

Estabilizadores de Sistemas de Potência: Conceitos Básicos e Projeto

Prof. Antonio Simões Costa

Grupo Sist. Potência - UFSC

Motivação para a Aplicação de Estabilizadores de Sist. Pot.

- A análise do comportamento dinâmico de geradores sujeitos a pequenas perturbações e o exemplo numérico vistos em aula indicaram que:

Motivação para a Aplicação de Estabilizadores de Sist. Pot.

- A análise do comportamento dinâmico de geradores sujeitos a pequenas perturbações e o exemplo numérico vistos em aula indicaram que:
 - A disseminação do uso de sistemas de excitação tiristorizados (*de resposta rápida e altos ganhos*) tende a anular o amortecimento intrínseco dos geradores síncronos;

Motivação para a Aplicação de Estabilizadores de Sist. Pot.

- A análise do comportamento dinâmico de geradores sujeitos a pequenas perturbações e o exemplo numérico vistos em aula indicaram que:
 - A disseminação do uso de sistemas de excitação tiristorizados (*de resposta rápida e altos ganhos*) tende a anular o amortecimento intrínseco dos geradores síncronos;
 - Em condições de operação severas (*carga pesada, sistema de transmissão externo fraco*) o amortecimento de sistemas máquina-barras infinita pode se tornar perigosamente pequeno ou até negativo.

Motivação para a Aplicação de Estabilizadores de Sist. Pot.

- A análise do comportamento dinâmico de geradores sujeitos a pequenas perturbações e o exemplo numérico vistos em aula indicaram que:
 - A disseminação do uso de sistemas de excitação tiristorizados (*de resposta rápida e altos ganhos*) tende a anular o amortecimento intrínseco dos geradores síncronos;
 - Em condições de operação severas (*carga pesada, sistema de transmissão externo fraco*) o amortecimento de sistemas máquina-barras infinita pode se tornar perigosamente pequeno ou até negativo.
- Surge portanto a necessidade de gerar torque de amortecimento através da inserção de novas malhas de controle;

Motivação para a Aplicação de Estabilizadores de Sist. Pot.

- A análise do comportamento dinâmico de geradores sujeitos a pequenas perturbações e o exemplo numérico vistos em aula indicaram que:
 - A disseminação do uso de sistemas de excitação tiristorizados (*de resposta rápida e altos ganhos*) tende a anular o amortecimento intrínseco dos geradores síncronos;
 - Em condições de operação severas (*carga pesada, sistema de transmissão externo fraco*) o amortecimento de sistemas máquina-barras infinita pode se tornar perigosamente pequeno ou até negativo.
- Surge portanto a necessidade de gerar torque de amortecimento através da inserção de novas malhas de controle;
- Os novos componentes de controle introduzidos para gerar amortecimento são genericamente denominados *Estabilizadores de Sistemas de Potência*.

Componentes de Amortecimento Natural Existentes

Os componentes de amortecimento natural de um sistema máquina-barra infinita são devidos aos seguintes efeitos:

- *Reação da armadura*, representada no diagrama de H-P através da constante K_4 Efeito de K_4 ;
- *Amortecimento da carga*, representado pelo parâmetro D_L Efeito da Carga.

- Outro componente de torque elétrico importante é devido à sensibilidade da tensão a variações no ângulo δ na presença de regulador, representada por K_5 Efeito de K_5 ;
- Na presença de Sistemas de Excitação rápidos de alto ganho e sob condições desfavoráveis, o torque elétrico via K_5 produz os seguintes efeitos:
 - Aumento do torque sincronizante em condições de operação desfavoráveis ($\checkmark$);
 - Redução acentuada do amortecimento via K_4 ($\times$);
 - Produção de torque de amortecimento negativo ($\times$).

