EXEMPLO
Análise do Comportamento Dinâmico de Sistema Máquina - Barra Infinita

Prof. Antonio Simões Costa

Grupo Sist. Potência - UFSC

Exemplo de Análise de Comportamento Dinâmico

Um gerador síncrono para o qual $H = 5,0\,s$ e $T'_{do} = 8\ s$ está ligado a um sistema infinito através de uma reatância externa $X_e = 0,4\ p.u.$ Os parâmetros do modelo linearizado de *Heffron & Phillips* para uma condição de carga $P + jQ = 1,0 + j0$ são os seguintes:

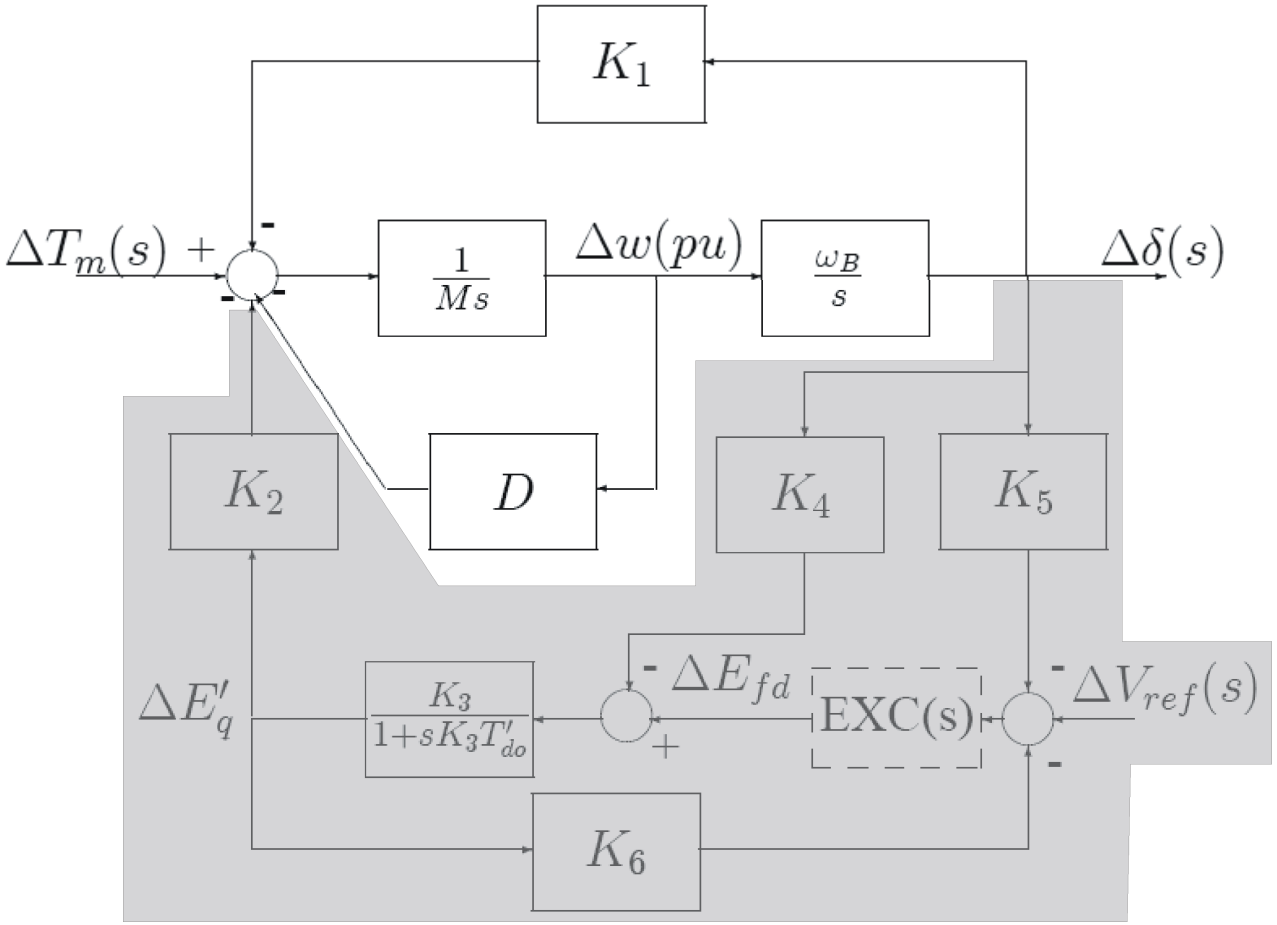
$$\begin{array}{lll} K_1 = 1,174 & K_3 = 0,36 & K_5 = -0,117 \\ K_2 = 1,47 & K_4 = 1,88 & K_6 = 0,301 \end{array}$$

Condição de Enlaces de Fluxo Constantes (I)

a) Qual o coeficiente de potência sincronizante considerando-se enlaces de fluxo constantes? Qual é o valor da freqüência de oscilação nestas condições?

Condição de Enlaces de Fluxo Constantes (I)

a) Qual o coeficiente de potência sincronizante considerando-se enlaces de fluxo constantes? Qual é o valor da freqüência de oscilação nestas condições?



Condição de Enlaces de Fluxo Constantes (II)

a) Qual o coeficiente de potência sincronizante considerando-se enlaces de fluxo constantes? Qual é o valor da freqüência de oscilação nestas condições?

Condição de Enlaces de Fluxo Constantes (II)

a) Qual o coeficiente de potência sincronizante considerando-se enlaces de fluxo constantes? Qual é o valor da freqüência de oscilação nestas condições?

Solução:

Condição de Enlaces de Fluxo Constantes (II)

a) Qual o coeficiente de potência sincronizante considerando-se enlaces de fluxo constantes? Qual é o valor da freqüência de oscilação nestas condições?

Solução:

- Condição de enlaces de fluxo constantes: o coeficiente de torque de sincronização é K_1. Logo:

$$K_s = K_1 = 1,174$$

Condição de Enlaces de Fluxo Constantes (II)

a) Qual o coeficiente de potência sincronizante considerando-se enlaces de fluxo constantes? Qual é o valor da freqüência de oscilação nestas condições?

