Modelagem e Controle de Conversores

Controle clássico de conversores: Efeitos da realimentação

Prof. Cassiano Rech

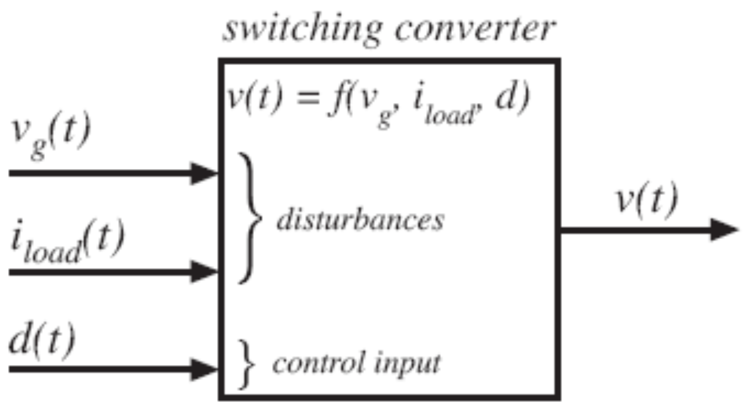
cassiano@ieee.org

Sumário

- Controle clássico de conversores estáticos
  - Efeitos da realimentação
  - Ações básicas de controle

Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

Os sinais de saída dos conversores estáticos são uma função das fontes de energia, das razões cíclicas dos interruptores e da carga, assim como dos parâmetros do conversor.

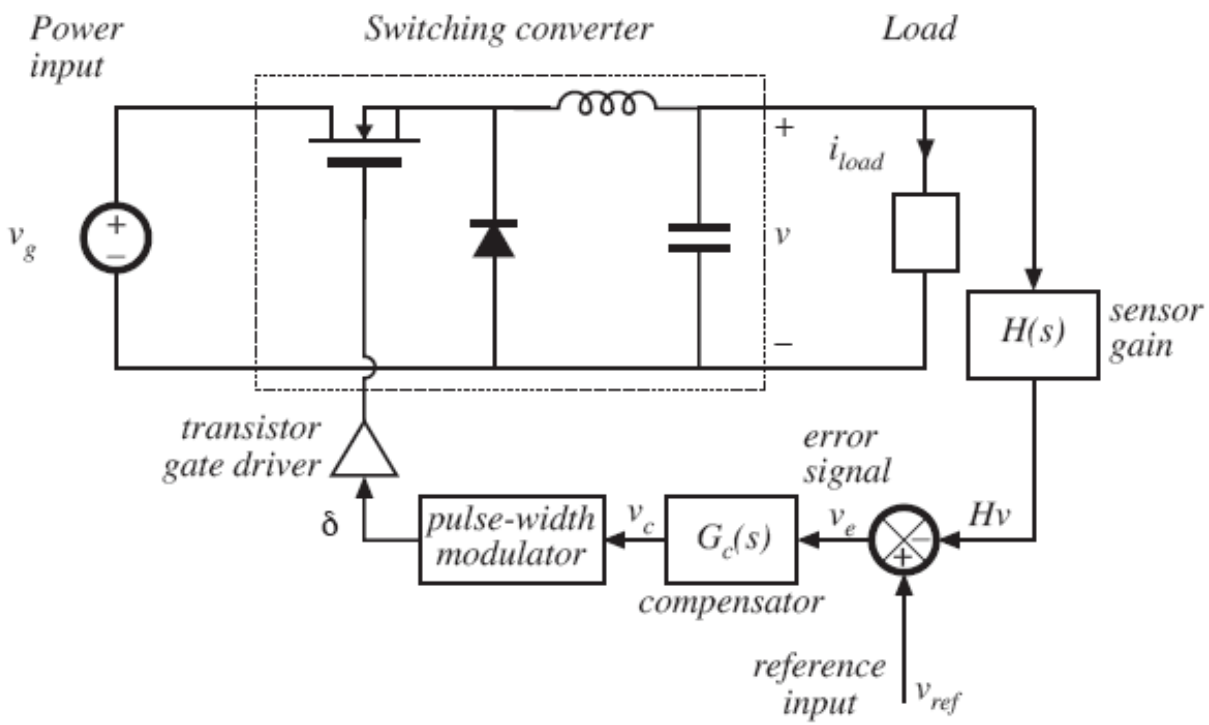


$$\hat{v}(s) = G_{vd}(s)\hat{d}(s) + G_{vg}(s)\hat{v}_g(s) + Z_{out}(s)\hat{i}_{load}(s)$$

Não podemos esperar que os sinais de saída se manterão ajustados nos valores de interesse para todas as condições de operação, apenas mantendo a razão cíclica fixa