Efeito Desejado do ESP

- Para contrabalançar a redução de amortecimento, pode-se pensar em produzi-lo diretamente a partir da medição de $\Delta\omega_G$ D_{pss} ;
- Entretanto, esta estratégia não é fisicamente realizável;
- *Alternativa:* inserção do *senal adicional* no comparador do Regulador de Tensão $ESP-RAT$;
- Dificuldades:
 - O torque elétrico finalmente produzido não necessariamente será de amortecimento;
 - Necessidade de se realizar a síntese de um função de transferência $ESP_{\omega}(s)$ para garantir os resultados desejados $ESP-RAT$.

Sinal Estabilizador Derivado da Velocidade

- O candidato natural para sinal adicional a ser usado como entrada do *ESP* é o sinal de velocidade;

Sinal Estabilizador Derivado da Velocidade

- O candidato natural para sinal adicional a ser usado como entrada do *ESP* é o sinal de velocidade;
- O sinal de saída da *FT do ESP* é aplicado ao ponto de soma do regulador de tensão;

Sinal Estabilizador Derivado da Velocidade

- O candidato natural para sinal adicional a ser usado como entrada do *ESP* é o sinal de velocidade;
- O sinal de saída da *FT do ESP* é aplicado ao ponto de soma do regulador de tensão;
- A tensão terminal é portanto modulada pelo sinal estabilizador $\Rightarrow$ variação da potência terminal, e se a fase do *ESP* estiver correta, é produzido torque de amortecimento.

Sinal Estabilizador Derivado da Velocidade

- O candidato natural para sinal adicional a ser usado como entrada do *ESP* é o sinal de velocidade;
- O sinal de saída da *FT do ESP* é aplicado ao ponto de soma do regulador de tensão;
- A tensão terminal é portanto modulada pelo sinal estabilizador $\Rightarrow$ variação da potência terminal, e se a fase do *ESP* estiver correta, é produzido torque de amortecimento.
- O *ESP* deve produzir um torque elétrico em fase com a velocidade, isto é, puramente de amortecimento, mesmo sendo aplicado no ponto de soma do regulador de tensão **ESP+RAT**.

Função de Transferência $GEP(s)$

- Para cumprir o requisito de produção de torque de amortecimento, a $FT_{ESP_\omega}(s)$ deve compensar o atraso de fase da FT :

$$GEP(s) = \frac{\Delta T_e(s)}{\Delta V_{ref}(s)}$$

Função de Transferência $GEP(s)$

- Para cumprir o requisito de produção de torque de amortecimento, a $FT_{ESP_\omega}(s)$ deve compensar o atraso de fase da FT :

$$GEP(s) = \frac{\Delta T_e(s)}{\Delta V_{ref}(s)}$$

- $GEP(s)$ depende de parâmetros do **G**erador, Sistema de **E**xcitação e Sistema de **P**otência externo **GEP**.

Função de Transferência Ideal para o Estabilizador

- Conforme visto anteriormente, $GEP(s)$ pode ser aproximada como:

$$GEP(s) \approx \frac{K_2/K_6}{(1 + s \frac{T'_{do}}{K_\epsilon K_6})(1 + sT_\epsilon)}$$

Função de Transferência Ideal para o Estabilizador

- Conforme visto anteriormente, $GEP(s)$ pode ser aproximada como:

$$GEP(s) \approx \frac{K_2 / K_6}{(1 + s \frac{T'_{do}}{K_\epsilon K_6})(1 + s T_\epsilon)}$$

- Portanto, para que o torque produzido pelo ESP seja puramente de amortecimento sobre todo o espectro de frequências com constante de amortecimento equivalente D_{PSS} , deve-se ter:

$$ESP_\omega(s) \times GEP(s) = D_{PSS}$$

ou

$$ESP_{\omega, ideal}(s) = \frac{D_{PSS} K_6}{K_2} \left(1 + s \frac{T'_{do}}{K_\epsilon K_6} \right) (1 + s T_\epsilon)$$