Solução:

- Condição de enlaces de fluxo constantes: o coeficiente de torque de sincronização é K_1. Logo:

$$K_s = K_1 = 1,174$$

- A freqüência natural das oscilações eletromecânicas, nesta situação, é dada por:

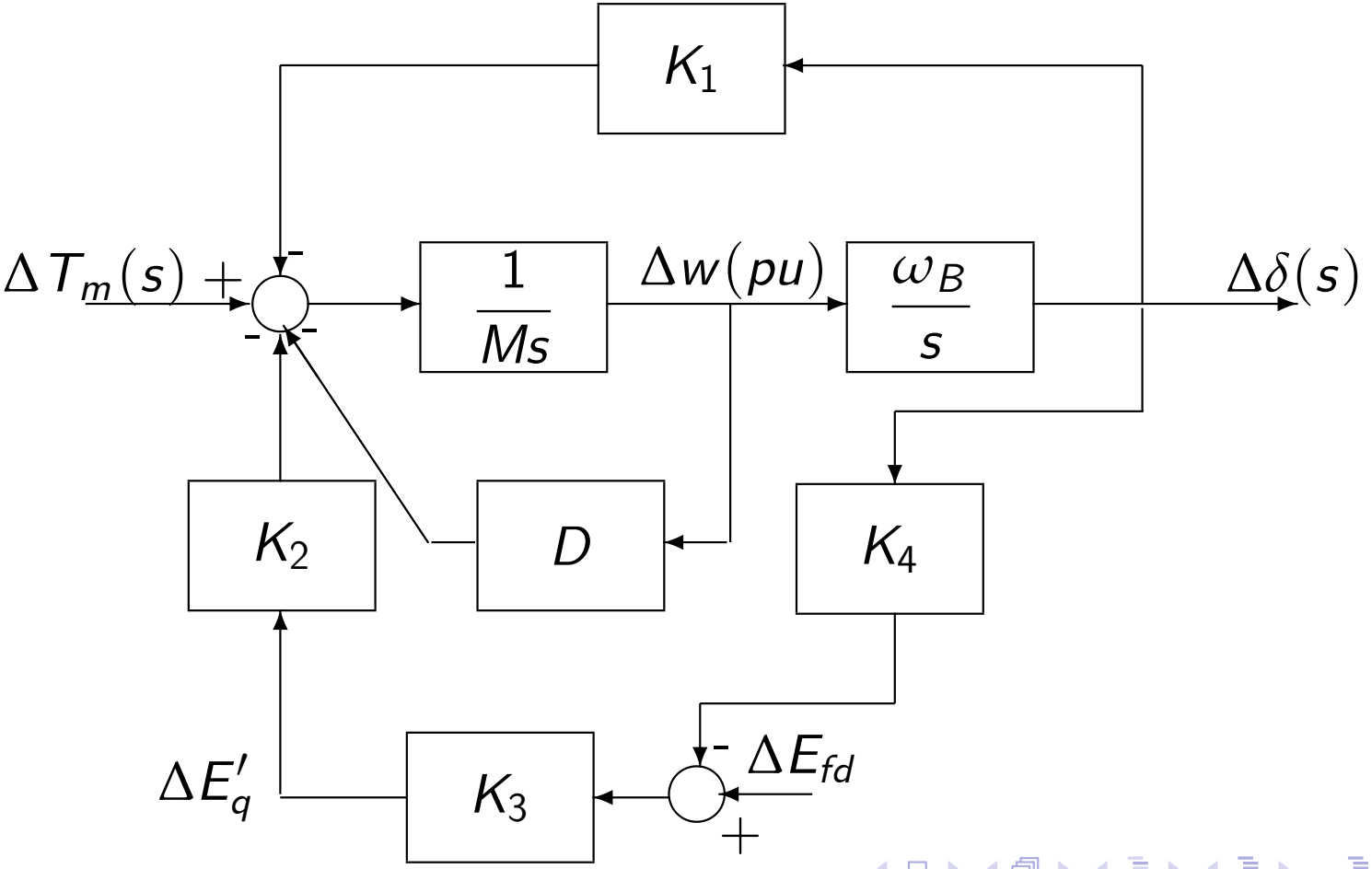
$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_B K_1}{M}} = \sqrt{\frac{377 \times 1,174}{2 \times 5}} = 6,65 \;\; rad/s \approx 1,06 \; Hz$$

Reação da Armadura em Regime Permanente (I)

b) Considerando-se a ausência de ação do RT, determine o torque de sincronização *em regime permanente*, levando agora em conta a influência da reação da armadura.

Reação da Armadura em Regime Permanente (I)

b) Considerando-se a ausência de ação do RT, determine o torque de sincronização *em regime permanente*, levando agora em conta a influência da reação da armadura.



Reação da Armadura em Regime Permanente (II)

b) Considerando-se a ausência de ação do RT, determine o torque de sincronização *em regime permanente*, levando agora em conta a influência da reação da armadura.

Reação da Armadura em Regime Permanente (II)

b) Considerando-se a ausência de ação do RT, determine o torque de sincronização *em regime permanente*, levando agora em conta a influência da reação da armadura.

Solução:

Reação da Armadura em Regime Permanente (II)

b) Considerando-se a ausência de ação do RT, determine o torque de sincronização *em regime permanente*, levando agora em conta a influência da reação da armadura.

Solução:

- Na condição de regime permanente $(s = j0)$, o coeficiente de torque de sincronização é obtido a partir de:

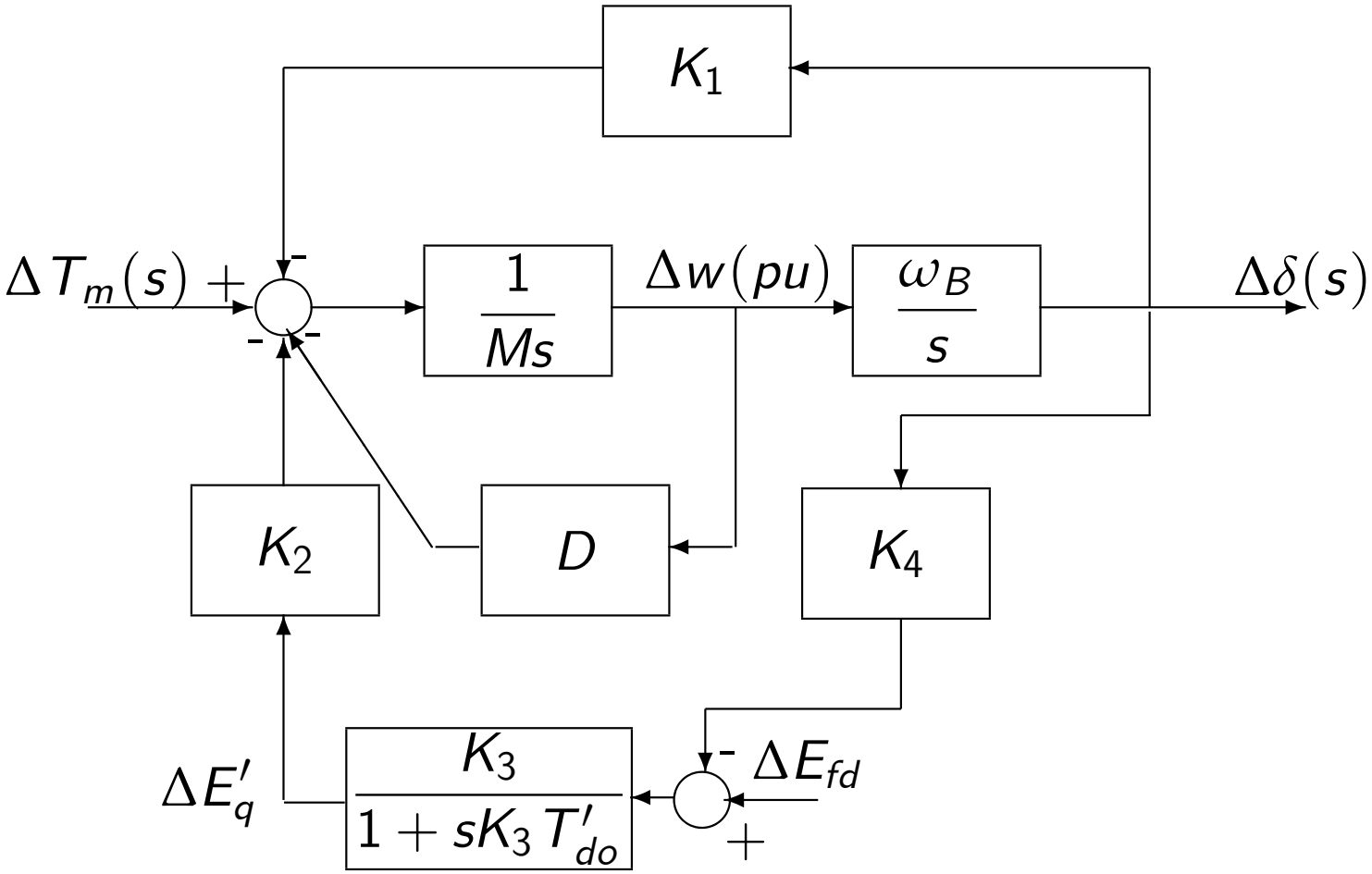
$$K_s = K_1 - K_2 K_3 K_4 = 1,174 - 1,47 \times 0,36 \times 1,88 = 0,179$$

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (I)

c) Desprezando a ação de regulador, qual os coeficientes de torque de sincronização e amortecimento *à freqüência natural* ω_n?

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (I)

c) Desprezando a ação de regulador, qual os coeficientes de torque de sincronização e amortecimento *à freqüência natural* ω_n?



Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (II)

c) Desprezando a ação de regulador, qual os coeficientes de torque de sincronização e amortecimento *à freqüência natural* ω_n?

Solução:

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (II)

c) Desprezando a ação de regulador, qual os coeficientes de torque de sincronização e amortecimento *à freqüência natural* ω_n?

Solução:

- À freqüência ω_n e sem ação do regulador:

$$\Delta T_e = \left(K_1 - \frac{K_2 K_3 K_4}{1 + j\omega_n T'_{do} K_3} \right) \times \Delta\delta$$

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (II)

c) Desprezando a ação de regulador, qual os coeficientes de torque de sincronização e amortecimento *à freqüência natural* ω_n?

Solução:

- À freqüência ω_n e sem ação do regulador:

$$\Delta T_e = \left(K_1 - \frac{K_2 K_3 K_4}{1 + j\omega_n T'_{do} K_3} \right) \times \Delta\delta$$

- Para $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$:

$$\Delta T_e = \left(1,174 - \frac{1,47 \times 0,36 \times 1,88}{1 + j6,65 \times 8,0 \times 0,36} \right) \Delta\delta = (1,171 + j0,052)\Delta\delta$$

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (III)

- Para $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$:

$$\Delta T_e = (1,171 + j0,052)\Delta\delta$$

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (III)

- Para $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$:

$$\Delta T_e = (1,171 + j0,052)\Delta\delta$$

- Coeficiente de torque sincronizante para $\omega = \omega_n$:

$$K_s = 1,171$$

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (III)

- Para $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$:

$$\Delta T_e = (1,171 + j0,052)\Delta\delta$$

- Coeficiente de torque sincronizante para $\omega = \omega_n$:

$$K_s = 1,171$$

- Torque de amortecimento para $s = jw_n$:

$$\Delta T_d = j0,052\ \Delta\delta = j0,052\ \frac{377}{j\omega_n}\ \Delta\omega_G = K_d\ \Delta\omega_G$$

Reação da Armadura na Freqüência do Modo Local (III)

- Para $\omega = \ \omega_n = \ 6,65 \ rad/s$:

$$\Delta T_e = (1,171 + j0,052)\Delta\delta$$

- Coeficiente de torque sincronizante para $\omega = \omega_n$:

$$K_s = 1,171$$

- Torque de amortecimento para $s = jw_n$:

$$\Delta T_d = j0,052 \ \Delta\delta = j0,052 \ \frac{377}{j\omega_n} \ \Delta\omega_G = K_d \ \Delta\omega_G$$

- Logo:

$$K_d = 0,052 \times \frac{377}{6,65} = 2,95$$

Amortecimento da Reação da Armadura

d) Para a mesma situação do item (c) calcule a cte. de amortecimento equiv., D_{eq}, e a razão de amortecimento equiv. ζ_{eq};

Amortecimento da Reação da Armadura

d) Para a mesma situação do item (c) calcule a cte. de amortecimento equiv., D_{eq}, e a razão de amortecimento equiv. ζ_{eq};

Solução:

Amortecimento da Reação da Armadura

d) Para a mesma situação do item (c) calcule a cte. de amortecimento equiv., D_{eq}, e a razão de amortecimento equiv. ζ_{eq};

Solução:

- Para $\omega = \omega_n$, a constante de amortecimento, D_{eq}, é igual a K_d, obtido no item anterior;

Amortecimento da Reação da Armadura

d) Para a mesma situação do item (c) calcule a cte. de amortecimento equiv., D_{eq}, e a razão de amortecimento equiv. ζ_{eq};

Solução:

- Para $\omega = \omega_n$, a constante de amortecimento, D_{eq}, é igual a K_d, obtido no item anterior;
- ζ_{eq}é obtida da equação característica para enlaces de fluxo constantes equivalente à operação em $\omega = \omega_n$:

$$s^2 + \frac{K_d}{M}s + \frac{377K_s}{M} = 0$$

Amortecimento da Reação da Armadura

d) Para a mesma situação do item (c) calcule a cte. de amortecimento equiv., D_{eq}, e a razão de amortecimento equiv. ζ_{eq};

Solução:

- Para $\omega = \omega_n$, a constante de amortecimento, D_{eq}, é igual a K_d, obtido no item anterior;
- ζ_{eq}é obtida da equação característica para enlaces de fluxo constantes equivalente à operação em $\omega = \omega_n$:

$$s^2 + \frac{K_d}{M}s + \frac{377K_s}{M} = 0$$

- Comparando com:

$$s^2 + 2\zeta_{eq}w_n s + \omega_n^2 = 0$$

Amortecimento da Reação da Armadura

d) Para a mesma situação do item (c) calcule a cte. de amortecimento equiv., D_{eq}, e a razão de amortecimento equiv. ζ_{eq};

Solução:

- Para $\omega = \omega_n$, a constante de amortecimento, D_{eq}, é igual a K_d, obtido no item anterior;
- ζ_{eq}é obtida da equação característica para enlaces de fluxo constantes equivalente à operação em $\omega = \omega_n$:

$$s^2 + \frac{K_d}{M}s + \frac{377K_s}{M} = 0$$

- Comparando com:

$$s^2 + 2\zeta_{eq}w_n s + \omega_n^2 = 0$$

- obtem-se:

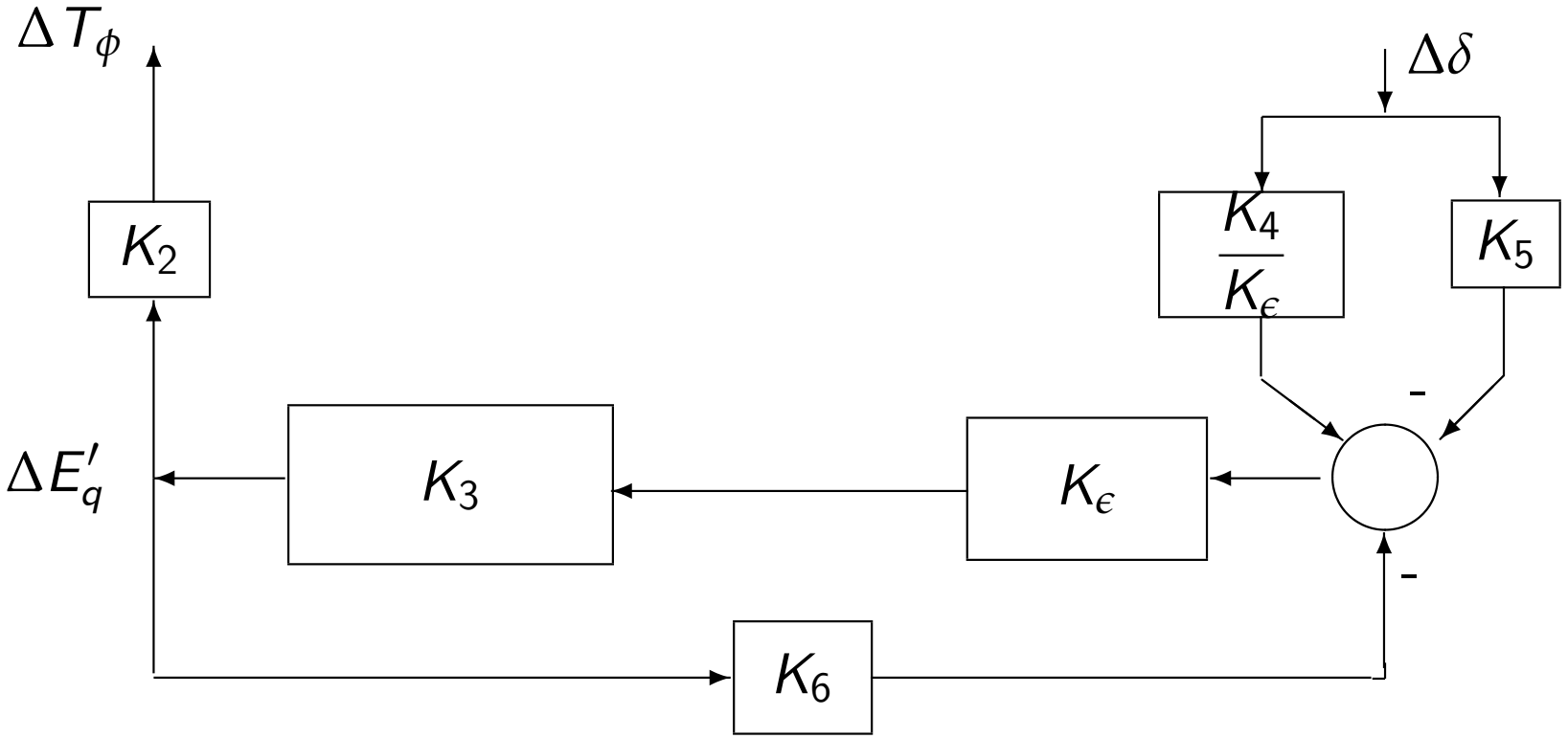
$$\zeta_{eq} = \frac{D_{eq}}{2M\omega_n} = 0,022$$

Efeito do RT sobre o Torque Sincr. em Reg. Perm. (I)

e) Qual o valor do ganho K_ϵ do regulador que torna o coeficiente de torque de sincronização igual àquele com enlaces de fluxo constantes, em regime permanente (calculado no item (a))?

Efeito do RT sobre o Torque Sincr. em Reg. Perm. (I)

e) Qual o valor do ganho K_ϵ do regulador que torna o coeficiente de torque de sincronização igual àquele com enlaces de fluxo constantes, em regime permanente (calculado no item (a))?



Efeito do RT sobre o Torque Sincr. em Reg. Perm. (II)

e) Qual o valor do ganho K_ϵ do regulador que torna o coeficiente de torque de sincronização igual àquele com enlaces de fluxo constantes, em regime permanente (calculado no item (a))?

Efeito do RT sobre o Torque Sincr. em Reg. Perm. (II)

e) Qual o valor do ganho K_ϵ do regulador que torna o coeficiente de torque de sincronização igual àquele com enlaces de fluxo constantes, em regime permanente (calculado no item (a))?

Solução:

Efeito do RT sobre o Torque Sincr. em Reg. Perm. (II)

e) Qual o valor do ganho K_ϵ do regulador que torna o coeficiente de torque de sincronização igual àquele com enlaces de fluxo constantes, em regime permanente (calculado no item (a))?

Solução:

- Com com enlaces de fluxo constantes, $K_s = K_1$;

Efeito do RT sobre o Torque Sincr. em Reg. Perm. (II)

e) Qual o valor do ganho K_ϵ do regulador que torna o coeficiente de torque de sincronização igual àquele com enlaces de fluxo constantes, em regime permanente (calculado no item (a))?

Solução:

- Com com enlaces de fluxo constantes, $K_s = K_1$;
- Logo, K_ϵ deve ser tal que o torque sincronizante equivalente através do laço reativo seja nulo;

Efeito do RT sobre o Torque Sincr. em Reg. Perm. (II)

e) Qual o valor do ganho K_ϵ do regulador que torna o coeficiente de torque de sincronização igual àquele com enlaces de fluxo constantes, em regime permanente (calculado no item (a))?

