

Estudo e análise de topologia de conversores estáticos em sistemas fotovoltaicos conectado à rede elétrica

Study and analysis of static converter topologies in photovoltaic systems connected to the electrical grid

Vinicius Motta de Oliveira¹, Anderson Aparecido Dionizio², Leonardo Poltronieri Sampaio³,
Sérgio Augusto Oliveira da Silva⁴

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um novo inversor integrado baseado no conversor Ćuk, o qual é capaz de injetar a energia disponível do arranjo fotovoltaico na rede alternada monofásica. O inversor proposto tem como vantagem a capacidade de realizar de forma simultânea a elevação da tensão de entrada enquanto injeta uma corrente senoidal na sua saída. Para o correto funcionamento do inversor, foi implementado algoritmo de seguimento de máxima potência para garantir que toda a energia disponível no arranjo FV seja drenada, bem como algoritmos para o sincronismo da corrente injetada com a tensão da rede elétrica (*Phase-locked loop*). Por meio da modelagem de pequenos sinais é obtida a função de transferência do sistema bem como os controladores foram ajustados e sincronizados. Por meio de resultados de simulação computacional utilizando o *software* MATLAB/Simulink® o desempenho do sistema proposto foi avaliado e confirmado. O inversor proposto é capaz de fornecer uma corrente injetada na rede elétrica com baixa taxa de distorção harmônica.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor Ćuk; Eletrônica de potência; Inversor integrado; Sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

This work aims to present a new integrated inverter based on the Ćuk converter, which is capable of injecting the available energy from the photovoltaic array into the single-phase alternating grid. The proposed inverter's advantage is its ability to simultaneously perform input voltage boosting while injecting a sinusoidal current at its output. For the proper functioning of the inverter, a maximum power point tracking algorithm was implemented to ensure that all available energy in the PV array is harvested, as well as algorithms for synchronizing the injected current with the grid voltage (*Phase-locked loop*). Through small-signal modeling, the system's transfer function is obtained, and the controllers are adjusted and synchronized. Using computational simulation results from MATLAB/Simulink®, the performance of the proposed system was evaluated and confirmed. The proposed inverter is capable of delivering injected current to the electrical grid with low harmonic distortion.

KEYWORDS: Ćuk Converter; Power Electronic; Integrated inverter; Photovoltaic system.

INTRODUÇÃO

Ao levantar questões sobre emissão de gases poluentes na atmosfera, os métodos atuais de geração de energia são também debatidos, visto o grande uso da queima de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade (BRITO; SILVA, 2006).

¹ Mestrando no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: viniciusmotta@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5940735137595696.

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

³ Docente no Curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: sampaio@utfpr.edu.br. ID Lattes: 5320781796971939.

⁴ Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: augus@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7428189879295593.

Estudos acerca de energias renováveis se tornam muito importantes devido à preocupação do aumento da poluição e esgotamento dos combustíveis fósseis utilizados, destacando métodos de geração alternativa de energia, como a solar (RODRIGUES; BATISTELA, 2013).

