

Capítulo 3

Controle Primário de Velocidade

3.1 Introdução

Este capítulo trata da malha mais interna associada ao controle de velocidade de geradores síncronos, que é implementada localmente, isto é, na própria usina de que faz parte o gerador.

O caso de um gerador isolado alimentando uma carga é inicialmente enfocado, na seção 3.2. Para situar o problema, um exemplo numérico ilustrativo é inicialmente introduzido, a partir do qual se procura comparar o comportamento do sistema com e sem regulador e analisar os fenômenos físicos associados. A seção 3.3 trata dos efeitos da regulação primária após uma variação da carga para o caso de duas ou mais máquinas. Tanto o comportamento estático quanto o transitório são investigados. Exemplos numéricos que buscam enfatizar a interpretação física do estatismo e determinar as contribuições individuais dos diversos geradores do sistema são fornecidos.

3.2 Sistema Isolado

3.2.1 Exemplo Numérico Ilustrativo

Considere o sistema isolado cujo diagrama de blocos está mostrado na Fig. 42, que é composto de um regulador com queda de velocidade associado a uma unidade a vapor sem reaquecimento. Os dados para o sistema são os seguintes:

- Capacidade Nominal: $P_{nom} = 2.000$ MW
- Carga nominal: $P_{D,nom} = 1000$ MW
- Constante de inércia: $H = 5,0$ seg
- Variação da carga com a frequência: 1% de variação da frequência \Rightarrow 1% de variação da carga.

Para que os desvios de frequência sejam expressos em Hertz, a equação de oscilação deve ter seu lado esquerdo modificado, como mostrado abaixo:

$$2H \frac{d}{dt}(\Delta w_{pu}) = \frac{H}{\pi f^0} \frac{d}{dt}(\Delta w_{rad/s}) = \frac{2H}{f^0} \frac{d}{dt}(\Delta f_{Hz}) = \Delta P_{mec} - \Delta P_e$$

de modo que, para Δf expresso em Hz:

$$M = \frac{2H}{f^0} \tag{3.97}$$

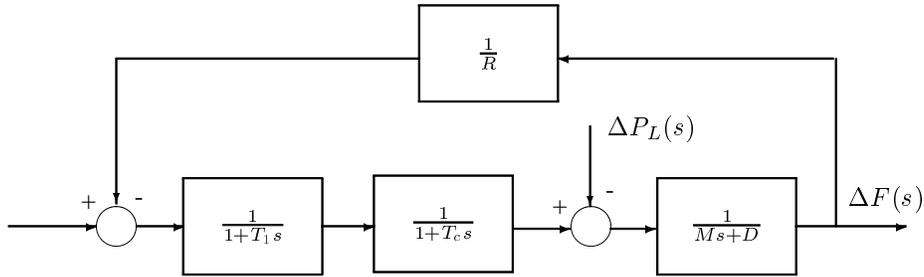


Figura 42: Sistema térmico sem reaquecimento.

Com os valores numéricos dados:

$$M = \frac{2 \times 5,0}{60} = \frac{1}{6} \text{ s}$$

$$D = \frac{1000/2000}{60} \text{ puMW/Hz} = \frac{1}{120} \text{ puMW/Hz}$$

$$\frac{1}{Ms + D} = \frac{1/D}{1 + s(M/D)} = \frac{120}{1 + 20s}$$

3.2.2 Desempenho com Regulador Bloqueado

Supondo regulador bloqueado, o diagrama de blocos da Fig. 42 reduz-se àquele mostrado na Fig. 43.

Para uma variação em degrau no torque da carga, de amplitude ΔL :

$$\Delta f(s) = -\frac{(1/D)}{1 + s(M/D)} \times \frac{\Delta L}{s}$$

ou

$$\Delta f(t) = -\frac{\Delta L}{D}(1 - e^{-t/(M/D)}) \quad (3.98)$$

Da equação Eq. (3.98), pode-se extrair as seguintes conclusões:

1. O desvio de frequência em regime permanente é dado por:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D} \quad (3.99)$$

Ou seja, o desvio de frequência é limitado apenas pela redução de carga com a queda de frequência;

Seção 3.2 Sistema Isolado

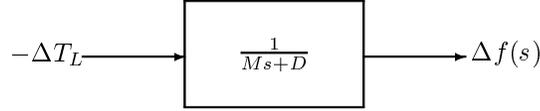


Figura 43: Unidade térmica com regulador bloqueado.

2. O transitório é do tipo de primeira ordem, e a resposta fica confinada em uma faixa de 5% do valor de regime após um tempo dado por:

$$t_{r_{5\%}} = 3\tau = 3\frac{M}{D}$$

3. Para os valores numéricos típicos dados e um incremento de carga de $20MW = 0,01p.u.$:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{0,01}{(1/120)} = -1,2 \text{ Hz}$$

$$f(\infty) = 58,8 \text{ Hz}$$

$$t = \frac{M}{D} = 20 \text{ s}$$

$$t_{r_{5\%}} = 3 \times 20 = 60 \text{ s}$$

3.2.3 Desempenho com Regulação Primária

Por conveniência, será considerado inicialmente que a ação do conjunto turbina + regulador é “instantânea” comparada com o resto do sistema (T_c e T_1 são da ordem de 1, 0 seg, enquanto que, no caso, $(M/D) = 20$ seg).

