

# MODELAGEM E CONTROLE DE CONVERSORES TRIFÁSICOS A TRÊS FIOS LIGADOS À REDE ATRAVÉS DE FILTRO LCL

**André Miguel Nicolini**

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria  
andrenicoliniee@gmail.com

**Humberto Pinheiro**

Professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria  
humberto.ctlab.ufsm.br@gmail.com

**Resumo.** Este artigo apresenta o modelo discreto para um conversor trifásico a três fios ligado a rede através de um filtro LCL. É realizada a transformação das coordenadas estacionárias trifásicas para coordenadas  $\alpha\beta 0$  em tempo discreto e depois para coordenadas síncronas  $qd0$ , que facilitarão a implementação do controle sobre o sistema. No modelo, será utilizada como possibilidade de saída, a corrente do lado da rede, porém a mesma análise pode ser estendida para a corrente do lado do conversor. É efetuado o controle da planta através de um controlador PI, que possibilita a inserção de um polo na origem, e com determinadas constantes  $k$  e  $T_i$  pode deixar a saída do modelo estável. A análise da resposta no tempo discreto e a localização dos polos e zeros em malha fechada são mostradas para observação da estabilidade do sistema.

**Palavras-chave:** Conversores trifásicos a três fios. Filtro LCL. Controlador de corrente PI.

## 1. INTRODUÇÃO

O interesse pela utilização das fontes renováveis na produção de energia elétrica tem sido impulsionado pela sempre crescente demanda de energia, pelo esgotamento dos combustíveis fósseis, pela baixa eficiência global, pela poluição causada pelas usinas convencionais (ALMEIDA, 2011).

Os conceitos atuais de geração distribuída permitem a integração das fontes de energias renováveis ao Sistema Elétrico de Potência, e conversores de potência são utilizados para fazer o interfaceamento entre esses (ARAÚJO, 2012). A operação em alta frequência dos interruptores produz harmônicos em torno da frequência de comutação. Assim, torna-se necessário a utilização de filtros na entrada do retificador PWM a fim de atenuar tais harmônicos (NISHIOKA et al., 2010).

Assim o estudo de conversores conectados a rede através de um filtro se mostra de grande importância no contexto atual, pois é possível utilizá-lo em diversas aplicações, como na conversão da energia gerada por painéis solares, em um estágio de conversão da energia gerada pelas turbinas eólicas, entre outros.

## 2. MODELAGEM DO SISTEMA

Um conversor trifásico a três fios ligado à rede através de filtro LCL é mostrado na Fig. 1. Para conhecermos o modelo dinâmico do mesmo é realizado a sua modelagem em matrizes espaço de estado.

Apesar de saber-se que a rede não possuiu características puramente indutivas; devido ao fato das cargas não lineares, banco de capacitores e outros equipamentos ligados a ela; na dedução considera-se esta como um equivalente de Thevenin de uma fonte trifásica alternada balanceada e uma impedância série equivalente com características indutivas. Já no conversor,

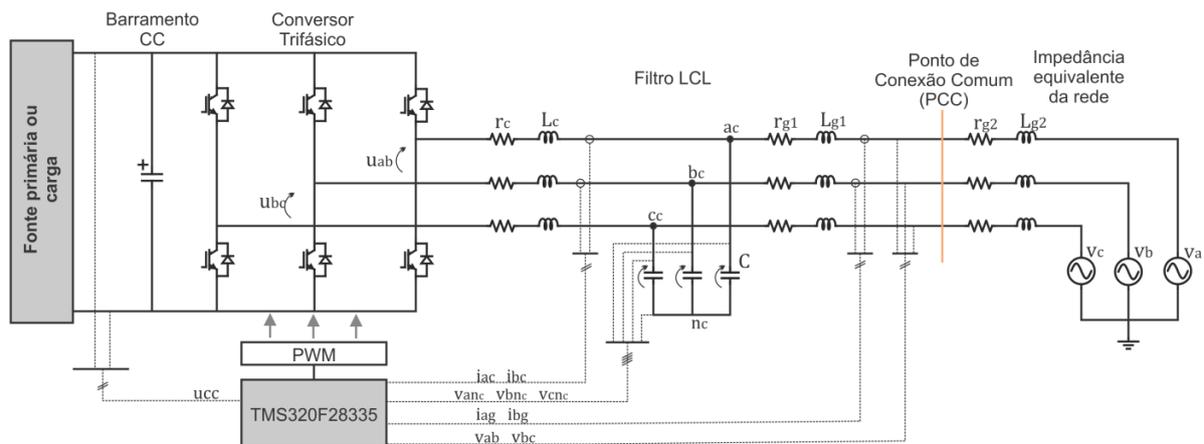


Figura 1 - Conversor Trifásico a Três Fios Conectado a rede através de um Filtro LCL

será considerado o modelo médio do conversor PWM, onde apesar das variáveis de controle serem discretas é possível aproximar a tensão de saída a um valor no tempo contínuo pelo comportamento médio em um período, sem alterar significativamente a resposta do sistema.