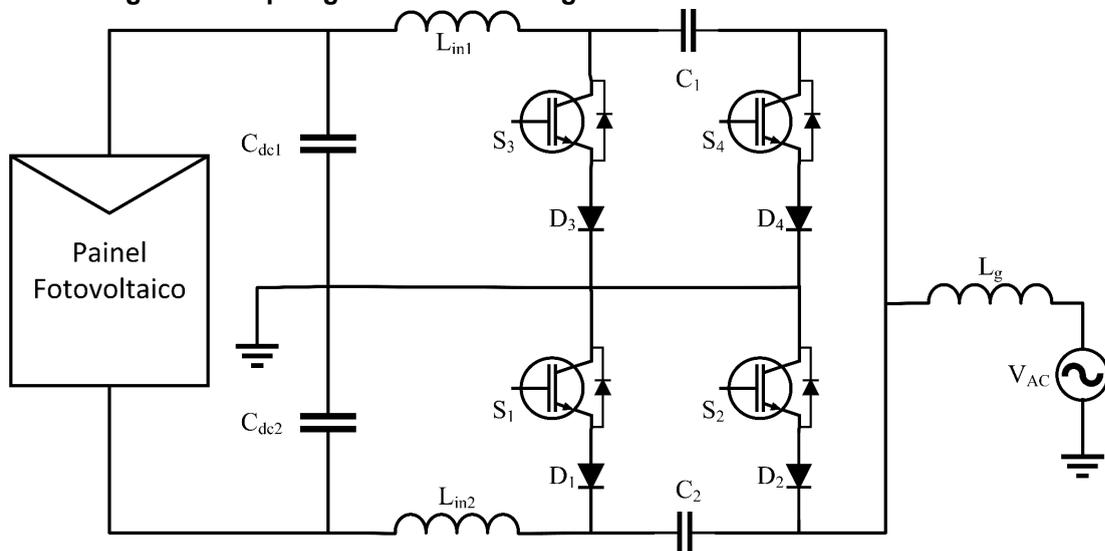
Os sistemas fotovoltaicos apresentam uma geração de energia de baixa amplitude, tornando necessário o uso de conversores de tensão para o processamento desta energia a níveis que possam ser utilizados em aplicações convencionais (VITOR *et al*, 2014).

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma nova estrutura de inversor denominado *Integrated Ćuk Inverter* (ICI) que é capaz de elevar a tensão contínua presente em um arranjo FV e injetar uma corrente senoidal oriunda deste arranjo à rede elétrica, visando maximizar a eficiência e diminuir a taxa de distorção harmônica da corrente injetada.

METODOLOGIA

Na Figura 1 é apresentado o ICI, o qual foi aplicado em um sistema FV dentro de simulação. A simulação ao todo contém os demais algoritmos que garantem um correto funcionamento do sistema FV e do inversor, como um modelo matemático de painel fotovoltaico apresentado por (CASARO; MARTINS, 2008) que apresenta funcionamento muito próximo a um painel real, algoritmo de MPPT, PLL e estrutura de controle.

Figura 1 – Topologia do conversor ligado à rede monofásica CA.