Assim, considerando $T_1 = T_c = 0$ no diagrama de blocos da Fig. 42:

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta T_L(s)} = -\frac{\frac{1}{Ms+D}}{1 + \frac{1}{R} \times \frac{1}{Ms+D}} = -\frac{R}{RMs + (RD + 1)} = -\frac{1}{D + \frac{1}{R}} \times \frac{1}{1 + s(\frac{M}{D + \frac{1}{R}})}$$

O desvio de frequência provocada por um degrau de amplitude ΔL será dado portanto por:

$$\Delta f(t) = -\frac{\Delta L}{D + \frac{1}{R}} \times (1 - e^{-\frac{t}{M/(D + \frac{1}{R})}}) \quad (3.100)$$

Considerando-se $R = 4\%$, ou

$$R = 0,04 \text{ pu Hz/pu MW} = 0,04 \times 60 \text{ Hz/puMW} = 2,4 \text{ Hz/pu MW}$$

e os dados da Subseção 3.1.1:

$$\Delta f(t) = -0,0235(1 - e^{-t/0,393})$$

Comparando-se a Eq. (3.98) com a Eq. (3.100), pode-se extrair as seguintes conclusões:

1. O desvio de frequência estática em malha fechada é:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D + \frac{1}{R}}$$

Isto é, o desvio de frequência em malha fechada é limitado não só por D , mas também pelo inverso do estatismo permanente;

2. Com as aproximações feitas, o transitório de frequência é de primeira ordem, mas agora o tempo de resposta a 5% é:

$$t_{r_{5\%}} = 3\tau_{MF} = 3 \times \frac{M}{D + \frac{1}{R}},$$

onde τ_{MF} é a constante de tempo em malha fechada do sistema.

3. Para os valores numéricos dados:

$$\Delta f(\infty) = -0,0235 \text{ Hz}$$

$$f(\infty) = 59,9765 \text{ Hz}$$

$$t_{r_{5\%}} \approx 1,2 \text{ s}$$

4. Da Eq. (3.100), nota-se que quanto menor o estatismo permanente R , menor serão a constante de tempo em malha fechada e o desvio estático de frequência. Há que se levar em conta, entretanto, a questão da estabilidade da malha de controle, que não é evidente de análise precedente porque foram desprezadas as dinâmicas do regulador e da turbina. Na prática, há um limite inferior para R (isto é, um limite superior para o ganho em malha aberta) para que não se ponha em risco a estabilidade da malha de controle.

A Fig. 44 apresenta o comportamento do desvio de frequência em função do tempo. Apresenta-se também o comportamento que se obteria se fossem consideradas as dinâmicas do regulador e turbina.

3.2.3.1 Interpretação física Imediatamente após a aplicação do incremento de carga, a energia para satisfazê-lo é retirada das únicas fontes de armazenamento de energia do sistema, que são as massas girantes (que armazenam energia cinética). A taxa inicial de decréscimo da energia cinética é de 20 MJ/seg , e a desaceleração inicial é dada por:

Seção 3.2 Sistema Isolado

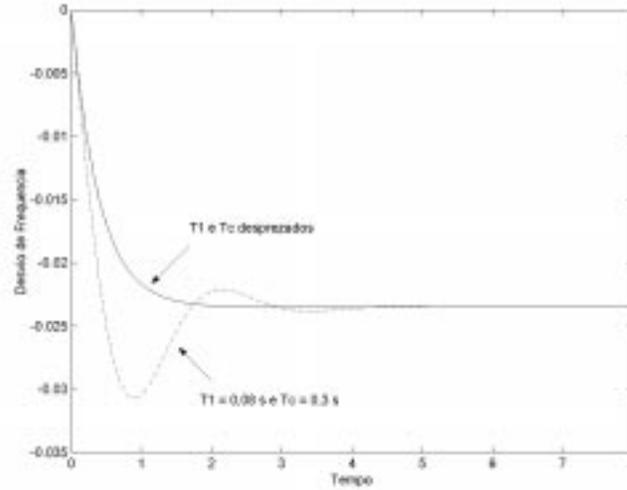


Figura 44: Desvio de frequência em função do tempo em resposta a degrau de carga.

$$\frac{\Delta f(\infty)}{\tau_{MF}} = \frac{0,0235}{0,393} = 0,06 \text{ Hz/s}$$

Com a queda de velocidade, dois novos fenômenos ocorrem: a entrada em ação do regulador, que sente esta queda de velocidade e age no sentido de aumentar a potência gerada, e a queda da carga com a frequência.

Assim, o suprimento do degrau de carga é composto de 3 componentes:

- a) A energia tomada emprestada da energia cinética das massas girantes do sistema;
- b) O aumento da geração, provocada pela ação do regulador;
- c) A redução da carga, por efeito da queda de frequência.

As parcelas (b) e (c) são inicialmente nulas, mas aumentam com o tempo, de modo que a contribuição de (a) diminui, e a velocidade finalmente se nivela em um novo valor final constante, quando então a contribuição (a) deixa de existir.

Para determinar as contribuições (b) e (c) em regime permanente, considere o diagrama de blocos da malha de controle de velocidade redesenhado como na Fig. 45.

