



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



MODELAGEM DE UM CONVERSOR ESTÁTICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO LCL PARA FINS DE PROJETO DE CONTROLADORES ADAPTATIVOS – CRICTE 2017

Wagner Barreto da Silveira

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
wasilveira91@hotmail.com

Rodrigo Varella Tambara

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
rodvarella10@gmail.com

Resumo. *Este artigo apresenta o desenvolvimento da modelagem de um conversor estático monofásico conectado à rede elétrica empregando filtro LCL para fins de projeto de controladores adaptativos. A modelagem matemática é desenvolvida em espaço de estados e por função de transferência. Por fim, um estudo sobre controladores adaptativos por modelo de referência é apresentado.*

Palavras-chave: Controle adaptativo, Conversores Estáticos, Filtro LCL.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de geração de energia elétrica conectados à rede baseados em painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, células a combustíveis, dentre outros, tem usado conversores estáticos com filtros LCL de saída, para a atenuação das altas frequências harmônicas, Dannehl et. al[1]. Se por um lado a impedância e a resistência equivalente da rede no ponto de conexão do conversor podem ser consideradas como parte do filtro LCL, as incertezas considerando seus valores reais resultam na mudança da frequência de ressonância do filtro LCL. Isso precisa ser considerado no projeto do controlador de corrente para garantir a estabilidade e o desempenho do conversor conectado à rede, Liserre et. al. [2]. Quanto ao amortecimento da

ressonância, as duas principais alternativas apresentadas na literatura para conversores conectados à rede com filtro LCL são: (i) uso de amortecimento passivo para atenuar o pico de ressonância, o que é indesejável em altas potências devido ao custo da energia e devido ao fato que existem métodos dependentes das características da rede no ponto de conexão; (ii) uso de amortecimento ativo, que pode ser alcançado através de diferentes estratégias de controle, tais como estruturas de controle específicas apresentada em Wu; Lehn[3], retroação de estados, Gabe et. al.[4], estimação da impedância da rede, Ciobotaru et. al. [5], estratégias de controle utilizando múltiplos laços de realimentação, Loh e Holmes [6]. Problemas de estabilidade e/ou baixo desempenho, em se tratando de amortecimento da ressonância, surgem frequentemente como resultado de dois fatores principais: (i) variação paramétrica do filtro LCL e (ii) inclusão da malha de rejeição de distúrbios de tensão.

A partir da modelagem da planta, será analisado um controlador adaptativo por modelo de referência (MRAC – *Model Reference Adaptive Control*). O objetivo do MRAC é calcular os ganhos do controlador, em tempo real, de modo que o sistema em malha fechada se comporte como o modelo de referência. O MRAC se torna praticável e eficaz pelo ajuste dos ganhos de retroação ser em tempo real, feito de forma adaptativa.

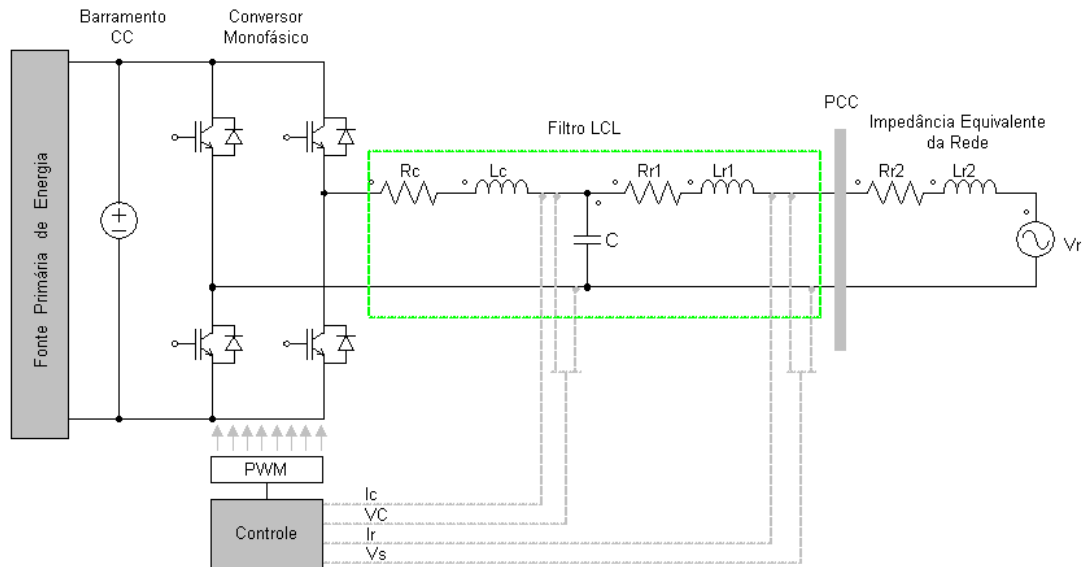


Figura 1 Diagrama elétrico do conversor estático com filtro LCL conectado à rede elétrica de energia.

