

Modelagem e Controle de Geradores Síncronos

- UERJ
- PROMINP
- Prof. José Paulo V. S. da Cunha
- Rio de Janeiro, 09 de outubro de 2012.

Referências

- Krause, P. C., Wasynczuk, O. and Sudhoff, S. D., Analysis of Electric Machinery, IEEE Press, 1995. Seção 3.3 e Capítulo 5.
- Kundur, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994. Capítulos 3, 8 e 9.
- IEC 60034-1, Rotating electrical machines Part 1: Rating and performance, 2004.

Geradores Síncronos

- Os mais usados na geração de energia elétrica
- Usualmente acionados por:
 - Turbinas hidráulicas;
 - Turbinas a vapor;
 - Motores a combustão interna;
 - etc.
- Podem ser:
 - Conectados à rede ou
 - **Isolados, nosso foco**, ex.: ilhas, plataformas, navios, equipamentos remotos, sistemas de emergência, etc.

Controle de Geradores Síncronos Isolados

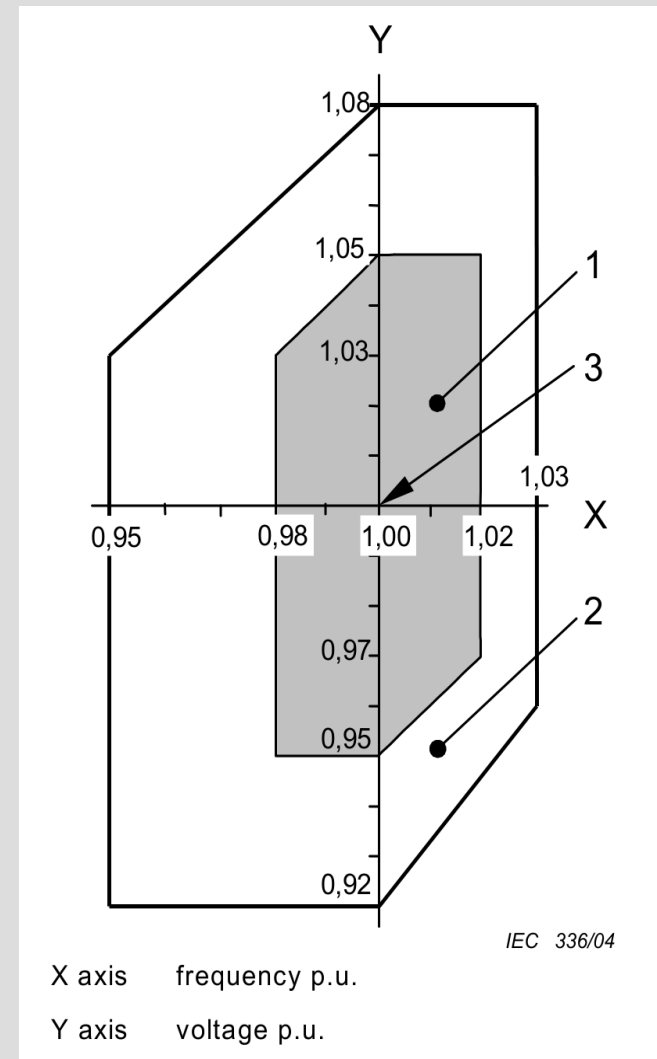
- Alguns requisitos para unidades de geração (Kundur, 1994):
 - Capacidade de atender às mudanças na carga, aleatórias embora dentro de ciclos diários, semanais e sazonais. Entretanto, a energia elétrica não pode ser armazenada em grandes quantidades. Assim, é preciso controlar e manter reserva adequada de potência ativa e reativa.
 - A qualidade da energia elétrica deve atender requisitos em relação a variações de frequência, variações de tensão e confiabilidade.