Em regime:

$$\Delta f(\infty) = \text{constante} \text{ e } \Delta P_{\text{acel}} = 0$$

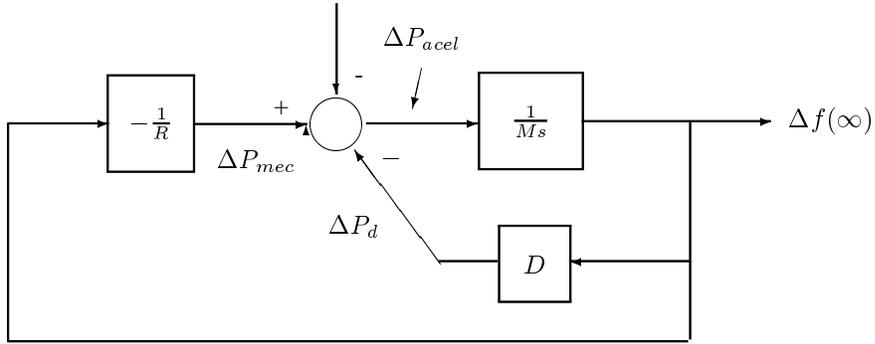


Figura 45: Malha de controle de velocidade em regime permanente

Logo:

$$\Delta P_{mec}(\infty) - \Delta P_d(\infty) = \Delta L \quad (3.101)$$

Além disso:

$$\begin{aligned} \Delta P_{mec}(\infty) &= -\frac{1}{R} \times \Delta f(\infty) = -\frac{1}{2,4} \times (-0,0235) \text{ pu MW} \\ &= (0,0235 \times 2000) / 2,4 \text{ MW} = 19,6 \text{ MW} \end{aligned} \quad (3.102)$$

e

$$\Delta P_d(\infty) = D \times \Delta f(\infty) = 8,33 \times 10^{-3} \times (-0,0235) \times 2000 \text{ MW} = -0,4 \text{ MW} \quad (3.103)$$

Substituindo as Eqs. (3.101) e (3.102) na Eq. (3.103), verifica-se que:

$$19,6 - (-0,4) = 19,6 + 0,4 = 20 \text{ MW}$$

3.3 Caso de Duas Máquinas Interligadas

3.3.1 Desempenho com Reguladores Bloqueados

A Fig. 46 representa o diagrama de blocos de dois geradores interligados com os respectivos reguladores bloqueados.

Deseja-se determinar a resposta a uma variação ΔP_{L_1} da carga na área 1. A partir dos diagramas de blocos da Fig. 46, tem-se:

$$G(s) = \frac{\Delta F_1(s)}{\Delta P_{L_1}(s)} = \frac{-(M_2 s^2 + D_2 s + T)}{(M_1 s + D_1)(M_2 s^2 + D_2 s + T) + T(M_2 s + D_2)} \quad (3.104)$$

Seção 3.3 Caso de Duas Máquinas Interligadas

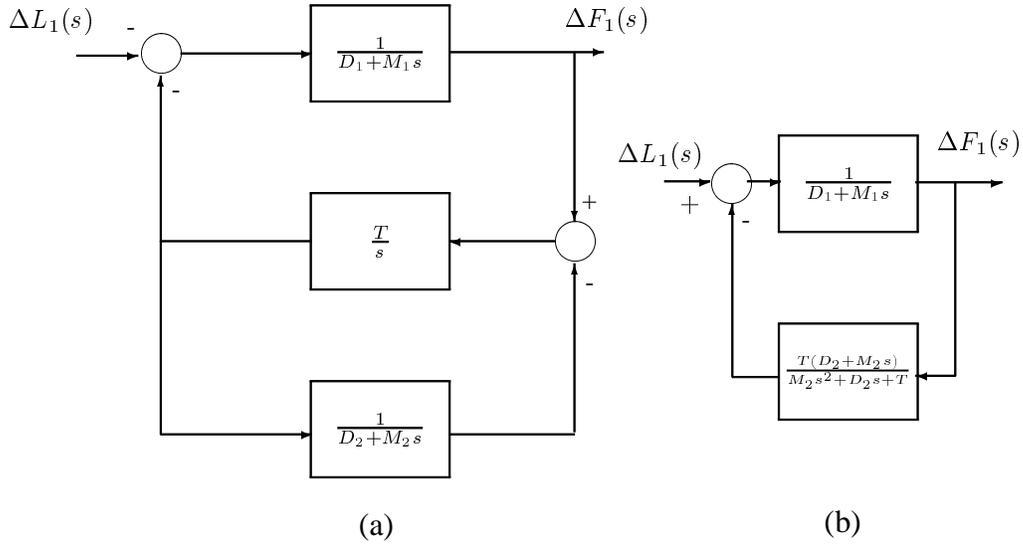


Figura 46: (a) Sistema de duas máquinas com reguladores bloqueados; (b) Diagrama de blocos reduzido.

