

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA



Controle Adaptativo de Corrente em Conversores Conectados na Rede Elétrica numa Estrutura Multimalha

Orientador

Prof. Dr. Márcio Stefanello

Acadêmico

Marcelo Durgante

1 de setembro de 2014

Sumário

Introdução

Modelagem

Controle Multimalha

Resultados

Conclusões

Referências

Sumário

Introdução

Modelagem

Controle Multimalha

Resultados

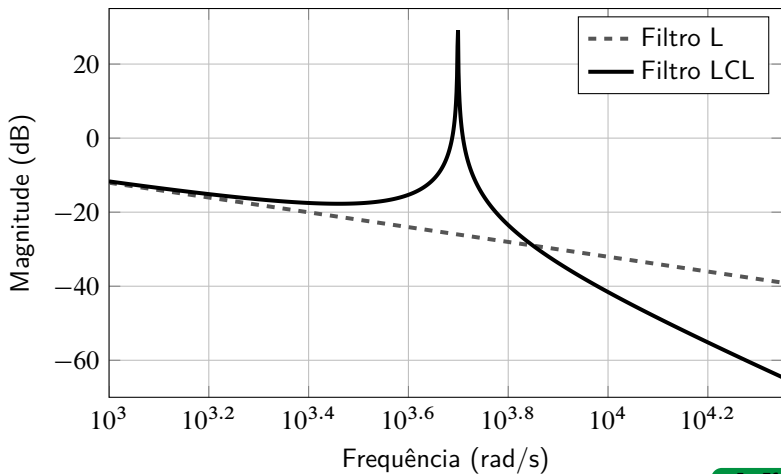
Conclusões

Referências

Introdução

- Problemas de qualidade de energia
- Conversores tiristorizados e dispositivos eletrônicos de potência
- Filtragem: ativa ou passiva
- Filtro $L \rightarrow$ Filtro LCL
 - ✓ Maior atenuação das componentes harmônicas
 - ✓ Dimensões físicas reduzidas em relação ao filtro L
 - ✗ Pico de amplitude na frequência de ressonância

Introdução

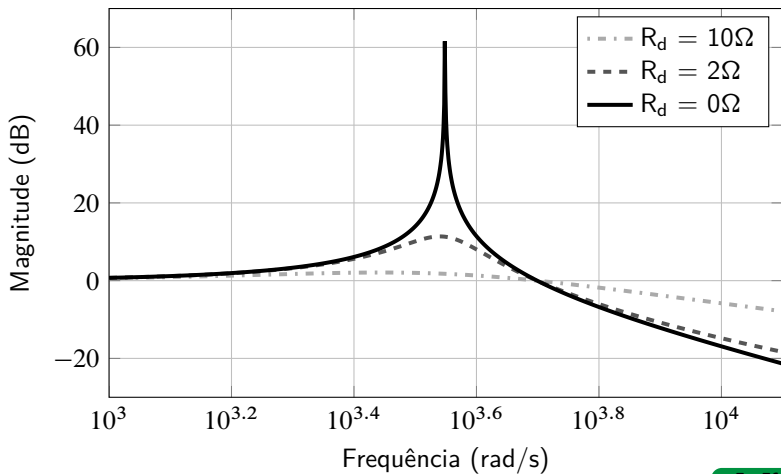


Introdução

Como resolver o problema do pico de amplitude na frequência de ressonância do filtro?

- Amortecimento passivo via resistor em série ou paralelo com o capacitor do filtro
- Estratégias de amortecimento ativo
 - Estimação da impedância da rede (LISERRE; BLAABJERG; TEODORESCU, 2007)
 - Retroação de estados (GABE et al., 2007)
 - Múltiplos laços de realimentação (LOH; HOLMES, 2005)
 - Dentre outras (WU; LEHN, 2006), (MORENO et al., 2009), (YANG et al., 2011)

Introdução



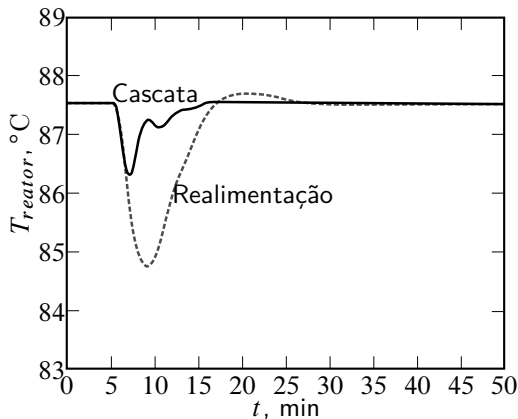
Introdução

Estratégias comumente usadas para controle de conversores conectados à rede elétrica:

- Controladores de tipo PI em eixos síncronos dq ou estacionários $\alpha\beta$ (KAZMIERKOWSKI; MALESANI, 1998)
- Controladores do tipo *Dead-Beat* (MALESANI; MATTAVELLI; BUSO, 1999)
- Controlador por Histerese (MALESANI et al., 1991)
- Controle Multimalha (KRISHNASWAMY et al., 1990)

Introdução

Conforme apresentado em (SMITH; CORRIPIO, 2008):



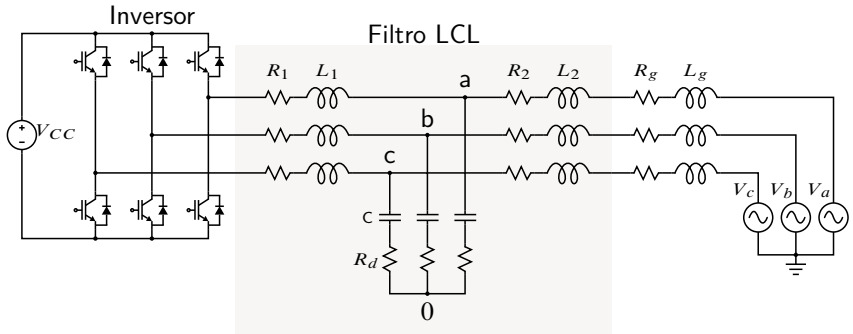
Introdução

Desafio

O valor da impedância da rede é desconhecido/incerto.