Controle de Geradores Síncronos Isolados

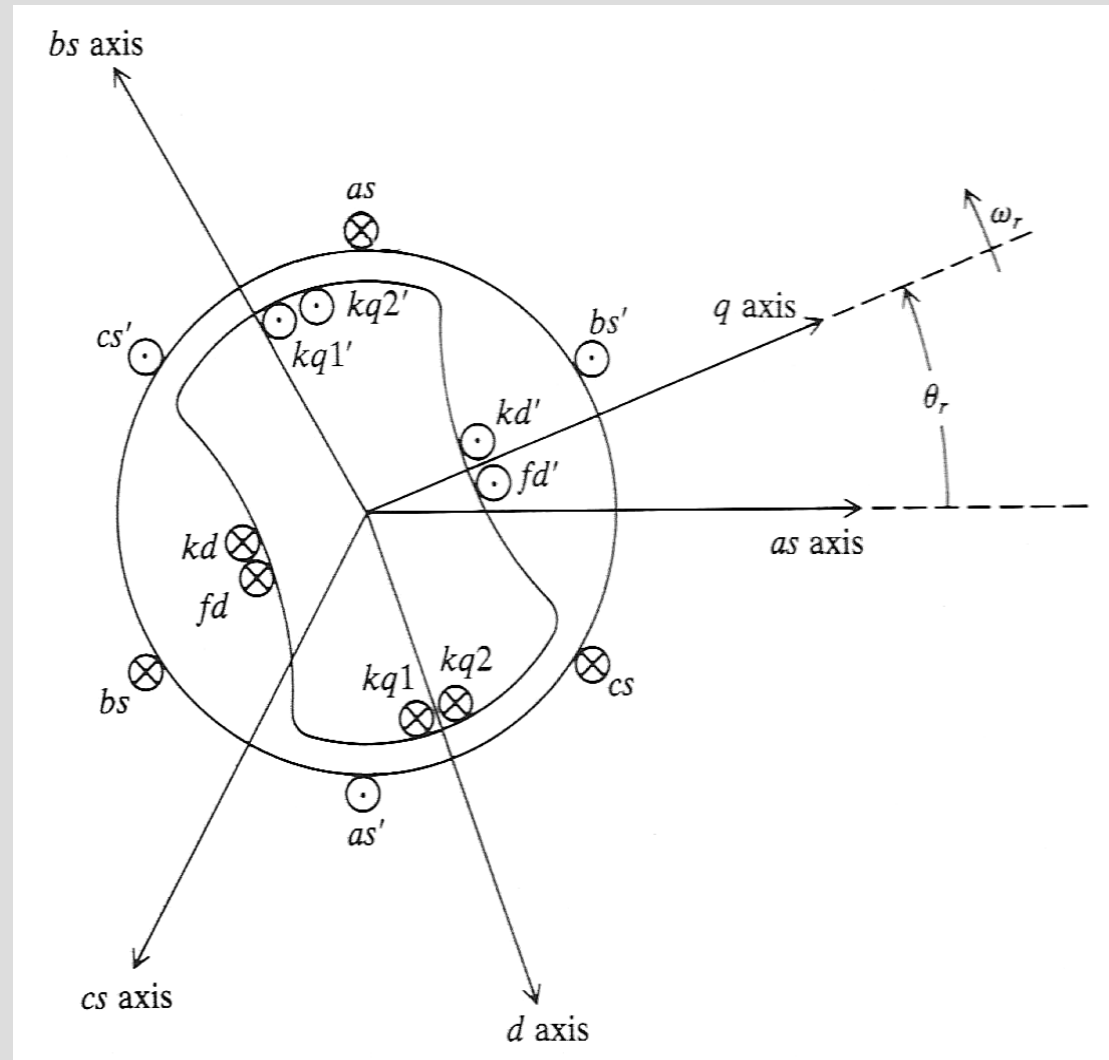
- Poucos geradores e pouca inércia para armazenar energia cinética dificultam o controle de sistemas isolados
- Variáveis que devem ser reguladas:
 - Frequência e
 - Tensão.
- Aproveita-se o pouco acoplamento entre essas variáveis para dividir o problema:
 - Controle de frequência = controle de velocidade;
 - Controle de tensão = controle de excitação.

Limites para Geradores Síncronos (IEC 60034-1, 2004)

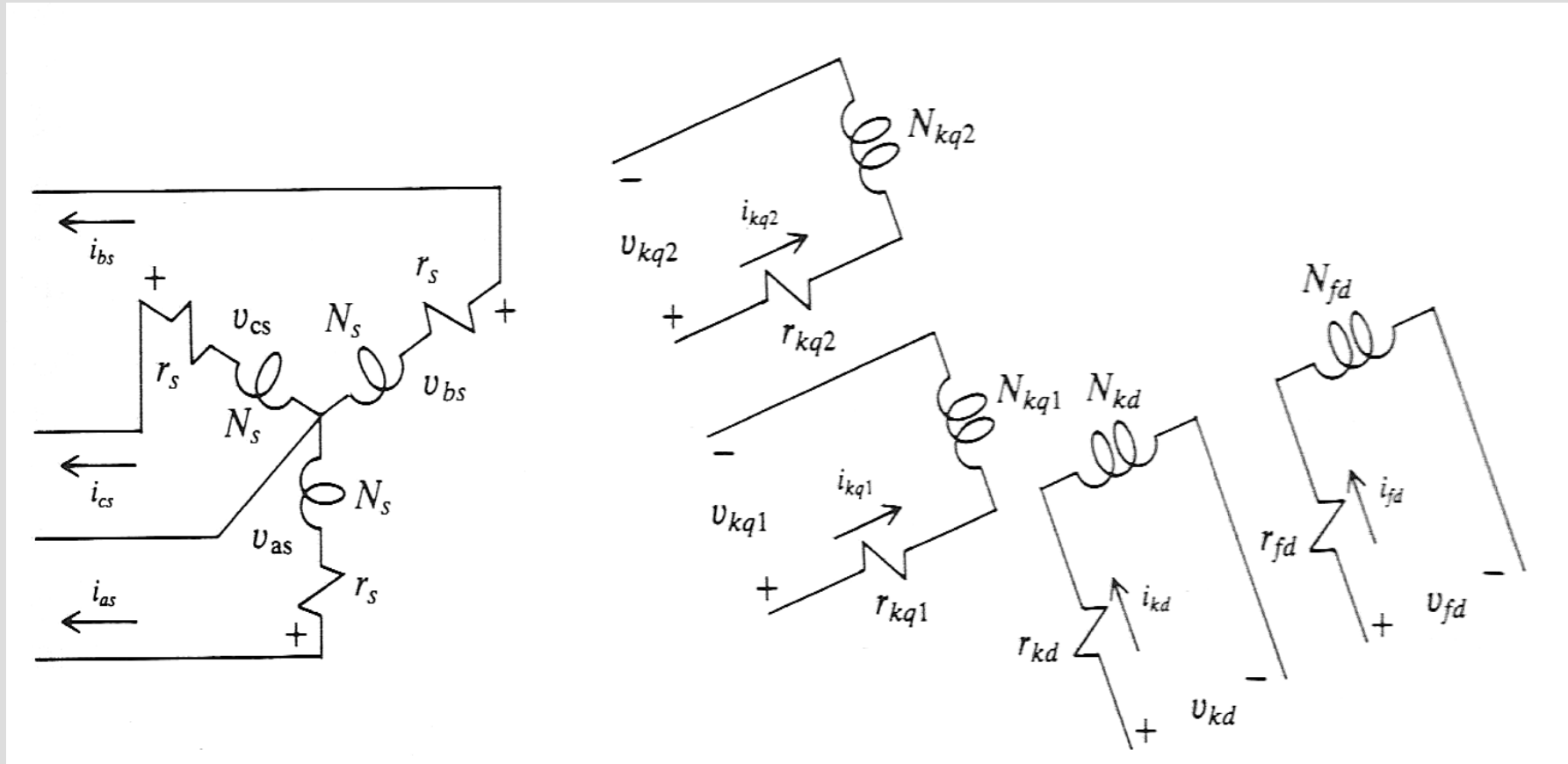
- Tolerância da frequência: $\pm 2\%$
- Tolerância da tensão: $\pm 5\%$



