

Projeto e análise de um conversor *boost interleaved* para o processamento eletrônico de energia

Design and analysis of an interleaved boost converter for electronic energy processing

RESUMO

Eduardo Felipe Weber
eduardoweber@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Cassius Rossi de Aguiar
cassiusaguiar@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Lucas Garcia Mendes
lucasmendes.1997@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Em sistemas fotovoltaicos, as condições climáticas estão diretamente associadas ao fornecimento de energia e, de forma que a energia processada esteja em níveis adequados e regulada, são utilizados conversores eletrônicos CC-CC. Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho é analisar e desenvolver um conversor de energia CC-CC utilizando a técnica *interleaved*, que traz benefícios para o conversor como transientes de resposta mais rápidos a variação da carga, melhor dissipação de calor e menor *stress* nas chaves. Para modelar o conversor, é utilizado o modelo de espaço de estados, considerando as resistências parasitas dos indutores e chaves, além de ter sido feita a linearização do arranjo de painéis fotovoltaicos. Posteriormente, com as funções de transferência obtidas, são projetados os controladores do tipo PI (*Proportional Integral*). Para o controle, foram modeladas duas malhas de controle, uma ajusta o controle da corrente de entrada, e outra regula o controle de tensão de saída do conversor. Após analisar as respostas dos controladores em função da frequência, comprovando sua estabilidade, o conversor e o arranjo de painéis fotovoltaicos foram simulados para diversos cenários, evidenciando o correto funcionamento do sistema, atingindo a tensão desejada em um tempo satisfatório e tendo uma amplitude baixa de ondulação residual.

PALAVRAS-CHAVE: Energia fotovoltaica. Conversor CC-CC. Técnica *interleaved*.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS, THE CLIMATIC CONDITIONS ARE DIRECTLY LINKED TO THE POWER SUPPLY AND FOR THAT TO BE REGULATED IT'S USED DC-DC (DIRECT CURRENT - DIRECT CURRENT) CONVERTERS. IN THIS MANNER, THE MAIN OBJECTIVE OF THIS PROJECT IS TO ANALYZE AND DEVELOP A DC-DC POWER CONVERTER UTILIZING THE INTERLEAVED TECHNIQUE, BRINGING BENEFITS TO THE CONVERTER LIKE FASTER RESPONSE TRANSIENTS FOR THE LOAD VARIATION, BETTER HEAT DISSIPATION AND LESS STRESS ON THE SWITCHES. TO REPRESENT THE INTERLEAVED CONVERTER IN A MATHEMATICAL FORM IS USED THE STATE-SPACE MODEL, WHERE THE PARASITIC RESISTANCE OF THE INDUCTORS AND SWITCHES WERE CONSIDERED, BESIDES, INSTEAD OF UTILIZING AN IDEAL POWER SOURCE, WERE UTILIZED A LINEARIZATION OF THE SOLAR PANEL ARRANGEMENT. POSTERIORLY, WITH THE TRANSFER FUNCTIONS OBTAINED THE PI (PROPORTIONAL INTEGRAL) CONTROLLERS ARE PROJECTED. WERE DESIGNED TWO CONTROL LOOPS, ONE TO ADJUST THE INPUT CURRENT ON THE INDUCTORS, AND ONE THAT REGULATES THE OUTPUT VOLTAGE OF THE CONVERTER.

AFTER INVESTIGATING THE RESPONSE OF THE CONTROLLERS IN THE FREQUENCY DOMAIN, INDICATING THE STABILITY OF THE SYSTEM, THE CONVERTER AND THE SOLAR PANEL ARRANGEMENT WERE SIMULATED FOR MULTIPLE ENVIRONMENTS, HIGHLIGHTING THE CORRECT OPERATION OF THE SYSTEM, REACHING THE DESIRED VOLTAGE IN SATISFACTORY TIME AND HAVING LITTLE RESIDUAL RIPPLE AMPLITUDE.

KEYWORDS: Photovoltaic energy. DC-DC converter. Interleaved technique.

INTRODUÇÃO

Um dos fatores chave do desenvolvimento das civilizações é a capacidade de geração de energia, e esse fator ganhou destaque após a revolução industrial, especialmente a energia com origem em combustíveis fósseis. Estima-se que as emissões de carbono multiplicaram mais de nove vezes desde 1914, chegando a alcançar aproximadamente 9.000 teratoneladas por ano só em 2010 (BODEN; ANDRES; MARLAND, 2013). A informação citada demonstra a gravidade da situação que a sociedade atual se encontra. Assim, para que esse impacto seja amenizado, ou até mesmo para que seja eliminada essa tendência, deve-se buscar a geração e utilização de fontes de energia limpas.

Em âmbito nacional, as fontes de energia predominantes têm origem hídrica e fóssil, tendo elas uma participação de 60,39% e 24,45%, respectivamente, na produção total (ANEEL, 2019).