Solução:

- Com com enlaces de fluxo constantes, $K_s = K_1$;
- Logo, K_ϵ deve ser tal que o torque sincronizante equivalente através do laço reativo seja nulo;
- A partir do diagrama de blocos, vemos que isto é conseguido com

$$K_\epsilon = -\frac{K_4}{K_5} = -\frac{1,88}{-0,117} = 16,06 \ p.u./p.u.$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (I)

f) Considere um sistema de excitação de atraso considerável, descrito por:

$$EXC(s) = \frac{K_\epsilon}{(1+sT_\epsilon)(1+sT_v)}\ , \qquad \begin{cases} K_\epsilon = & 20 \\ T_\epsilon = & 0,5\ s \\ T_v = & 0,2\ s \end{cases}$$

Determine K_s e K_d produzidos por variações de fluxo à freqüência ω_n. O ponto de operação considerado é estável com $EXC(s)$?

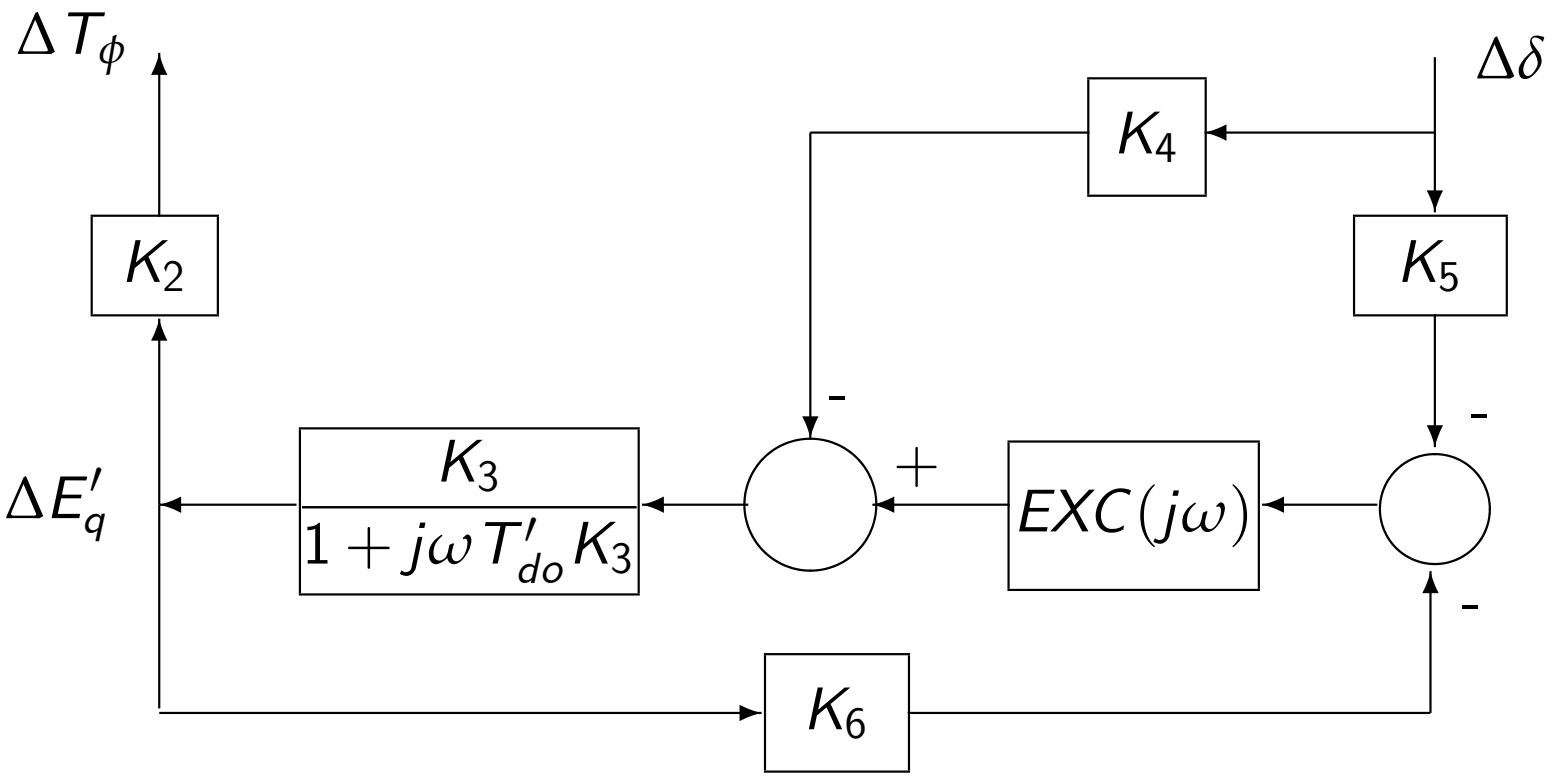
Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (II)

Solução:

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (II)