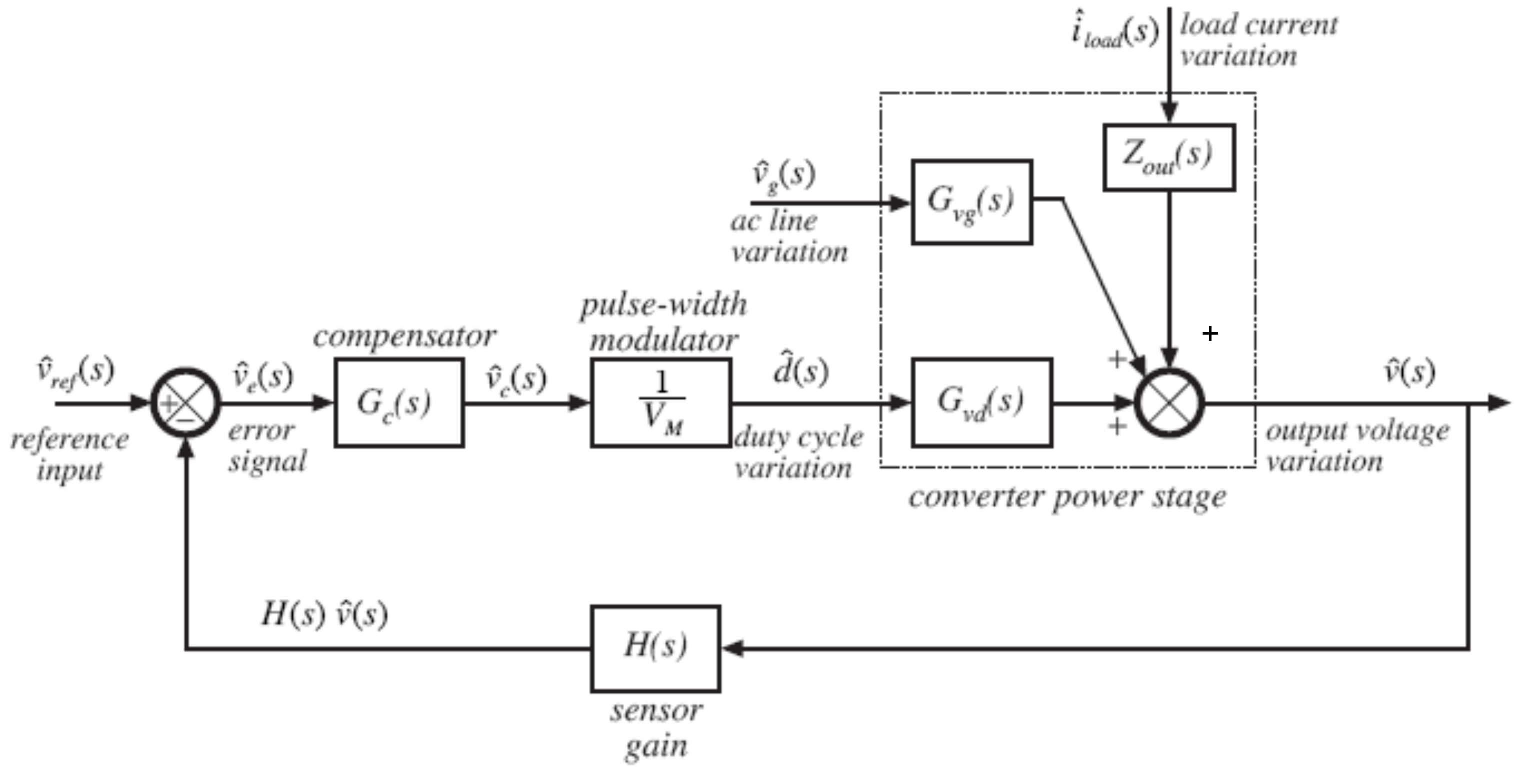
Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

O objetivo da realimentação é construir um circuito que ajuste a razão cíclica automaticamente para obter os sinais de saída desejados, mesmo com distúrbios nas fontes e na carga, ou com variações paramétricas



Controle clássico de conversores: Efeitos da realimentação

Para analisar os efeitos da realimentação no desempenho do sistema em malha fechada, iremos utilizar o seguinte diagrama de blocos que representa o **modelo de pequenos sinais do sistema em malha fechada**.



Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

Uma vez que existem três sinais de entrada, a tensão de saída pode ser obtida por superposição:

$$\hat{v}(s) = v_{ref}\frac{G_c G_{vd}/V_M}{1+HG_c G_{vd}/V_M} + v_g\frac{G_{vg}}{1+HG_c G_{vd}/V_M} + i_{load}\frac{Z_{out}}{1+HG_c G_{vd}/V_M}$$

E também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\boxed{\hat{v}(s) = v_{ref}\frac{1}{H}\frac{T}{1+T} + v_g\frac{G_{vg}}{1+T} + i_{load}\frac{Z_{out}}{1+T}}$$

onde:

$$T(s) = H(s)G_c(s)G_{vd}(s)/V_M = \text{"ganho de malha"}$$

$T(s)$ = função de transferência de malha aberta

(produto de todos os ganhos da malha de realimentação negativa)

Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

Função de transferência entre a tensão de saída e a tensão de referência

$$\left.\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_{ref}(s)}\right|_{\substack{\hat{v}_g = 0 \\ i_{load} = 0}} = \frac{1}{H(s)}\,\frac{T(s)}{1+T(s)}$$

If the loop gain is large in magnitude, i.e., $\| T \| >> 1$, then $(1+T) \approx T$ and $T/(1+T) \approx T/T = 1$. The transfer function then becomes

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_{ref}(s)} \approx \frac{1}{H(s)}$$

which is independent of the gains in the forward path of the loop.

This result applies equally well to dc values:

$$\frac{V}{V_{ref}} = \frac{1}{H(0)}\,\frac{T(0)}{1+T(0)} \approx \frac{1}{H(0)}$$

Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

Função de transferência entre a tensão de saída e a tensão de entrada

With addition of negative feedback, the line-to-output transfer function becomes:

$$\left.\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)}\right|_{\substack{\hat{v}_{ref}=0 \\ \hat{i}_{load}=0}} = \frac{G_{vg}(s)}{1+T(s)}$$

Feedback reduces the line-to-output transfer function by a factor of

$$\frac{1}{1+T(s)}$$

If $T(s)$ is large in magnitude, then the line-to-output transfer function becomes small.

