



Inversores integrados baseados no conversor Zeta em sistemas fotovoltaicos

Integrated inverters based on the Zeta converter in photovoltaic systems

Anderson Aparecido Dionizio *, Leonardo Poltronieri Sampaio †,
Sergio Augusto Oliveira da Silva ‡

RESUMO

Este artigo apresenta o estudo de duas estruturas de inversores integrados utilizados como conversores de interface em sistemas de geração fotovoltaicos (FV) conectados à rede elétrica monofásica. Ambos os conversores operam no modo de condução descontínua (MCD), sendo então analisados em diferentes etapas de condução. A partir da análise dessas etapas é possível encontrar a representação por um modelo médio de espaços de estados e, converter essa representação em uma função de transferência para o modelo de pequenos sinais. No sistema de controle são utilizados compensadores do tipo PI multi-malhas associados com algoritmos de PLL (*Phase Locked Loop*) e *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), garantindo a extração da máxima potência e sincronismo com a rede elétrica. O objetivo do controle é injetar na rede elétrica uma corrente senoidal com baixa distorção harmônica total (DHT), enquanto realiza a elevação da tensão de entrada. Por meio dos resultados de simulação os modelos são validados os desenvolvimentos teóricos, bem como a viabilidade do conversor.

Palavras-chave: Fotovoltaico. Inversor Integrado. Eletrônica de potência. Conversor Zeta

ABSTRACT

This paper presents the study of two structures of integrated inverters used as interface converters in photovoltaic (PV) generation systems connected to the single-phase utility grid. Both converters operate in discontinuous conduction mode (DCM), being then analyzed in different conduction stages. From the analysis, it is possible to find the representation by a state space average model and, convert this representation into a transfer function for the small-signal model. The control system uses multi-loop PI controllers associated with PLL (Phase Locked Loop) and Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms, ensuring maximum power extraction and synchronism with the mains. The purpose of the control is to inject a sinusoidal current with low total harmonic distortion (THD) into the mains while performs the step-up of the input voltage. By means of simulation results, the theoretical developments are valided, as well as the converter feasibility.

Keywords: Photovoltaic. Integrated inverter. Power electronics Zeta converter

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade desempenha um papel fundamental na humanidade. As fontes ditas renováveis são aquelas em que os recursos são considerados ilimitados, exemplos comuns são a energia solar, a eólica, a hidráulica, e a geotérmica (VILLALVA, 2015).

* Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; ✉ dionizio@alunos.utfpr.edu.br.

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; ✉ sampaio@utfpr.edu.br.

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; ✉ augus@utfpr.edu.br.

A geração de eletricidade por um arranjo PV ocorre em CC, porém para utilização na rede elétrica é necessário converter tensão e corrente para forma CA, geralmente uma senoide de 60 Hz . Uma das maneiras de se realizar tal conversão é com o uso de conversores estáticos como inversores de tensão.

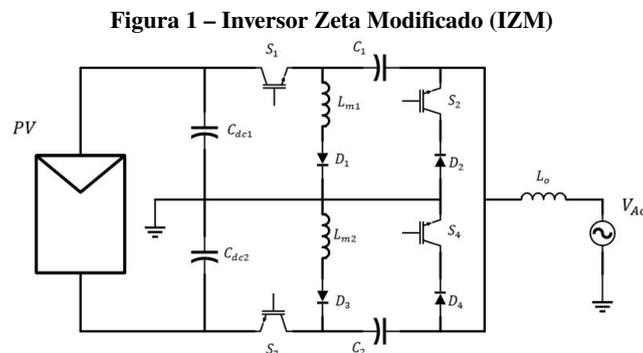
Quando a tensão gerada pelo arranjo PV não possui amplitude para utilização de um inversor de tensão, é preciso utilizar uma estrutura de conversor que realize a adequação desta tensão em um barramento CC, criando assim uma estrutura de duplo estágio, no primeiro estágio geralmente são utilizados conversores elevadores como o Boost. No segundo estágio é utilizado um conversor responsável pela conversão CC/CA, como o full-bridge.

Com o objetivo de minimizar perdas, reduzir volume e aumentar a eficiência são utilizadas estruturas de simples estágio, onde a tensão gerada pelo módulo PV passa por um único conversor CC/CA responsável por fazer a injeção da energia gerada na rede.

Sobre a estrutura de simples estágio é possível utilizar novas topologias? Com este propósito este artigo tem o objetivo de analisar duas estruturas integradas baseadas no conversor CC Zeta, chamadas de Inversor Zeta Modificado (IZM) e Inversor Integrado Zeta Modificado (I2ZM).