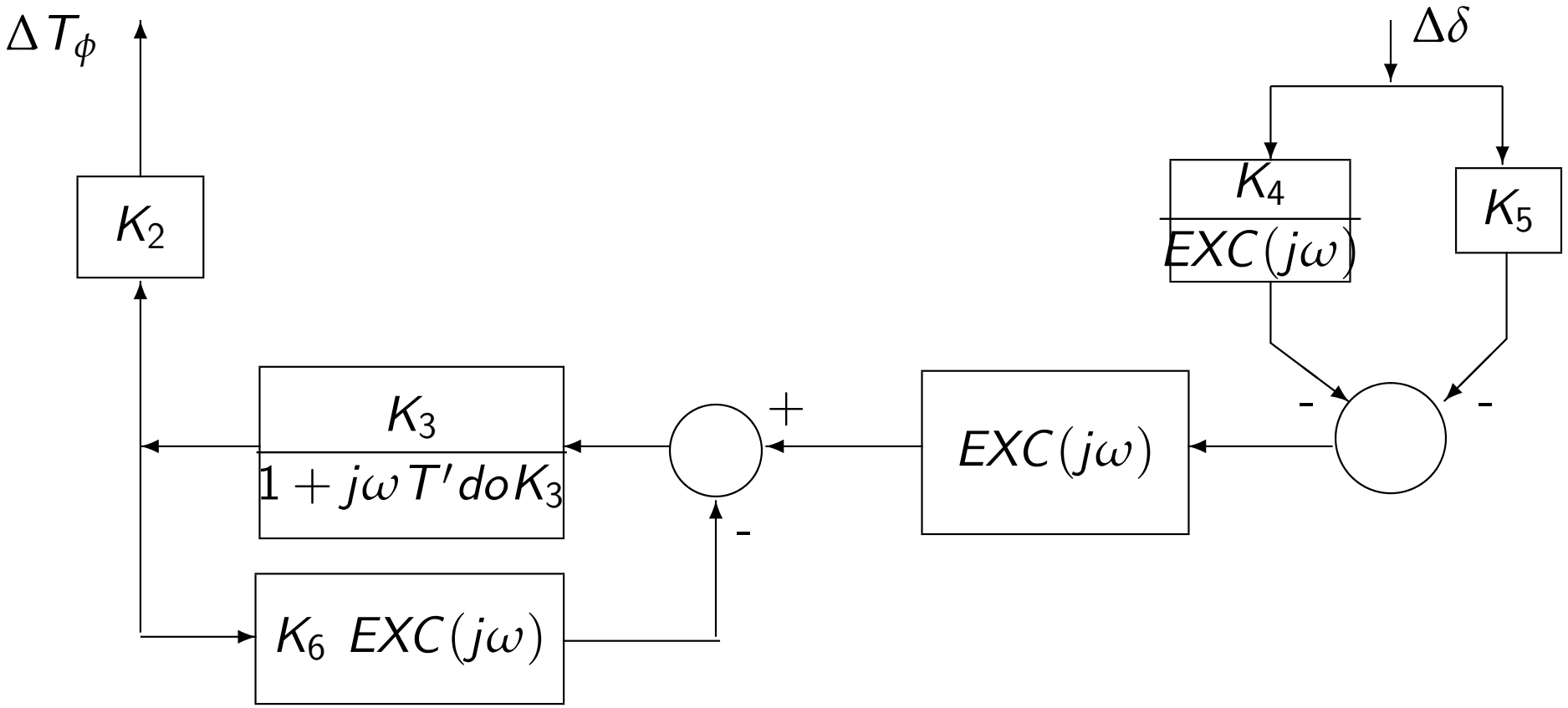
Solução:

- Laço reativo à freqüência ω:



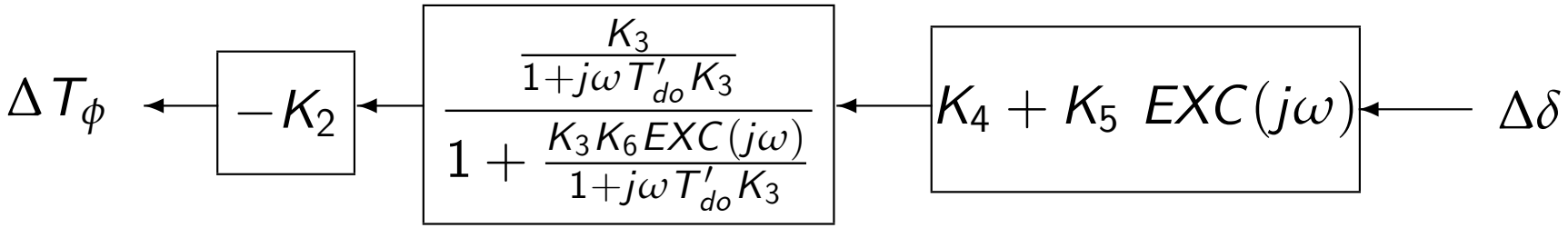
Efeitos do regulador sobre Ts e Td com excitatriz convencional (III)

- Modificação do diagrama de blocos:



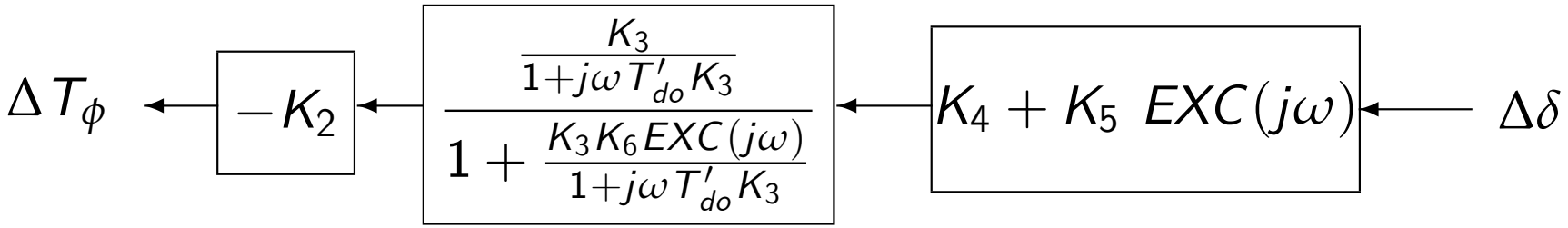
Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (IV)

- Diagrama de blocos equivalente:



Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (IV)

- Diagrama de blocos equivalente:

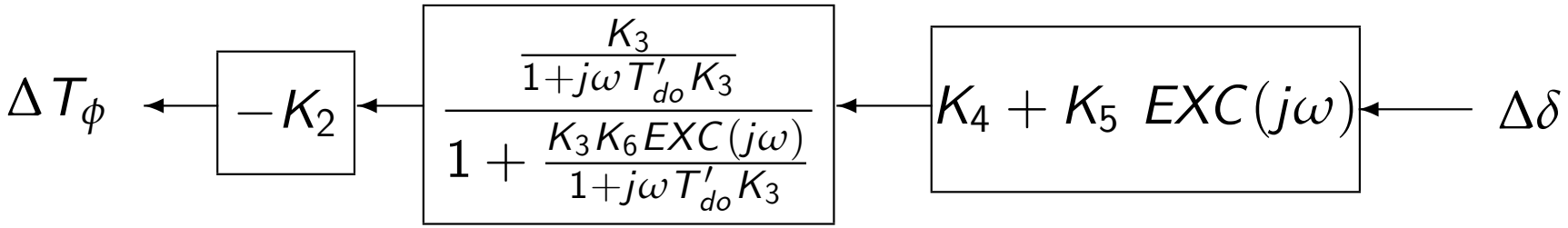


- Fazendo $\omega = \omega_n = 6,65$ e considerando

$$EXC(j\omega_n) = \frac{20}{(1 + j\omega_n\ 0,5)(1 + j\omega_n\ 0,2)}$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (IV)

- Diagrama de blocos equivalente:



- Fazendo $\omega = \omega_n = 6,65$ e considerando

$$EXC(j\omega_n) = \frac{20}{(1 + j\omega_n\ 0,5)(1 + j\omega_n\ 0,2)}$$

- obtém-se

$$\Delta T_\phi\,(j6,65) = (-0,0093 + j0,062)\,\Delta\delta$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (V)

- Torque devido a variações de fluxo:

$$\Delta T_{\phi}\left(j6,65\right) = \left(-0,0093 + j0,062\right)\Delta\delta$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (V)

