &= Q_1^{esp} - Q_1^{cal} = (Q_{G1} - Q_{L1}) - Q_1^{cal} \\ \Delta Q'_2 &= Q_2^{esp} - Q_2^{cal} = (Q_{G2} - Q_{L2}) - Q_2^{cal} \\ \Delta Q'_3 &= Q_3^{esp} - Q_3^{cal} = (Q_{G3} - Q_{L3}) - Q_3^{cal} \\ \Delta Q'_4 &= Q_4^{esp} - Q_4^{cal} = (Q_{G4} - Q_{L4}) - Q_4^{cal} \\ \Delta Q'_5 &= Q_5^{esp} - Q_5^{cal} = (Q_{G5} - Q_{L5}) - Q_5^{cal} \\ \Delta Q'_6 &= Q_6^{esp} - Q_6^{cal} = (Q_{G6} - Q_{L6}) - Q_6^{cal} \end{aligned} \quad (4.126)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= \alpha_{12} \cdot (P_{G2} - P_{G2}^{esp}) - (P_{G1} - P_{G1}^{esp}) \\ \Delta y_2 &= \alpha_{26} \cdot (P_{G6} - P_{G6}^{esp}) - (P_{G2} - P_{G2}^{esp}) \end{aligned} \quad (4.127)$$

$$\begin{aligned}
\Delta y'_1 &= V_1^{esp} - V_1 \\
\Delta y'_2 &= V_2^{esp} - V_2 \\
\Delta y'_6 &= V_6^{esp} - V_6
\end{aligned} \tag{4.128}$$

$$\Delta y''_1 = f^{esp} - f \tag{4.129}$$

$$\Delta \theta'_1 = \theta_1^{esp} - \theta_1 \tag{4.130}$$

Resolvendo (4.109), obtêm-se os novos resíduos das variáveis de estado e, conseqüentemente, em cada iteração h os novos valores de frequência, potências ativas e potência reativa são calculados, até atingir a convergência e um novo ponto de operação.

$$\begin{aligned}
P_{G1}^{h+1} &= P_{G1}^h + \Delta P_{G1}^h \\
Q_{G1}^{h+1} &= Q_{G1}^h + \Delta Q_{G1}^h \\
P_{G2}^{h+1} &= P_{G2}^h + \Delta P_{G2}^h \\
Q_{G2}^{h+1} &= Q_{G2}^h + \Delta Q_{G2}^h \\
P_{G6}^{h+1} &= P_{G6}^h + \Delta P_{G6}^h \\
Q_{G6}^{h+1} &= Q_{G6}^h + \Delta Q_{G6}^h
\end{aligned} \tag{4.131}$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \tag{4.132}$$

4.5.4.2

Duas Áreas de Controle

O sistema da Figura 4.1 é dividido, como mostrado na Figura 4.2. Agora o sistema é composto por duas áreas de controle, duas barras de geração na área 1 e uma barra de geração na área 2.