- A indutância da rede pode ser considerada como parte do filtro
- Desenvolver estratégias de controle robustas à incerteza paramétrica

Introdução

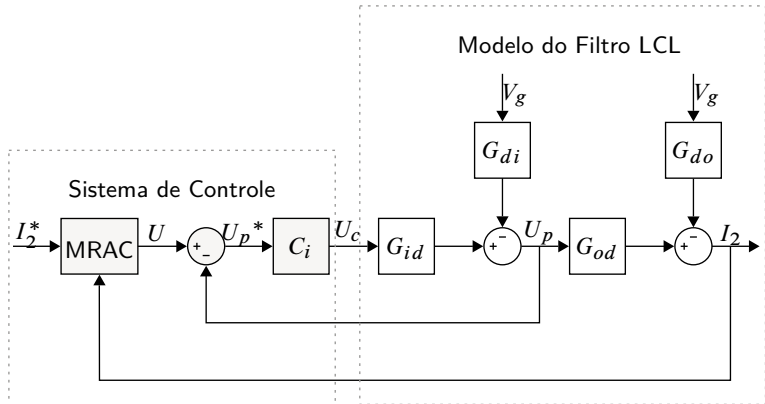


Introdução

Proposta deste trabalho:

- Utilização de uma estrutura composta por duas malhas
- Projeto de um controlador do tipo MRAC Robusto
- Modelagem do sistema visando simplificação do projeto dos controladores

Introdução



Sumário

Introdução

Modelagem

Controle Multimalha

Resultados

Conclusões

Referências

Modelagem

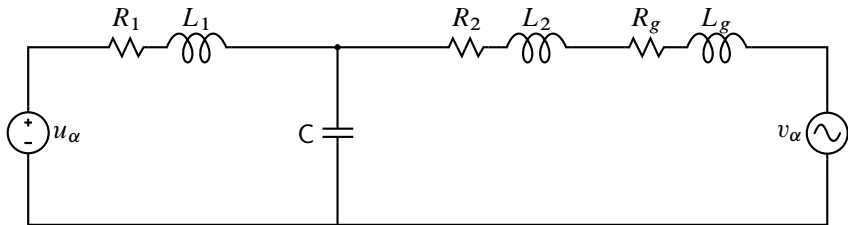
Modelagem clássica de sistemas de potência:

- Teoria das Componentes Simétricas (FORTESCUE, 1918)
- Transformação de Clarke (DUESTERHOEFT; SCHULZ; CLARKE, 1951)

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta 0} \mathbf{x}_{abc} = \mathbf{x}_{\alpha\beta 0} \iff \mathbf{T}_{\alpha\beta 0}^{-1} \mathbf{x}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{x}_{abc} \quad (2)$$

Modelagem



Modelagem

Modelo em função de transferência (SHEN et al., 2008):

$$\begin{aligned}Z_i &= r_1 + L_1 s, \\Z_C &= \frac{1}{sC}, \\Z_g &= r_2 + r_g + (L_2 + L_g)s\end{aligned}\tag{3}$$

Modelagem

Modelo em função de transferência:

$$\frac{V_C}{U_c} = \frac{Z_C Z_g}{Z_i (Z_C + Z_g) + Z_C Z_g} \quad (4)$$

$$\frac{I_C}{U_c} = \frac{Z_g}{Z_i (Z_C + Z_g) + Z_C Z_g} \quad (5)$$

$$\frac{I_2}{U_c} = \frac{Z_C}{Z_i (Z_C + Z_g) + Z_C Z_g} \quad (6)$$

Modelagem

Discretizando (6):

$$G_d(z) = \frac{I_2}{U_c} = K_1 \frac{1}{z(z-1)} - \frac{K_1 \sin(\omega_n T_s)}{\omega_n T_s} \frac{z-1}{z(z^2 - 2\cos(\omega_n T_s)z + 1)} \quad (7)$$

Onde T_s é o período de amostragem e

$$K_1 = \frac{T_s}{L_1 + L_2 + L_g} \quad (8)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_g}{L_1 C (L_2 + L_g)}} \quad (9)$$

Modelagem

Para a tensão do capacitor V_C como variável intermediária, discretizando (4):

$$G_{id_{vc}}(z) = \frac{V_C}{U_c} = \frac{2 \operatorname{sen}^2 \left(\omega_n \frac{T_s}{2} \right)}{L_1 C \omega_n^2} \frac{z + 1}{z (z^2 - \cos(\omega_n T_s) z + 1)} \quad (10)$$

$$G_{od_{vc}}(z) = \frac{I_2}{V_C} = \frac{G_d}{G_{id_{vc}}} \quad (11)$$

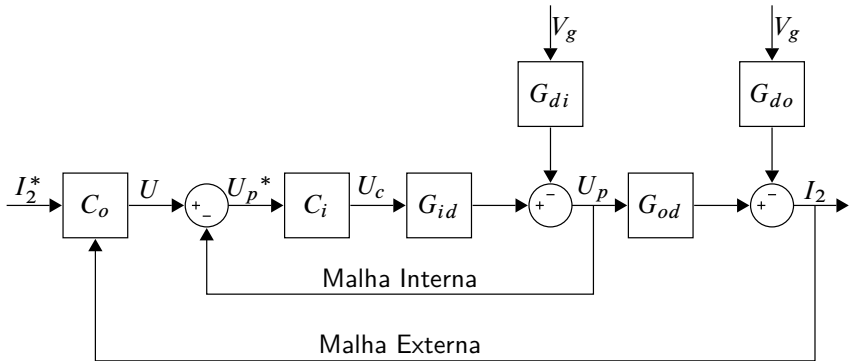
Modelagem

Para a corrente do capacitor I_C como variável intermediária, discretizando (5):

$$G_{id_{ic}}(z) = \frac{I_C}{U_c} = \frac{\text{sen}(\omega_n T_s)}{\omega_n L_1} \frac{z - 1}{z(z^2 - \cos(\omega_n T_s)z + 1)} \quad (12)$$