2. DIAGRAMA ELÉTRICO DO CONVERSOR MONOFÁSICO COM FILTRO LCL

A Figura 1 apresenta o modelo elétrico equivalente do conversor monofásico conectada à rede de energia elétrica. Neste caso, a rede é representada pelo equivalente Thevenin em relação ao ponto de conexão comum (PCC).

O sistema é formado por uma fonte primária de geração, que poderá ser: um gerador eólico, um sistema de painéis fotovoltaicos ou qualquer outra forma de geração distribuída de energia. O banco de capacitores é responsável pela acumulação de energia em forma de tensão contínua. O conversor (atuando como inversor de tensão) monofásico em ponte completa tem a função de realizar a conversão CC-CA (Corrente Contínua para Corrente Alternada) a partir da energia armazenada no banco de capacitores.

A comutação dos interruptores eletrônicos do inversor é governada pela modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) realizada pelo bloco do controlador. O respectivo controlador é responsável pela realização das medidas das variáveis do sistema, ou seja, as correntes e tensões do filtro LCL e da tensão no PCC, do cômputo

da ação de controle e da modulação PWM do inversor. Na Figura 1 ainda é apresentado o modelo da impedância da rede.

3. MODELO MATEMÁTICO DO FILTRO LCL

O modelo matemático do filtro LCL em espaço de estados é expresso por:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_c(t) \\ \dot{V}_C(t) \\ \dot{I}_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \frac{1}{L_c} & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & \frac{1}{L_r} & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_c(t) \\ V_C(t) \\ I_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L_r} \end{bmatrix} \cdot V_r(t)$$

$$y(t) = [0 \quad 0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} I_c(t) \\ V_C(t) \\ I_r(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde $I_c(t)$ é a corrente do lado do conversor, $V_C(t)$ a tensão no capacitor do filtro LCL, $I_r(t)$ a corrente do lado da rede, $U(t)$ a tensão sintetizada pelo inversor, $V_r(t)$ a tensão da rede no ponto de conexão.

E escolhendo a corrente $I_r(t)$ como saída da planta, tem-se a seguinte função de transferência de malha aberta.

$$\frac{I_r(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^3 L_c L_r + s^2 C(R_r L_c + R_c L_r) + s(L_r + L_c + R_c R_r C) + (R_c + R_r)} \quad (2)$$

Neste trabalho, o objetivo é controlar a corrente $I_r(t)$, portanto a equação (3) será utilizada.

4. SIMULAÇÃO DA PLANTA EM MALHA ABERTA

Os parâmetros nominais da planta, baseados em uma bancada experimental do laboratório da instituição, são mostrados na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros do filtro LCL

L_c (mH)	L_r (mH)	R_c (Ω)	R_r (Ω)	C (μ f)
1	0.5	0.05	0.05	60

Substituindo-se os valores da Tabela (1) na Eq. (3) e considerando $R_r = R_{r1}$ e $L_r = L_{r1}$, tem-se

$$G_p(s) = \frac{3.333 \times 10^{10}}{s^3 + 150s^2 + 5.001 \times 10^7 s + 3.333 \times 10^9} \quad (3)$$

A incerteza dos parâmetros da rede podem gerar o deslocamento da frequência de ressonância da planta $G_p(s)$, para ilustrar este problema foi realizado uma simulação comparando a resposta em frequência de $G_p(s)$ com uma planta de variação paramétrica ($G_{pv}(s)$), definindo $R_{rv} = 0.02\Omega$ e $L_{rv} = 0.2 \times 10^{-3}$, tem-se o diagrama de bode na Figura 3:

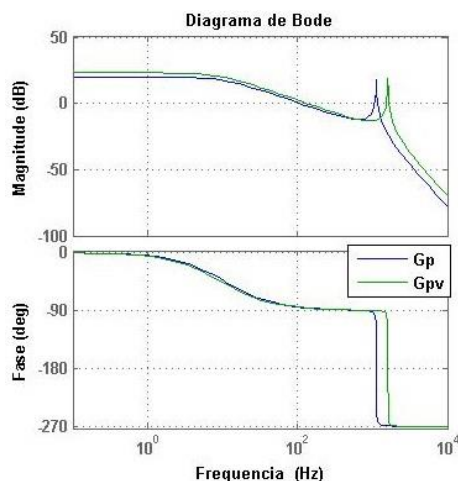


Figura 2 – Resposta em frequência $G_p(s)$ e $G_{pv}(s)$.