Controle clássico de conversores: Efeitos da realimentação

Função de transferência entre a tensão de saída e a corrente na carga

With addition of negative feedback, the output impedance becomes:

$$\left.\frac{\hat{v}(s)}{\pm\,\hat{i}_{load}(s)}\right|_{\substack{\hat{v}_{ref}=0\\ \hat{v}_g=0}} = \frac{Z_{out}(s)}{1+T(s)}$$

Feedback reduces the output impedance by a factor of

$$\frac{1}{1+T(s)}$$

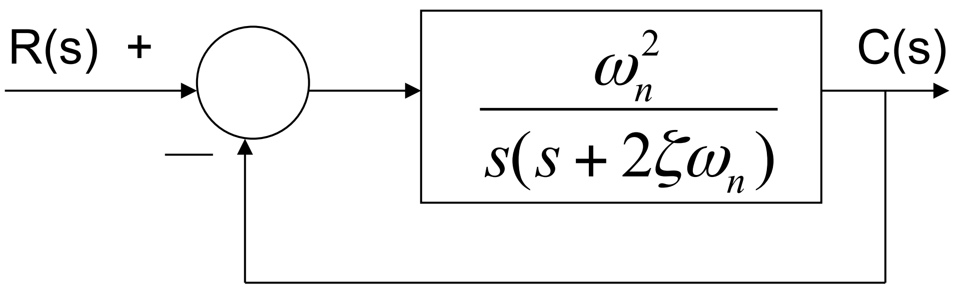
If $T(s)$ is large in magnitude, then the output impedance is greatly reduced in magnitude.

Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

Relação entre margem de fase e coeficiente de amortecimento em malha fechada

- **Qual a margem de fase (φ_m) necessária?**

- Considere o seguinte sistema em malha fechada:



$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s+2\zeta\omega_n)}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

Relação entre margem de fase e coeficiente de amortecimento em malha fechada

- Para encontrar a margem de fase deve-se, primeiramente, encontrar a frequência de cruzamento do ganho por 0 dB:

$$\left|T\left(j\omega_1\right)\right| = 1 \quad \Rightarrow \quad \omega_1 = \omega_n \sqrt{-2\zeta^2 + \sqrt{1 + 4\zeta^4}}$$

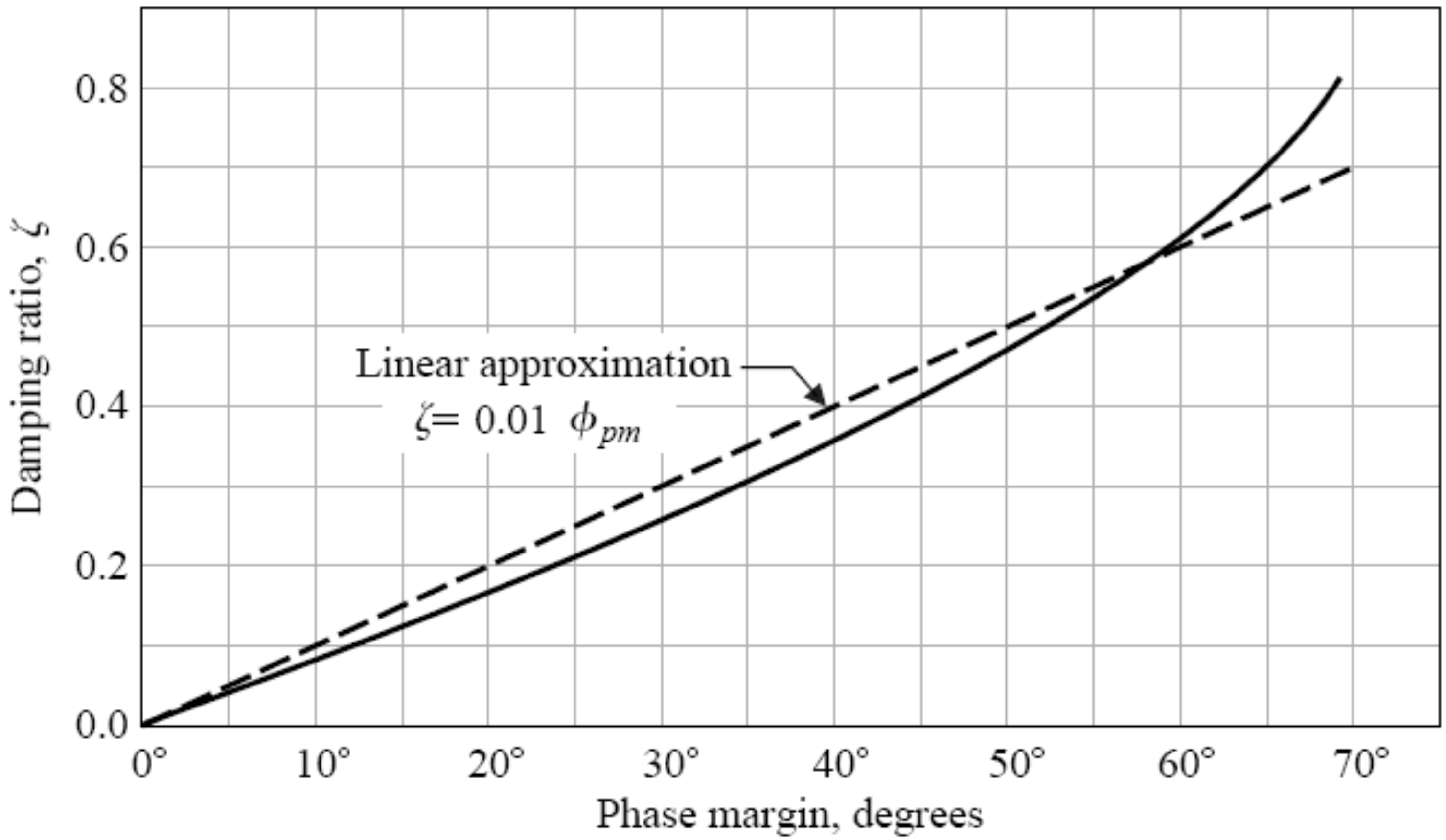
- Assim, pode-se encontrar a fase na frequência de cruzamento do ganho por 0 dB e, portanto, a margem de fase:

$$\angle T(j\omega_1) = -90^0 - \tan^{-1} \frac{\omega_1}{2\zeta\omega_n} = -90^0 - \tan^{-1} \frac{\sqrt{-2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 + 1}}}{2\zeta}$$

$$\Phi_M = 90^0 - \tan^{-1} \frac{\sqrt{-2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 + 1}}}{2\zeta} = \tan^{-1} \frac{2\zeta}{\sqrt{-2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 + 1}}}$$