Dificuldades Práticas para a FT ideal do Estabilizador

$$ESP_{\omega,ideal}(s) = \frac{D_{PSS} K_6}{K_2} \left(1 + s \frac{T'_{do}}{K_{\epsilon} K_6} \right) (1 + s T_{\epsilon})$$

- $ESP_{\omega,ideal}(s)$ não é realizável (*grau do numerador* > *grau do denominador*) $\Rightarrow$ não é possível gerar torque puramente amortecedor ao longo de todo o espectro de frequências;

Dificuldades Práticas para a FT ideal do Estabilizador

$$ESP_{\omega,ideal}(s) = \frac{D_{PSS} K_6}{K_2} \left(1 + s \frac{T'_{do}}{K_{\epsilon} K_6} \right) (1 + s T_{\epsilon})$$

- $ESP_{\omega,ideal}(s)$ não é realizável (*grau do numerador > grau do denominador*) $\Rightarrow$ não é possível gerar torque puramente amortecedor ao longo de todo o espectro de frequências;
- o sinal estabilizador não deve produzir efeitos (*offset*) em regime permanente sobre a tensão terminal $\Rightarrow ESP_{\omega}(s)$ deve tender a um sinal derivativo a baixas frequências.

Função de Transferência Real para o Estabilizador (I)

- Não-realizabilidade $ESP_{\omega,ideal}(s) \Rightarrow ESP_{\omega}(s)$ deve ser sintetizada para fornecer o amortecimento desejado apenas em frequências próximas à *frequência do modo local*;

Função de Transferência Real para o Estabilizador (I)

- Não-realizabilidade $ESP_{\omega,ideal}(s) \Rightarrow ESP_{\omega}(s)$ deve ser sintetizada para fornecer o amortecimento desejado apenas em frequências próximas à *frequência do modo local*;
- Para isso, sintetiza-se uma FT realizável com suficiente avanço de fase para compensar o atraso de fase de $GEP(s)$ na frequência ω_n :

$$ESP_{\omega}(s) = K_{PSS} \times \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \times \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4}$$

Função de Transferência Real para o Estabilizador (II)

- Para evitar o *offset* da referência de tensão em frequências próximas ao regime permanente, usa-se um bloco *washout* do tipo

$$\frac{sT_w}{1 + sT_w}$$

em série com os blocos de avanço-atraso de fase;

Função de Transferência Real para o Estabilizador (II)

- Para evitar o *offset* da referência de tensão em frequências próximas ao regime permanente, usa-se um bloco *washout* do tipo

$$\frac{sT_w}{1 + sT_w}$$

em série com os blocos de avanço-atraso de fase;

- Portanto, uma *FT* realística para o *ESP* é:

$$ESP_{\omega, \text{real}}(s) = K_{PSS} \times \frac{sT_w}{1 + sT_w} \times \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \times \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4}$$

Função de Transferência Real para o Estabilizador (II)

- Para evitar o *offset* da referência de tensão em frequências próximas ao regime permanente, usa-se um bloco *washout* do tipo

$$\frac{sT_w}{1 + sT_w}$$

em série com os blocos de avanço-atraso de fase;

- Portanto, uma *FT* realística para o *ESP* é:

$$ESP_{\omega, \text{real}}(s) = K_{PSS} \times \frac{sT_w}{1 + sT_w} \times \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \times \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4}$$

- Frequentemente considera-se os blocos de avanço-atraso com parâmetros iguais. Logo:

$$ESP_{\omega, \text{real}}(s) = K_{PSS} \times \frac{sT_w}{1 + sT_w} \times \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^2$$

Exemplo (Cont. exemplo anterior)

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

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

Determinação da fase do ESP (I)

- h) Determinar o avanço de fase da função de transferência através da qual um sinal estabilizador derivado da velocidade angular ω_G , deverá ser processado a fim de produzir apenas torque de amortecimento, à frequência natural de oscilação ω_n .