Geradores Síncronos



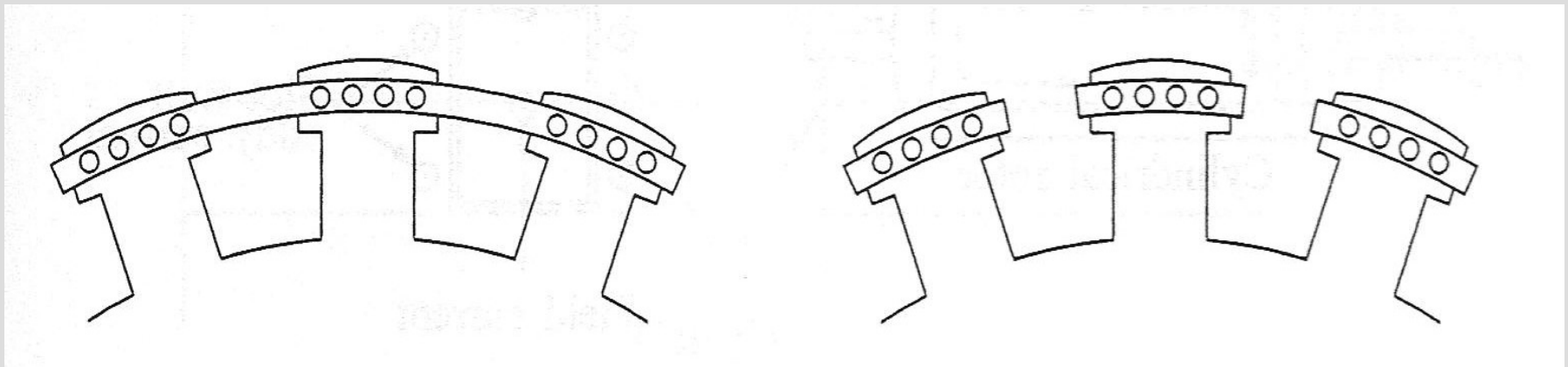
Geradores Síncronos



Estator

Rotor

Amortecedores em Geradores Síncronos



Contínuo

Não contínuo

Transformação do Sistema Estacionário para $dq0$

onde:

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abcs} \quad (3.3-1)$$

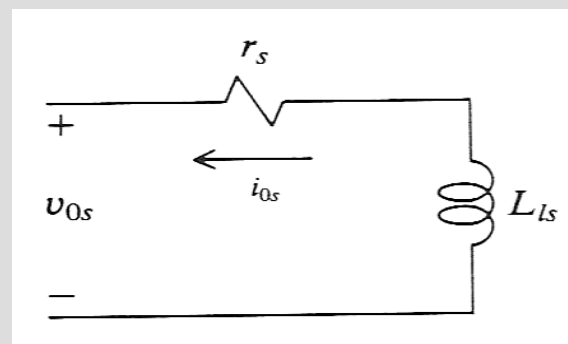
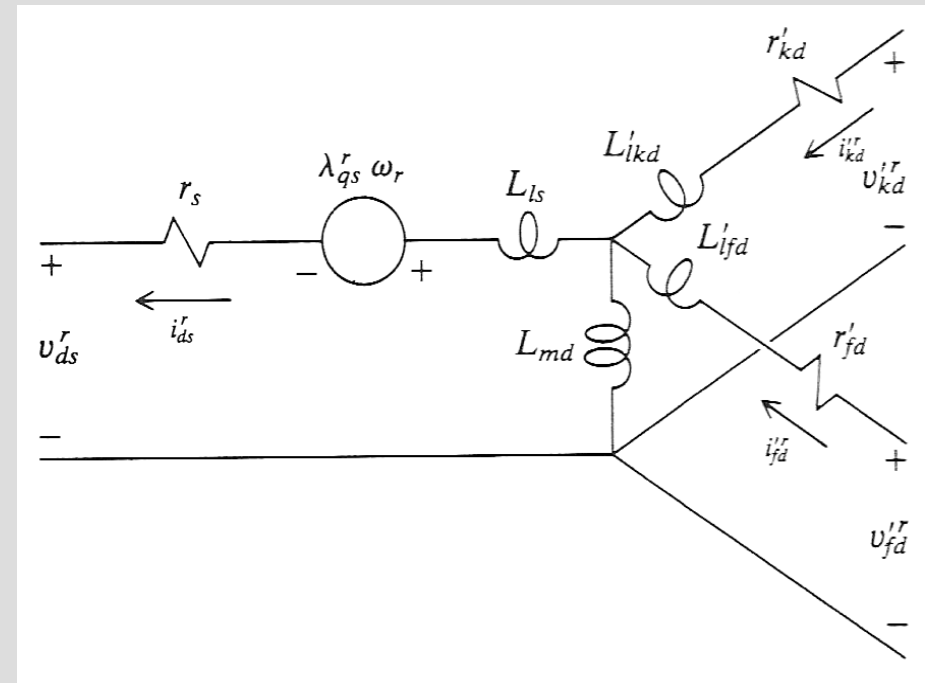
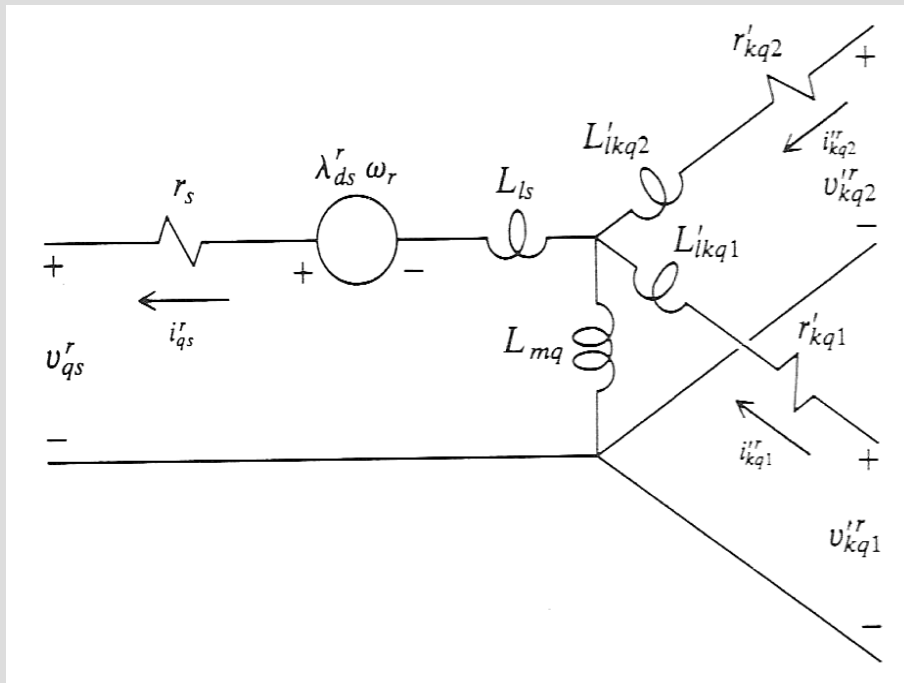
$$(\mathbf{f}_{qd0s})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \quad (3.3-2)$$

$$(\mathbf{f}_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (3.3-3)$$

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.3-4)$$

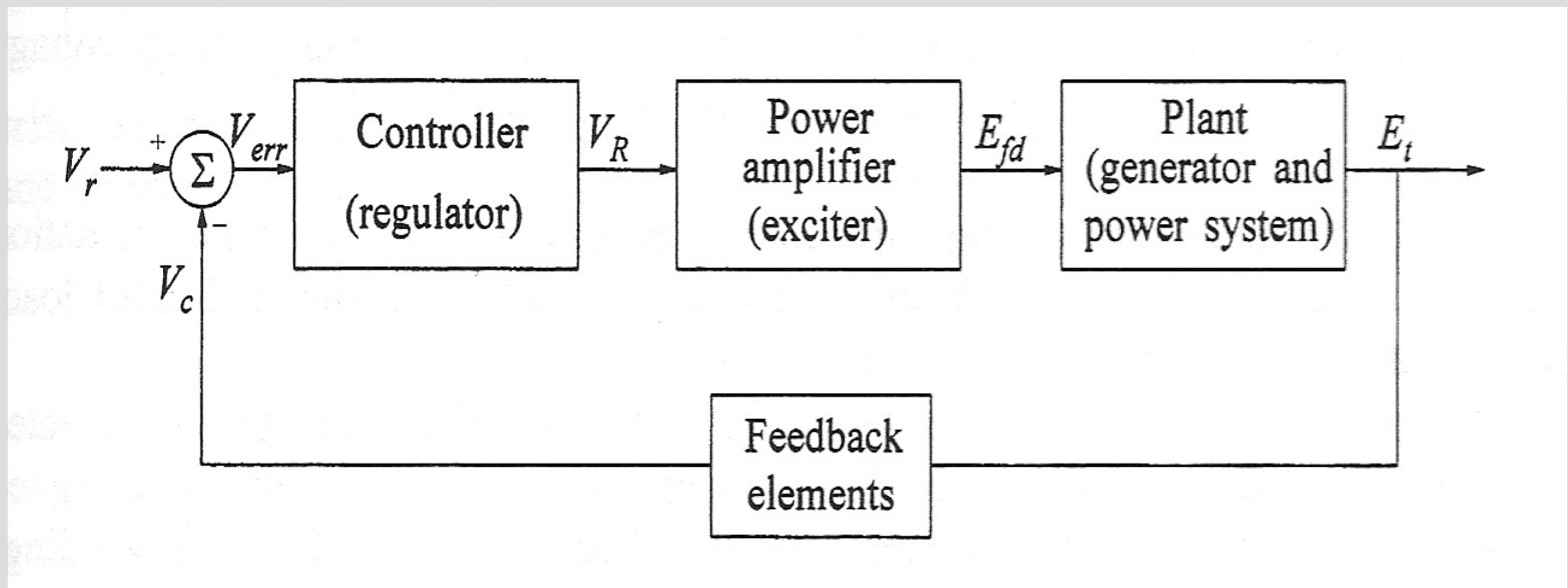
$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (3.3-5)$$