Em regime permanente:

$$\Delta f(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s G(s) \frac{\Delta P_{L1}}{s} = G(0) \times \Delta P_{L1} = -\frac{\Delta P_{L1}}{D_1 + D_2} \quad (3.105)$$

e

$$\Delta P_{TL_{12}}(\infty) = \frac{TD_2}{T} \Delta f(\infty) = -\frac{D_2 \Delta P_{L1}}{D_1 + D_2} \quad (3.106)$$

Se a variação de carga for na área 2, tem-se:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta P_{L2}}{D_1 + D_2} \quad (3.107)$$

e

$$\Delta P_{TL_{12}}(\infty) = \frac{D_1 \Delta P_L}{D_1 + D_2} \quad (3.108)$$

Estes resultados podem ser obtidos a partir do diagrama de blocos da Fig. 10 do Capítulo 2. Por exemplo, utilizando-se a função de transferência:

$$\frac{\Delta F_2(s)}{\Delta P_{L_2}(s)} = \frac{-(Ms^2 + D_1s + T)}{(M_1s^2 + D_1s + T)(M_2s + D_2) + T(M_1s + D_1)} \quad (3.109)$$

obtida daquele diagrama de blocos, verifica-se facilmente que:

$$\Delta f_2(\infty) = \Delta f(\infty) = \frac{T}{-TD_2 - TD_1} \Delta P_{L_2} = -\frac{\Delta P_{L_2}}{D_1 + D_2} \quad (3.110)$$

Consequentemente, do mesmo diagrama é fácil se concluir que:

$$\Delta P_{TL_{12}}(\infty) = \frac{-TD_1}{T} \Delta f(\infty) = \frac{D_1 \Delta P_{L_2}}{D_1 + D_2} \quad (3.111)$$

3.3.2 Sistema De Duas Máquinas com Regulação Primária

Supondo-se $T_1 = T_2 \approx 0$, $T_{c_1} = T_{c_2} \approx 0$ e, adicionalmente, considerando-se a hipótese de que as áreas são iguais, obtem-se expressões similares às equações anteriores para os desvios de frequência e de potência de intercâmbio em regime permanente, com a única diferença de que D é substituído por $D + (1/R)$. Assim, teremos os seguintes casos:

Variação de carga $\Delta P_{L_1} = \Delta P_L$ na área 1 ($\Delta P_{L_2} = 0$):

Frequência em regime permanente na área 1:

$$\Delta f_1(\infty) = \Delta f(\infty) = \frac{-\Delta P_L}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.112)$$

Frequência em regime permanente na área 2:

$$\Delta f_2(\infty) = \Delta f_1(\infty) = \Delta f \quad (3.113)$$

Potência de Intercâmbio:

$$\Delta P_{TL_{12}} = -\frac{\Delta P_L(D_2 + \frac{1}{R_2})}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.114)$$

Variação de carga $\Delta P_{L_2} = \Delta P_L$ na área 2 ($\Delta P_{L_1} = 0$):

Frequência em regime permanente na área 1:

$$\Delta f_1(\infty) = \Delta f(\infty) = \frac{-\Delta P_L}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.115)$$

Frequência em regime permanente na área 2:

Seção 3.3 Caso de Duas Máquinas Interligadas

$$\Delta f_2(\infty) = \Delta f(\infty) = -\frac{\Delta P_L}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.116)$$

Potência de Intercâmbio:

$$\Delta P_{TL_{12}} = \frac{\Delta P_L(D_1 + \frac{1}{R_1})}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.117)$$

Todas as relações acima são derivadas do sistema de equações em regime permanente, obtido do diagrama de blocos para as duas máquinas interligadas com regulação primária mostrado na Fig. 47. Este sistema de equações é dado abaixo, onde se considera que todas as relações são válidas em regime permanente, e portanto se omite o argumento (∞).

$$\Delta f_1 = \Delta f_2 = \Delta f \quad (3.118)$$

$$\Delta P_{m_1} - \Delta P_{TL_{12}} - \Delta P_{L_1} = D_1 \Delta f_1 \quad (3.119)$$

$$\Delta P_{m_2} - \Delta P_{L_2} + \Delta P_{TL_{12}} = D_2 \Delta f_2 \quad (3.120)$$

$$\Delta P_{m_1} = -\frac{\Delta f_1}{R_1} \quad (3.121)$$

$$\Delta P_{m_2} = -\frac{\Delta f_2}{R_2} \quad (3.122)$$

Expressões gerais para Δf e $\Delta P_{TL_{12}}$ em regime permanente podem ser obtidas das equações acima. Por exemplo, é fácil verificar que o sistema de equações pode ser re-escrito como:

$$-\frac{\Delta f_1}{R_1} - \Delta P_{TL_{12}} - \Delta P_{L_1} = D_1 \Delta f_1 \quad (3.123)$$

$$-\frac{\Delta f_2}{R_2} - \Delta P_{L_2} - \Delta P_{TL_{12}} = D_2 \Delta f_2 \quad (3.124)$$

ou ainda:

$$-\Delta P_{TL_{12}} - \Delta P_{L_1} = \Delta f_1(D_1 + \frac{1}{R_1}) \quad (3.125)$$

$$\Delta P_{TL_{12}} - \Delta P_{L_2} = \Delta f_2(D_2 + \frac{1}{R_2}) \quad (3.126)$$

Usando o fato de que os desvios de frequência são iguais em regime:

$$-\Delta P_{TL_{12}} - \Delta P_{L_1} = \Delta f(D_1 + \frac{1}{R_1}) \quad (3.127)$$