Solução:

- A fase do sinal estabilizador derivado da velocidade deve ser ajustada para compensar o atraso de fase da função de transferência $GEP(j\omega)$ na frequência dos modos eletromecânicos, ω_n ;
- $GEP(s)$ (sem aprox.) é dada por gep s/ aprox.

$$GEP(s) = \frac{K_2 K_3 K_\epsilon}{(1 + sT_\epsilon)(1 + sK_3 T'_{do}) + K_3 K_6 K_\epsilon}$$

Determinação da fase do ESP (II)

- Com $K_e = 100$, $T_e = 0,05 \text{ s}$ e $s = j\omega_n = j6,65 \text{ rad/s}$, tem-se:

$$GEP(j6,65) = 2,616 \angle (-74,3^\circ)$$

- Para assegurar uma contribuição puramente de amortecimento do *ESP*:

$$\angle ESP(j\omega_n) = -\angle GEP(j\omega_n)$$

- Logo:

$$\angle PSS_\omega(j\omega_n) = 74,3^\circ$$

Determinação do ganho do ESP (I)

- i) Determine o ganho da função de transferência do estabilizador para que, nas condições do item (g.3), o coeficiente de amortecimento equivalente seja igual a 1,0.

Solução:

Determinação do ganho do ESP (I)

- i) Determine o ganho da função de transferência do estabilizador para que, nas condições do item (g.3), o coeficiente de amortecimento equivalente seja igual a 1,0.

Solução:

- O sinal estabilizador contribuirá para o *coeficiente de amortecimento líquido* da máquina, portanto:

$$D_{líq} = D_L + D_{eq}^{\phi} + D_{PSS}$$

Determinação do ganho do ESP (I)

- i) Determine o ganho da função de transferência do estabilizador para que, nas condições do item (g.3), o coeficiente de amortecimento equivalente seja igual a 1,0.

Solução:

- O sinal estabilizador contribuirá para o *coeficiente de amortecimento líquido* da máquina, portanto:

$$D_{líq} = D_L + D_{eq}^{\phi} + D_{PSS}$$

- Como o *ESP* atua através de $GEP(\delta)$, tem-se:

$$D_{PSS} = |GEP(j\omega_n)| \times |PSS(j\omega_n)|$$

Determinação do ganho do ESP (I)

- i) Determine o ganho da função de transferência do estabilizador para que, nas condições do item (g.3), o coeficiente de amortecimento equivalente seja igual a 1,0.

Solução:

- O sinal estabilizador contribuirá para o *coeficiente de amortecimento líquido* da máquina, portanto:

$$D_{líq} = D_L + D_{eq}^{\phi} + D_{PSS}$$

- Como o *ESP* atua através de $GEP(\delta)$, tem-se:

$$D_{PSS} = |GEP(j\omega_n)| \times |PSS(j\omega_n)|$$

- Para que o coeficiente líquido de amortecimento seja igual a 1,0, é necessário portanto que:

$$D_L + D_{eq}^{\phi} + |GEP(j\omega_n)| \times |PSS(j\omega_n)| = 1,0$$

Determinação do ganho do ESP (II)

- Para que o coeficiente líquido de amortecimento seja igual a 1,0 :

$$1,0 + (-14,3) + 2,616 |PSS(j\omega_n)| = 1,0$$

Determinação do ganho do ESP (II)

- Para que o coeficiente líquido de amortecimento seja igual a 1,0 :

$$1,0 + (-14,3) + 2,616 |PSS(j\omega_n)| = 1,0$$

- que fornece:

$$|PSS(j\omega_n)| = 5,47$$

Determinação do ganho do ESP (II)

- Para que o coeficiente líquido de amortecimento seja igual a 1,0 :

$$1,0 + (-14,3) + 2,616 |PSS(j\omega_n)| = 1,0$$

- que fornece:

$$|PSS(j\omega_n)| = 5,47$$

- Portanto, para cumprir as especificações do sinal estabilizador deveremos ter:

$$PSS(j\omega_n) = 5,47 \angle 74,3^\circ$$

Determinação da Função de Transf. Real do ESP (I)

- j) Determine a função de transferência de um estabilizador real que forneça o amortecimento especificado no item anterior.