$$G_{od_{ic}}(z) = \frac{I_2}{I_C} = \frac{G_d}{G_{id_{ic}}} \quad (13)$$

Modelagem

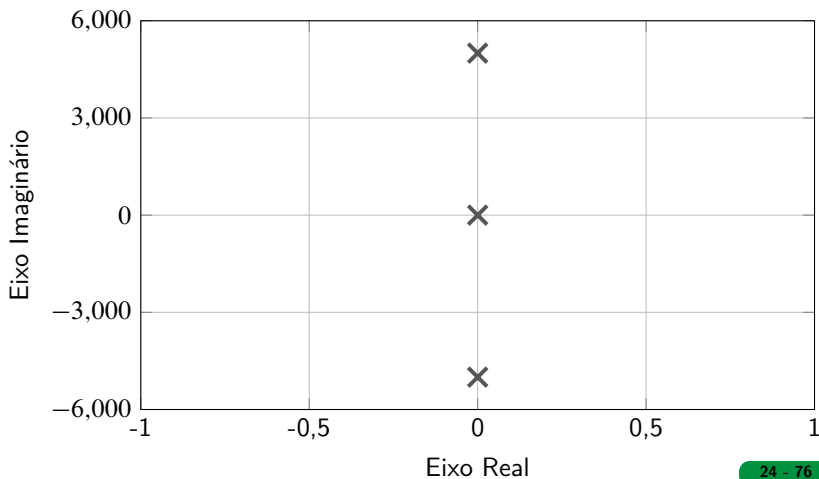


Modelagem

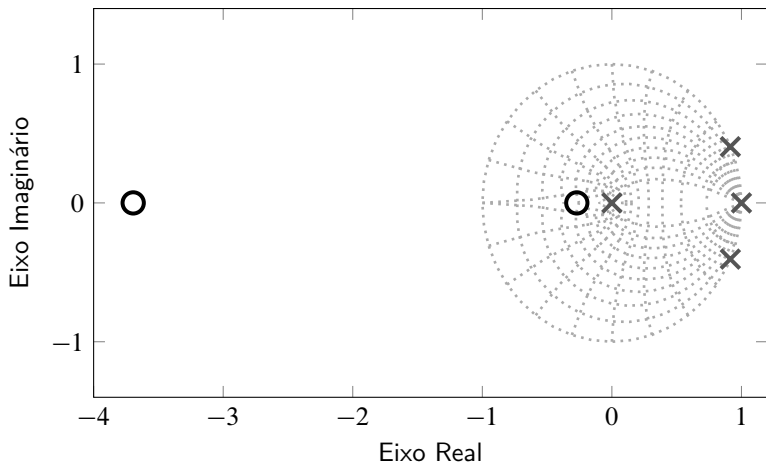
Efeitos da discretização:

- Planta em tempo contínuo
- Planta em tempo discreto (ÅSTRÖM; HAGANDER; STERNBY, 1980)

Modelagem



Modelagem



Sumário

Introdução

Modelagem

Controle Multimalha

Resultados

Conclusões

Referências

Controle Multimalha

- Projeto do controlador da malha interna (DANNEHL et al., 2010)
 - Variável intermediária: tensão do capacitor v_C
 - Variável intermediária: corrente do capacitor i_C
- Projeto do controlador da malha externa

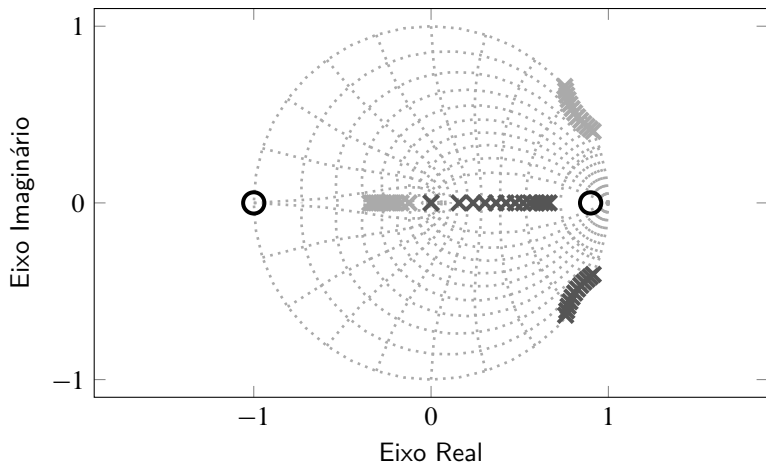
Controle Multimalha

Variável controlada na malha interna: tensão do capacitor v_C

$$C_i(z) = (K_P + K_D) \frac{z - \frac{K_D}{K_P + K_D}}{z} \quad (14)$$

$$z = \frac{K_D}{K_P + K_D} > 1 \quad (15)$$

Controle Multimalha



Controle Multimalha

Variável controlada na malha interna: corrente do capacitor i_C

$$C_i(z) = K_P \quad (16)$$

Equação característica da função de transferência $\frac{i_C}{U_c}$:

$$z^3 - 2 \cos(\omega_n T_s) z^2 + (1 + K_P K_{id}) z - K_P K_{id} = 0 \quad (17)$$

Onde:

$$K_{id} = \frac{\sin(\omega_n T_s)}{\omega_n L_1} \quad (18)$$

Controle Multimalha

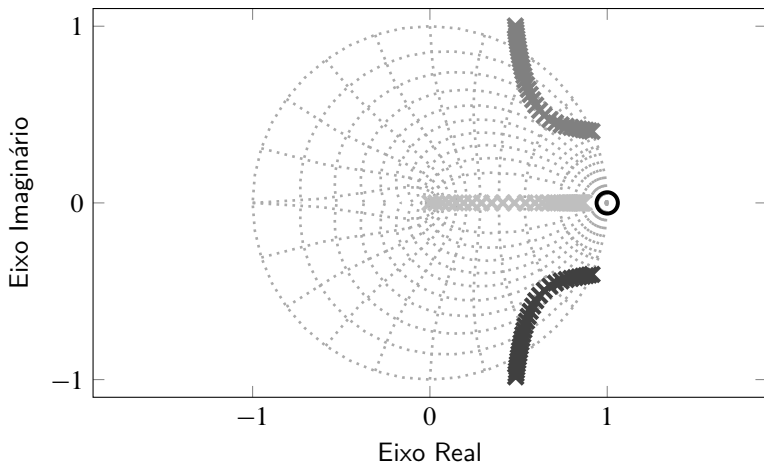
Utilizando a transformação bilinear:

$$z = \frac{w + 1}{w - 1} \quad (19)$$

Critério de estabilidade de Routh-Hurwitz como em um sistema em tempo contínuo (OGATA, 1995)

$$\overline{K_P} = \frac{2 \cos(\omega_n T_s) - 1}{\sin(\omega_n T_s)} \omega_n L_1 \quad (20)$$