Controle clássico de conversores:
Efeitos da realimentação

Relação entre margem de fase e coeficiente de amortecimento em malha fechada



AÇÕES BÁSICAS DE CONTROLE

Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle

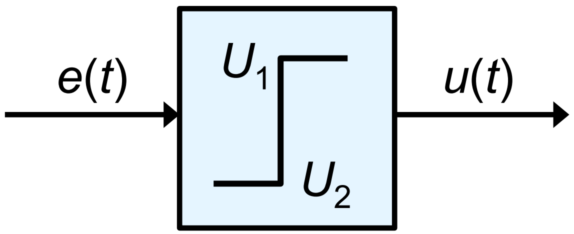
- Existem inúmeros tipos e formas de implementação de compensadores, diferindo na complexidade e no desempenho

- Contudo, os compensadores usualmente empregam uma das seguintes ações básicas de controle:
  - On-off
  - Proporcional
  - Integral
  - Derivativa

Controle clássico de conversores:
Ações básicas de controle

- **On-off:** o sinal de controle $u(t)$ assume um valor máximo U_1 ou mínimo U_2, de acordo com um sinal de entrada (por exemplo: sinal de erro)

$$u(t) = U_1, \quad \text{para } e(t) > 0$$
$$u(t) = U_2, \quad \text{para } e(t) < 0$$

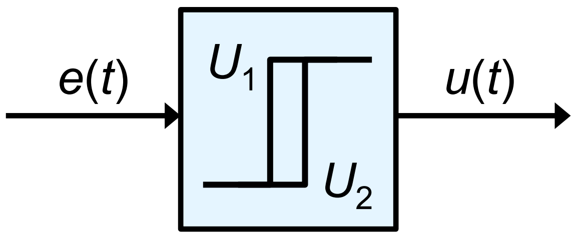


Para conversores estáticos, as ações U_1 e U_2 normalmente representam interruptor fechado (acionado) e interruptor aberto (bloqueado), respectivamente.

Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle

Para evitar que o sinal de controle comute em uma frequência muito elevada é usual utilizar um intervalo diferencial, que faz com que a saída do controlador mantenha seu valor atual até que o sinal de entrada tenha variado ligeiramente além do limite estabelecido

O controle on-off com esse intervalo diferencial é normalmente chamado de controle por histerese.



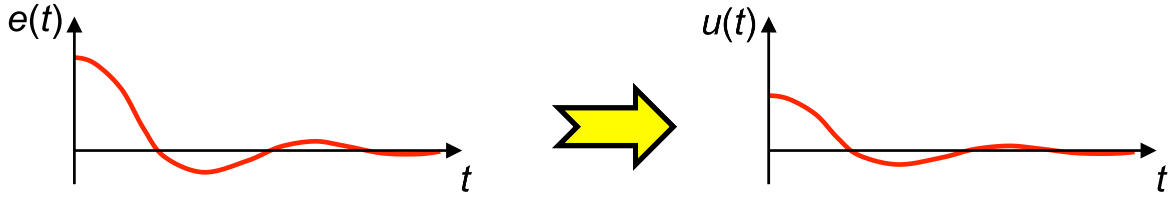
O controle por histerese é uma estratégia de fácil projeto e implementação, robusta e com boa resposta dinâmica.

Controle clássico de conversores:
Ações básicas de controle

- **Proporcional:** a saída do compensador $u_p(t)$ é proporcional ao sinal de entrada $e(t)$

$$u_p(t) \propto e(t) \quad \Rightarrow \quad U_p(s) \propto E(s)$$

Logo, é necessário que exista um sinal de erro na entrada do compensador para que exista um sinal na saída do mesmo.

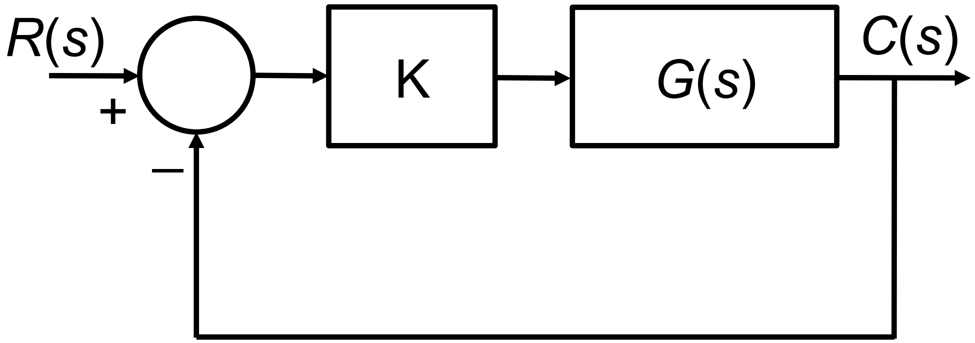


Ao aumentar o ganho proporcional consegue-se reduzir o erro estático, aumentar a velocidade de resposta, contudo, usualmente o sistema torna-se menos amortecido

Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle

Exemplo

Conversor BUCK em malha fechada com **controle proporcional**



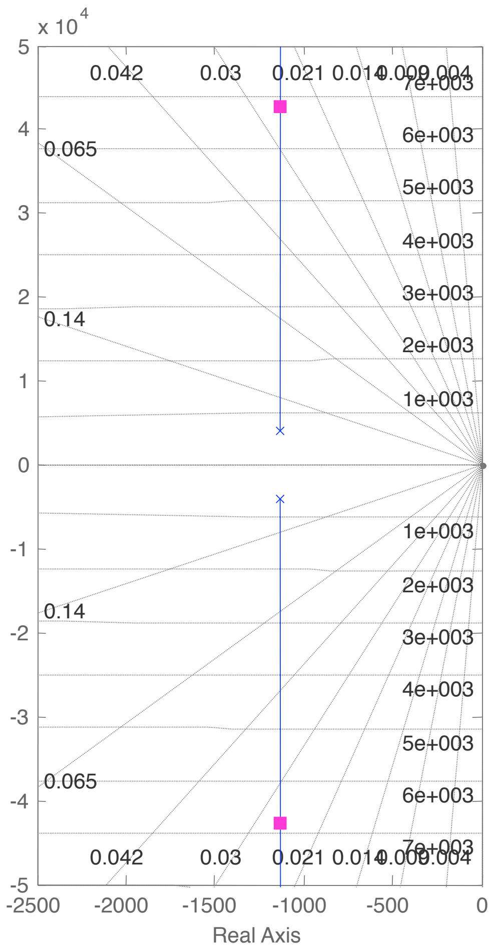
$V_{in} = 100$ V $V_o = 50$ V

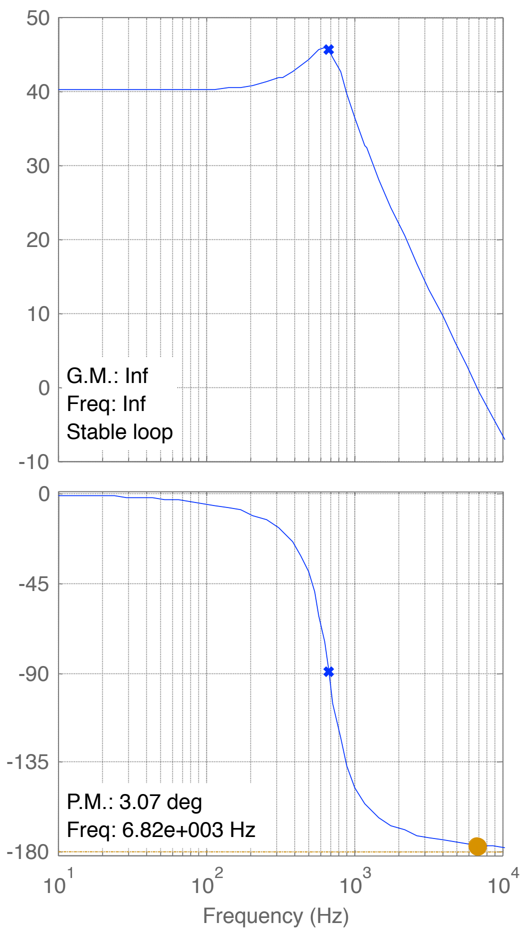
$L = 250\ \mu$H $R = 2\ \Omega$

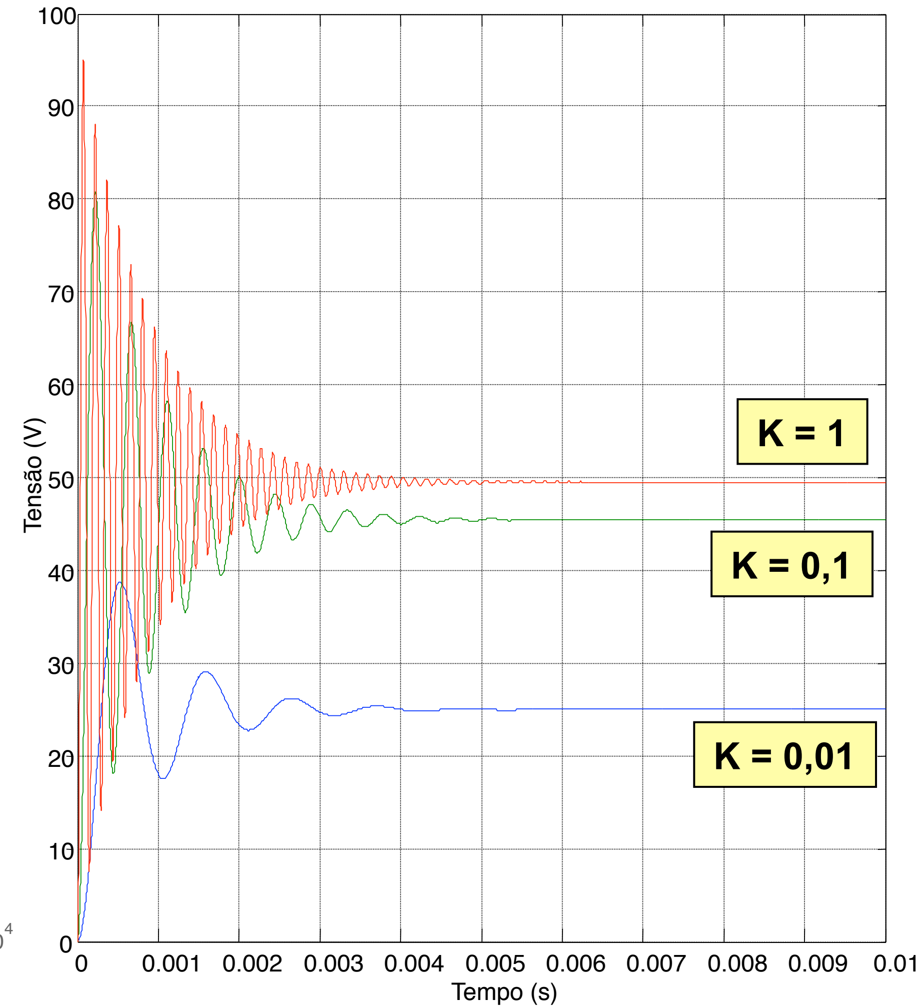
$C = 220\ \mu$F f = 50 kHz

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_{in}\frac{\dfrac{1}{LC}}{s^2 + \dfrac{1}{RC}s + \dfrac{1}{LC}}$$

Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle



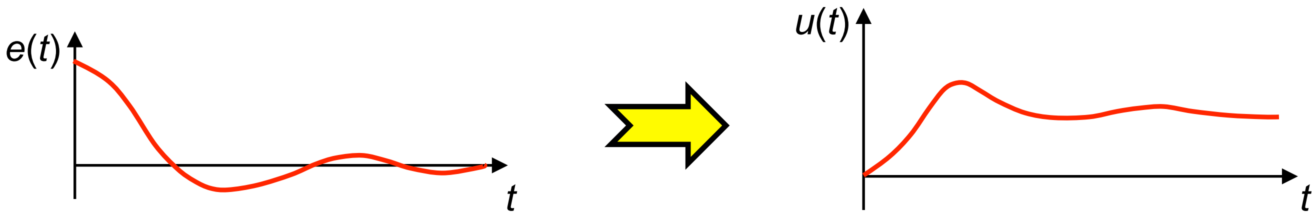




Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle

- **Integral:** o sinal de saída do compensador é a área sob a curva do sinal de erro, até aquele momento (depende do passado)

$$u_i(t) \propto \int_0^t e(t)\,dt \quad \Rightarrow \quad U_i(s) \propto \frac{E(s)}{s}$$



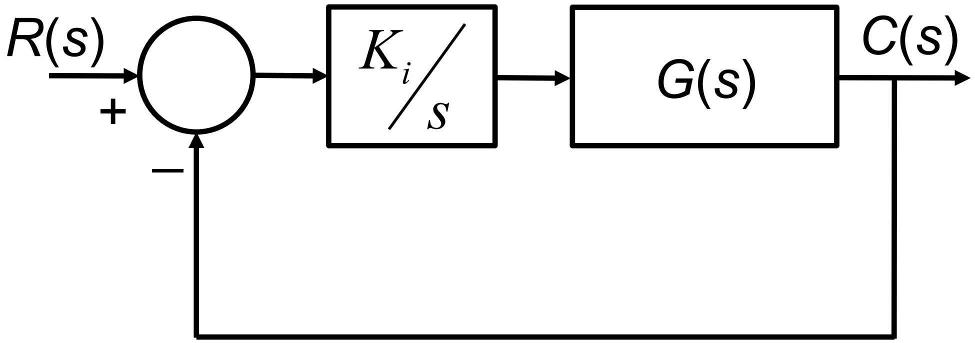
O sinal de controle pode ter um valor não-nulo mesmo quando o sinal de erro for zero.

Embora a ação de controle integral remova o erro em regime permanente para entradas do tipo degrau, pode conduzir a uma resposta oscilatória ou até mesmo instável.

