2
Controle Carga - Frequência

Apresenta-se neste capítulo uma breve revisão sobre a regulação própria, primária e secundária presentes na operação dos sistemas elétricos de potência.

2.1
Regulação Própria

Em um sistema elétrico de potência, as cargas variam continuamente e, assim, todo o ponto de operação.

As tarefas mais importantes do sistema de controle carga-frequência é manter a frequência na faixa desejada ($f = 60 \pm 0.05\ hz$) e suprir as cargas do sistema. A propriedade de um sistema de potência de chegar a um novo estado de equilíbrio "por si só" é denominada "Regulação Própria do Sistema". É expressa através de um parâmetro D, chamado de Coeficiente de Amortecimento, que representa a variação da potência ativa demandada com a frequência:

$$D = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} \tag{2.1}$$

Mostra-se na Figura 2.1 uma variação linear entre as grandezas P_D (potência ativa demandada) e f (frequência do sistema).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

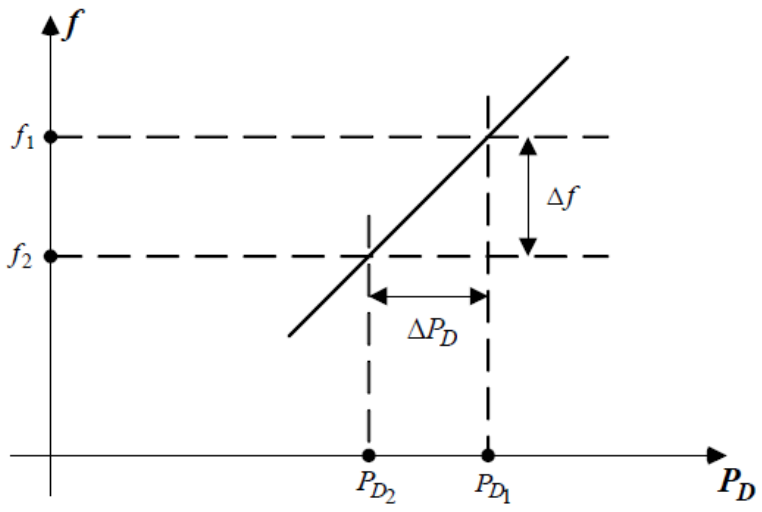

Figura 2.1- Variação Linear da Carga com a Frequência pela Regulação Própria

Os valores de D típicos são pequenos, por exemplo, $D = 1\%$. Assim, a frequência no novo ponto de equilíbrio após variação da carga tem valor fora da faixa desejada. Assim, é necessário contar com as regulações primária e secundária que recuperam o equilíbrio entre carga/geração, o valor nominal da frequência e intercâmbios entre áreas.

2.2
Regulação Primária

Após um aumento de carga, a geração fica menor que a carga. Para suprir esse aumento de carga, o sistema toma emprestada parte da energia cinética das massas girantes e, em consequência, a velocidade de rotação (frequência) é reduzida. O regulador de velocidade ao observar essa queda, aumenta a potência das unidades geradoras.

2.2.1
Característica Estática do Regulador

A característica estática do regulador é retratada por cada estado de equilíbrio atingido após a variação de frequência. É dada por (2.2):

$$\Delta P_{Gr.p.} = -\frac{1}{R}\Delta f_{r.p.} \quad (2.2)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Considerando o ponto inicial de equilíbrio (f_0, P_{G_0}) tem-se:

$$P_G - P_{G_0} = -\frac{1}{R}(f - f_0) \quad (2.3)$$

$$P_G - P_{G_0} + \frac{1}{R}(f - f_0) = 0 \quad (2.4)$$

A reta que passa pelo ponto f_0, P_{G_0} na Figura 2.2 tem como equação (2.4).