Controle Multimalha



Controle Multimalha

Projeto do controlador da malha externa:

- Tratamento do zero de fase não-mínima devido à discretização
- Explorar a característica robusta do controlador para reduzir a ordem do sistema

Controle Multimalha

Reescrita da expressão da planta em termos de uma *dinâmica não-modelada*

$$G(z) = G_o(z) + \Delta(z) \quad (21)$$

Considerando $G_o(z)$ como sendo apenas um indutor $L_1 + L_2$:

$$G_o(z) = k \frac{T_s}{L_1 + L_2} \frac{1}{z(z-1)} \quad (22)$$

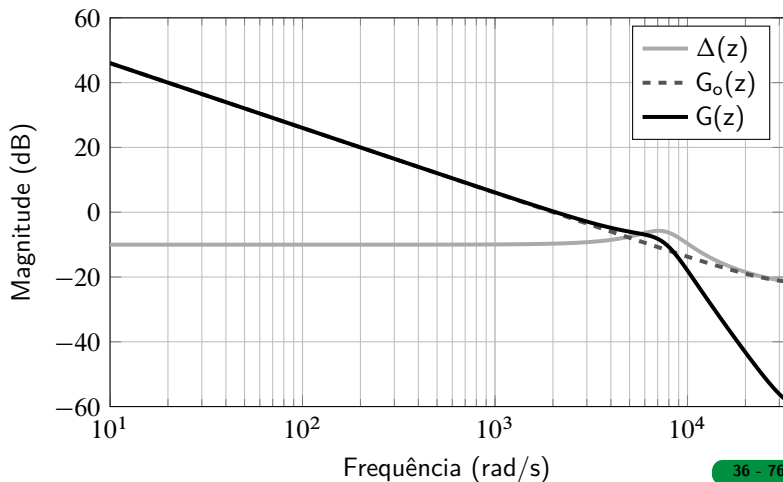
Logo, a dinâmica não-modelada é dada por

$$\Delta(z) = G(z) - G_o(z) \quad (23)$$

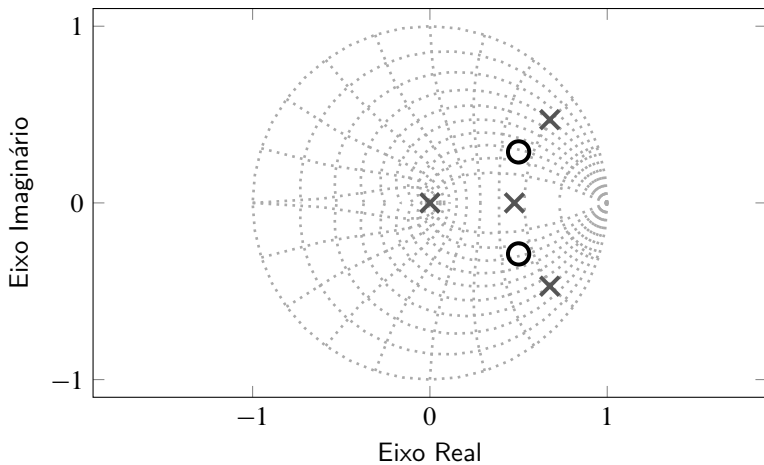
Controle Multimalha

Margem de ganho para $G(z)$, $G_o(z)$ e $\Delta(z)$ e diagrama de pólos e zeros para $\Delta(z)$ para a corrente do capacitor i_C como variável controlada na malha interna

Controle Multimalha



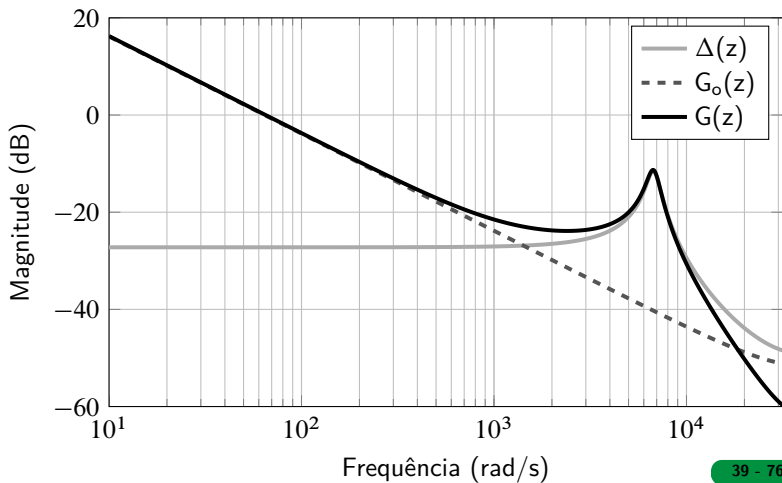
Controle Multimalha



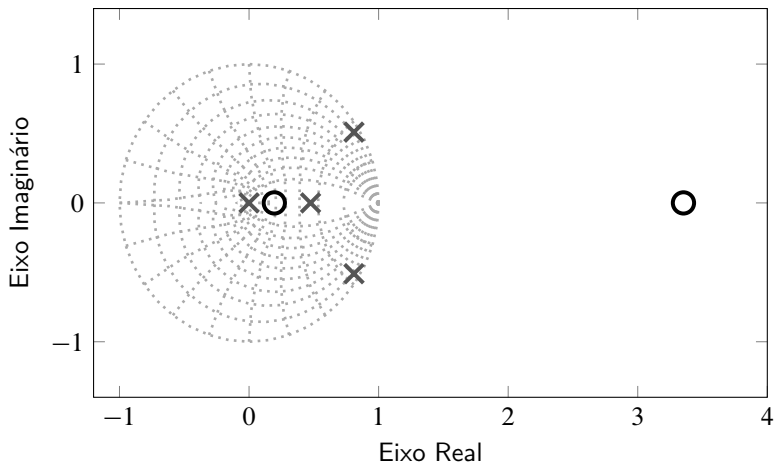
Controle Multimalha

Margem de ganho para $G(z)$, $G_o(z)$ e $\Delta(z)$ e diagrama de pólos e zeros para $\Delta(z)$ para a tensão do capacitor v_C como variável controlada na malha interna