2 MÉTODO (OU PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA)

Baseado no conversor Zeta, foi proposto (SAMPAIO; SILVA; COSTA, 2019) uma estrutura integrada chamada de Inversor Zeta Modificado (IZM). O conversor proposto atua em sistemas PV conectados a rede elétrica monofásica, a estrutura do conversor é apresentada na Figura 1.



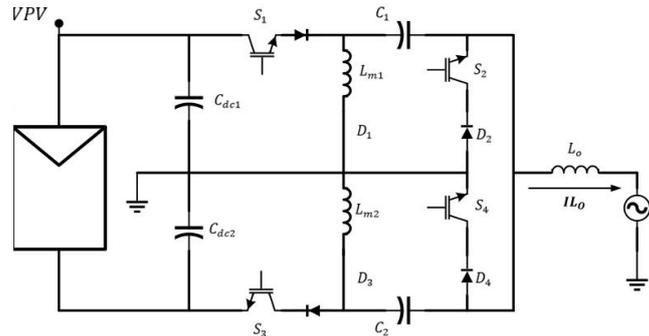
Fonte: Autoria própria (2021).

O IZM trabalha em modo de condução descontínua, no processo de injeção de corrente na rede elétrica uma parcela dos componentes atua ativamente durante o semiciclo positivo da corrente, enquanto outra parcela atua no semiciclo negativo, os diodos em série com os indutores L_{m1} e L_{m2} não permitem a troca de corrente entre estes e o indutor de saída L_o na terceira etapa de condução, quando a corrente do indutor é descarregada.

O I2ZM apresentado na Figura 2 também é baseada no conversor CC/CC Zeta e pode ser visto como uma variação da primeira estrutura apresentada. Com a retirada dos diodos D_1 e D_3 em série com os indutores L_{m1} e L_{m2} , respectivamente, o conversor passa a permitir a troca de energia entre os indutores durante a terceira etapa de condução, os diodos D_1 e D_3 são inseridos em série com as chaves S_1 e S_3 , para impedir a recirculação de corrente da rede elétrica para o arranjo PV.

Para o controlador inicialmente são medidas a tensão e corrente do arranjo PV, essas grandezas passam pelo algoritmo de MPPT que gera uma tensão de referência V_{ref} . A tensão V_{ref} é comparada com a tensão atual do arranjo PV. O erro entre as duas tensões passa por um compensador Proporcional-Integral (PI) de tensão,

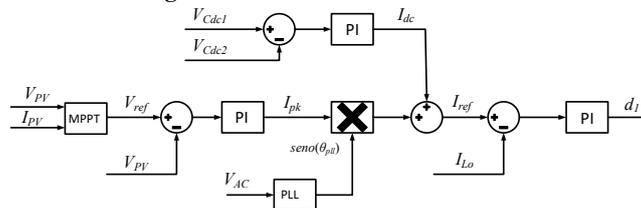
Figura 2 – Inversor Integrado Zeta Modificado



Fonte: Autoria própria (2021).

responsável por gerar uma corrente de pico para a extração da máxima potência do painel. Para garantir o sincronismo dessa corrente com a rede elétrica ela é multiplicada por um seno do PLL e também é somada uma pequena corrente responsável por manter o equilíbrio de tensão entre os capacitores C_{dc1} e C_{dc2} . Por fim é gerada a corrente de referência I_{ref} que é comparada com a corrente no indutor L_o , gerando o erro que passa por outro controlador PI gerando a razão cíclica. A Figura 3 apresenta a estrutura do controlador responsável por gerar a razão cíclica.

Figura 3 – Estrutura do controlador



Fonte: Autoria própria (2021).

Enquanto a Figura 4 apresenta a estrutura de controle responsável pelo acionamento das quatro chaves dos inversores IZM ou I2ZM. É possível observar que o acionamento das chaves depende da rede elétrica, sendo atuante no semiciclo positivo as chaves S_1 e S_2 e no semiciclo negativo as chaves S_3 e S_4 .

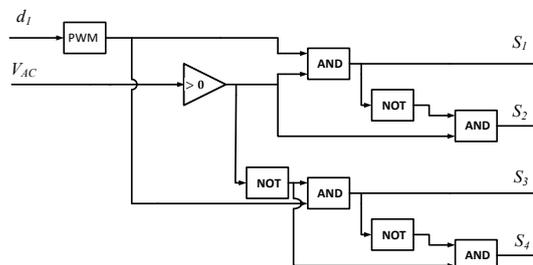


Figura 4 – Estrutura de acionamento das chaves

No processo de obtenção de um modelo matemático para um sistema é preciso ponderar simplicidade e precisão, de forma que seja obtido um modelo simplificado que represente de forma fiel o sistema dinâmico. Por vezes são descartadas não linearidades presentes no sistema físico se estes apresentarem pouca contribuição para a resposta do sistema (OGATA, 2010).