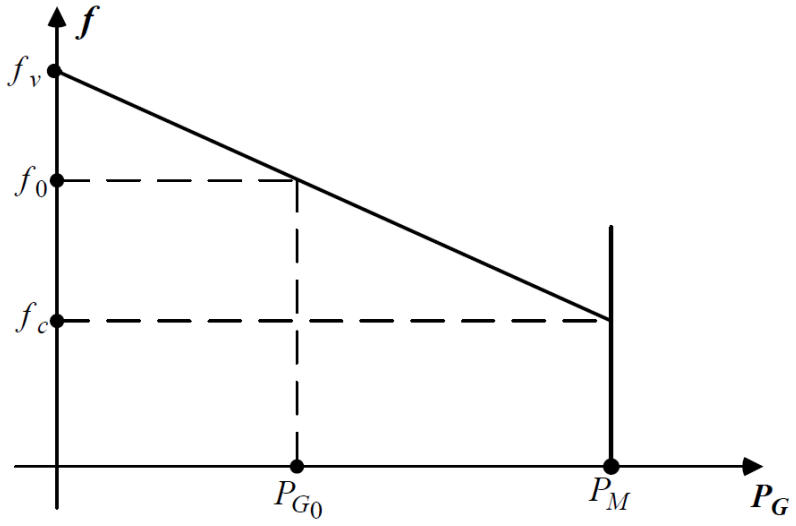

Figura 2.2- Curva Caraterística do Regulador com Queda de Velocidade

A grandeza $\frac{1}{R}$ é chamada de "Energia de Regulação da Máquina "porque tem dimensões de energia (MW/Hz). Outro parâmetro empregado é o estatismo (*speed droop*), que é definido como a variação de velocidade que se tem ao passar-se de carga zero a 100% da carga, expresso em *p.u.* da velocidade nominal.

$$s = \frac{f_v - f_c}{f_n}.100 \quad (2.5)$$

f_v : frequência quando a potência gerada da máquina é zero.

f_c : frequência quando a potência gerada da máquina é a máxima.

f_n : frequência nominal.

Em *p.u.*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

$$s = R. \tag{2.6}$$

2.2.2
Operação em Paralelo de Geradores

Um sistema tem n geradores com regulador com queda de velocidade. Estes geradores assumem os impactos normais ocorridos no sistema.

Após um aumento de carga ΔP_L, os reguladores de velocidade atuam até que um novo ponto de equilíbrio seja atingido.

Como em (2.3), para cada gerador i com energia de regulação $\frac{1}{R_i}$, tem-se:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{G_1} &= P'_{G_1} - P_{G_1} = \frac{\Delta f}{R_1} \\
\Delta P_{G_2} &= P'_{G_2} - P_{G_2} = \frac{\Delta f}{R_2} \\
&\vdots \\
\Delta P_{G_n} &= P'_{G_n} - P_{G_n} = \frac{\Delta f}{R_n}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

A variação da frequência Δf no novo ponto do equilíbrio do sistema é única:

$$\Delta f = Cte = \frac{\Delta P_{G_1}}{\frac{1}{R_1}} = \frac{\Delta P_{G_2}}{\frac{1}{R_2}} = \cdots = \frac{\Delta P_{G_n}}{\frac{1}{R_n}} \tag{2.8}$$

Conforme (2.8), as unidades geradoras com regulação primária assumirão o desequilíbrio carga-geração proporcionalmente às suas energias de regulação.

Assumindo que a variação nas perdas é nula:

$$\Delta P_L = \Delta P_{G_1} + \Delta P_{G_2} + \cdots + \Delta P_{G_n} \tag{2.9}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Substituindo (2.7) em (2.9).

$$\Delta P_L = \frac{\Delta f}{R_1} + \frac{\Delta f}{R_2} + \cdots + \frac{\Delta f}{R_n} \quad (2.10)$$

Logo:

$$\Delta f = \frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}} \quad (2.11)$$

A energia de regulação equivalente para o sistema é:

$$\Delta f = \frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R_{eq}}} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (2.13)$$

2.2.3
Área de controle

É a parte de um sistema de potência na qual um grupo de unidades geradoras, respondem às variações de carga contidas nesse sistema.

As fronteiras de uma área de controle, não são definidas de forma rígida, geralmente coincidem com as fronteiras elétricas com um sistema que possui uma razoável capacidade de geração e carga.

As áreas de controle deverão ser balanceadas em termos de carga-geração e as interligações entre áreas deverão trabalhar com folgas suficientes para garantir intercâmbios.