Controle Multimalha



Controle Multimalha



Controle Multimalha

Algoritmo de adaptação paramétrica (TAO, 2003):

$$\begin{aligned}\theta(k+1) &= \theta(k) - \text{sgn}(k_p) \gamma_d \frac{\zeta(k) \cdot e_a(k)}{\bar{m}^2(k)} \\ \rho(k+1) &= \rho(k) - \gamma \frac{e_2(k) \cdot e_a(k)}{\bar{m}^2(k)} \\ \bar{m}^2 &= m^2(k) + \zeta^T(k) \zeta(k) + e_2^2(k) \\ m^2(k+1) &= \delta_0(m^2(k) - 1) + u^2(k) + y^2(k) + 1\end{aligned}\tag{24}$$

Controle Multimalha

Com:

$$e_1 = y(k) - y_m(k) \quad (25)$$

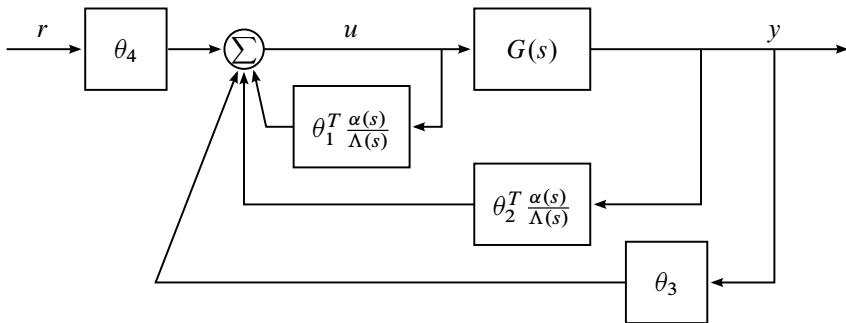
$$e_a = e_1 + \rho e_2 \quad (26)$$

$$\zeta(k) = W_m(z)\omega(k) \quad (27)$$

$$e_2 = -W_m(z)u(k) + \theta^T(k)\zeta(k) \quad (28)$$

Com γ e γ_d ganhos das leis de adaptação e δ_0 é uma constante de projeto

Controle Multimalha



Sumário

Introdução

Modelagem

Controle Multimalha

Resultados

Conclusões

Referências

Resultados

Resultados de simulação para a corrente do capacitor i_C como variável controlada na malha interna

Valores de inicialização:

$$\begin{aligned}\theta^T &= [-0,03, \quad -0,36, \quad -0,57, \quad -0,01 \quad 0,16 \quad 0,02] \text{ e} \\ \omega &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T\end{aligned}\tag{29}$$

$$W_m(z) = \frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{(z - p_1)(z - p_2)}\tag{30}$$

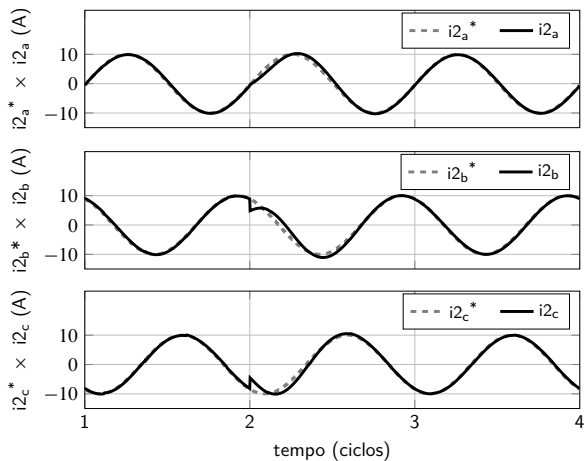
Com $p_1 = p_2 = 0,2$.

Resultados

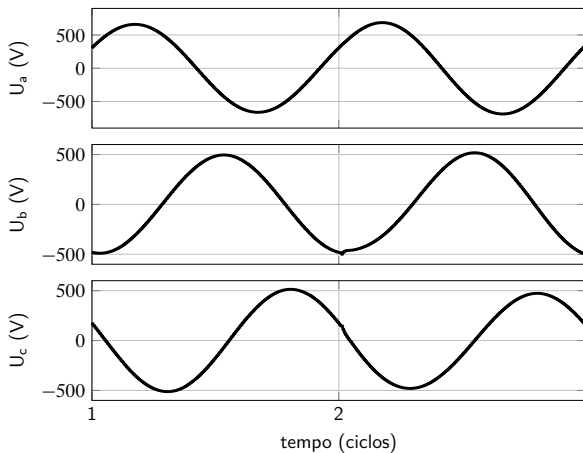
Valores utilizados dos parâmetros do sistema utilizados no projeto

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
L_1	2mH	L_2	2mH
C	40 μ F	$f_s = 1/T_s$	12kHz
γ_d	0,0098	γ	0,99
δ_0	0,8	K_P	8

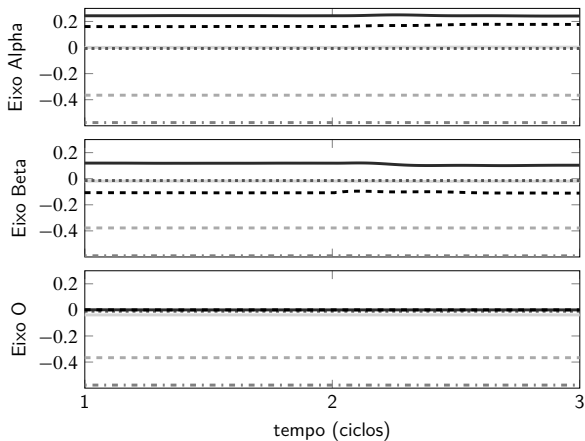
Resultados



Resultados



Resultados



Resultados

Resultados de simulação para a tensão do capacitor v_C como variável controlada na malha interna