Circuitos Equivalentes no Sistema $dq0$



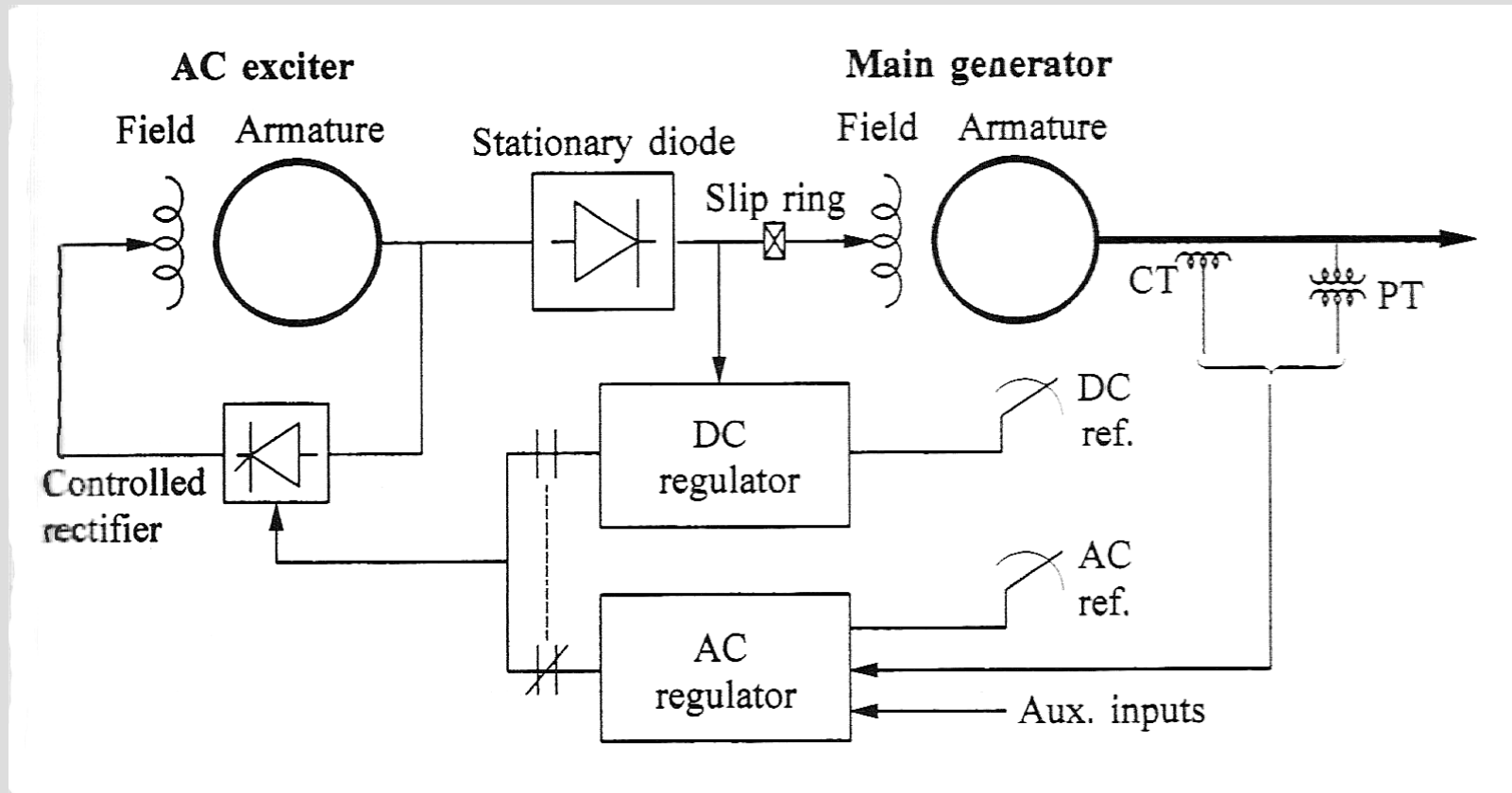
Controle de Excitação

- Usado para regular tensão
- Sistema realimentado clássico:



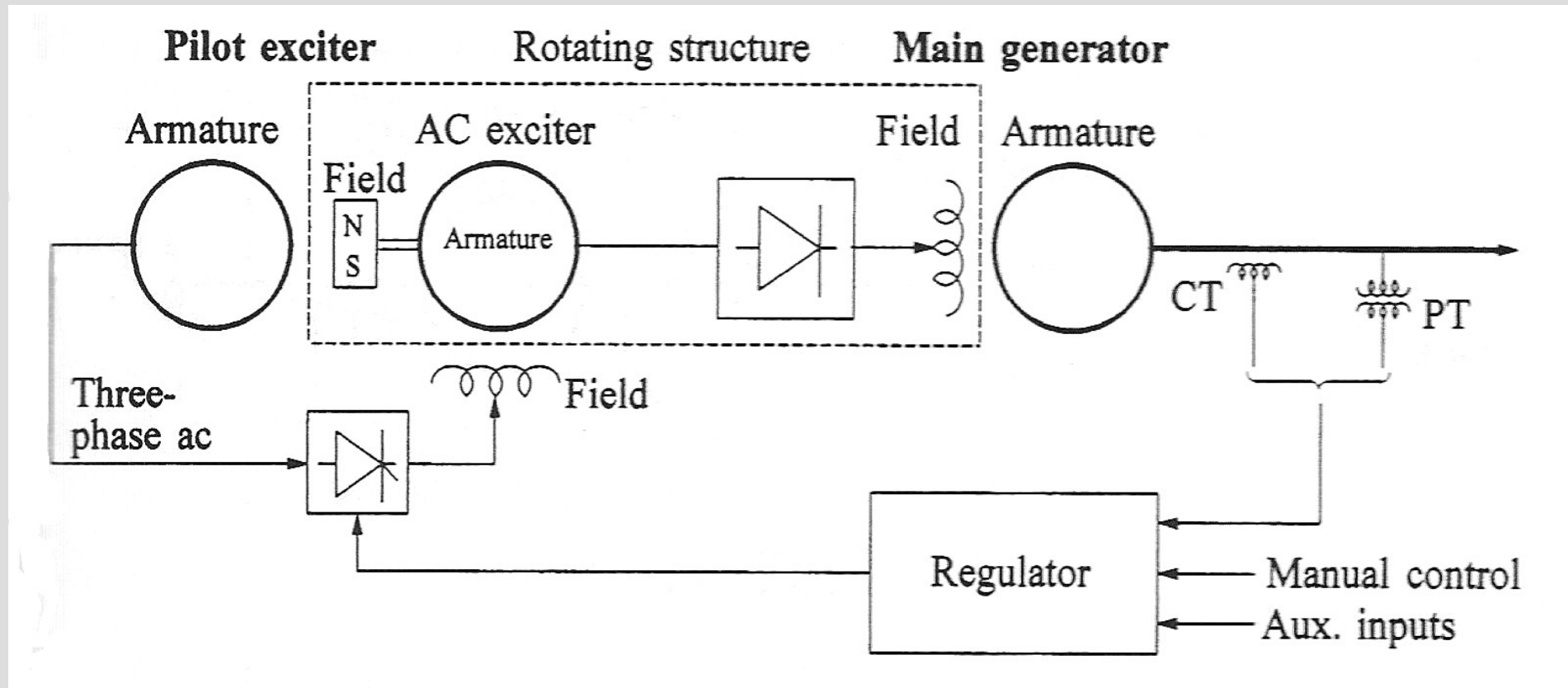
Controle de Excitação

- Excitador CA controlado pelo campo:



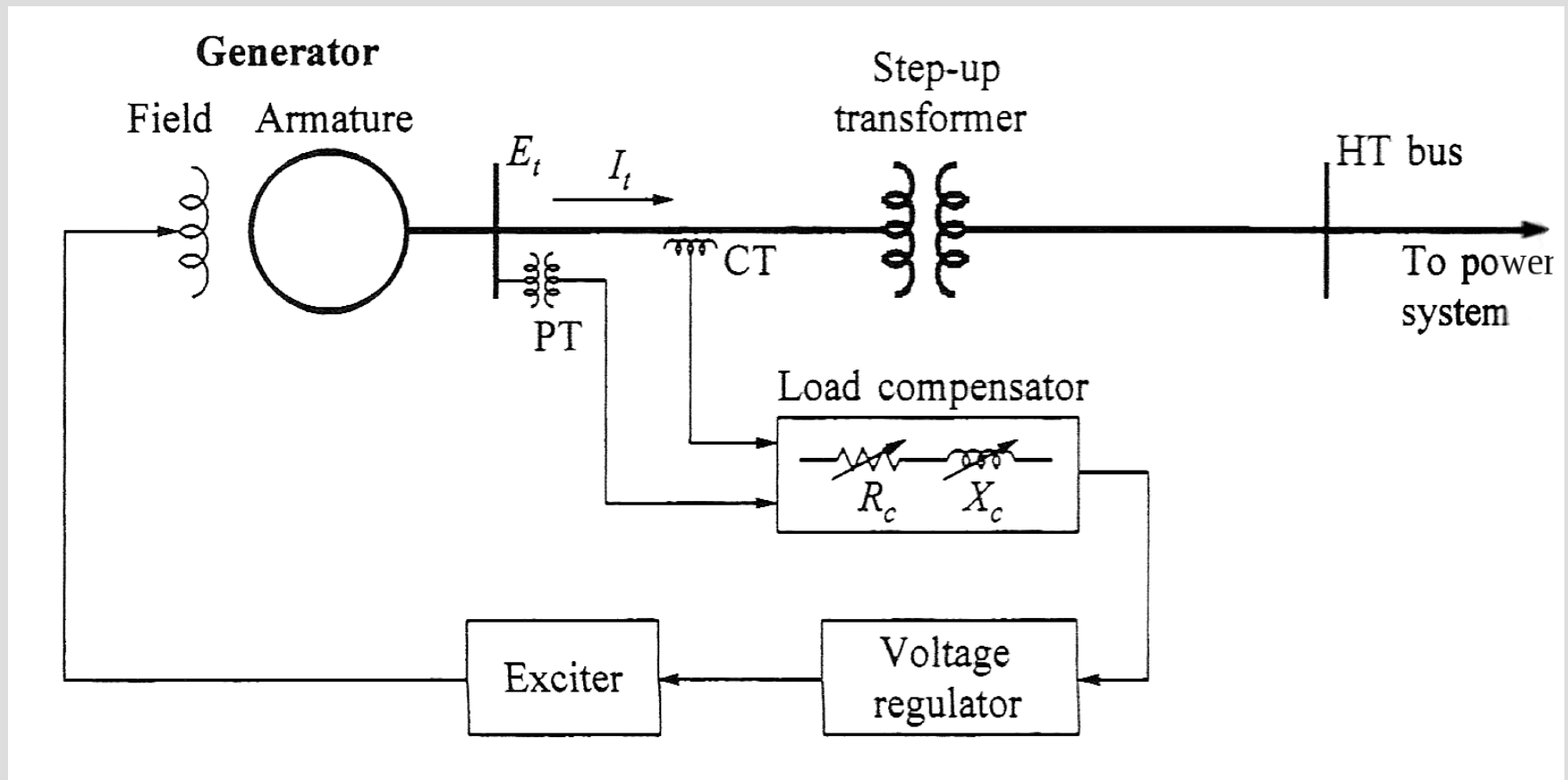
Controle de Excitação

- Excitador CA sem escovas controlado pelo campo:



Controle de Excitação

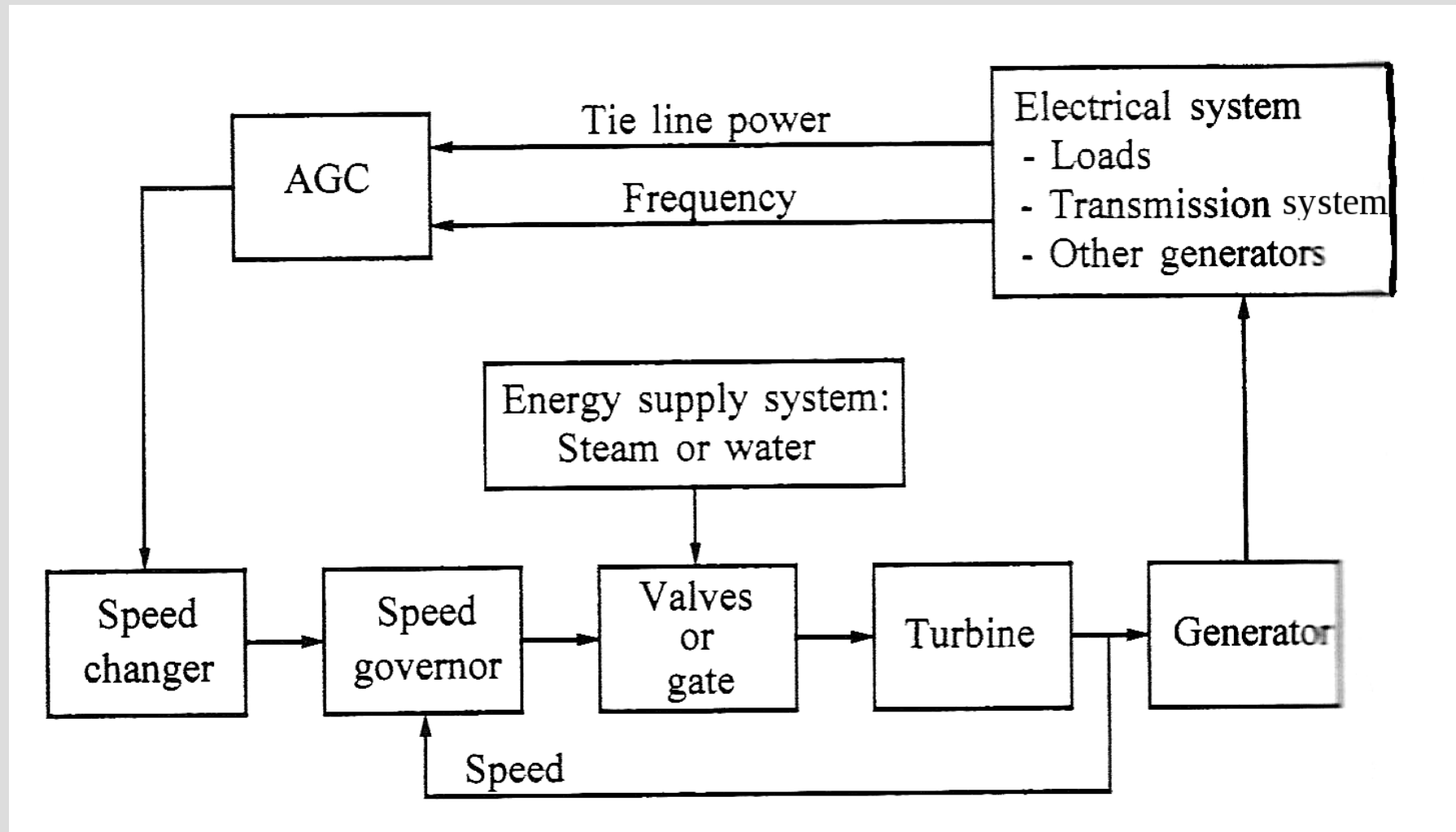
- Compensador de carga:



Controle do Acionamento do Gerador Síncrono

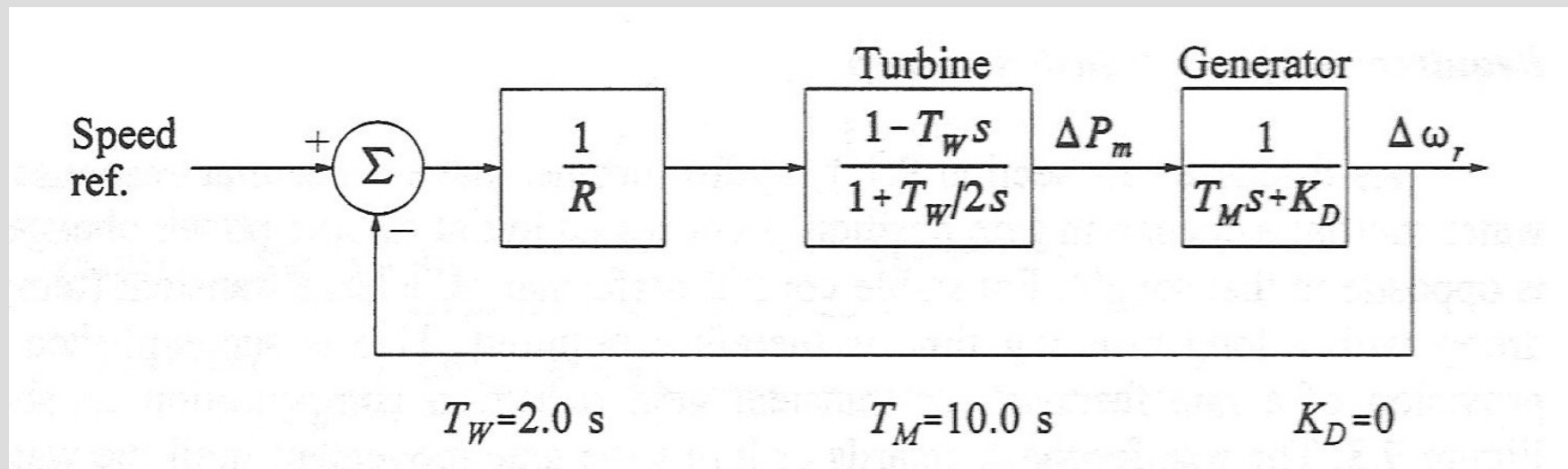
- Controle da máquina (ex.: turbina) que aciona o gerador
- Controle da velocidade é usado para controlar frequência elétrica em geradores síncronos
- Este controle também afeta a potência gerada
- Em sistemas conectados à rede, o controle de velocidade deve estar subordinado ao controle da geração (AGC – *automatic generation control*)

Controle do Acionamento do Gerador Síncrono



Controle do Acionamento do Gerador Síncrono

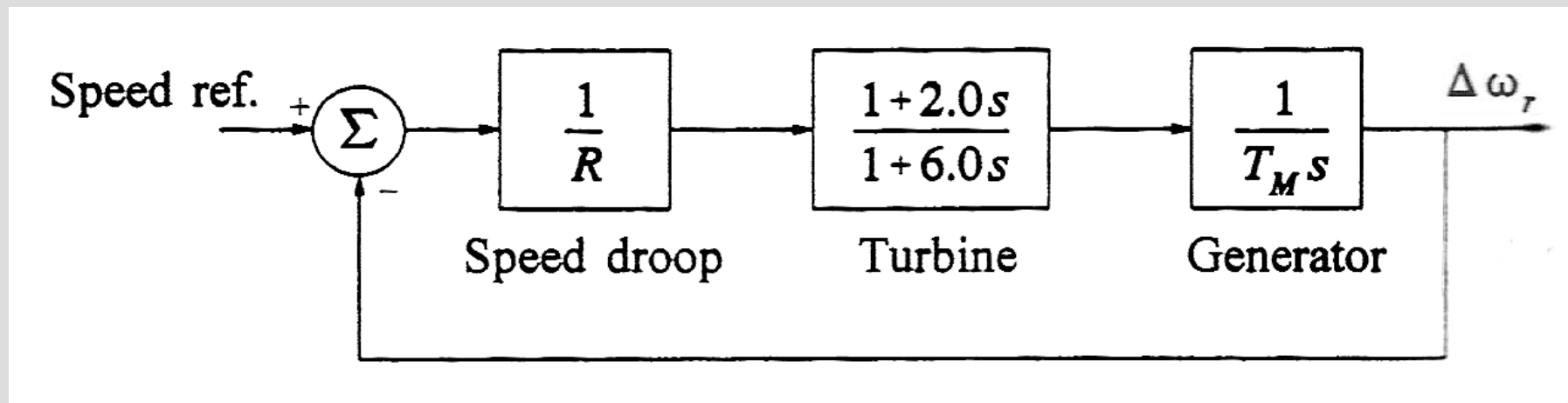
- Controle de turbina hidráulica:



- A dinâmica do sistema hidráulico é de fase não-mínima pois há zero no semiplano complexo direito em $s = +1/T_W$. Isto dificulta controle.

Controle do Acionamento do Gerador Síncrono

- Controle de turbina a vapor:



Conclusões

- Controle de geradores síncronos em sistemas isolados tem duas malhas principais:
 - Controle de excitação: regula tensão e compensa mudanças da potência reativa;
 - Controle de velocidade: regula frequência e compensa mudança da potência ativa.
- Em sistemas isolados pode-se usar controle P, I, PI, etc., eventualmente combinados com não-linearidades (ex., saturações), *feedforward*, etc.

Conclusões

- Estratégia de controle de velocidade depende da máquina que aciona o gerador.
- O controle de geradores conectados à rede é mais complexo:
 - Demanda coordenação do sistema de geração;
 - A estabilidade do sistema deve ser considerada.