



Estudo e análise de um inversor integrado baseado na topologia Zeta operando em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica

Study and analysis of a integrated inverter based on Zeta topology operating on a grid-connected photovoltaic system

Óliver Pincelli Westin¹, Anderson Aparecido Dionizio²,
Leonardo Poltronieri Sampaio³, Sérgio Augusto Oliveira da Silva⁴

RESUMO

Este trabalho propõe uma nova topologia de conversor de potência capaz de realizar a interface entre um sistema fotovoltaico e a rede elétrica monofásica, nomeado de Inversor Integrado Duplo Zeta (I2DZ). A topologia I2DZ proposta apresenta a vantagem de conseguir extrair a energia disponível no arranjo fotovoltaico (FV), realizando simultaneamente a adequação da tensão do arranjo FV e a conversão CC/CA, injetando uma corrente senoidal, sincronizada e controlada na rede elétrica monofásica. O controle do I2DZ é realizado por uma estratégia onde a malha interna controla a corrente que será injetada na rede, enquanto a externa controla a tensão do arranjo FV, garantindo a extração da máxima potência disponível. A partir da modelagem de pequenos sinais são obtidas as matrizes de espaço de estados para o I2DZ, as quais são empregadas para projeto do regulador linear quadrático (LQR) para o controle da corrente injetada, enquanto o controle da tensão do arranjo FV é realizado por um controlador Proporcional-Integral (PI). O desempenho e viabilidade do I2DZ proposto são avaliados e confirmados por meio de resultados de simulação computacional.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor Zeta; Eletrônica de Potência; Inversor integrado Zeta; Regulador Linear Quadrático; Sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

This work proposes a new topology of power electronics converter to perform the interface between a photovoltaic (PV) system and the single-phase electrical grid, named Integrated Double Zeta Inverter (I2DZ). The proposed I2DZ topology has the advantage of being able to harvest the power available in the PV, adequating the PV array voltage, and simultaneously the DC/AC conversion, injecting a sinusoidal, synchronized, and controlled current into the AC mains. The I2DZ control is performed by an inner control loop, which adequates the current that is injected into the mains. In addition, an outer control loop of the PV array voltage guarantees the extraction of the maximum available power. The state matrices are obtained from the small signals modeling, which is employed in the Linear Quadratic Regulator (LQR) design for the injected current controlling, while the PV array voltage is controlled by using a Proportional-Integral (PI) controller. The performance and feasibility of the proposed I2DZ is evaluated and proven by computational simulation results.

KEYWORDS: Zeta Converter; Power Electronics; Integrated Inverter; Linear Quadratic Regulator; Photovoltaic System.

¹ Bolsista do CNPq. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: oliverwestin@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5086684088486151.

² Doutorando no Programa de Pós-Graduação Associado em Engenharia Elétrica (PPGAEE-CP). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: dionizio@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9946117111367840.

³ Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE-CP). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: sampaio@utfpr.edu.br. ID Lattes: 5320781796971939.

⁴ Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE-CP). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: augus@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7428189879295593.



INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da demanda por eletricidade, à evolução dos semicondutores e avanços tecnológicos, o uso da eletrônica de potência no desenvolvimento de recursos e equipamentos para o processamento eletrônico da energia elétrica vem se tornando cada vez mais frequente e importante. No que tange as aplicações fotovoltaicas, a eletrônica de potência tem um papel fundamental no desenvolvimento de conversores de interface entre o arranjo fotovoltaico (FV) e a rede elétrica (VODAPALLY; NIKHIL, 2023).

Comumente, para a conexão do arranjo FV com a rede elétrica CA é adotado um sistema de duplo estágio de conversão de energia, o qual é composto por um conversor elevador associado a um inversor de tensão. Como vantagem deste sistema destaca-se sua facilidade no projeto, já que ambos conversores podem ser projetados e controlados independentemente um do outro. Por outro lado, este tipo de sistema pode levar à uma menor eficiência, um maior número de componentes, peso e volume.