Trabalhos como os apresentados em (JIAN SUN et al., 2001) e (GHOSH; KANDPAL, 2010) são utilizados como base para a modelagem de conversores CC/CC operando no modo de condução descontínuo. Para o IZM partindo das simplificações e desconsiderando as perdas nos componentes chega-se no modelo médio.

Uma função de transferência é uma maneira de relacionar a saída e a entrada de algum sistema (OGATA, 2010). É possível transformar um sistema representado pelo modelo médio de espaços e estados para função de transferência. Com isso as funções de transferência que relacionam a corrente do indutor L_o com a razão cíclica dos inversores integrados são descritas abaixo pelas equações (1) e (8).

$$Gid_{IZM}(s) = \frac{a_0 + a_1}{b_0s^3 + b_1s^2 + b_2s + b_3} \quad (1)$$

Onde:

$$a_0 = (V_{Ca} + V_g)(C_a L_m T_S V_g D s^2 + 2C_a L_m V_{Ca} s + 2L_m \bar{I}_{Lm-T_S V_g D^2}) \quad (2)$$

$$a_1 = C_a D L_m (2V_{Ca} + D T_S V_g s) \left(\frac{I_{L_o}}{C_a} + \frac{D T_S V_g}{C_a L_m} \right) \quad (3)$$

$$b_0 = C_a D L_m L_o T_S V_g \quad (4)$$

$$b_1 = C_a D L_m R T_S \quad (5)$$

$$b_2 = 2\bar{I}_{Lm} L_m L_o - D^2 L_o T_S V_g + D^3 L_m T_S + 2C_a L_m R V_{Ca} \quad (6)$$

$$b_3 = 2D^2 L_m V_{Ca} - D^2 R T_S V_g + 2\bar{I}_{Lm} L_m R \quad (7)$$

$$Gid_{I2ZM}(s) = \frac{2I_{L_o} V_{Ca} V_g + 2\bar{I}_{Lm} V_{Ca} V_g / D - 4\bar{I}_{Lm} V_g^2}{C_a L_o V_{Ca}^2 s^2 + C_a V_{Ca}^2 R s + I_{L_o} V_{Ca} R - V_{Ca} D V_g + V_{Ca}^2 - \bar{I}_{Lm} V_g R} \quad (8)$$

O controle de tensão nos capacitores do barramento CC, C_{dc1} e C_{dc2} , é feito através do princípio da conservação de energia, onde a energia gerada pelo arranjo PV é transferida pelo conversor para saída, sendo representada por:

$$V_{PV} I_{C_{dc}} = \frac{V_p I_p}{2} \quad (9)$$

Desconsiderando os termos de segunda ordem, variações na tensão de saída \hat{v}_p , além de aplicar Laplace desconsiderando as condições iniciais encontra-se a função de transferência $Gvi(s)$.

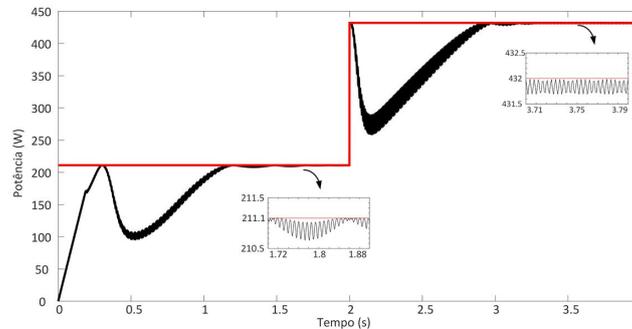
$$Gvi(s) = \frac{\hat{v}_{PV}(s)}{\hat{i}_p(s)} = \frac{V_p}{2V_{PV} C_{dc} s} \quad (10)$$

3 RESULTADOS

Com o algoritmo de MPPT é possível analisar a potência que foi extraída do arranjo PV, de acordo com o modelo do arranjo a máxima potência para $500W/m^2$ e $25^\circ C$ é de $211,1W$, já para *Standard Test Conditions* STC o fabricante informa que a potência de cada módulo é de $54W$, totalizando na associação de oito módulos

na potência de 432W. A Figura 5 mostra a potência extraída do arranjo, além de detalhar a potência quando o sistema atinge MPP.