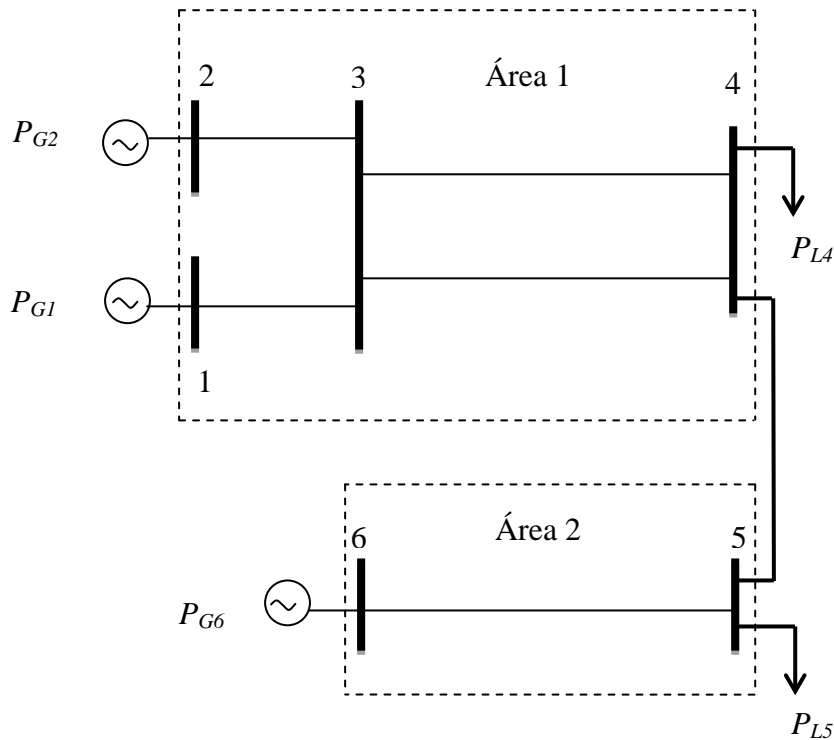


Figura 4.2- Sistema com Duas Áreas de Controle

O sistema (4.31) para esse caso fica na forma de (4.133). O vetor dos resíduos inclui os resíduos de potência ativa e reativa, os resíduos das equações de controle como em (4.32) para cada área de controle, o ECA e o resíduo da frequência.

O vetor das variáveis de estado inclui as variações dos ângulos e tensões, as variações de potência ativa e reativa nas barras de geração com regulação secundária e a variação da frequência no sistema.

$$\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_1'' \\ \Delta y_2 \\ \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 & 0 & H_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{28} & 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 & H_{69} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & L_{65} & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{77} & 0 & H_{78} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{71} & 0 & 0 & 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 & 0 & 0 & N_{810} \\ 0 & 0 & 0 & L_{82} & 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 & 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 & L_{96} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{110} & 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 (4.133)$$

Os elementos da matriz Jacobiana clássica estão na parte superior esquerda da matriz de (4.133). Os outros elementos são as derivadas das equações de controle. As equações de controles para o sistema da Figura 4.2 são:

Para a área 1:

$$\Delta y_1 = \alpha_{12} \cdot (P_{G2} - P_{G2}^{esp}) - (P_{G1} - P_{G1}^{esp}) \quad (4.134)$$

Como na área 2 só há um gerador, não há equação para a proporcionalidade com outro gerador, isto é, ele assumirá todas as perdas e variações da área 2.

Os resíduos referentes ao controle de tensão nas barras de geração serão iguais a (4.128).

Para o ECA:

$$\Delta y_1'' = B_1 \cdot (f^{esp} - f) - (T_1^{esp} - T_1) \quad (4.135)$$

Onde:

$$T_1 = P_{45} = V_4^2 \cdot g_{45} - V_4 \cdot V_5 \cdot (g_{45} \cdot \cos \Theta_{45} + b_{45} \sin \Theta_{45}) \quad (4.136)$$

Para a frequência:

$$\Delta y' = f^{esp} - f \quad (4.137)$$

Assim, os elementos da matriz Jacobiana são:

$$H_{17} = \frac{\partial(P_1^{esp} - (P_{G1} - P_{L1}))}{\partial P_{G1}} = -1 \quad (4.138)$$

$$H_{28} = \frac{\partial(P_2^{esp} - (P_{G2} - P_{L2}))}{\partial P_{G2}} = -1 \quad (4.139)$$

$$H_{69} = \frac{\partial(P_6^{esp} - (P_{G6} - P_{L6}))}{\partial P_{G6}} = -1 \quad (4.140)$$

$$L_{17} = \frac{\partial(Q_1^{esp} - (Q_{G1} - Q_{L1}))}{\partial Q_{G1}} = -1 \quad (4.141)$$

$$L_{28} = \frac{\partial(Q_2^{esp} - (Q_{G2} - Q_{L2}))}{\partial Q_{G2}} = -1 \quad (4.142)$$

$$L_{69} = \frac{\partial(Q_6^{esp} - (Q_{G6} - Q_{L6}))}{\partial Q_{G6}} = -1 \quad (4.143)$$