Das correntes do lado do conversor, das correntes do lado da rede, e dos nós das conexões dos capacitores no filtro LCL encontram-se equações que representam o modelo do sistema em coordenadas trifásicas estacionárias abc. Elas podem ser reorganizadas e representadas em forma de equações de espaço de estado. Os valores trifásicos são transformados para coordenadas bifásicas estacionárias  $\alpha\beta 0$  e são passados do tempo contínuo para tempo discreto já adicionado o atraso de transporte de uma amostra associado à implementação digital. Então, são transformados para coordenadas síncronas dq0, onde as grandezas são contínuas em regime permanente, facilitando a ação de controle que pode alcançar valores sem erro em regime permanente (DANNEHL et al., 2009).

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq0}(k+1) &= \mathbf{A}_{dq0} \mathbf{x}_{dq0}(k) + \mathbf{B}_{dq0} \mathbf{u}_{dq0}(k) \\ &\quad + \mathbf{F}_{dq0} \mathbf{v}_{dq0}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{dq0}(k) = \mathbf{C}_{dq0} \mathbf{x}_{dq0}(k)$$

A Equação (1) é o modelo discreto em coordenadas síncronas dq0 para conversor trifásico a três fios com um filtro LCL conectado a rede. Neste tipo de transformação existe acoplamento entre os eixos q e d. A coordenada 0 da transformação pode ser desprezada já que não há caminho para esta corrente no sistema apresentado.

Com o modelo da planta discretizado em coordenadas dq0, representado em matrizes espaço de estado Eq. (1), é possível obter um controlador PI para implementação digital, que leve a saída a um valor sem erros em regime permanente.

### 3. CONTROLADOR DE CORRENTE

O controlador a ser utilizado será o proporcional-integral (PI). A parte proporcional tem como característica aumentar a velocidade de resposta do sistema, porém pode tornar o sistema instável e oscilante. Já a parte integral, adiciona um polo no zero, e integra o erro da resposta de saída, e se bem dimensionado pode levar a erro nulo em regime permanente com sinal de referência constante.

$$G_{pi} = k \frac{s^{Ti+1}}{s^{Ti}} \quad (2)$$

Para o projeto deste controlador o acoplamento entre os eixos d e q é desprezado, e por isso ele é projetado para cada eixo independentemente.

Utilizou-se a Eq. (3), analisada por DANNEHL et al. (2009), para aproximar-se de valores de k e  $T_i$  que deixassem a planta estável.

$$k = -\frac{L_f}{2T_c} \quad T_i = a_1^2 \cdot T_c \quad a_1 = 3 \quad (3)$$

O resultado encontrado é utilizado como base das constantes do controlador, e será realizada uma estimativa desses parâmetros caso haja necessidade de valores que melhorem o tempo e o valor final da reposta da planta a uma entrada degrau unitária.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

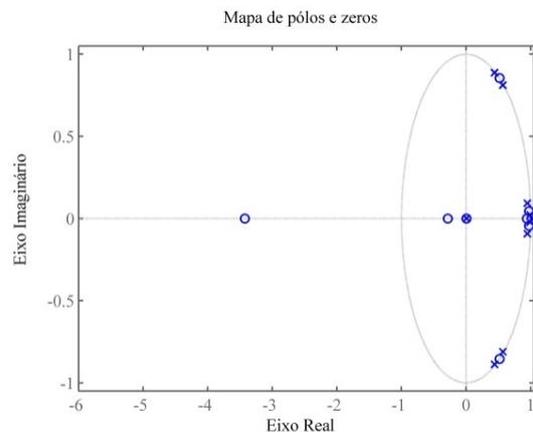
Para verificação do comportamento do modelo utilizando os valores mostrados na Tabela 1, plotou-se a resposta no tempo e os lugares dos polos e raízes em malha fechada.

Tabela 1 - Valores utilizados para validação do modelo

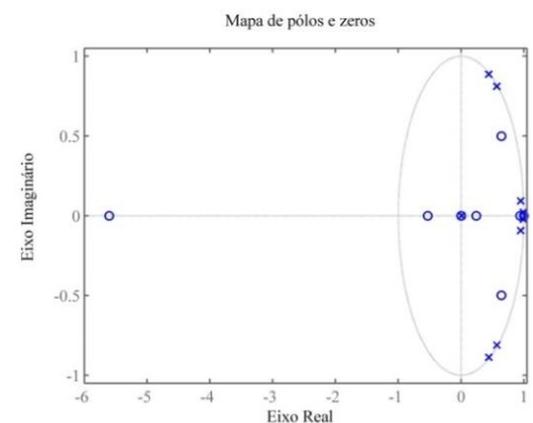
Símbolo	Discriminação	Valores
$V_1$	Tensão da rede (linha)	220 V
I	Corrente nominal por fase	26,2 A
$V_{cc}$	Tensão barramento CC	400 V
$f_c$	Frequência de comutação	5 kHz
$L_{g2}$	Indutância da rede	0-1 mH
$r_{g1}$	Resistencia parasita	0,05Ω
$r_c$	Resistencia parasita	0,05Ω
$L_c$	Indutância do Conversor	1 mH
$L_{g1}$	Indutância do lado da rede	0,5 mH
C	Capacitor do Filtro	60 μF

O modelo encontrado é de 7ª ordem. Existem três pares de polos complexos

conjugado, onde um deles está próximo da frequência  $\omega$  e os outros dois próximos da frequência  $\omega_{res} \pm \omega$ . O controlador PI adicionou um pólo na origem e o ganho kp modificou a localização dos polos da planta, que é mostrado na Fig. 2.