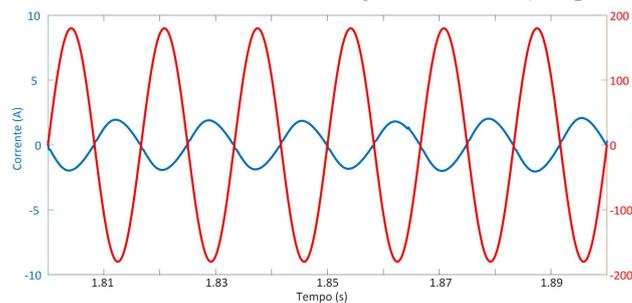
Figura 5 – Potência extraída de arranjo PV para o IZM



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 6 mostra que a corrente está em contra-fase com a rede elétrica, indicando que está sendo injetada na rede.

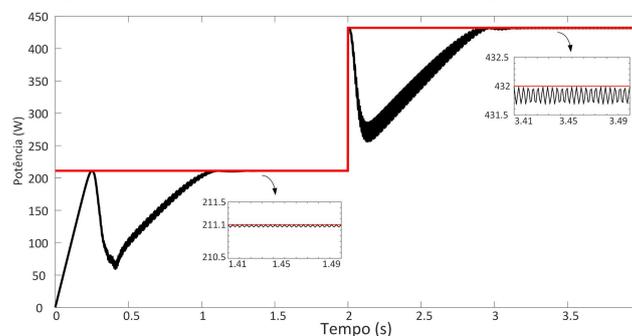
Figura 6 – Tensão da rede e corrente injetada em 500W/m² para o IZM



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o I2ZM as oscilações em torno da máxima potência são menores, enquanto o tempo de resposta para encontrar a máxima potência é parecido em ambos inversores, a Figura 7 apresenta a potência extraída do arranjo PV e sua referência.

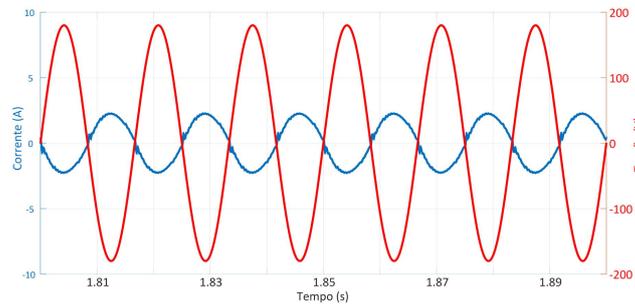
Figura 7 – Potência extraída de arranjo PV para o I2ZM



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 8 mostra a corrente de saída do I2ZM e a tensão da rede quando o sistema opera com a irradiação de 500 W/m², de forma que a corrente está em contra-fase com a tensão indicando que está sendo injetada na rede.

Figura 8 – Tensão da rede e corrente injetada em $500W/m^2$ para o I2ZM



Fonte: Autoria própria (2021).

4 CONCLUSÕES

Ambos os inversores foram capazes de elevar a tensão do arranjo fotovoltaico, enquanto injetam uma corrente senoidal na rede elétrica. Para ambos casos o algoritmo de MPPT conseguiu rastrear a máxima potência para diferentes irradiações sobre o arranjo PV, associado com os controladores empregados garante a injeção de potência ativa na rede elétrica.

Os resultados de simulação mostram que ambos os conversores são capazes de atuar em sistemas de geração fotovoltaico de simples estágio como conversores integrados, atuando na regulação da tensão gerada pelo arranjo PV e transformação CC/CA.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao suporte financeiro concedido pelo CNPq pela bolsa PIBIC chamada CNPq nº 02/2020 processo 129233/2020-0 que possibilitou a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- GHOSH, Antip; KANDPAL, Mayank. **State-space average Modeling of DC-DC Converters with parasitic in Discontinuous Conduction Mode (DCM)**. 2010. F. 60. Bachelor of Technology Degree in Electrical Engineering – Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, Rourkela, Maio 2010.
- JIAN SUN et al. Averaged modeling of PWM converters operating in discontinuous conduction mode. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 16, n. 4, p. 482–492, 2001. DOI: [10.1109/63.931052](https://doi.org/10.1109/63.931052).
- OGATA, Katsuhiko. **ENGENHARIA DE CONTROLE MODERNO**. 5. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010. v. 1. ISBN 978-85-4301-375-6.
- SAMPAIO, L. P.; SILVA, S. Augusto Oliveira da; COSTA, P. J. Silva. Integrated Zeta Inverter Applied in a Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System. In: 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–6.
- VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. 2. ed. [S.l.]: Editora Saraiva, 2015. v. 1. ISBN 9788536514895.