$$L_{71} = \frac{\partial(V_1^{esp} - V_1)}{\partial V_1} = -1 \quad (4.144)$$

$$L_{82} = \frac{\partial(V_2^{esp} - V_2)}{\partial V_2} = -1 \quad (4.145)$$

$$L_{96} = \frac{\partial(V_6^{esp} - V_6)}{\partial V_6} = -1 \quad (4.146)$$

$$H_{77} = \frac{\partial((P_{G1} - P_{G1}^{esp}) - \alpha_{12}(P_{G2} - P_{G2}^{esp}))}{\partial P_{G1}} = 1 \quad (4.147)$$

$$H_{78} = \frac{\partial((P_{G1} - P_{G1}^{esp}) - \alpha_{12}(P_{G2} - P_{G2}^{esp}))}{\partial P_{G2}} = -\alpha_{12} \quad (4.148)$$

$$N_{810} = \frac{\partial(B_1(f^{esp} - f) - (T_1^{esp} - T_1))}{\partial f} = -B_1 \quad (4.149)$$

Os elementos C_{84} , C_{85} , D_{84} e D_{85} são:

$$C_{84} = \frac{\partial(B_1(f^{esp} - f) - (T_1^{esp} - T_1))}{\partial \theta_4} = \frac{\partial(T_1)}{\partial \theta_4} \quad (4.150)$$

$$D_{84} = \frac{\partial(B_1 \cdot (f^{esp} - f) - (T_1^{esp} - T_1))}{\partial V_4} = \frac{\partial(T_1)}{\partial V_4} \quad (4.151)$$

$$C_{85} = \frac{\partial(B_1 \cdot (f^{esp} - f) - (T_1^{esp} - T_1))}{\partial \theta_5} = \frac{\partial(T_1)}{\partial \theta_5} \quad (4.152)$$

$$D_{85} = \frac{\partial(B_1 \cdot (f^{esp} - f) - (T_1^{esp} - T_1))}{\partial V_5} = \frac{\partial(T_1)}{\partial V_5} \quad (4.153)$$

As derivadas são:

$$C_{84} = V_4 \cdot V_5 \cdot (g_{45} \cdot \sin \theta_{45} - b_{45} \cdot \cos \theta_{45}) \quad (4.154)$$

$$D_{84} = -V_4 \cdot V_5 \cdot (g_{45} \cdot \sin \theta_{45} - b_{45} \cdot \cos \theta_{45}) \quad (4.155)$$

$$C_{85} = 2 \cdot V_4 \cdot g_{45} - V_5 \cdot (g_{45} \cdot \cos \theta_{45} + b_{45} \cdot \sin \theta_{45}) \quad (4.156)$$

$$D_{85} = -V_4 \cdot (g_{45} \cdot \cos \theta_{45} + b_{45} \cdot \sin \theta_{45}) \quad (4.157)$$

E para o ângulo da referência:

$$J_{101} = \frac{\partial(\theta_1^{esp} - \theta_1)}{\partial \theta_1} = -1 \quad (4.158)$$

Os termos α_1 , α_2 são os fatores de participação na área 1 e α_6 é o fator de participação na área 2, sendo a barra 6 a única barra de geração, então α_6 é 100%.

O vetor de resíduos é:

$$\begin{aligned} \Delta P'_1 &= P_1^{esp} - P_1^{cal} = (P_{G_1} - P_{L_1}) - P_1^{cal} \\ \Delta P'_2 &= P_2^{esp} - P_2^{cal} = (P_{G_2} - P_{L_2}) - P_2^{cal} \\ \Delta P'_3 &= P_3^{esp} - P_3^{cal} = (P_{G_3} - P_{L_3}) - P_3^{cal} \\ \Delta P'_4 &= P_4^{esp} - P_4^{cal} = (P_{G_4} - P_{L_4}) - P_4^{cal} \\ \Delta P'_5 &= P_5^{esp} - P_5^{cal} = (P_{G_5} - P_{L_5}) - P_5^{cal} \\ \Delta P'_6 &= P_6^{esp} - P_6^{cal} = (P_{G_6} - P_{L_6}) - P_6^{cal} \end{aligned} \quad (4.159)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q'_1 &= Q_1^{esp} - Q_1^{cal} = (Q_{G_1} - Q_{L_1}) - Q_1^{cal} \\ \Delta Q'_2 &= Q_2^{esp} - Q_2^{cal} = (Q_{G_2} - Q_{L_2}) - Q_2^{cal} \\ \Delta Q'_3 &= Q_3^{esp} - Q_3^{cal} = (Q_{G_3} - Q_{L_3}) - Q_3^{cal} \\ \Delta Q'_4 &= Q_4^{esp} - Q_4^{cal} = (Q_{G_4} - Q_{L_4}) - Q_4^{cal} \end{aligned} \quad (4.160)$$