Valores de inicialização:

$$\begin{aligned}\theta^T &= [0,97, \quad -1,07, \quad 2,22, \quad 16,03] \text{ e} \\ \omega &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T\end{aligned}\tag{31}$$

$$W_m(z) = \frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{(z - p_1)(z - p_2)}\tag{32}$$

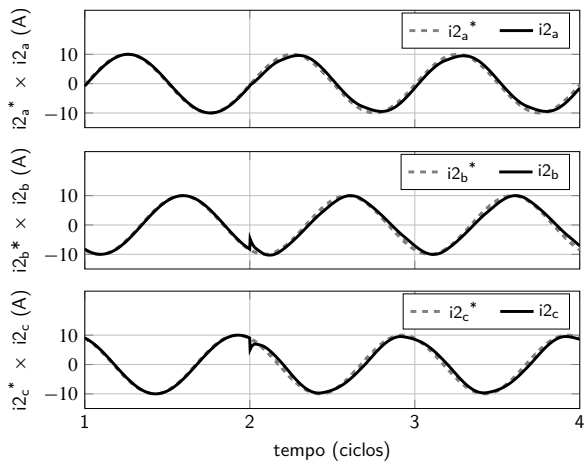
Com $p_1 = p_2 = 0,2$.

Resultados

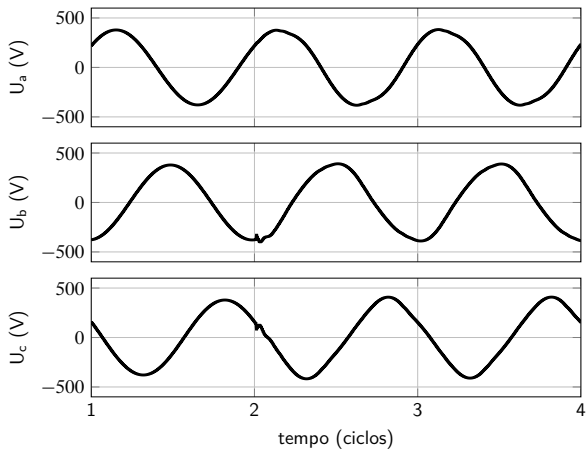
Valores utilizados dos parâmetros do sistema utilizados no projeto

Parâmetro	Valor
L_1	2mH
L_2	2mH
C	40 μ F
$f_s = 1/T_s$	12kHz
γ_d	0,0098
γ	0,99
δ_0	0,8
$K_P * K_D$	3

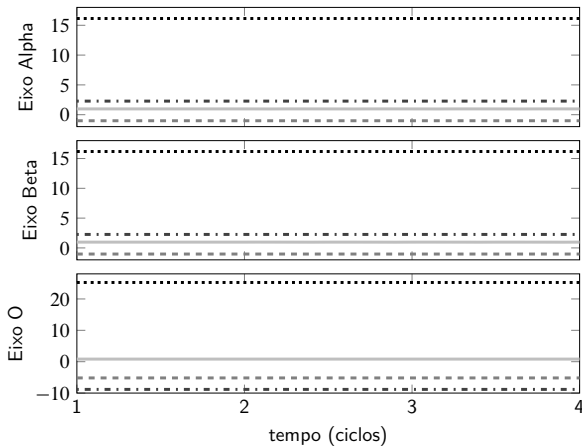
Resultados



Resultados



Resultados



Resultados

Resultados experimentais para a corrente do capacitor i_C como variável controlada na malha interna

Valores de inicialização:

$$\begin{aligned}\theta^T &= [0, \quad 0, \quad -1,36, \quad 1,36] \\ \omega &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T\end{aligned}\tag{33}$$

$$W_m(z) = \frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{(z - p_1)(z - p_2)}\tag{34}$$

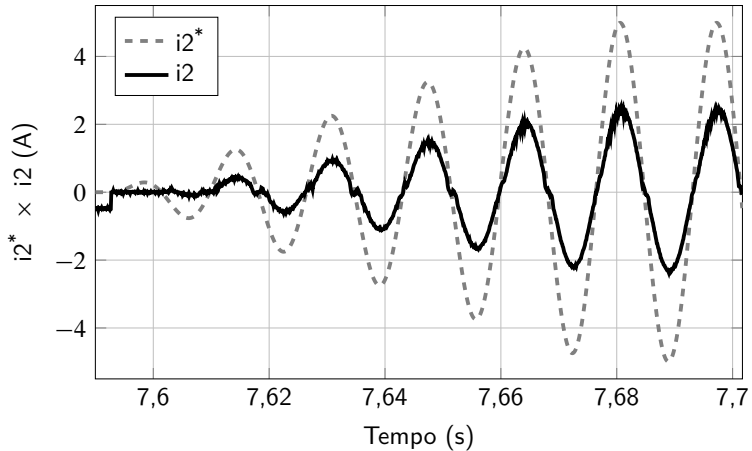
Com $p_1 = p_2 = 0,5$.

Resultados

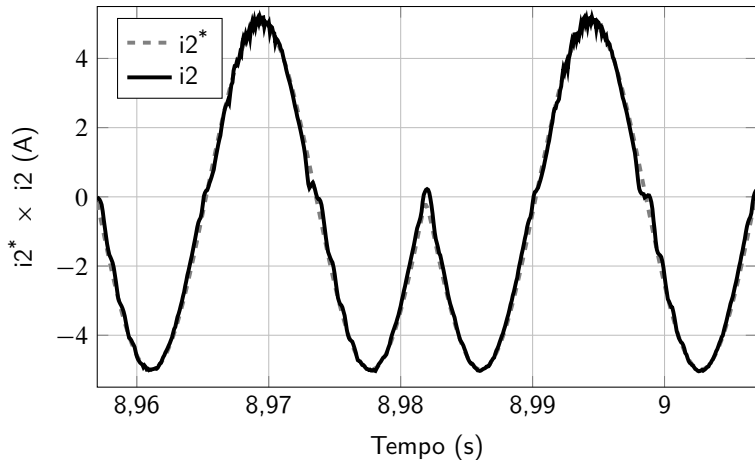
Valores utilizados dos parâmetros do sistema utilizados no projeto