Considera-se que uma área de controle pode ser representada como uma unidade geradora suprindo uma carga.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

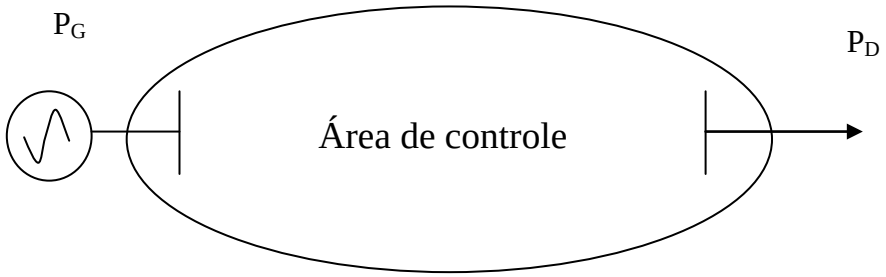

Figura 2.3- Área de Controle Representada Como uma Unidade Geradora Equivalente Suprindo uma Carga Equivalente

Supondo que nesta área de controle ocorre um degrau positivo na carga, e considerando-se que as unidades geradoras desta área dispõem somente de regulação primária, a variação da frequência é:

$$\Delta f_{r.p.} = -\frac{\Delta P_D}{D+\frac{1}{R}} \tag{2.14}$$

Haverá uma redução da frequência diretamente proporcional à variação de carga e inversamente proporcional a uma caraterística inerente da área de controle. Chama-se de β de caraterística natural da área de controle.

$$\beta = D + \frac{1}{R} \tag{2.15}$$

2.2.4
Caso de Mais de uma Área de Controle

Quando se subdivide o sistema de potência em áreas de controle, cada um destas depende das caraterísticas próprias de cada área, da sua capacidade de geração e do mercado a ser atendido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

Se uma área não dispuser de recursos próprios de geração para efetuar o controle de sua carga em cada instante de tempo, outra área de controle atuará para auxiliar nesta função de controle.

Mostra-se na Figura 2.4 a forma simplificada de duas áreas de controle.

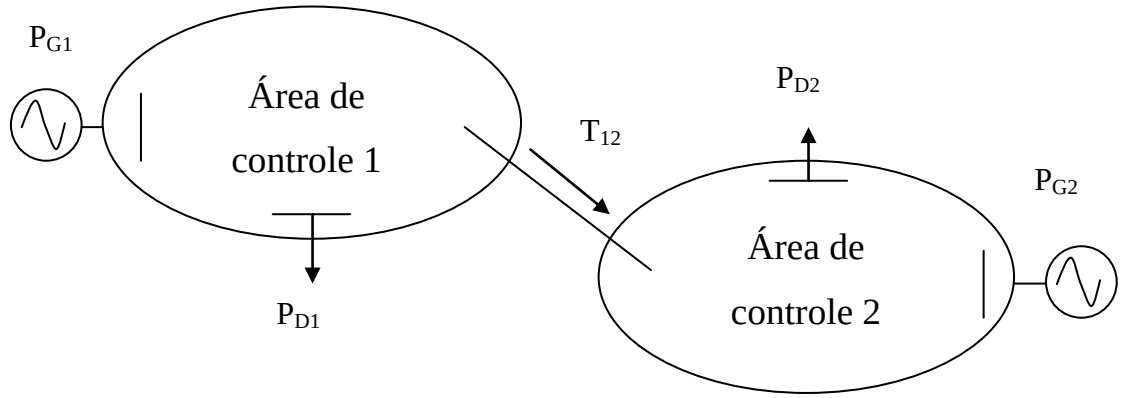

Figura 2.4- Representação Simplificada de Duas Áreas de Controle Interconectadas

Suponha-se um acréscimo instantâneo na carga P_{D1} (área de controle 1). Neste caso, como a área 1 esta interligada com a área 2, haverá uma forma de absorção do excesso de carga através de um aumento no intercâmbio entre as áreas 1 e 2, ΔT_{12}.

Ao atingir o regime permanente pode-se escrever:

$$\Delta P_{G1} - \Delta P_{D1} = D_1 . \Delta f_{r.p.} + \Delta T_{12} \quad (2.16)$$

$$\Delta P_{G2} - \Delta P_{D2} = D_2 . \Delta f_{r.p.} - \Delta T_{12} \quad (2.17)$$

Pode-se ver também que:

$$\Delta P_{G1} = -\frac{1}{R_1} . \Delta f_{r.p.} \quad (2.18)$$

$$\Delta P_{G2} = -\frac{1}{R_2} . \Delta f_{r.p.} \quad (2.19)$$

Substituindo (2.18) e (2.19) em (2.16) e (2.17):