Controle clássico de conversores:
Ações básicas de controle

Exemplo

Conversor BUCK em malha fechada com **controle integral**



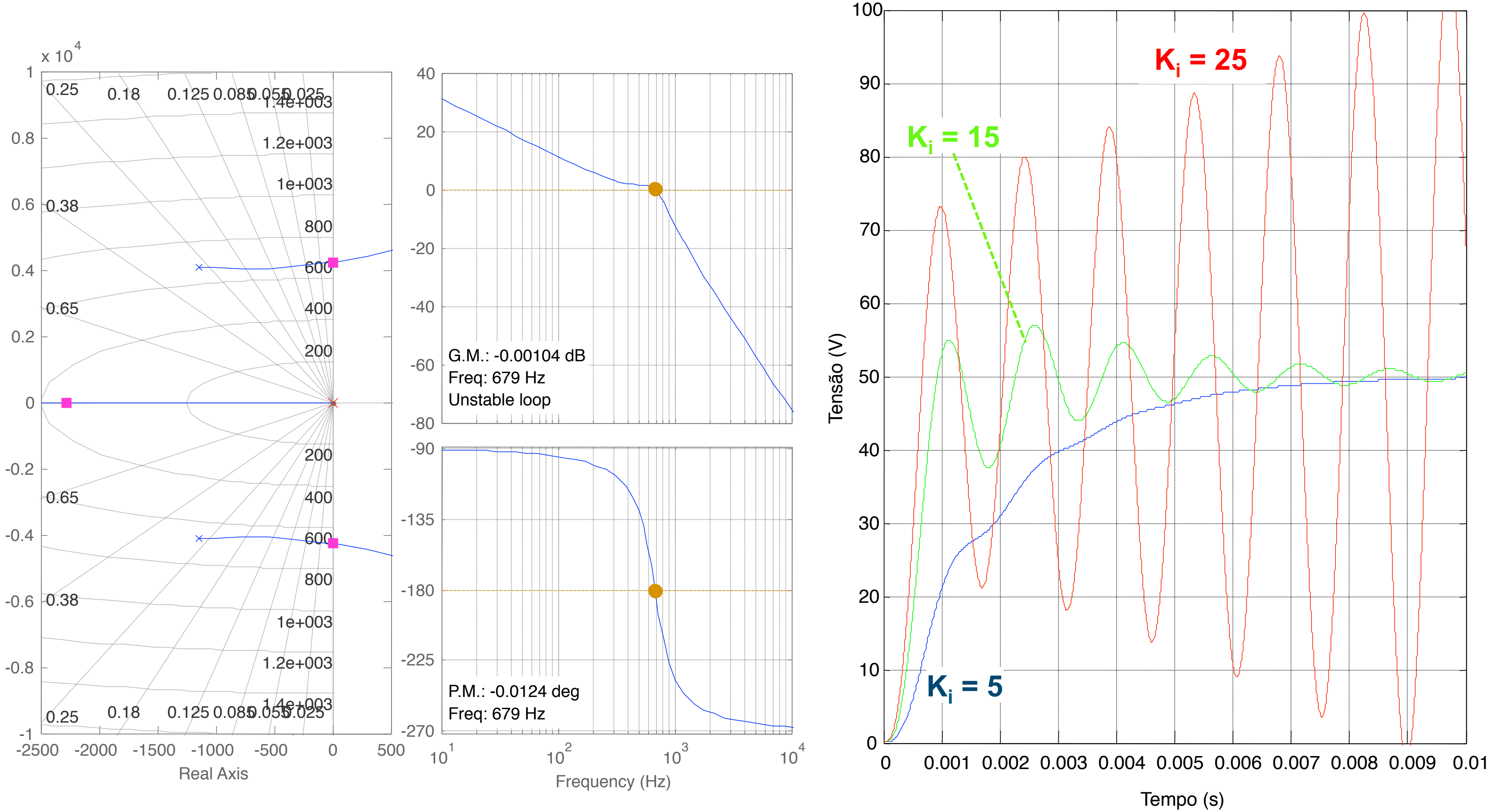
$V_{in} = 100$ V $V_o = 50$ V

$L = 250\ \mu$H $R = 2\ \Omega$

$C = 220\ \mu$F f = 50 kHz

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_{in}\frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}$$

Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle



Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle

- **Derivativo:** A ação de controle derivativo responde a uma taxa de variação do erro e pode produzir uma correção significativa antes que o valor do erro atuante se torne muito elevado.

$$u_d(t) \propto \frac{de(t)}{dt} \Rightarrow U_d(s) \propto sE(s)$$

Portanto, o controle derivativo "prevê" o erro, inicia uma correção antecipada e tende a aumentar a estabilidade do sistema.

Embora o controle derivativo não afete diretamente o erro estacionário, ele aumenta o amortecimento do sistema, permitindo o uso de ganho proporcional mais elevado, o que vai resultar em maior precisão em regime permanente.

Controle clássico de conversores:
Ações básicas de controle

Como o controle derivativo atua sobre a taxa de variação do erro e não sobre o próprio erro, ele nunca é utilizado sozinho.

É sempre utilizado em combinação com uma ação proporcional ou proporcional-integral.

$$U_{pd}(s) = (K_p + K_d s)E(s) \quad \Rightarrow \quad U_{pd}(s) = K_c (T_d s + 1)E(s)$$

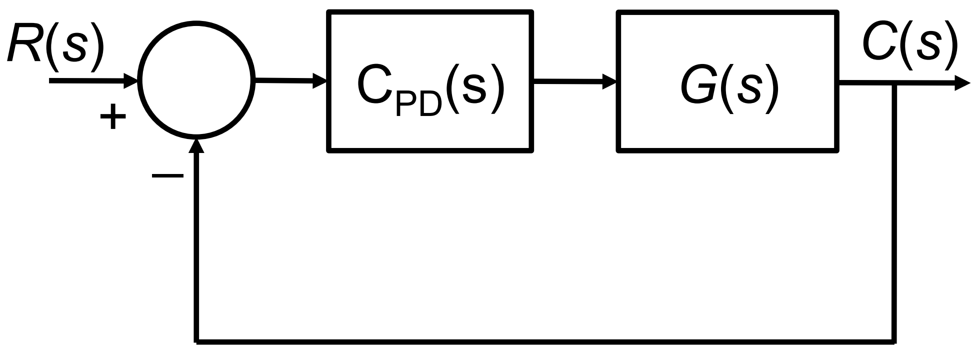
O zero adicionado aumenta o ganho do compensador em +20dB/déc, podendo amplificar ruídos em alta frequência. Nesse sentido, é usual a adição de um pólo em alta frequência para limitação de ganho.