- Torque devido a variações de fluxo:

$$\Delta T_{\phi}\left(j6,65\right) = \left(-0,0093 + j0,062\right)\Delta\delta$$

- Portanto:

$$K_s^{\phi} = -0,0093$$

$$K_d^{\phi} = 0,062 \times \frac{377}{6,65} = 3,51$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (V)

- Torque devido a variações de fluxo:

$$\Delta T_\phi \left(j6,65\right) = \left(-0,0093 + j0,062\right) \Delta\delta$$

- Portanto:

$$K_s^\phi = -0,0093$$

$$K_d^\phi = 0,062 \times \frac{377}{6,65} = 3,51$$

- Torque de sincronização e amortecimento totais:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta\delta + \Delta T_\phi$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (V)

- Torque devido a variações de fluxo:

$$\Delta T_\phi \left(j6,65\right) = \left(-0,0093 + j0,062\right) \Delta\delta$$

- Portanto:

$$K_s^\phi = -0,0093$$

$$K_d^\phi = 0,062 \times \frac{377}{6,65} = 3,51$$

- Torque de sincronização e amortecimento totais:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta\delta + \Delta T_\phi$$

- Ou, numericamente:

$$\Delta T_e = \left[\left(1,174 - 0,0093\right) + j0,062\right]\Delta\delta = \left(1,165 + j0,062\right) \Delta\delta$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com excitatriz convencional (V)

- Torque devido a variações de fluxo:

$$\Delta T_\phi \left(j6,65\right) = \left(-0,0093 + j0,062\right) \Delta\delta$$

- Portanto:

$$K_s^\phi = -0,0093$$

$$K_d^\phi = 0,062 \times \frac{377}{6,65} = 3,51$$

- Torque de sincronização e amortecimento totais:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta\delta + \Delta T_\phi$$

- Ou, numericamente:

$$\Delta T_e = \left[\left(1,174 - 0,0093\right) + j0,062\right]\Delta\delta = \left(1,165 + j0,062\right) \Delta\delta$$

- *Conclusão:* Sistema <u>*estável*</u>, pois $K_s > 0$ e $K_d > 0$.

Efeitos do RT sobre Ts e Td com RT Tiristorizado (I)

g) Considere um sistema de excitação rápido e de alto ganho descrito por:

$$EXC(s) = \frac{100}{1 + s0,05}$$

Determine K_s e K_d produzidos por variações de fluxo à freqüência ω_n. O ponto de operação considerado é estável com $EXC(s)$?

Efeitos do RT sobre Ts e Td com RT Tiristorizado (I)

g) Considere um sistema de excitação rápido e de alto ganho descrito por:

$$EXC(s) = \frac{100}{1 + s0,05}$$

Determine K_s e K_d produzidos por variações de fluxo à freqüência ω_n. O ponto de operação considerado é estável com $EXC(s)$?

Solução:

Efeitos do RT sobre Ts e Td com RT Tiristorizado (I)

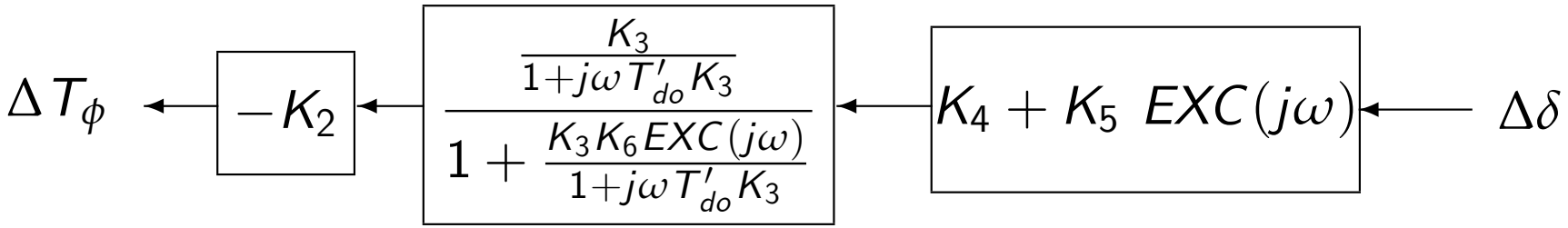
g) Considere um sistema de excitação rápido e de alto ganho descrito por:

$$EXC(s) = \frac{100}{1 + s0,05}$$

Determine K_s e K_d produzidos por variações de fluxo à freqüência ω_n. O ponto de operação considerado é estável com $EXC(s)$?

Solução:

- ΔT_ϕ para este sistema de excitação rápido pode ser obtido do diagrama de blocos:



Efeitos do RT sobre Ts e Td com RT Tiristorizado (II)

- Fazendo $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$ e considerando

$$EXC(s) = \frac{100}{1 + j\omega_n\ 0,05}$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com RT Tiristorizado (II)

- Fazendo $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$ e considerando

$$EXC(s) = \frac{100}{1 + j\omega_n\ 0,05}$$

- obtém-se

$$\Delta T_\phi(s) = (0,0533 - j0,252)\Delta\delta$$

Efeitos do RT sobre Ts e Td com RT Tiristorizado (II)

- Fazendo $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$ e considerando

$$EXC(s) = \frac{100}{1 + j\omega_n\ 0,05}$$

- obtém-se

$$\Delta T_\phi(s) = (0,0533 - j0,252)\Delta\delta$$

- Como a componente de torque de amortecimento é negativa, conclui-se que o sistema de potência é *instável*;

Efeitos do RT sobre Ts e Td com RT Tiristorizado (II)

- Fazendo $\omega = \omega_n = 6,65\ rad/s$ e considerando

$$EXC(s) = \frac{100}{1 + j\omega_n\ 0,05}$$

- obtém-se

$$\Delta T_\phi(s) = (0,0533 - j0,252)\Delta\delta$$

- Como a componente de torque de amortecimento é negativa, conclui-se que o sistema de potência é *instável*;
- A constante de amortecimento equivalente é:

$$D_{eq}^{\phi} = -0,252 \times \frac{377}{6,65} = -14,3$$

Malha de regulação de Tensão Estável? (I)

Gerador a vazio

- Condição mais severa para RT: gerador a vazio ($x_e \rightarrow \infty$);

Malha de regulação de Tensão Estável? (I)