Para mitigar estes problemas, inversores integrados são amplamente propostos para estas aplicações, os quais conseguem adequar o nível de tensão e realizar a conversão CC/CA em uma única etapa de conversão de energia. Como desvantagem, este tipo de estrutura pode apresentar maior dificuldades no projeto e operação.

Desta forma, este trabalho propõe um o novo inversor integrado, o qual é obtido por meio da adaptação de conversores Zeta modificados. A topologia I2DZ apresenta como vantagens: i) único estágio de conversão de energia (DIONIZIO et al., 2023); ii) funcionamento semelhante ao conversor Zeta convencional; iii) reduzido número de semicondutores.

O I2DZ é controlado empregando um regulador linear quadrático (LQR). Os ganhos do LQR são projetados empregando matrizes de espaços de estados, as quais são obtidas por meio da modelagem de pequenos sinais do conversor I2DZ. Desta forma, o sistema consegue garantir que uma corrente com baixa distorção harmônica (DHT) seja injetada na rede elétrica.

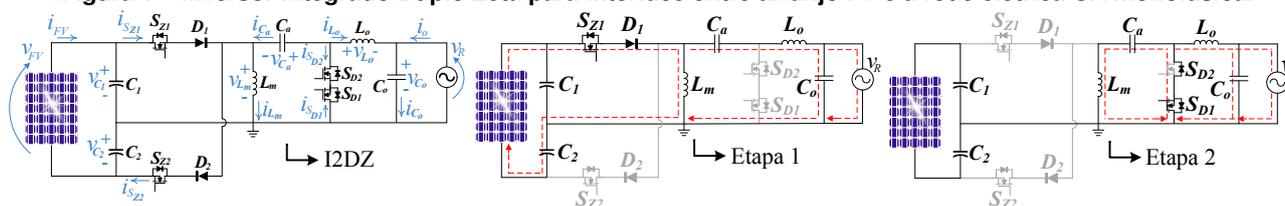
METODOLOGIA

O I2DZ é proposto como conversor de interface entre arranjo FV e a rede elétrica monofásica, seu funcionamento ocorre no modo de condução contínua (MCC), apresentando duas etapas de operação para cada período de chaveamento. Para a operação do inversor é empregado algoritmo para extração da máxima potência do arranjo FV, sendo utilizado um algoritmo Perturbe e Observe (P&O), também é adotado sistema para sincronização da corrente injetada com a tensão da rede elétrica por meio de algoritmos de atracamento de fase *Phase-Locked Loop* (PLL).

A estrutura do I2DZ proposto é apresentada na Figura 1. Analisando um período de chaveamento o I2DZ funciona de maneira análoga ao conversor CC/CC Zeta convencional. Onde os interruptores S_{Z1} e S_{Z2} são comutados em alta frequência enquanto os interruptores S_{D1} e S_{D2} são comutados em baixa frequência, dependendo do estado da rede.

Durante o semiciclo positivo da rede elétrica o interruptor S_{Z1} é comutado em alta frequência, enquanto o interruptor S_{D1} permanece todo o semiciclo ativado e os demais interruptores permanecem

Figura 1 – Inversor Integrado Duplo Zeta para interface entre arranjo FV e a rede elétrica CA monofásica.



Fonte: Autoria própria (2023).

bloqueados durante este semiciclo. No semiciclo negativo o interruptor S_{Z2} opera em alta frequência, enquanto o interruptor S_{D2} permanece ativo e os demais interruptores bloqueados.

Um período de chaveamento durante o semiciclo positivo da rede CA é iniciado com a entrada em condução do interruptor S_{Z1} , polarizando diretamente o diodo D_1 , e realizando a magnetização do indutor L_m com a tensão do capacitor C_1 , idealmente metade da tensão do arranjo FV. A tensão no indutor L_o é uma relação entre as tensões nos capacitores, assim $v_{L_o} = V_{C_1} + V_{C_a} - V_{C_o}$. A segunda etapa inicia com o bloqueio do interruptor S_{Z1} , a energia acumulada no indutor L_m é transferida para o capacitor C_a , polarizando diretamente o diodo em antiparalelo do interruptor S_{D2} , passando através do interruptor S_{D1} , que já se encontrava comandado à condução. Nesta etapa, os L_m e L_o são desmagnetizados com as tensões $-V_{C_a}$ e $-V_{C_o}$, respectivamente. O I2DZ opera de forma similar no semiciclo negativo da rede elétrica.