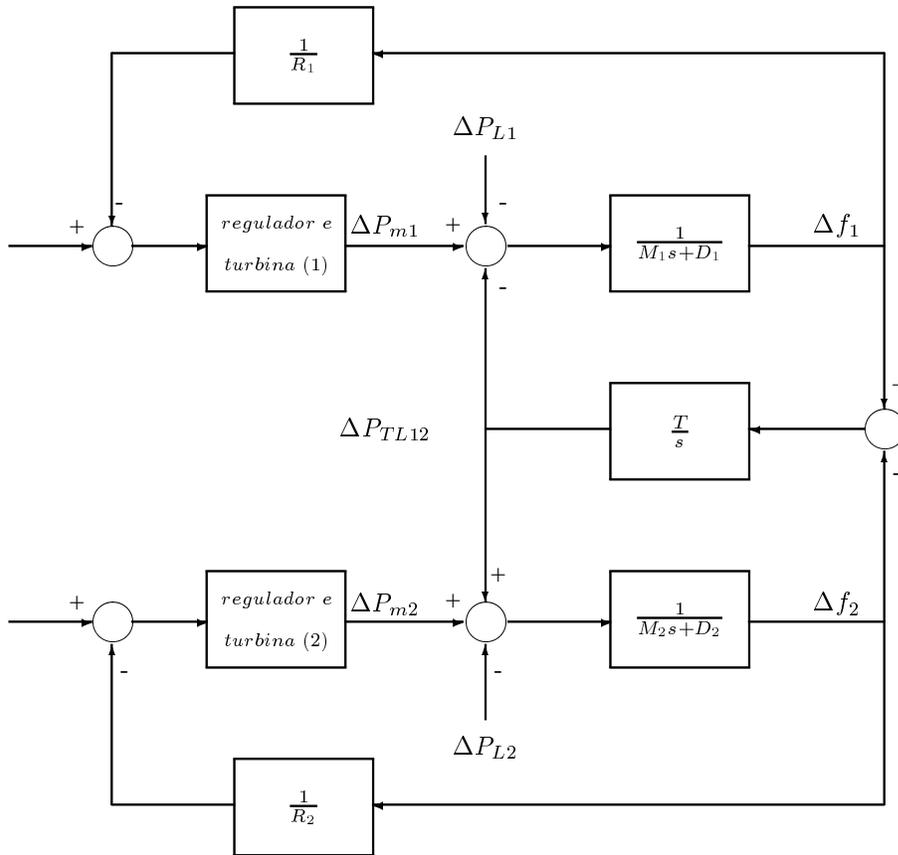


Figura 47: Sistema de duas máquinas com regulação primária.

Seção 3.3 Caso de Duas Máquinas Interligadas

$$\Delta P_{TL_{12}} - \Delta P_{L_2} = \Delta f \left(D_2 + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.128)$$

$$(3.129)$$

e somando as equações acima, obtêm-se:

$$\Delta f(\infty) = \frac{-\Delta P_{L_1} - \Delta P_{L_2}}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.130)$$

De (3.124):

$$\Delta P_{TL_{12}}(\infty) = \Delta P_{L_2} + \frac{(-\Delta P_{L_1} - \Delta P_{L_2})(D_2 + \frac{1}{R_2})}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.131)$$

Supondo uma variação de carga na área 1, $\Delta P_{L_1} = \Delta P_L$ e $\Delta P_{L_2} = 0$, têm-se, da Eq. (3.130):

$$\Delta f(\infty) = \frac{-\Delta P_L}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.132)$$

e da Eq. (3.131):

$$\Delta P_{TL_{12}}(\infty) = -\frac{\Delta P_L(D_2 + \frac{1}{R_2})}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.133)$$

Supondo agora uma variação na área 2, $\Delta P_{L_2} = \Delta P_L$, com $\Delta P_{L_1} = 0$ tem-se:

$$\Delta f(\infty) = \frac{-\Delta P_L}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.134)$$

e

$$\Delta P_{TL_{12}}(\infty) = \frac{\Delta P_L(D_1 + \frac{1}{R_1})}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (3.135)$$

Observação - Supondo $D_1 = D_2 = D$ e $R_1 = R_2 = R$, para um aumento de carga $\Delta P_{L_1} = \Delta P_L$ na área 1 a variação de frequência é:

$$\Delta f_1(\infty) = \frac{-\Delta P_L}{2(D + \frac{1}{R})} \quad (3.136)$$

e o desvio de frequência em regime permanente é a metade do desvio obtido se a área 1 estivesse isolada.

A variação de potência na interligação é:

$$\Delta P_{TL_{12}} = -\frac{\Delta P_L(D + \frac{1}{R})}{2(D + \frac{1}{R})} = -\frac{\Delta P_L}{2} \quad (3.137)$$

de modo que a metade da potência adicional para suprir o aumento de carga na área 1 será fornecida pela área 2.

3.3.3 Comportamento Transitório

No caso de duas áreas interligadas, a análise de comportamento transitório das variáveis de interesse torna-se mais complexa, dada a ordem elevada do sistema. Para viabilizar a obtenção de resultados analíticos que nos permitam ter uma idéia sobre o comportamento do sistema, serão feitas as seguintes simplificações:

- Áreas iguais, ou seja, $M_1 = M_2$ e $D_1 = D_2$;
- A dinâmica do regulador e turbina é rápida em relação ao resto do sistema, ou seja, $T_1 = T_c \approx 0$ (unidade térmica sem reaquecimento).