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
L_1	1mH	L_2	0,5mH
C	40 μ F	$f_s = 1/T_s$	12kHz
γ_d	0,01	γ	0,95
δ_0	0,98	K_P	3,35

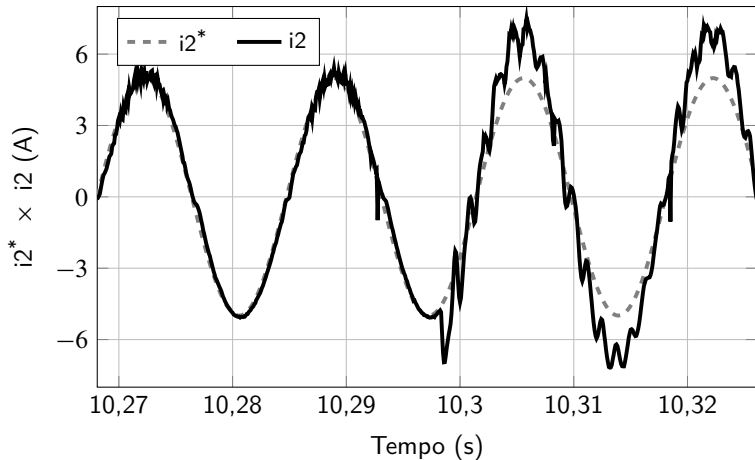
Resultados



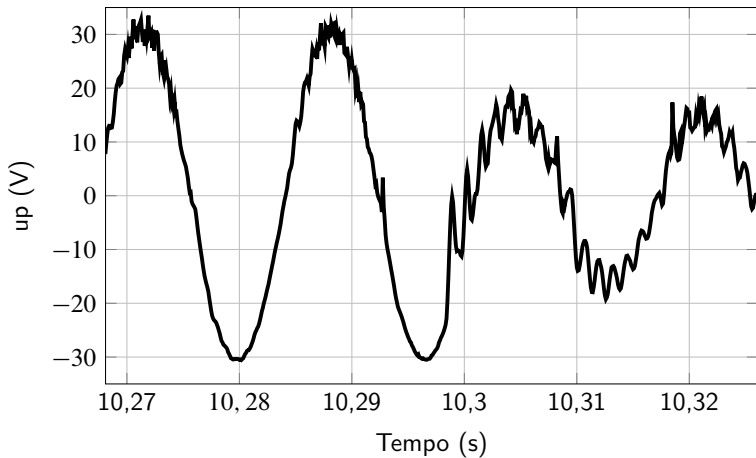
Resultados



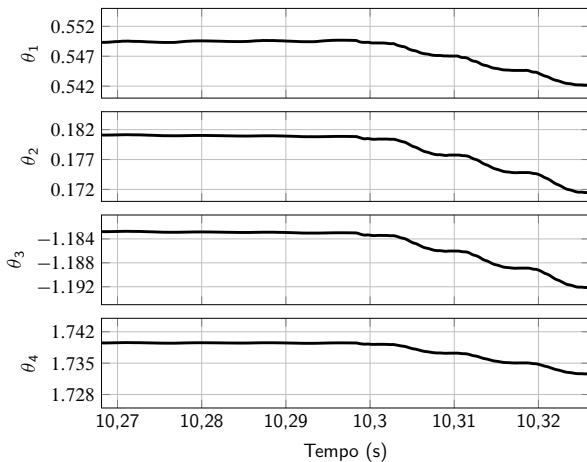
Resultados



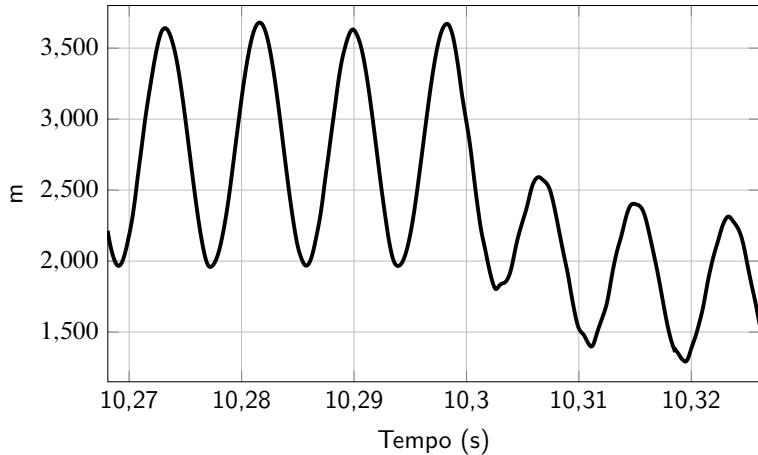
Resultados



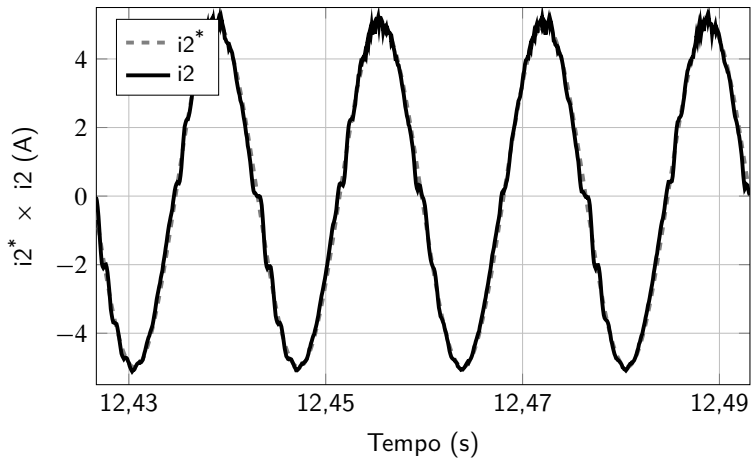
Resultados



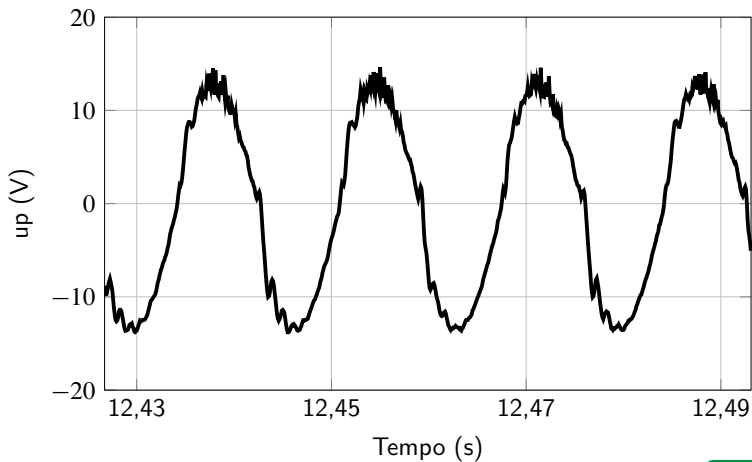
Resultados



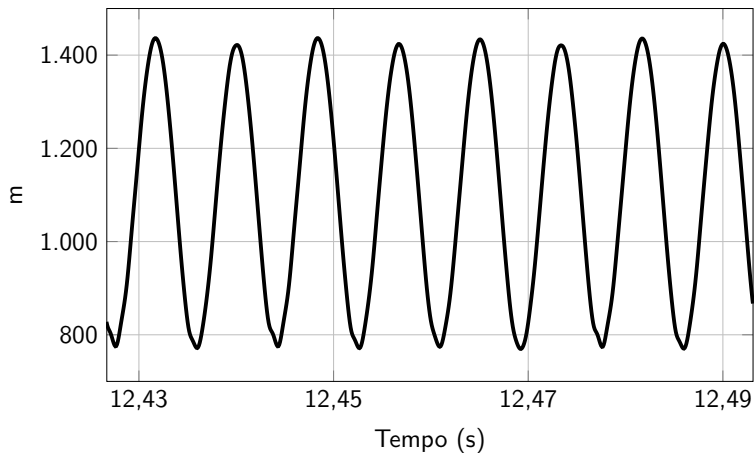
Resultados



Resultados



Resultados



Sumário

Introdução

Modelagem

Controle Multimalha

Resultados

Conclusões

Referências

Conclusões

- O sistema funciona com o projeto proposto
- Resultados para a tensão do capacitor como variável intermediária são bastante inferiores
 - Amortecimento
 - Violação do requisito principal do controle multimalha
- Este trabalho gerou duas publicações (DURGANTE; STEFANELLO, 2012) e (DURGANTE; PLOTZKI; STEFANELLO, 2013)
- Sugestão de trabalho futuro: Controladores IMC (SILVA; DATTA, 1999)

Sumário

Introdução

Modelagem


Controle Multimalha


Resultados

Conclusões


Referências


Referências (1)

 DANNEHL, J. et al. Investigation of Active Damping Approaches for PI-Based Current Control of Grid-Connected Pulse Width Modulation Converters With LCL Filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 46, n. 4, p. 1509–1517, July/August 2010.


 DUESTERHOEFT, W. C.; SCHULZ, M. W.; CLARKE, E. Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta and Zero Components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 70, n. 2, p. 1248–1255, July 1951.


Referências (2)

 DURGANTE, M. H.; PLOTZKI, H. F. B.; STEFANELLO, M. Combined active damping with adaptive current control for converters with lcl filters. In: *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 520–525. ISSN 1553-572X.


 DURGANTE, M. H.; STEFANELLO, M. Multi loop deadbeat+repetitive and adaptive control for power converters with lcl filters. In: *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 5955–5960. ISSN 1553-572X.


Referências (3)


 FORTESCUE, C. L. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, July 1918.

 GABE, I. J. et al. Stability Analysis of Grid-Connected Voltage Source Inverters with *LCL*-Filters using Partial State Feedback. *European Conference on Power Electronics and Applications*, p. 1–10, September 2007.


Referências (4)


 KAZMIERKOWSKI, M. P.; MALESANI, L. Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 45, n. 5, p. 691–703, October 1998.