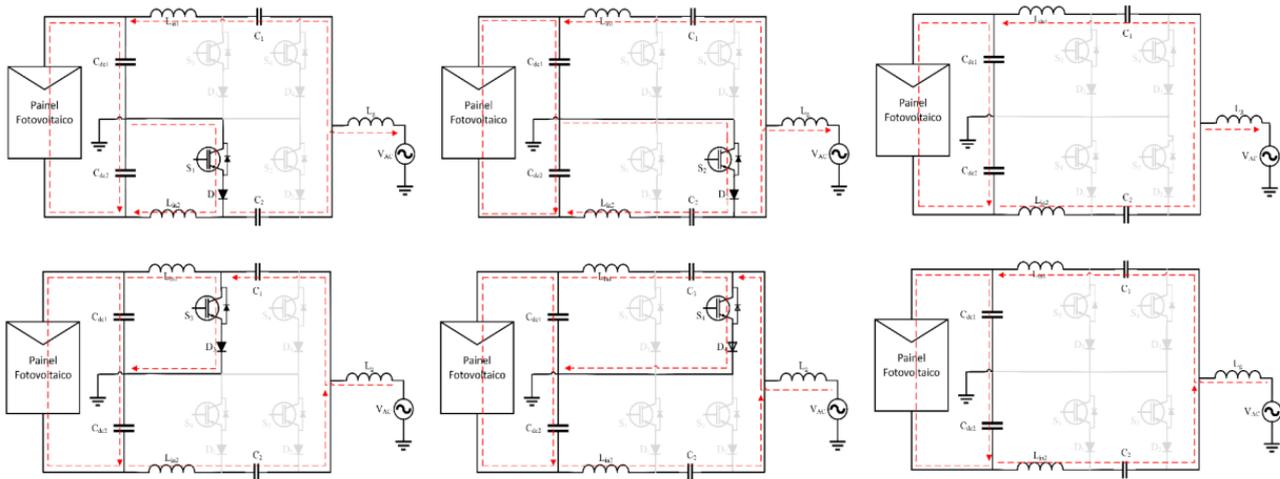


Fonte: Autoria própria

ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR

O inversor apresentado foi projetado no modo de condução descontínua (MCD), o que faz com que este apresente um total de seis etapas de operação (Figura 2), três referentes ao semiciclo positivo, e três referente ao semiciclo negativo.

Figura 2 – Etapas de funcionamento do conversor estudado



Fonte: Autoria própria

ALGORITMO DE SEGUIMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

Ao utilizar um sistema fotovoltaico, é imprescindível o uso de um algoritmo de seguimento de máxima potência, para que o arranjo sempre opere com a máxima potência presente. Para isso, é implementado um algoritmo chamado Perturbe e Observe (P&O), o qual realiza a leitura da tensão e da corrente presente no sistema fotovoltaico e calcula a potência presente sobre ele, comparando com uma potência anterior vinculada a uma tensão de referência diferente a atual.

PHASE-LOCKED LOOP (PLL)

O algoritmo PLL é responsável por garantir que a corrente a ser injetada na rede esteja sempre em contra-fase à tensão, pois caso isso não seja garantido, será injetada uma parcela reativa. O algoritmo escolhido foi o p-PLL proposto em (SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008).

MODELAGEM EM PEQUENOS SINAIS E CONTROLE

Para projeto dos controladores, foi realizada a modelagem em pequenos sinais do conversor, para avaliar a resposta dinâmica do circuito. Para esta análise foi considerada uma aproximação referente ao circuito, considerando que as três primeiras etapas de operação possuem a mesma resposta que as três últimas.

Foi então utilizado o modelo apresentado por (GHOSH, 2010) para modelagem do conversor, o qual apresenta um modelo preciso de modelagem para conversores em MCD.

Realizando as manipulações matemáticas, chega-se na seguinte função de transferência para controle da corrente da saída pela razão cíclica D :

$$G_{id}(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & 0 & -\frac{D+d_2-1}{L_{in}+L_g} + \frac{d_2}{L_{in}} & -\frac{1-D-d_2}{L_{in}+L_g} \\ 0 & s & -\frac{D}{L_g} + \frac{1-D-d_2}{L_{in}+L_g} & -\frac{D+d_2-1}{L_g} - \frac{D+d_2-1}{L_{in}+L_g} \\ -\frac{d_2-d_2^2}{DC} & -\frac{d_2-1}{C} & s & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_o} & 0 & s + \frac{1}{RC_o} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{V_c-V}{L_{in}+L_g} + \frac{V_g}{L_{in}} - \frac{V_g}{L_{in}+L_g} \\ \frac{V_c-V}{L_g} + \frac{V-V_c}{L_{in}+L_g} + \frac{V_g}{L_{in}+L_g} \\ \frac{(d_2 I_{Lg}) - I_{Lg}}{DC} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

