



## Estudo do inversor PWM trifásico conectado à rede de distribuição

### RESUMO

**Kamilla Pittol**  
[kamillapittol@alunos.utfpr.edu.br](mailto:kamillapittol@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Rafael Cardoso**  
[rcardoso@utfpr.edu.br](mailto:rcardoso@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

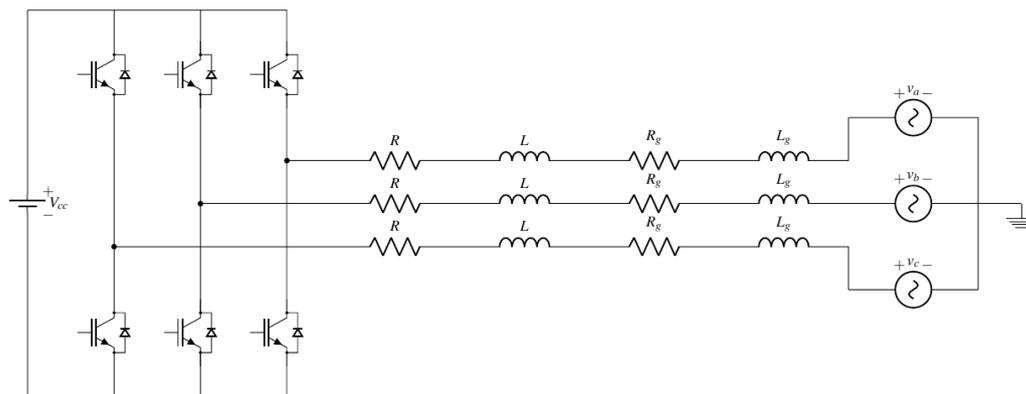
**OBJETIVO:** O intuito deste trabalho é fazer o estudo de comportamento de um inversor PWM trifásico conectado à rede de distribuição. **MÉTODOS:** Modelagem do sistema representado pelo inversor trifásico conectado à rede, o projeto de controle para o inversor e a simulação computacional considerando a rede ideal e a análise dos efeitos das incertezas considerando a rede não ideal. **RESULTADOS:** Os resultados obtidos foram o controle de corrente do sistema, com tensão estável da rede de distribuição. **CONCLUSÕES:** As perdas na linha de distribuição obedecem a Lei de Ohm, ou seja, quanto maior os parâmetros de resistência e indutância da linha, menor é o valor de corrente. O sistema de controle estabiliza o sistema, mas não consegue zerar o erro pela referência devido à essas perdas pela resistência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Inversor trifásico. PWM. Sistema de controle .

## INTRODUÇÃO

A energia produzida pelos meios renováveis tem a necessidade de passar por uma adequação de níveis de tensão e forma de onda, feita por um inversor CC/CA, que transforma a corrente contínua gerada em corrente alternada. O sistema que representa o inversor trifásico ligado à rede de distribuição é apresentado na Figura 1. Assim, o intuito desse trabalho é fazer o estudo de comportamento de um inversor PWM trifásico conectado à rede de distribuição,

Figura 1 - Circuito representativo do inversor trifásico a ser modelado.



Fonte: Autoria própria.

## MODELAGEM DO INVERSOR TRIFÁSICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

O circuito da Figura 1 foi modelado a partir da análise de circuitos elétricos, com equações de tensões e correntes definidas pelas Leis de Kirchoff, equações bases para a modelagem do sistema em espaço de estados, Equações 1, 2 e 3.

$$i_{L_a} + i_{L_b} + i_{L_c} = 0 \quad (1)$$

$$-u_a + (R + R_g) \cdot i_{L_a} + v_{L_a} + v_{L_{ga}} + v_a - v_b - v_{L_{bg}} - (R + R_g) i_{L_b} + u_b = 0 \quad (2)$$

$$-u_b + (R + R_g) \cdot i_{L_b} + v_{L_b} + v_{L_{gb}} + v_b - v_c - v_{L_{gc}} - (R + R_g) i_{L_c} + u_c = 0 \quad (3)$$

Esta forma de circuito resulta em um sistema de equações linearmente dependentes, apresentado na Equação 4.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Fw(t) \quad (4)$$

As matrizes  $A$ ,  $B$  e  $F$  são obtidas a partir de componentes físicos do circuito e os vetores  $x$ ,  $u$  e  $w$  são parâmetros do circuito. Sendo  $x$  determinado pelas correntes de linha que circulam pelo circuito, o vetor  $u$  são as tensões de controle do inversor e o vetor  $w$  são as tensões de fase da rede elétrica.