Solução:

Determinação da Função de Transf. Real do ESP (I)

- j) Determine a função de transferência de um estabilizador real que forneça o amortecimento especificado no item anterior.

Solução:

- Considere: a FT real do *ESP* dada por:

$$ESP_{\omega, \text{real}}(s) = K_{PSS} \times \frac{sT_w}{1 + sT_w} \times \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^2$$

onde $T_w = 1,6 \text{ s}$ e $T_2 = 0,01 \text{ s}$;

Determinação da Função de Transf. Real do ESP (I)

- j) Determine a função de transferência de um estabilizador real que forneça o amortecimento especificado no item anterior.

Solução:

- Considere: a FT real do *ESP* dada por:

$$ESP_{\omega, \text{real}}(s) = K_{PSS} \times \frac{sT_w}{1 + sT_w} \times \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^2$$

onde $T_w = 1,6 \text{ s}$ e $T_2 = 0,01 \text{ s}$;

- Incógnitas a determinar: K_{PSS} e T_1 .

- Na frequência do modo local, devemos ter:

$$ESP_{\omega, \text{real}}(j\omega_n) = 5,47 \angle 74,3^\circ$$

com $\omega_n = 6,65 \text{ rad/s}$;

- Na frequência do modo local, devemos ter:

$$ESP_{\omega, \text{real}}(j\omega_n) = 5,47 \angle 74,3^\circ$$

com $\omega_n = 6,65 \text{ rad/s}$;

- Equacionando a fase, temos:

$$\angle \left(\frac{j\omega_n T_w}{1 + j\omega_n T_w} \right) + 2\angle \left(\frac{1 + j\omega_n T_1}{1 + j\omega_n T_2} \right) = 74,3^\circ$$

$$T_1 = 0,1186 \text{ s}$$

Determinação da FT Real do ESP - Cálculo de K_{pss}

- Usando o valor determinado de T_1 , podemos equacionar os ganhos na frequência ω_n :

$$K_{PSS} \times \left| \frac{j\omega_n T_w}{1 + j\omega_n T_w} \right| \times \left| \frac{1 + j\omega_n T_1}{1 + j\omega_n T_2} \right|^2 = 5,47$$

- Usando o valor determinado de T_1 , podemos equacionar os ganhos na frequência ω_n :

$$K_{PSS} \times \left| \frac{j\omega_n T_w}{1 + j\omega_n T_w} \right| \times \left| \frac{1 + j\omega_n T_1}{1 + j\omega_n T_2} \right|^2 = 5,47$$

- o que fornece

$$K_{PSS} = 3,40$$

Determinação da FT Real do ESP - Cálculo de K_{pss}

- Usando o valor determinado de T_1 , podemos equacionar os ganhos na frequência ω_n :

$$K_{PSS} \times \left| \frac{j\omega_n T_w}{1 + j\omega_n T_w} \right| \times \left| \frac{1 + j\omega_n T_1}{1 + j\omega_n T_2} \right|^2 = 5,47$$