3.3.3.1 Desvio de Frequência no Domínio do Tempo com Regulação Primária O sistema de duas máquinas está representado na Fig. 47. Definindo-se:

$$\beta \triangleq D + \frac{1}{R} \quad (3.138)$$

pode ser facilmente verificado que a função de transferência $\Delta f_1(s)/\Delta P_{L_1}(s)$ é dada por:

$$\frac{\Delta f_1(s)}{\Delta P_{L_1}(s)} = -\frac{(M s^2 + \beta s + T)}{(M s^2 + \beta s + 2T)(M s + \beta)} \quad (3.139)$$

Para $\Delta P_{L_1}(s) = \Delta P_L/s$ obtêm-se:

$$\Delta f_1(t) = \Delta P_{L_1} \left[-\frac{1}{2\beta} + \frac{1}{2\beta} e^{-\frac{\beta t}{M}} - \frac{e^{-\frac{\beta t}{M}}}{\sqrt{8TM - \beta^2}} \text{sen} \left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{\beta^2}{4M^2}} t + \varphi \right) \right] \quad (3.140)$$

3.3.3.2 Desvio de Potência de Intercâmbio no Domínio do Tempo com Regulação Primária Da Fig. 47 obtêm-se:

$$\frac{\Delta P_{TL}(s)}{\Delta P_{L_1}(s)} = \frac{-T}{M s^2 + \beta s + 2T} \quad (3.141)$$

ou

Seção 3.3 Caso de Duas Máquinas Interligadas

$$\frac{\Delta P_{TL}(s)}{\Delta P_{L_1}(s)} = \frac{-\frac{T}{M}}{s^2 + \frac{\beta}{M}s + \frac{2T}{M}} \quad (3.142)$$

Para $\Delta P_{L_1}(s) = \Delta P_{L_1}/s$, tem-se:

$$\Delta P_{TL}(t) = -\frac{\Delta P_{L_1}}{2} \left[1 - \frac{e^{-\frac{\beta}{2M}t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos\left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{\beta}{4M^2}}t + \varphi\right) \right] \quad (3.143)$$

onde $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$.

3.3.4 Comportamento Transitório sem reguladores

Como neste caso $\frac{1}{R} = 0$, $\beta = D$.

3.3.4.1 Resposta transitória do desvio de frequência: Usando a Eq. (3.140) com $\beta = D$:

$$\Delta f_1(t) = -\frac{\Delta P_L}{2D} + \frac{\Delta P_L}{2D} e^{\frac{D}{M}t} - \frac{\Delta P_L e^{-\frac{D}{2M}t}}{\sqrt{8TM - D^2}} \operatorname{sen}\left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{D^2}{M^2}}t + \varphi\right) \quad (3.144)$$

Se $(\frac{D}{M})^2 \ll \frac{2T}{M}$, então $\omega_1 \approx \sqrt{\frac{2T}{M}}$.

Notar que uma diminuição de reatância aumenta o coeficiente de torque sincronizante T e portanto a frequência de oscilação aumenta. O amortecimento aumenta com D .

3.3.4.2 Resposta transitória do desvio de potência de intercâmbio: Usando a Eq. (3.143) com $\beta = D$:

$$\Delta P_{TL}(t) = -\frac{\Delta P_{L_1}}{2} \left[1 - \frac{e^{-\frac{D}{2M}t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos\left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{D}{4M^2}}t + \varphi\right) \right] \quad (3.145)$$

3.3.5 Exemplo Resolvido sobre o Comportamento Estático de um Sistema Composto por Três Máquinas

Um sistema de potência é composto de 3 unidades geradoras:

- *Unidade 1* : Potência nominal = 300 MW, R=5% na base da máquina, ajustada para fornecer 200 MW à frequência nominal;
- *Unidade 2* : Potência nominal = 220 MW, R = 5%, ajustada para fornecer 150 MW à frequência nominal;
- *Unidade 3* : Potência nominal = 100 MW, R=5%, fornece 50 MW à frequência nominal.

Capítulo 3 Controle Primário de Velocidade

O sistema alimenta uma carga constante e invariável com a frequência de 400 MW (ver Fig. 48).

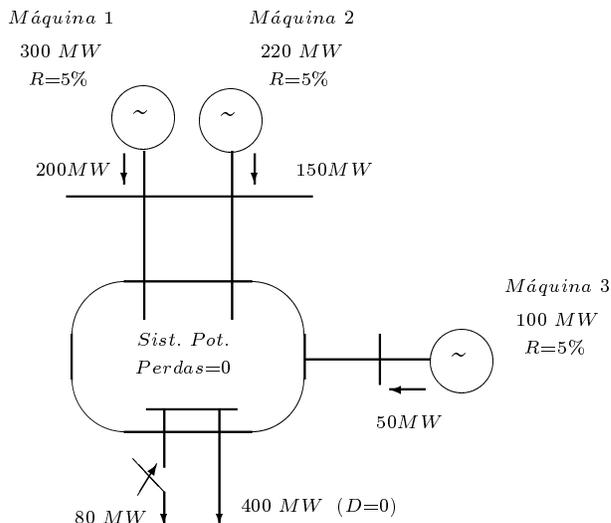


Figura 48: Sistema de 3 máquinas para exemplo resolvido.