Para fins de projeto de um MRAC para o conversor monofásico em questão, primeiramente foi considerado um filtro L no lugar do filtro LCL, pois o primeiro resulta em um modelo matemático de primeira ordem tornando a aplicação do MRAC mais simples. Considerando uma resistência $R_r = R_c + R_{r2}$ e $L_r = L_c + L_{r2}$, onde R_r e L_r representam a impedância do filtro L, R_{r2} e L_{r2} a impedância do lado da rede de valores respectivos de 0.05Ω e 5 mH , tem-se a seguinte função de transferência:

$$G_{p2}(s) = \frac{166.7}{s + 16.67} \quad (4)$$

5. ANÁLISE DO CONTROLADOR MRAC

O controlador adaptativo escolhido para a planta em questão é o MRAC. Neste tipo de controle é definido o comportamento desejado da planta, através de um modelo de referência, que descreve propriedades de entrada e saída desejadas para o sistema em malha fechada, conforme Ioannou, P [7].

Considerando uma planta SISO (Single-Input Single-Output), invariante no tempo, parâmetros desconhecidos, e de fase mínima:

$$G_p(s) = K_p \frac{Z_p(s)}{R_p(s)} \quad (5)$$

Onde $G_p(s)$ é a função de transferência da planta, Z_p e R_p são polinômios mônicos e K_p é o ganho de alta frequência. O modelo de referência, definido pelo projetista para descrever as características desejadas da planta é dado por:

$$W_m(s) = K_m \frac{Z_m(s)}{R_m(s)} \quad (6)$$

Onde $W_m(s)$ é a função de transferência do modelo de referência, Z_m e R_m são polinômios mônicos e K_m é o ganho de alta frequência.

Para se ajustar os ganhos do controlador em tempo real, um algoritmo de adaptação paramétrica deve ser escolhido.

Considerando um modelo de referência:

$$W_m(s) = \frac{2000}{s + 2000} \quad (7)$$

Obteve-se:

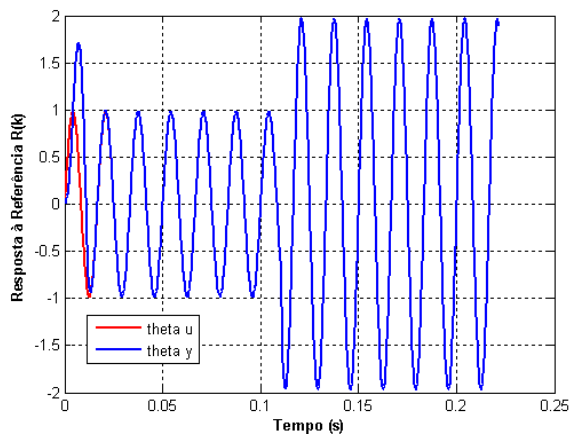


Figura 3 – Resposta em de y_p e y_m a um sinal de referência senoidal

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este resumo apresentou a modelagem e simulação de um conversor estático com filtro LCL conectado à rede de energia elétrica. Devido à incerteza e variação dos parâmetros da rede, controladores adaptativos podem prover amortecimento ativo da ressonância do filtro LCL com bom desempenho e estabilidade. Deste modo, pelo fato da planta não ser bem conhecida, um controlador MRAC é uma solução para controle de corrente deste tipo de sistema de energia, para um filtro L, o controle adaptativo apresentou um ótimo desempenho levando a planta a seguir o modelo de referência em um tempo extremamente pequeno. Assim, a partir da modelagem e simulação da planta com o filtro LCL em malha aberta, o próximo

passo será o projeto do sistema de controle adaptativo da respectiva planta.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Dannehl et. al, “PWM rectifier with LCL-filter using different current control structures”, In:European Conference on Power Electronics and Applications, 2007. EPE’07, p. 1–10.
- [2] Liserre et. al. “Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier”, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, n. 5, p. 1281–1291, September/October 2005
- [3] Wu; Lehn, “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.
- [4] Gabe et. al. “Stability analysis of grid-connected voltage source inverters with LCL-filters using partial state feedback”, In: European Conference on Power Electronics and Applications, 2007. EPE’07, 2007. p. 1–10.
- [5] Ciobotaru et. al. “Online grid impedance estimation for single-phase grid-connected systems using PQ variations”, In: IEEE 38th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC’07, p. 2306–2312.
- [6] Loh e Holmes em “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.
- [7] IOANNOU, P.; DATTA, A. Robust adaptive control: A unified approach. Proceedings of the IEEE, v. 79, p. 1736 - 1768, 1991.