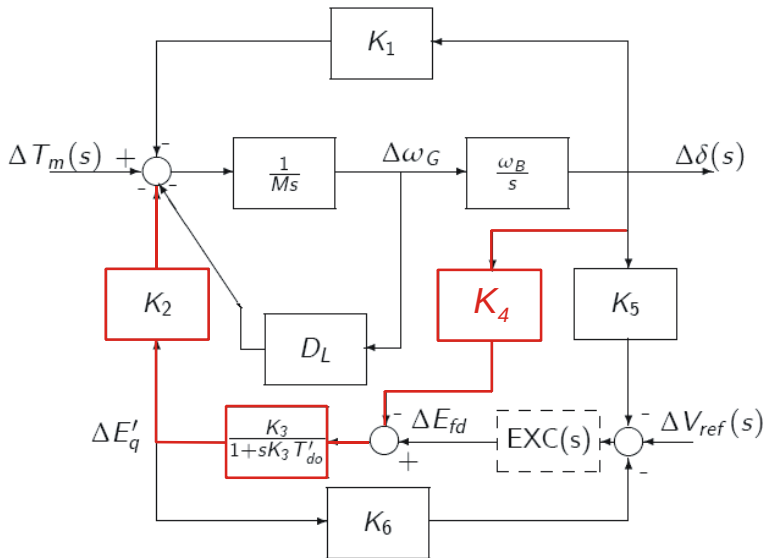
- o que fornece

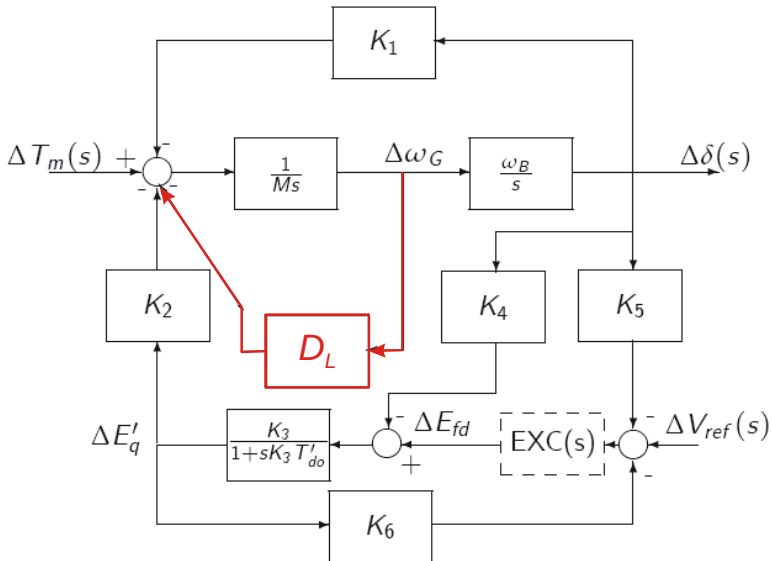
$$K_{PSS} = 3,40$$

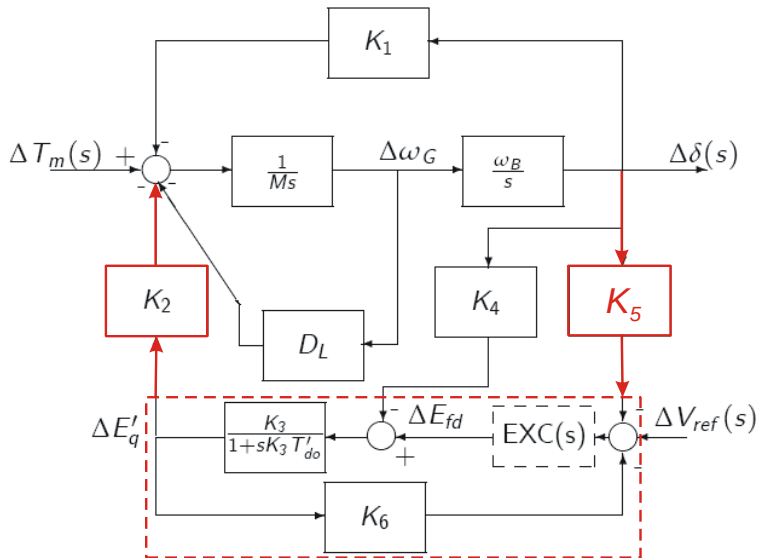
- Portanto, a FT do *ESP* real é dada por