Modelagem em pequenos sinais e projeto dos controladores

Para garantir o correto funcionamento do I2DZ são necessários projetos de controladores, os quais dependem de uma modelagem. Sendo assim, inicialmente é necessária a obtenção de uma representação matemática adequada do sistema em análise e seu comportamento dinâmico. Para tal, foi utilizada a modelagem de pequenos sinais (ERICKSON, 1997), onde são analisadas separadamente cada uma das etapas de operação do inversor e posteriormente é calculada a média das etapas, a qual sofre pequenas perturbações e linearizações em torno de um ponto de operação, por fim os resultados são organizados em matrizes de estados, obtendo-se a seguinte representação em espaços de estados:

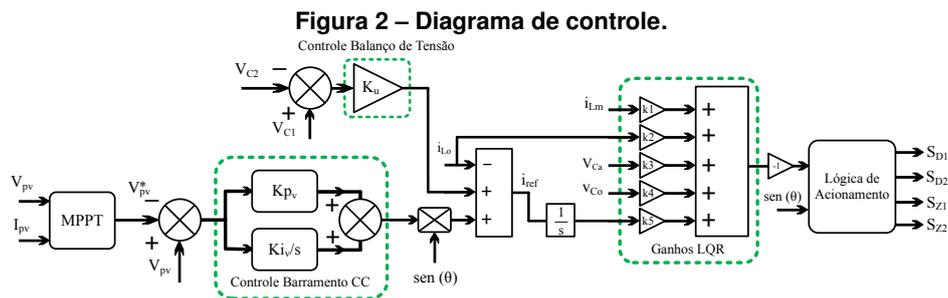
$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L_m} \\ \hat{i}_{L_o} \\ \hat{V}_{C_a} \\ \hat{V}_{C_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{D-1}{L_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D-1}{L_o} & -\frac{1}{L_o} \\ \frac{1-D}{C_a} & -\frac{1}{C_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_o} & 0 & \frac{-1}{RC_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L_m} \\ \hat{i}_{L_o} \\ \hat{V}_{C_a} \\ \hat{V}_{C_o} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_g + V_{C_a}}{L_m} \\ \frac{V_g + V_{C_a}}{L_o} \\ \frac{-I_{L_m} - I_{L_o}}{C_a} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{d} \quad (1)$$

Na Figura 2, tem-se o diagrama de controle simplificado. Nele existe um controlador PI para a malha de tensão, onde a entrada é o erro entre a referência V_{pv}^* do MPPT, gerada pelo método P&O e a própria tensão do arranjo FV (BRITO et al., 2010), como saída do PI é gerado um pico de corrente, o qual é multiplicado por uma função senoidal unitária obtida pelo PLL, garantindo o sincronismo com a rede. Adicionalmente, soma-se à esta corrente, agora senoidal, uma corrente de desbalanço, responsável por equalizar os níveis de tensão entre os capacitores C_1 e C_2 , gerando ao

final uma corrente de referência i_{ref} , a qual será comparada com a corrente do indutor L_o , equivalente à corrente injetada na rede.

Por conta das características do I2DZ operando em MCC, um controlador mais simples como um PI não é o suficiente para garantir o funcionamento satisfatório da malha de controle de corrente uma vez que a região de operação do PI está muito próxima do pico de ressonância, desta forma é adotada uma estratégia utilizando um regulador quadrático linear (LQR) (OGATA KATSUHIKO; SEVERO, 2010). Sendo uma técnica de controle moderno, seu projeto e funcionamento dependem das variáveis de estados representados em (1), em sua saída é fornecido um sinal de razão cíclica, o qual juntamente com informações sobre a condição atual da rede, é interpretado pela lógica de acionamento dos quatro interruptores.