Sendo  $i_{L_a}$ ,  $i_{L_b}$  e  $i_{L_c}$  as correntes de linha do sistema e as variáveis de estado representadas pelo vetor  $x$ , as Equações 2 e 3 a soma das tensões existentes nas duas malhas do sistema, com a manipulação matemática das três equações é possível chegar a representação matemática em espaço de estados do sistema, com as matrizes correspondentes apresentadas abaixo.

$$x = \begin{bmatrix} i_{L_a} \\ i_{L_b} \\ i_{L_c} \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad w = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$



$$A = \begin{bmatrix} \frac{-2(R + R_g)}{3(L + L_g)} & \frac{R + R_g}{3(L + L_g)} & \frac{R + R_g}{3(L + L_g)} \\ \frac{R + R_g}{3(L + L_g)} & \frac{-2(R + R_g)}{3(L + L_g)} & \frac{R + R_g}{3(L + L_g)} \\ \frac{R + R_g}{3(L + L_g)} & \frac{R + R_g}{3(L + L_g)} & \frac{-2(R + R_g)}{3(L + L_g)} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{2}{3(L + L_g)} & \frac{-1}{3(L + L_g)} & \frac{-1}{3(L + L_g)} \\ \frac{-1}{3(L + L_g)} & \frac{2}{3(L + L_g)} & \frac{-1}{3(L + L_g)} \\ \frac{-1}{3(L + L_g)} & \frac{-1}{3(L + L_g)} & \frac{2}{3(L + L_g)} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{-2}{3(L + L_g)} & \frac{1}{3(L + L_g)} & \frac{1}{3(L + L_g)} \\ \frac{1}{3(L + L_g)} & \frac{-2}{3(L + L_g)} & \frac{1}{3(L + L_g)} \\ \frac{1}{3(L + L_g)} & \frac{1}{3(L + L_g)} & \frac{-2}{3(L + L_g)} \end{bmatrix}$$

As tensões e correntes trifásicas relacionadas ao sistema são representadas por fasores. A projeção dos três fasores sobre dois eixos estacionários  $\alpha\beta$  representam a transformada de *Clarke*, que será aplicada ao sistema em espaço de estados.

A transformada de *Park* utiliza como referência dois eixos girantes com velocidade angular  $\omega$ , o eixo direto e o eixo em quadratura. Estes eixos girantes proporcionam duas tensões que antes eram variantes no tempo, e agora são constantes no tempo a partir da sua referência. As transformadas são aplicadas e resultam no sistema apresentado na Equação 5.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(R + R_g)}{L + L_g} & \omega \\ \omega & -\frac{(R + R_g)}{L + L_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L + L_g} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L + L_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L + L_g} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L + L_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

## PROJETO DE CONTROLE

A partir do sistema da Equação 5, obtém-se a função de transferência equivalente do sistema, aplicando transformada de Laplace ao sistema. Assim, a função de transferência linearmente independente que representa o sistema no eixo direto é apresentado na Equação 6.

$$\frac{I_d(s)}{U_d(s)} = \frac{1}{(L + L_g)s + (R + R_g)} \quad (6)$$

Para o projeto do sistema de controle do inversor, a impedância da linha será desprezada,  $Z_g$ . Um controlador PI será projetado a partir de valores típicos de indutância  $L$  e a resistência será unitária, com  $L = 2,5mH$ .

Aplicando o compensador PI na planta do sistema em malha fechada, obtém-se a função de transferência da Equação 7, aplicando condições de estabilidade, encontra-se a condição de valores para os ganhos do compensador para que o sistema seja estável. A inserção de um polo na origem pelo compensador leva o sistema à referência em malha fechada.

$$G_{MF}(s) = \frac{K_p s + K_i}{Ls^2 + (R + K_p)s + K_i} \quad (7)$$

O critério de escolha dos valores dos ganhos está relacionado com o tempo de resposta do sistema, com isso os ganhos definidos foram  $K_p = 120$  e  $K_i = 400$ .