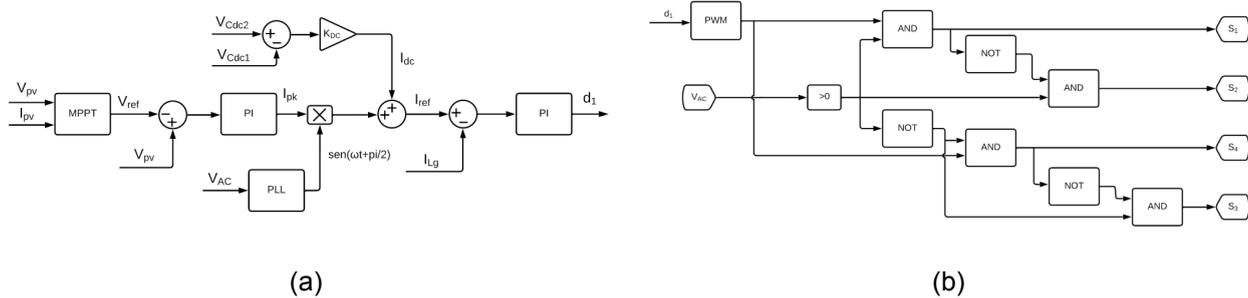
onde: D é a razão cíclica máxima do circuito; d_2 é referente ao período da segunda etapa de operação, como mostrado em (ERICKSON, 1997); L_{in} é o valor de indutância de entrada; L_g é a indutância de saída; C é a capacitância de acoplamento (paralelo entre C_1 e C_2); C_o é a capacitância de saída; R é uma resistência fictícia representando a rede CA.

Para projetar o controle do barramento CC, foi realizada a modelagem da entrada do circuito, a qual resultou em uma função de transferência apresentada em (2).

$$G_{vi} = \frac{V_p}{2V_{pv} C_{dc} S} \quad (2)$$

Os controladores utilizados foram do tipo proporcional-integral (PI), os quais tentam minimizar uma diferença de sinais de entrada (erro) alterando a ação do controle. Neste caso, foi utilizado um controle multimalhas, o qual a princípio gera uma corrente de pico a partir da malha externa, esta corrente é então multiplicada pela informação presente no PLL e somada a corrente gerada pelo controle de balanço de tensão nos capacitores, resultando em uma corrente de referência, a qual é subtraída a corrente de saída do circuito, gerando o erro a ser utilizado no segundo PI, o qual resultará na razão cíclica do inversor. A estrutura do controle e a estrutura de acionamento das chaves pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura de controle do conversor



Fonte: Autoria própria

PARÂMETROS UTILIZADOS

Para a simulação, foi preciso definir alguns parâmetros, como informações do arranjo FV utilizado e valores de componentes para o circuito do Cúk integrado. Foram utilizados os valores de componentes presentes na Tabela 1 e Tabela 2:

Tabela 1: Parâmetros do circuito e dos sistemas implementados

Parâmetros	Valor
Tensão RMS da rede	$V_g = 127V$
Frequência da rede	$f_g = 60Hz$
Potência nominal do PV	$P = 432W$
Tensão do PV	$V_{pv} = 127V$
Capacitâncias do barramento CC	$C_{dc1} = C_{dc2} = 6mF$
Indutores de entrada	$L_{in1} = L_{in2} = 60\mu H$
Indutores de saída	$L_g = 3,5mH$
Capacitância de acoplamento	$C_1 = C_2 = 1\mu F$

Tabela 2: Ganho dos controladores PI implementados

Parâmetros	Valor
Ganho da malha de tensão	$k_{P_{vpv}} = 0,15;$ $k_{I_{vpv}} = 3,32$
Ganho do controle de balanço de tensão	$k_{P_{unb}} = 0,05$
Ganho da malha de corrente	$k_{P_{vpv}} = 0,07;$ $k_{I_{vpv}} = 580,50$

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

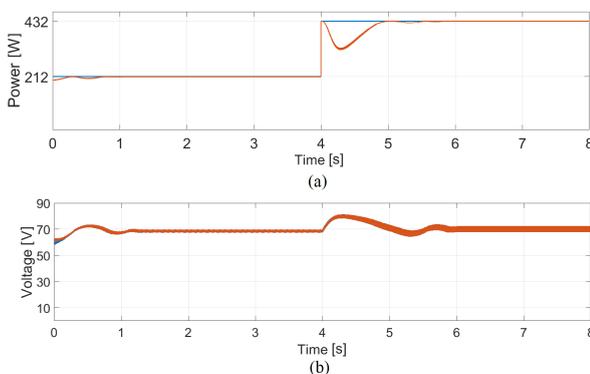
Para comprovar o funcionamento do conversor, são apresentados os resultados de simulação com os parâmetros anteriores. Foi considerado um degrau de irradiância solar após 4 segundos de simulação, a qual passou de 500 W/m^2 para 1000 W/m^2 .