(a) Entrada  $u_q(z)$ ; Saída  $y_q(z)$



(b) Entrada  $u_q(z)$ ; Saída  $y_q(z)$

Figura 2 - Mapa de polos e zeros do modelo com controlador PI

A reposta de saída Fig. 3, da corrente de linha mostrou-se satisfatória, com tempos reduzidos e uma sobre-elevação de sinal de 30%, que poderia ser reduzida com um controlador anti-windup. O valor em regime permanente teve erro nulo, com uma entrada de referência degrau.

A limitação do controlador quanto à frequência de comutação das chaves fica em torno de 3-7kHz, valores fora desta margem tornam a reposta de saída instável, pois alguns polos do modelo controlado em malha fechada são levados em direção

contrária ao centro do círculo unitário  $z$  do tempo discreto.

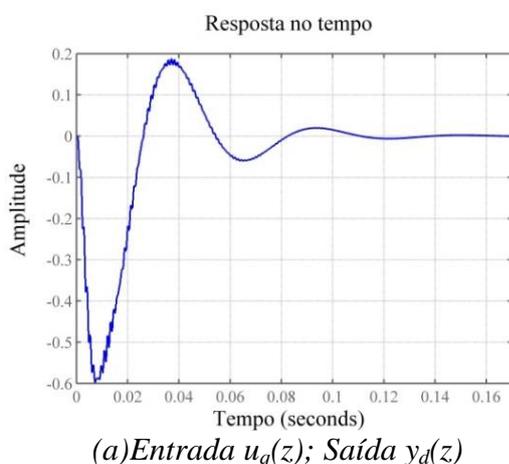
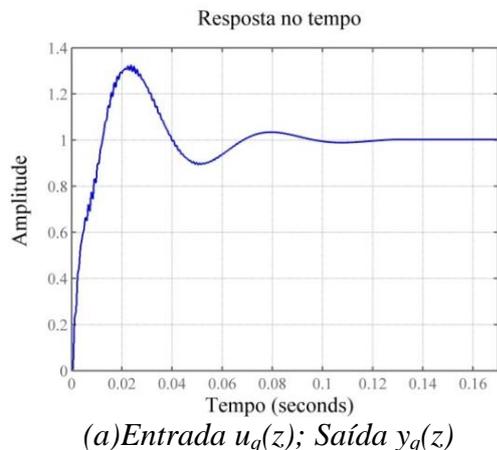


Figura 3 - Resposta no tempo para o modelo com controlador PI

## 5. CONCLUSÃO

O modelo discreto em coordenadas  $dq0$  do conversor trifásico a três fios conectado à rede através de filtro LCL é de 7º ordem, e apresenta um zero fora do círculo de estabilidade do tempo discreto  $z$ , sendo assim uma planta de fase não mínima que apresenta resposta instável para uma entrada de referência unitária.

O controlador PI projetado, após uma oscilação inicial, manteve a resposta seguindo o sinal de referência com erro de regime permanente nulo. Valores entre 3-7 kHz de chaveamento mantêm a estabilidade do sistema controlado e valores fora dessa margem podem levar a saída da planta a ficar instável.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Araújo, R. D., “Projeto e Simulação de Filtros L e LCL para Interconexão de Inversor NPC Trifásico à Rede”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2012.

Borgonovo, D., “Modelagem e Controle de Retificadores PWM Trifásicos Empregando a transformação de Park”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

De Almeida, P. M., “Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão Utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juíz de Fora, 2011.

Dannehl, J., Wessels, C., Fuchs, F. W., “Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control for Grid-Connected PWM Rectifiers With LCL Filters”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 56, no. 2, Feb. 2009.

Massing, J., “Controle Adaptativo de Corrente Aplicado a Conversores Estáticos Conectados à Rede Elétrica”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

Nishioka, J. K., Mezaroba, M., Michels, L., Rech, C., “Retificador PWM Trifásico a Quatro Fios com Filtro LCL e Amortecimento Ativo”, *Induscon 2010*.

Nicolini, A. M., Pinheiro, H., Modelagem de Conversores Trifásicos a Três Fios Ligados à Rede Através de Filtro LCL, *28ª Jornada Acadêmica Integrada da UFSM*, 2013.

Ogata, K., *Engenharia de Controle Moderno*, 4ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.