$$\Delta Q_5 = Q_5^{esp} - Q_5^{cal} = (Q_{G_5} - Q_{L_5}) - Q_5^{cal}$$

$$\Delta Q'_6 = Q_6^{esp} - Q_6^{cal} = (Q_{G_6} - Q_{L_6}) - Q_6^{cal}$$

$$\Delta y_1 = \alpha_{12} \cdot (P_{G2}^{cal} - P_{G2}^{esp}) - (P_{G1}^{cal} - P_{G1}^{esp}) \quad (4.161)$$

$$\Delta y'_1 = V_1^{esp} - V_1^{cal}$$

$$\Delta y'_2 = V_2^{esp} - V_2^{cal} \quad (4.162)$$

$$\Delta y'_6 = V_6^{esp} - V_6^{cal}$$

$$\Delta y''_1 = B_1 \cdot (f^{esp} - f^{cal}) - (T_1^{esp} - T_1^{cal}) \quad (4.163)$$

$$\Delta y' = f^{esp} - f \quad (4.164)$$

Fazendo a inversa da matriz em (4.133) e multiplicando-a pelo vetor de resíduos, obtém-se as correções das variáveis de estado e, com isto, pode-se atualizar essas variáveis em cada iteração h :

$$P_{G1}^{h+1} = P_{G1}^h + \Delta P_{G1}^h$$

$$Q_{G1}^{h+1} = Q_{G1}^h + \Delta Q_{G1}^h$$

$$P_{G2}^{h+1} = P_{G2}^h + \Delta P_{G2}^h$$

$$Q_{G2}^{h+1} = Q_{G2}^h + \Delta Q_{G2}^h \quad (4.165)$$

$$P_{G6}^{h+1} = P_{G6}^h + \Delta P_{G6}^h$$

$$Q_{G6}^{h+1} = Q_{G6}^h + \Delta Q_{G6}^h$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \quad (4.166)$$

Depois de satisfeita as condições de convergência, é obtido o ponto de operação após regulação secundária.

4.6

Conclusões

Neste capítulo, formulou-se o problema do fluxo de potência para diferentes esquemas de geração de potência ativa.

1. Múltiplas barras *swing*

Esta modelagem representa o problema do despacho proporcional na rede. Os geradores participantes do despacho repartem as perdas na rede proporcionalmente às suas gerações do caso-base sem perdas.

2. Regulação primária e própria

Depois de um desequilíbrio entre carga e geração, a regulação primária atuará levando o sistema a um novo ponto de operação. O algoritmo de fluxo de potência, ao convergir, fornecerá o novo ponto de operação. A repartição do desequilíbrio e perdas é proporcional às energias de regulação dos geradores. A nova frequência é calculada.

3. Regulação secundária

Como frequência do sistema não é recuperada para seu valor-base, e se for um sistema multiáreas o intercâmbio de potência não será o especificado, então a regulação secundária é necessária.

O objetivo da regulação secundária é anular o ECA de cada área. O algoritmo de fluxo de potência com regulação secundária ao convergir, recuperará a frequência e o intercâmbio entre áreas. O ECA, sinal do integrador, é repartido entre cada gerador de cada área de controle.

Os modelos apresentados nesse capítulo para resolução do problema de fluxo de potência servem de base para analisar a influência do controle de carga-frequência na estabilidade de tensão do sistema.