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

$$-\frac{1}{R_1}.\Delta f_{r.p.} - \Delta P_{D1} = D_1.\Delta f_{r.p.} + \Delta T_{12} \quad (2.20)$$

$$-\frac{1}{R_2}.\Delta f_{r.p.} - \Delta P_{D2} = D_2.\Delta f_{r.p.} - \Delta T_{12} \quad (2.21)$$

Resolvendo (2.20), (2.21) e considerando (2.15):

$$\Delta f_{r.p.} = \frac{\Delta P_{D1}+\Delta P_{D2}}{\beta_1+\beta_2} \quad (2.22)$$

$$(\Delta T_{12})_{r.p.} = \frac{\beta_1.\Delta P_{D2}-\beta_2.\Delta P_{D1}}{\beta_1+\beta_2} \quad (2.23)$$

2.3
Regulação Secundária

Após a atuação da regulação primária, um desvio de frequência permanece. Se nenhuma providência adicional for tomada, ter-se-ia variações de frequência inaceitáveis, devido a sucessivas variações na carga.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

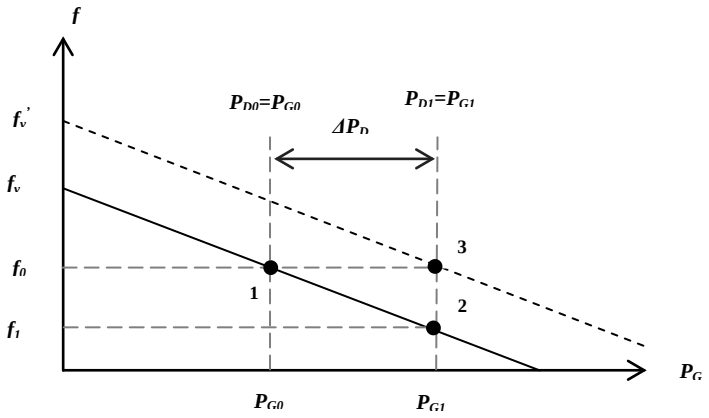

Figura 2.5- Dinâmica Sequencial do Sistema

Na Figura 2.3, o ponto 1 é o ponto de equilíbrio antes da variação da carga ($P_{G0} = P_{D0}$). O ponto 2 é o ponto de equilíbrio após a atuação da regulação primária ($P_{G1} = P_{D1}$) e ($f_0 > f_1$). O ponto 3 é o ponto de equilíbrio após a atuação da regulação secundária.

A regulação secundária possui constantes de tempo bem maiores que a regulação primária. Assim, a regulação secundária atua após a regulação primária.

2.3.1
Regulação Secundária em Áreas de Controle

Suponha que a área tenha n geradores, das quais j são dotados do controle secundário.

O sinal adicional relativo à regulação secundária é distribuído para as j unidades através dos fatores de participação α_i que definem a porcentagem do acréscimo de geração em cada unidade após a atuação da regulação secundária.

Obviamente:

$$\sum_{i=1}^{i=j} \alpha_i = 1 \qquad (2.14)$$

2.3.2
Erro da Área de Controle

O Erro da Área de Controle (ECA), para uma única área de controle é:

$$ECA = \Delta F \qquad (2.15)$$

Enquanto persiste o erro de frequência, permanece a atuação da regulação secundária.

Para duas áreas de controle interligadas, o ECA para cada área de controle é:

$$ECA_1 = \Delta P_{12} + B_1.\Delta f \qquad (2.16)$$

$$ECA_2 = \Delta P_{21} + B_2.\Delta f \qquad (2.17)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA

É composto pela mudança no intercâmbio de potência entre as áreas e pelo desvio da frequência, ponderado pelo *bias* B_i, onde, usualmente:

$$B_1 = \beta_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 \tag{2.18}$$

$$B_2 = \beta_2 = \frac{1}{R_2} + D_2 \tag{2.19}$$

2.4 Conclusões

No presente capítulo mostrou-se uma revisão dos tipos de regulações presentes nos sistemas de potência. Consideraram-se três tipos de regulações no controle Carga-Frequência: a regulação própria, que é uma caraterística inerente das cargas do sistema; a regulação primária, aplicável aos sistemas com unidades geradoras que tem regulador com queda de velocidade; e a regulação secundária. Esta, implementada como um controle integral faz com que o erro na área de controle (ECA) seja nulo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313462/CA