 KRISHNASWAMY, P. R. et al. When To Use Cascade Control. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 29, n. 10, p. 2163–2166, October 1990.


 LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; TEODORESCU, R. Grid Impedance Estimation via Excitation of *LCL*-Filter Resonance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 43, n. 5, p. 1401–1407, September/October 2007.


Referências (5)


 LOH, P. C.; HOLMES, D. G. Analysis of multiloop control strategies for LC/CL/LCL-filtered voltage-source and current-source inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 2, p. 644–654, March/April 2005.

 MALESANI, L.; MATTAVELLI, P.; BUSO, S. Robust Dead-Beat Current Control for PWM Rectifiers and Active Filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 35, n. 3, p. 613–620, May/June 1999.


Referências (6)


 MALESANI, L. et al. Improved Current Control Technique of VSI PWM Inverters with Constant Modulation Frequency and Extended Voltage Range. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 27, n. 2, p. 365–369, March/April 1991.


 MORENO, J. C. et al. A Robust Predictive Current Control for Three-Phase Grid-Connected Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 6, p. 1993–2004, June 2009.


 OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems*. second. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1995.

Referências (7)


 SHEN, G. et al. An Improved Control Strategy for Grid-Connected Voltage Source Inverters With an LCL Filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 23, n. 4, p. 1899–1906, July 2008.

 SILVA, G. J.; DATTA, A. Adaptive Internal Model Control: The Discrete-Time Case. In: . [S.l.: s.n.], 1999. v. 1, p. 547–555.


 SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. *Princípios e Prática do Controle Automático de Processo*. third. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

 TAO, G. *Adaptive Control Design and Analysis*. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2003.

Referências (8)

 WU, E.; LEHN, P. W. Digital Current Control of a Voltage Source Converter With Active Damping of LCL Resonance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 21, n. 5, p. 1364–1373, September 2006.

 YANG, S. et al. A Robust Control Scheme for Grid-Connected Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 1, p. 202–212, January 2011.

 ÅSTRÖM, K.; HAGANDER, P.; STERNBY, J. Zeros of sampled systems. In: *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 1980. v. 19, p. 1077–1081.