$$U_{pd}(s) = K_c \frac{T_d s + 1}{T_p s + 1} E(s)$$

Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle

Exemplo

Conversor BUCK em malha fechada com **controle proporcional-derivativo**



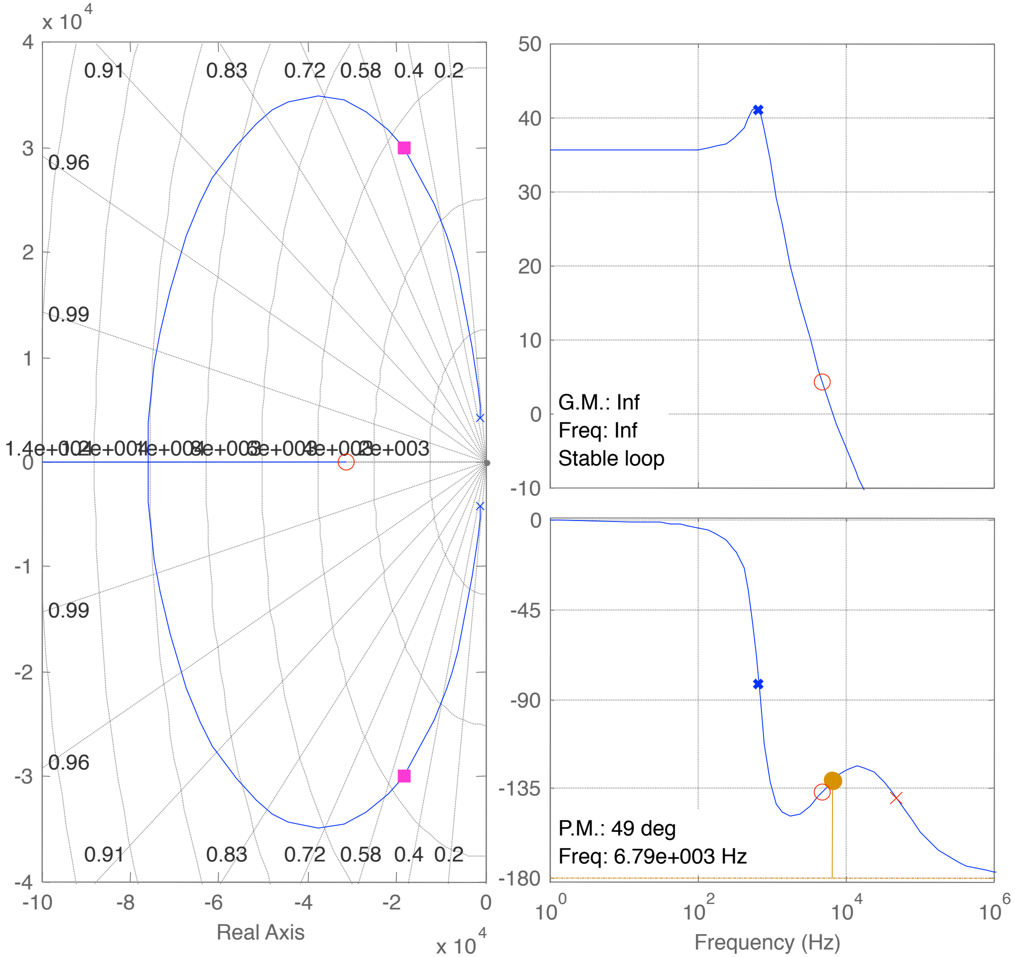
V_{in} = 100 V V_o = 50 V

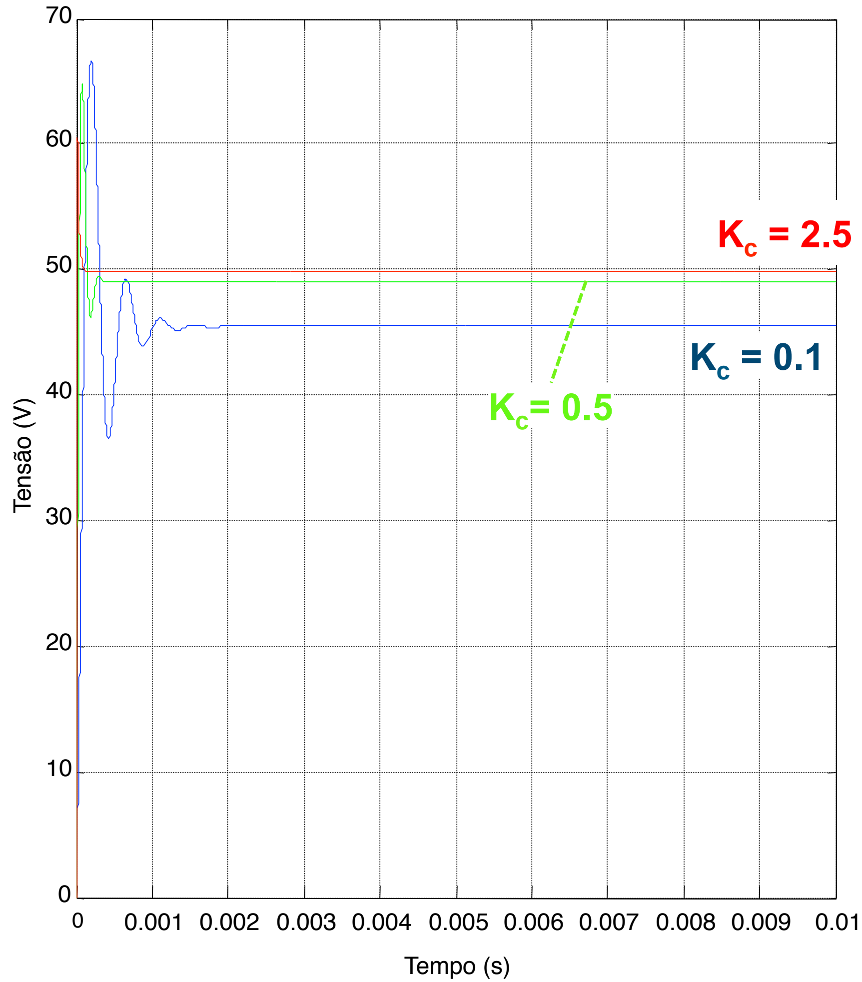
L = 250 μH R = 2 Ω

C = 220 μF f = 50 kHz

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_{in}\frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}$$

Controle clássico de conversores: Ações básicas de controle





Bibliografia

- R. W. Erickson, D. Maksimovic, "*Fundamentals of Power Electronics*", Second edition.
- J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, G. C. Verghese, "*Principles of Power Electronics*".
- K. Ogata, "*Engenharia de Controle Moderno*", 4ª edição.