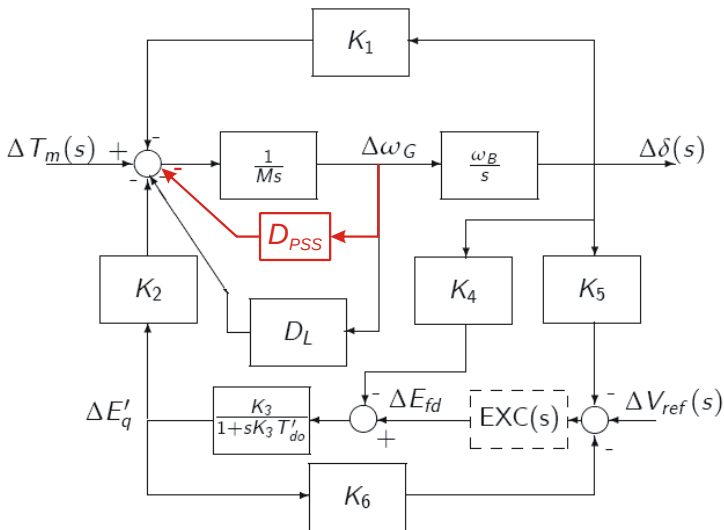
$$ESP_{\omega, \text{real}}(s) = 3,40 \times \frac{s1,60}{1 + s1,60} \times \left(\frac{1 + s0,1186}{1 + s0,01} \right)^2$$

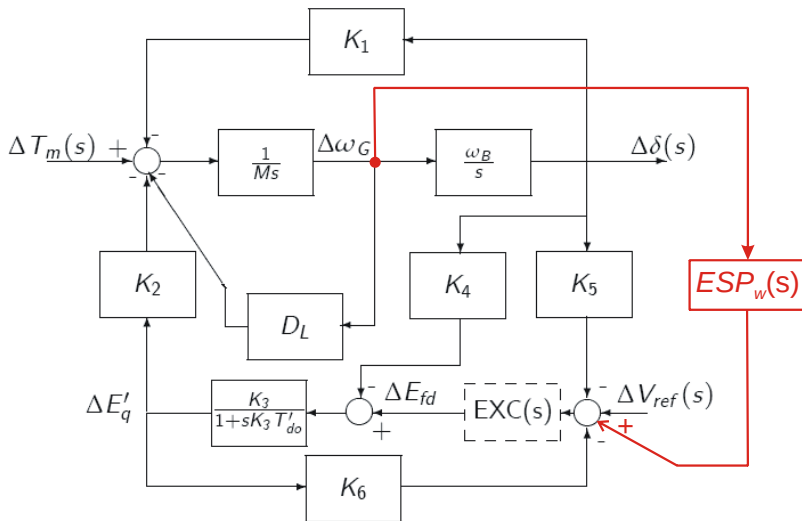
FIM

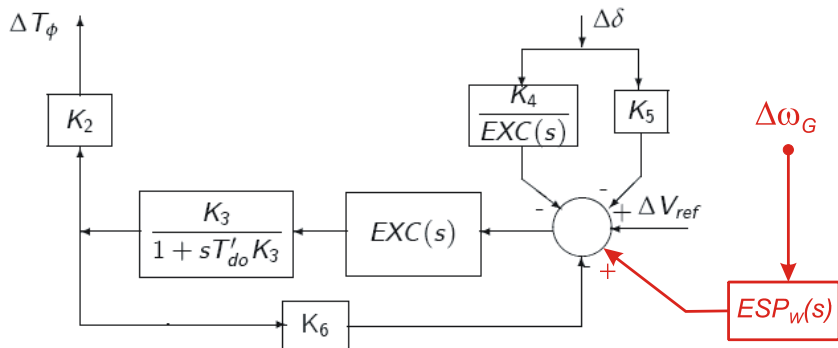












Retorna