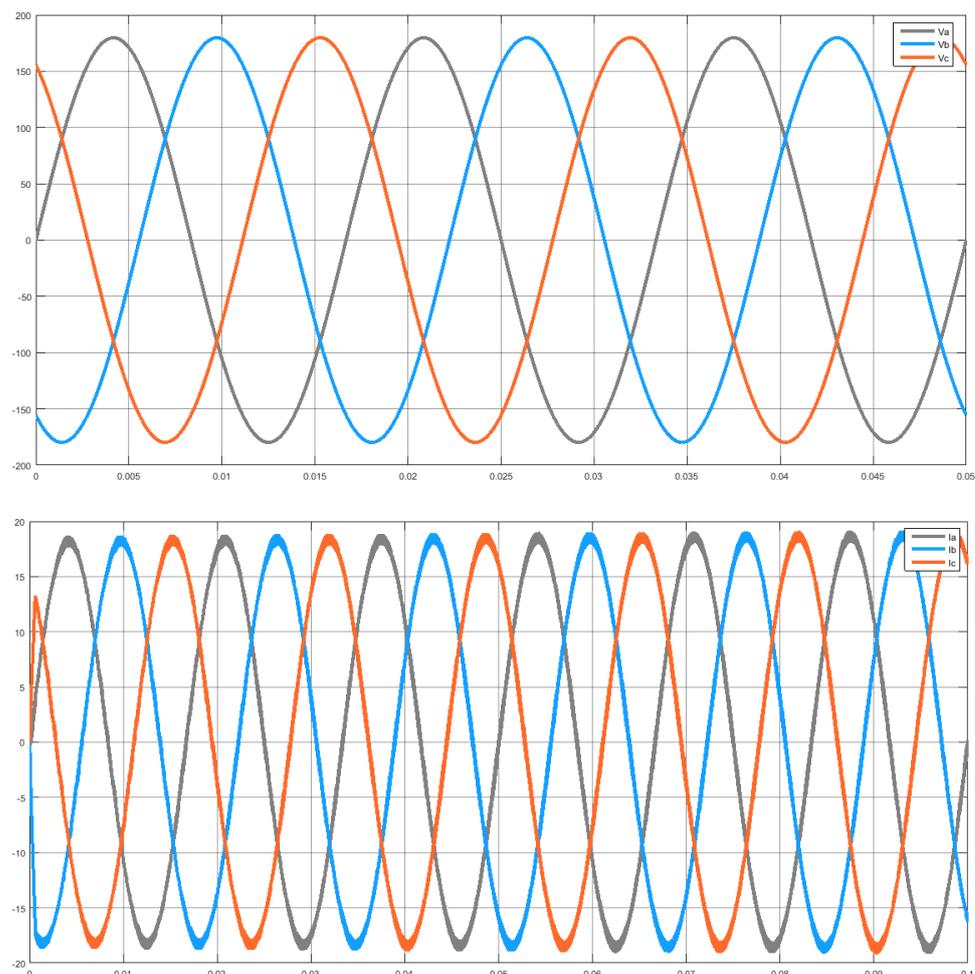
### RESULTADOS E CONCLUSÕES

O sistema foi simulado e o controle projetado foi incluído no sistema, na forma de duas malhas de controle independentes nos eixos dq, com referência de um degrau com amplitude 20 e uma constante zero. A tensão trifásica do sistema tem amplitude de pico de 180V e são defasadas  $120^\circ$  entre elas. As tensões do sistema e as correntes controladas são apresentadas na Figura 3.

Com o desenvolvimento desse trabalho foi feita a validação da modelagem do sistema e do projeto de controle, um controlador PI. Para maior simplificação do projeto de controle do sistema, foram utilizadas as transformadas de *Clarke* e *Park*. A utilização do controlador PI só foi possível devido a utilização das transformações de coordenadas.

Com a análise dos dados apresentados anteriormente, pode-se perceber que a tensão não possui variação independente dos parâmetros da linha, alterando somente as correntes de saída, no qual a perda de amplitude na corrente ocorre devido ao aumento da resistência da linha, obedecendo a lei de Ohm.

Figura 3 - Tensões trifásicas do sistema e correntes trifásicas controladas para resistência unitária e indutância de 2,5mH.



---

## Study of three-phase PWM inverter connected to the distribution network

### ABSTRACT

**OBJECTIVE:** The purpose of this work is to study the behavior of a three-phase PWM inverter connected to the distribution network. **METHODS:** Modeling of the system represented by the three-phase inverter connected to the grid, the control design for the inverter and the computational simulation considering the ideal network and the analysis of the effects of the uncertainties considering the non-ideal network. **RESULTS** The results obtained were the current control of the system, with stable voltage of the distribution network. **CONCLUSIONS:** The losses in the distribution line obey Ohm's Law, that is, the higher the line resistance and inductance parameters, the lower the current value. The control system stabilizes the system, but can't clear the error by reference because of such resistance losses.

**KEYWORDS:** Three-phase inverter. PWM. Control system.

---

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Cassius Rossi de. **Estudo e Análise de Algoritmos de Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída Conectdos á Rede de Distribuição**. [S.l.:s.n.]. 2013.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. [S.l.: s.n.], 2017.

BARBI, Ivo. **Teoria fundamental do motor de indução**. Florianopolis: Editora da UFSC, 1985.

BOTTERÓN, Fernando. **Análise, projeto e implementação de um inversor PWM trifásico para UPS de média potência**. vol. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Santa Maria, RS, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

GUISSO, Igor Luiz, **Estudo e desenvolvimento de um algoritmo de detecção da operação ilhada para sistemas pv, aplicado a um microinversor baseado no conversor zeta**. 2015.

IEA. **Medium-Term Renewable Energy Makert Report**. [S.l.]: 9 rue de la Flédlération, Paris, France., Outubro, 2016

JOHNSON, David E.; HILBURN, John L.; JOHNSON, Johnny R. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. Livros Tecnicos e Cientificos, 1994.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Programa de desenvolvimento da geração distribuída de energia elétrica**. 2015.

NISE, Norman S.; DA SILVA, Fernando Ribeiro. **Engenharia de sistemas de controle**. LTC, 2002.

OGATA, Katsuhiko; YANG, Yanjuan. **Modern control engineering**. 1970

**Recebido:** 31 ago. 2017.

**Aprovado:** 02 out. 2017.

**Como citar:**

PITTOL, K. et al. Estudo do inversor trifásico PWM conectado à rede de distribuição. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Kamilla Pittol

Avenida Tupi, 2263. Centro, Pato Branco, Paraná, Brasil.

**Direito autoral:**

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional.