Gerador a vazio

- Condição mais severa para RT: gerador a vazio ($x_e \rightarrow \infty$);
- Nestas condições:

$$K_3 \rightarrow 1 \quad e \quad K_6 \rightarrow 1$$

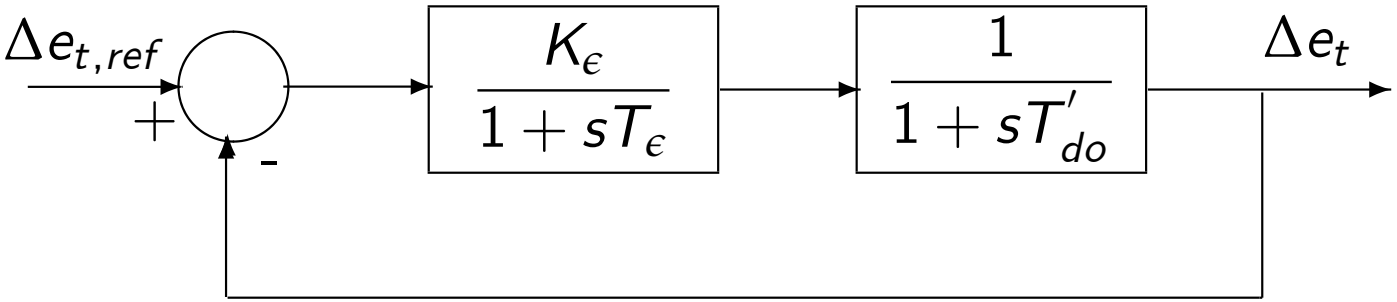
Malha de regulação de Tensão Estável? (I)

Gerador a vazio

- Condição mais severa para RT: gerador a vazio ($x_e \rightarrow \infty$);
- Nestas condições:

$$K_3 \rightarrow 1 \quad e \quad K_6 \rightarrow 1$$

- Diagrama de blocos do RT para gerador a vazio:



Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Freqüência de cruzamento de ganho

- Função de transferência em malha aberta:

$$FTMA(j\omega) = \frac{100}{(1 + j\omega 0,05)(1 + j\omega 8,0)}$$

Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Freqüência de cruzamento de ganho

- Função de transferência em malha aberta:

$$FTMA(j\omega) = \frac{100}{(1 + j\omega 0,05)(1 + j\omega 8,0)}$$

- Freqüência de cruzamento de ganho obtida de:

$$|FTMA(j\omega_1)| = 1,0 \Rightarrow \frac{100}{\sqrt{(1 + 0,0025\omega_1^2)(1 + 64\omega_1^2)}} = 1$$

Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Freqüência de cruzamento de ganho

- Função de transferência em malha aberta:

$$FTMA(j\omega) = \frac{100}{(1 + j\omega 0,05)(1 + j\omega 8,0)}$$

- Freqüência de cruzamento de ganho obtida de:

$$|FTMA(j\omega_1)| = 1,0 \Rightarrow \frac{100}{\sqrt{(1 + 0,0025\omega_1^2)(1 + 64\omega_1^2)}} = 1$$

- o que fornece:

$$\omega_1 = 10,96 \ rad/s$$

Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Margem de fase

- Margem de fase definida como::

$$M_\phi = 180^o + \angle FTMA(j\omega_1)$$

Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Margem de fase

- Margem de fase definida como::

$$M_\phi = 180^o + \angle FTMA(j\omega_1)$$

- Como

$$\angle FTMA(j\omega_1) = -tg^{-1}(0,05\omega_1) - tg^1(8\omega_1) = -118,07^o$$

Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Margem de fase

- Margem de fase definida como::

$$M_\phi = 180^o + \angle FTMA(j\omega_1)$$

- Como

$$\angle FTMA(j\omega_1) = -tg^{-1}(0,05\omega_1) - tg^1(8\omega_1) = -118,07^o$$

- temos que

$$M_\phi = 180^o - 118,07^o = 61,93^o$$

Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Margem de fase

- Margem de fase definida como::

$$M_\phi = 180^o + \angle FTMA(j\omega_1)$$

- Como

$$\angle FTMA(j\omega_1) = -tg^{-1}(0,05\omega_1) - tg^1(8\omega_1) = -118,07^o$$

- temos que

$$M_\phi = 180^o - 118,07^o = 61,93^o$$

- Logo, a M_ϕ da malha de controle de tensão a vazio é considerável $\Rightarrow$ o *sistema de controle de tensão* é bastante estável;

Malha de regulação de Tensão Estável? (II)

Margem de fase

- Margem de fase definida como::

$$M_\phi = 180^o + \angle FTMA(j\omega_1)$$

- Como

$$\angle FTMA(j\omega_1) = -tg^{-1}(0,05\omega_1) - tg^1(8\omega_1) = -118,07^o$$

- temos que

$$M_\phi = 180^o - 118,07^o = 61,93^o$$

- Logo, a M_ϕ da malha de controle de tensão a vazio é considerável $\Rightarrow$ o *sistema de controle de tensão* é bastante estável;
- Portanto, a instabilidade detectada para sistema de excitação rápido deve-se à falta de amortecimento *do sistema de potência.*

Consideração do amortecimento da carga

g) Supondo que a carga fornece um amortecimento tal que $D = 1,0$, calcule o coeficiente de amortecimento líquido do sistema. Re-examinar a questão da estabilidade do ponto de operação.

Consideração do amortecimento da carga

Solução:

Consideração do amortecimento da carga

Solução:

- Considerando o efeito da carga, D_L, o coeficiente de amortecimento líquido é:

$$D_{liq} = D_L + D_{eq}^{\phi}$$

Consideração do amortecimento da carga

Solução:

- Considerando o efeito da carga, D_L, o coeficiente de amortecimento líquido é:

$$D_{liq} = D_L + D_{eq}^{\phi}$$

- sendo D_{eq}^{ϕ} é o coeficiente de amortecimento da máquina devido às variações de fluxo:

$$D_{eq}^{\phi} = -0,252 \times \frac{377}{6,65} = -14,3$$

Consideração do amortecimento da carga

Solução:

- Considerando o efeito da carga, D_L, o coeficiente de amortecimento líquido é:

$$D_{liq} = D_L + D_{eq}^{\phi}$$

- sendo D_{eq}^{ϕ} é o coeficiente de amortecimento da máquina devido às variações de fluxo:

$$D_{eq}^{\phi} = -0,252 \times \frac{377}{6,65} = -14,3$$

- Portanto:

$$D_{liq} = 1,0 + (-14,3) = -13,3$$

Consideração do amortecimento da carga

Solução:

- Considerando o efeito da carga, D_L, o coeficiente de amortecimento líquido é:

$$D_{liq} = D_L + D_{eq}^{\phi}$$

- sendo D_{eq}^{ϕ} é o coeficiente de amortecimento da máquina devido às variações de fluxo:

$$D_{eq}^{\phi} = -0,252 \times \frac{377}{6,65} = -14,3$$

- Portanto:

$$D_{liq} = 1,0 + (-14,3) = -13,3$$

- Conclui-se portanto que, mesmo considerando o amortecimento da carga, o sistema de potência continua *instável*.