O projeto de um controlador LQR leva em consideração matrizes Q e R , simétricas e definidas positivas, que representam a importância relativa do erro e o consumo de energia pelo controlador, respectivamente, a solução do projeto pode ser obtida pela equação de Riccati. Ainda para o I2DZ é considerado um servossistema, ou seja, um sistema aumentado, onde é acrescida uma nova variável no vetor de estados, representada pela integral do erro da variável que se deseja seguir. Consequentemente, serão gerados cinco ganhos que atuam no sistema apresentados na Tabela 2.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 1 – Valores de projeto e dos componentes.

Tensão de pico da rede monofásica CA	V_{prede}	180 V
Potência de projeto fornecida à carga	P	400 W
Frequência de chaveamento	f_s	50 kHz
Capacitâncias do barramento CC	C_1 e C_2	6 mF
Capacitância de saída	C_o	1,5 μ F
Capacitância de acoplamento	C_a	1 μ F
Indutância do indutor de magnetização	L_m	250 μ H
Indutância do indutor de saída	L_o	1,5 μ H

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 2 – Ganhos do LQR.

K_1	$2,6146 \cdot 10^{-2}$
K_2	$6,8496 \cdot 10^{-2}$
K_3	$1,2750 \cdot 10^{-3}$
K_4	$-1,4238 \cdot 10^{-3}$
K_5	$-2,4495 \cdot 10^3$

Fonte: Autoria própria (2023).

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

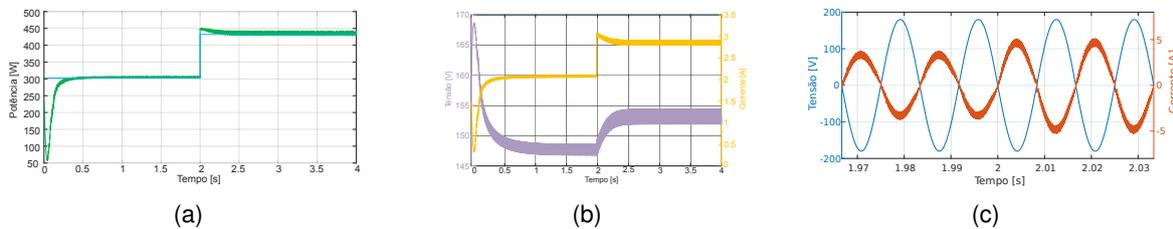
Para comprovar o funcionamento do conversor, são apresentados os resultados de simulação com os principais parâmetros apresentado nas Tabelas 1 e 2. Simulou-se durante quatro segundos a operação do I2DZ, onde na metade desse período foi aplicado um degrau de irradiância solar, indo

de 700 W/m^2 para 1000 W/m^2 .

A Figura 3(a) e 3(b) apresenta o resultado para a avaliação do sistema quando ocorre variação na irradiância solar, demonstrando a rápida adaptação do controlador utilizado, ainda com a Figura 3(b) é possível observar que a tensão do arranjo FV apresenta pouca variação quando ocorre o degrau de irradiância, já a corrente apresenta uma variação em torno de 50%, saindo de valores próximos de 2A para aproximadamente 3A .