Para um súbito aumento de carga de 80 MW, determinar:

1. Quanto cada máquina alocará para este aumento de demanda;
2. A nova frequência a ser atingida, considerando que o sistema é dotado apenas de regulação primária.

Solução:

1. Expressão dos estatismos em base comum (100 MVA).

$$\left(\frac{1}{R}\right)_{pu} = \frac{\Delta P_G, pu MW}{\Delta f, pu Hz}$$

$$\left(\frac{1}{R}\right)_{pu}^{(1)} = \left(\frac{1}{R}\right)_{pu} \times \frac{S_B}{S_B^{(1)}}$$

Aplicando-se a expressão acima às três máquinas:

$$\left(\frac{1}{R_1}\right)_{pu, base 100} = \frac{1}{0.05} \times \frac{300}{100} = 60 pu \Rightarrow R_1 = 0.0167 pu$$

Seção 3.3 Caso de Duas Máquinas Interligadas

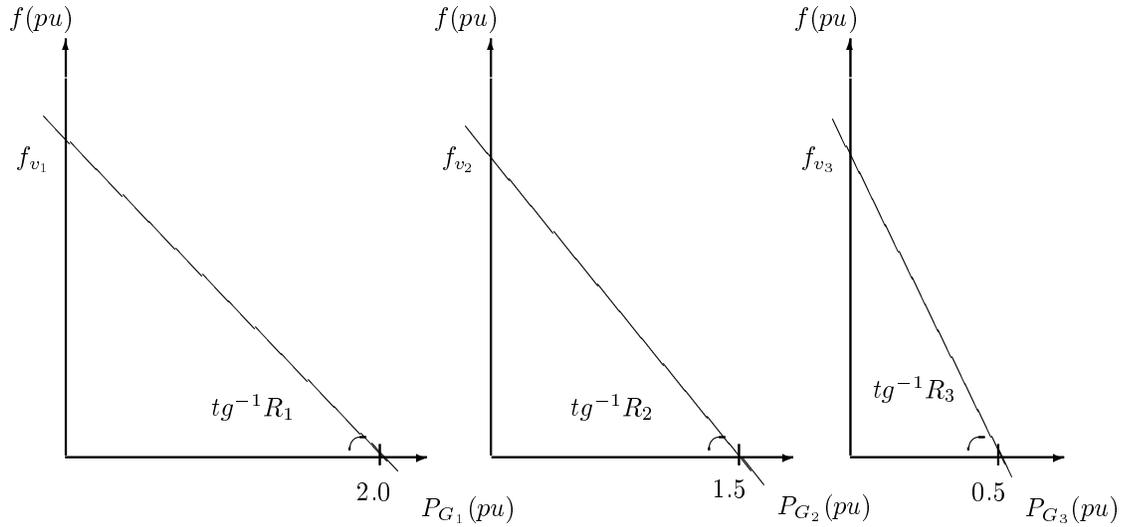


Figura 49: Características carga-freqüência individuais das máquinas

$$\left(\frac{1}{R_2}\right)_{pu, base 100} = \frac{1}{0.05} \times \frac{220}{100} = 44 pu \Rightarrow R_2 = 0.0227 pu$$

$$\left(\frac{1}{R_3}\right)_{pu, base 100} = \frac{1}{0.05} \times \frac{100}{100} = 20 pu \Rightarrow R_3 = 0.05 pu$$

2. Cálculo do desvio de freqüência.

As freqüências das máquinas a vazio são dadas por (ver Fig. 49).

$$R_1 = \frac{f_{v1} - 1}{2.0} \Rightarrow f_{v1} = 1.0334 pu$$

$$R_2 = \frac{f_{v2} - 1}{1.5} \Rightarrow f_{v2} = 1.034 pu$$

$$R_3 = \frac{f_{v3} - 1}{0.5} \Rightarrow f_{v3} = 1.025 pu$$

Como não há controle suplementar, um aumento de carga implicará em uma queda de freqüência. Por outro lado, para suprir o aumento de carga passaremos a ter $P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = 480 MW (4,8 pu)$. A partir da Fig. 50, têm-se:

$$\left. \begin{array}{l} 1/R_1 = \Delta P_{G1} / \Delta f(\infty) \\ 1/R_2 = \Delta P_{G2} / \Delta f(\infty) \\ 1/R_3 = \Delta P_{G3} / \Delta f(\infty) \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{\Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \Delta P_{G3}}{\Delta f(\infty)}$$

Mas $\Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \Delta P_{G3} = \Delta P_L$. Por analogia com o caso de uma máquina (com $D = 0$), definimos:

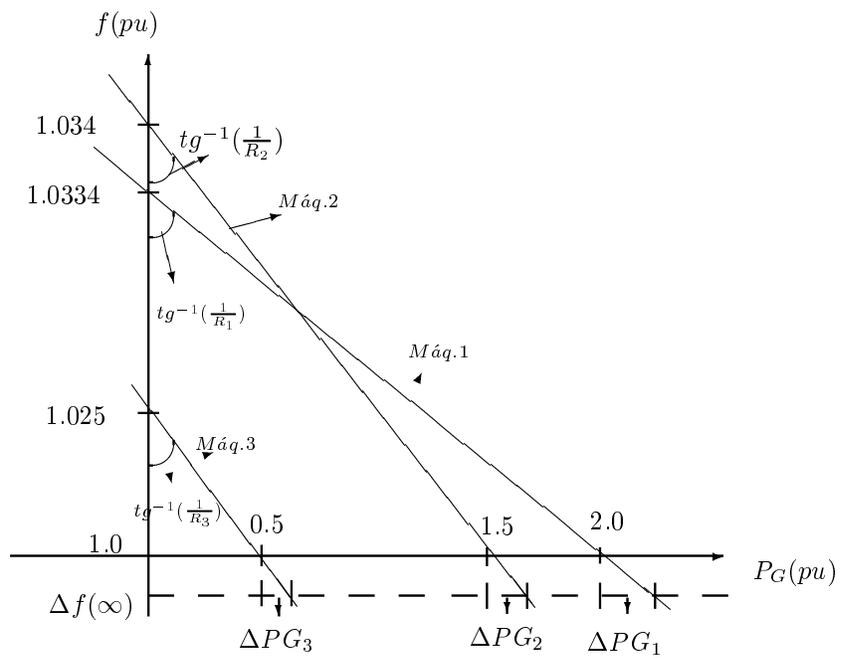


Figura 50: Características carga-freqüência das máquinas representadas em um mesmo par de eixos.

Seção 3.4 Ajuste Convencional de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

$$\frac{1}{R_{eq}} \triangleq \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

de modo que:

$$\Delta f(\infty) = \frac{\Delta P_L}{1/R_{eq}}$$

Para o problema em questão:

$$\Delta f(\infty) = 0,8/(60. + 44. + 20.) = 0.00645 \text{ p.u.}$$

ou

$$\Delta f(\infty) = 0.00645 \times 60 = 0.387 \text{ Hz}$$

e

$$f_1 = f - \Delta f(\infty) = 59.613 \text{ Hz}$$

3. Cálculo das contribuições de potência de cada máquina.
As contribuições de cada máquina serão dadas por:

$$\Delta P_{G1} = \frac{1}{R_1} \times \Delta f(\infty) = 60. \times 0.00645 = 0.387 \text{ p.u.} = 38.7 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{G2} = \frac{1}{R_2} \times \Delta f(\infty) = 44. \times 0.00645 = 0.283 \text{ p.u.} = 28.3 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{G3} = \frac{1}{R_3} \times \Delta f(\infty) = 20. \times 0.00645 = 0.13 \text{ p.u.} = 13.0 \text{ MW}$$

Verifica-se portanto que, com estatismos ajustados em um mesmo valor em p.u., a carga se distribui entre as máquinas de acordo com as suas capacidades nominais. Isto é, a máquina de maior capacidade nominal assume a maior parcela da carga, e assim por diante.

3.4 Ajuste Convencional de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

Esta seção trata do ajuste de parâmetros de reguladores de velocidade de turbinas hidráulicas. Conforme visto no Capítulo 2, a função de transferência típica de reguladores de velocidade tem a forma:

$$\frac{\eta(s)}{\sigma(s)} = -\frac{1}{R} \times \frac{1 + sT_r}{(1 + sT_1)(1 + s\frac{r}{R}T_r)}$$

Os parâmetros do compensador a serem ajustadas para se obter um bom comportamento transitório são r e T_r . Este ajuste é em geral feito para o caso de sistema isolado, usando-se por exemplo técnicas de resposta em frequência para se obter valores adequados de margens de ganho e fase do sistema compensado.

A partir de um projeto generalístico, onde são feitas aproximações conservativas, chega-se aos seguintes valores para um ajuste de r e T_r :

$$r = 2,5 \frac{T_W}{M} \quad (3.146)$$

$$T_r = \left[\frac{(r/R) - 1}{0,536(r/R)} + \sqrt{\left(\frac{(r/R) - 1}{0,536(r/R)}\right)^2 - \frac{R}{r}} \right] \times \frac{T_w}{0,4} \quad (3.147)$$

onde:

T_W = constante de tempo de partida da água;

$M = 2H$ constante de inércia da máquina, e

R = estatismo permanente.

As fórmulas acima fornecem um ajuste em geral estável, mas podem levar a uma resposta lenta do regulador. Na seção seguinte é apresentado um método de projeto mais detalhado que resolve este problema.

3.5 Síntese de Parâmetros de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

3.5.1 Introdução

As condições de operação do sistema determinam os requisitos de operação de reguladores de velocidade para turbinas hidráulicas. Em especial, as seguintes condições de operação devem ser consideradas:

- operação a vazio, incluindo a fase de partida e a sincronização ao sistema;
- operação alimentando carga isolada (rede isolada);
- operação em carga com conexão a um grande sistema em regulação primária e eventualmente em regulação secundária.

Cada condição de operação tem seus requisitos e os parâmetros do regulador que atendem a uma condição de operação podem não atender a outra. A comutação de parâmetros é uma forma de atender aos requisitos de todas aquelas condições.

O procedimento adotado geralmente para o projeto é considerar a condição de sistema isolado, que impõe os requisitos mais severos de operação e que garante que em caso de ilhamento a estabilidade é mantida. Considera-se ainda que a otimização do ajuste para cada sistema considerado isoladamente leva a um bom desempenho do sistema interligado.