A Figura 4 (a) apresenta a potência teórica (azul) e potência do inversor (laranja) ao longo da simulação. Enquanto a Figura 4 (b) apresenta a tensão presente sobre o barramento CC. Como pode ser observado, o algoritmo de MPPT buscou a máxima potência, enquanto o controle de balanço de tensão manteve a tensão dos capacitores no mesmo nível.

A Figura 5 apresenta a corrente de saída do inversor em intervalos diferentes, em comparação a tensão da rede para 500 W/m^2 e 1000 W/m^2 de irradiância solar, respectivamente. Como pode ser observado, a corrente se manteve em contra-fase a tensão, mostrando a injeção de corrente.

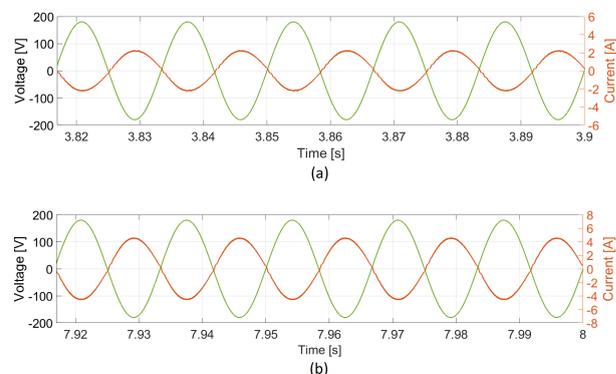
As taxas de distorção harmônica da corrente injetada na rede para ambos os casos foram de 2,93% para 500 W/m^2 e 2,06% para 1000 W/m^2 .

Figura 4 – Potência do sistema (teórica em azul e presente no arranjo em laranja) (a) e tensão nos capacitores do barramento CC (b)



Fonte: Autoria própria

Figura 5 – Etapas de funcionamento do conversor estudado



Fonte: Autoria própria

CONCLUSÕES

O inversor proposto realizou o objetivo de injetar corrente com baixa TDH na rede elétrica a partir de um sistema fotovoltaico, o que possibilitou comprovar o comportamento dinâmico do conversor por meio da modelagem de pequenos sinais realizada.

De acordo com a simulação, o conversor apresentou um bom funcionamento para aplicações em sistemas fotovoltaicos, sendo uma alternativa para os modelos convencionais de conversão de energia, como por exemplo de um conversor elevador em conjunto a um inversor.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da Fundação Araucária.

Disponibilidade de código

Os códigos utilizados encontram-se indisponíveis no momento.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em eletricidade. **O instalador**, 2006.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C.; Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análise em eletrônica de potência via simulação. **Eletrônica de potência**. vol. 13, no. 3, Ago, 2008.

ERICKSON, R. W.; *Fundamentals of power electronics*. Springer. 1ª ed., 1997.

GHOSH, A. State-space average Modeling of DC-DC Converters with parasitic in Discontinuous Conduction Mode (DCM). 2010. **Thesis**, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela.

RODRIGUES, S. A.; BATISTELA, G. C. Uma revisão sobre a disponibilidade hídrica brasileira para geração de energia elétrica. **Geoambiente On-line**, UFG, 2013.

SILVA, S. A. O. da; NOVOCHADLO, R.; MODESTO, R. A. PLL monofásico aplicado a sistemas conectados na rede elétrica utilizando a teoria da potência ativa instantânea. **UNOPAR Cient. Exatas Technol.**, v. 7, p. 63–69, 2008.

VITOR, A. L. de O. et al. Análise comparativa utilizando simulação computacional de conversores elevadores de tensão c.c.- c.c. empregados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. **V Congresso brasileiro de energia solar**, CBENS, 2014.