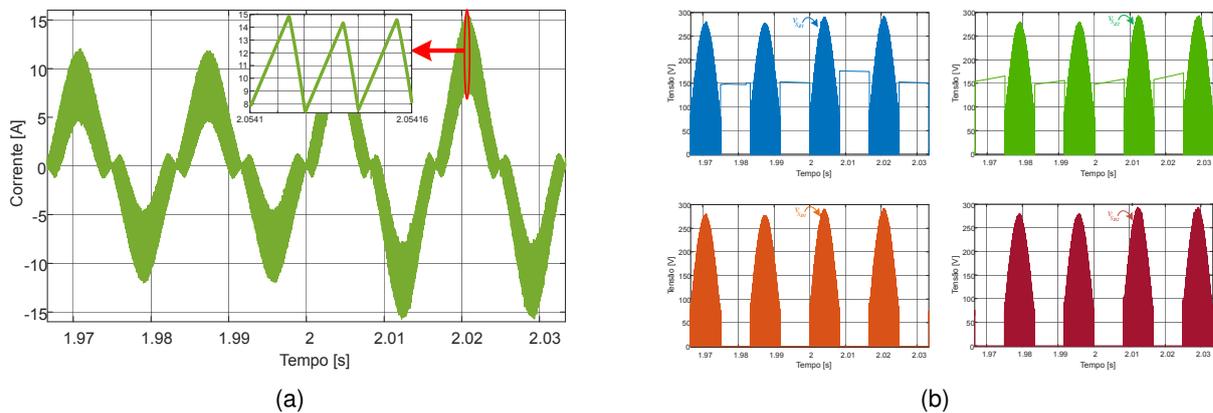
A Figura 3(c) ilustra a corrente injetada na rede elétrica durante o transitório de degrau de irradiância solar. Este resultado valida o funcionamento do I2DZ, o qual é capaz de injetar uma corrente senoidal na rede com baixa DHT. A DHT da corrente injetada foi de 3,02% e 2,53% para as irradiâncias solares de 700 W/m^2 e 1000 W/m^2 , respectivamente.

Figura 3 – Resultados de simulação: (a) Potência extraída do arranjo FV empregando o algoritmo P&O. (b) Tensão e corrente no arranjo FV. (c) Tensão e corrente na rede elétrica.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4 – Resultados de simulação: (a) Corrente no indutor de magnetização. (b) Tensão nos interruptores.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4(a), mostra a corrente no indutor de magnetização, i_{L_m} , onde ao se visualizar alguns períodos de chaveamento próximos à máxima amplitude atingida é observada a presença de duas etapas de operação comprovando o funcionamento do conversor em MCC. Já Figura 4(b), apresenta as tensões nos interruptores, mostrando que houve um esforço relativamente baixo dos semicondutores, com amplitude máxima de tensão inferior a 300 V , mesmo na potência nominal do projeto. Essa tensão é a soma da tensão na saída com a metade da tensão no arranjo FV, que não pode ser muito pequena para o sistema operar corretamente, uma vez que o ganho prático é limitado em cerca de quatro vezes, devido as perdas dos componentes.



CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de inversor integrado, a qual é obtida pela combinação de conversores Zeta, aqui denominado de inversor integrado duplo Zeta (I2DZ). O sistema proposto é capaz de realizar a interface entre arranjos FV e a rede elétrica monofásica CA. O I2DZ é capaz de realizar de forma simultânea a elevação da tensão do arranjo FV enquanto realiza a injeção de uma corrente senoidal, controlada e sincronizada na rede elétrica. Por meio de resultados de simulação computacional pode-se verificar e avaliar o desempenho do sistema proposto, o qual conseguiu injetar uma corrente na rede elétrica com baixa distorção harmônica, atendendo aos principais quesitos de qualidade de energia elétrica. Desta forma, a estrutura I2DZ proposta se torna interessante em substituição aos sistemas tradicionais de duplo estágio de conversão de energia empregados para interfacear arranjos FV com a rede elétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 308620/2021-6 e 304707/2021-0), o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e o apoio financeiro por meio de bolsa de iniciação científica recebida da Fundação Araucária.

Disponibilidade de Código

Os códigos utilizados não estão disponíveis no momento.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BRITO, M. A. G. de et al. Avaliação das principais técnicas para obtenção de MPPT de painéis fotovoltaicos. **IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON**, v. 9, p. 1–6, 2010.
- DIONIZIO, A.A. et al. Grid-Tied Single-Phase Integrated Zeta Inverter for Photovoltaic Applications. **Energies**, v. 16, p. 1–19, 2023.
- ERICKSON, Robert W. **Fundamentals of Power Electronics**. [S.l.]: [S.l.]: Springer, 1997.
- OGATA KATSUHIKO; SEVERO, Bernardo. **Engenharia de controle moderno**. [S.l.]: Prentice Hall do Brasil, 2010.
- VODAPALLY; NIKHIL, Sai. A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic (PV) Technologies, Architecture, and Its Applications to Improved Efficiency. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 319, 2023.