Além das dificuldades e dos problemas sociais e ambientais causados pela instalação de hidrelétricas, é conhecido que combustíveis fósseis são grandes causadores do efeito estufa e da poluição do meio ambiente. Assim, com a necessidade de produzir mais energia associado ao interesse de utilizar fontes de energia renováveis, que não impactem o meio ambiente, tem sido estimulado o desenvolvimento de sistemas de Geração Distribuída (GD) utilizando fontes de energia alternativas (BLAABJERG et al., 2006).

Geração distribuída, como o nome sugere, são vários locais onde existem sistemas de geração de energia próximos de seus consumidores. O que difere da geração centralizada, na qual grandes usinas elétricas concentram a geração de energia e fazem a distribuição para inúmeros consumidores.

A utilização de fontes de energia renováveis é, quando comparada a outros tipos de geração de energia, a que teve o crescimento mais rápido dos últimos anos, com previsão de alcançar até 29% da produção de energia total mundial em 2040. Nesse contexto, a energia que mais se destaca na atualidade é a energia solar, com um crescimento previsto de em média 8,3% ao ano, mundialmente (Energy Information Administration, 2016).

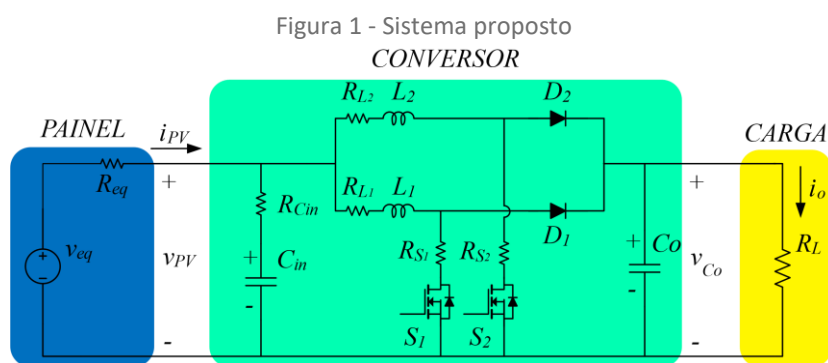
Em sistemas fotovoltaicos, as condições climáticas estão diretamente associadas ao fornecimento de energia. Por esse motivo, são propostas soluções que buscam tornar a energia fornecida, pelos painéis, menos susceptível às variações climáticas. Normalmente, essa solução é um conversor de energia que regula a tensão fornecida pelo painel para seu uso adequado pelo restante do sistema fotovoltaico.

Assim, por meio da utilização de conversores eletrônicos, pode-se garantir que painéis solares possam ser conectados a uma carga ou bateria de forma eficaz e controlada, podendo, por exemplo, energizar uma casa, uma empresa, um computador, um celular ou qualquer outra aplicação que necessite de uma fonte regulada de energia.

Com o crescimento da utilização de energia solar na sociedade, as pesquisas relacionadas a área se tornam de exímia importância, pois elas trazem conhecimentos técnico-científicos que podem ser aplicados em melhorias às tecnologias já existentes ou serem portas para novas descobertas.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, foi desenvolvido um conversor *boost interleaved* de duas fases conforme ilustra a Figura 1. Este conversor tem como entrada um arranjo de painéis fotovoltaicos e utiliza duas chaves semicondutoras e possui carga representada por um resistor R_L . Serão consideradas também as resistências parasitas das chaves, indutores e do capacitor de entrada para realizar a modelagem do conversor. O objetivo é fornecer uma tensão controlada de 200 V com até 1 kW de potência.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, ao invés de utilizar uma fonte de tensão ideal, é feita uma linearização do arranjo de painéis (parte em azul na Figura 1).

Podemos dividir o sistema em quatro subintervalos: o primeiro quando as duas chaves S_1 e S_2 estão em curto; o segundo quando a chave S_1 se abre enquanto a S_2 permanece em curto; o terceiro quando as duas chaves voltam a estar em curto; e o quarto quando a chave S_2 se abre com a chave S_1 ainda em curto.

Cada um desses subintervalos do conversor *boost interleaved* fora representado em espaço de estados, tendo como o vetor de estados (Eq. 1), o vetor de entrada (Eq. 2) e o vetor de saída (Eq. 3).

$$\mathbf{x} = [i_{L_1} \quad i_{L_2} \quad v_{C_o}]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} v_{PV} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_{L_1} + i_{L_2} \\ v_{C_o} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Com o modelo do conversor representado em espaço de estados, é possível obter a representação do funcionamento médio do conversor. Contudo, para que seja possível obter as funções de transferência do conversor em função do ciclo do trabalho das chaves do conversor para a corrente de entrada (Eq. 4) e para a tensão de saída (Eq. 5), assumindo que $A_n = [(-A_1 + A_2 + A_4) + K(2A_1 - A_2 - A_4)]$, $F = (2A_1 - A_2 - A_4)X$, $C_i = [1 \ 1 \ 0]$ e $C_v = [0 \ 0 \ 1]$, é preciso efetuar a análise em pequenos sinais do mesmo.

$$G_i(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{k}} = C_i(sI - A_n)^{-1}F \quad (4)$$

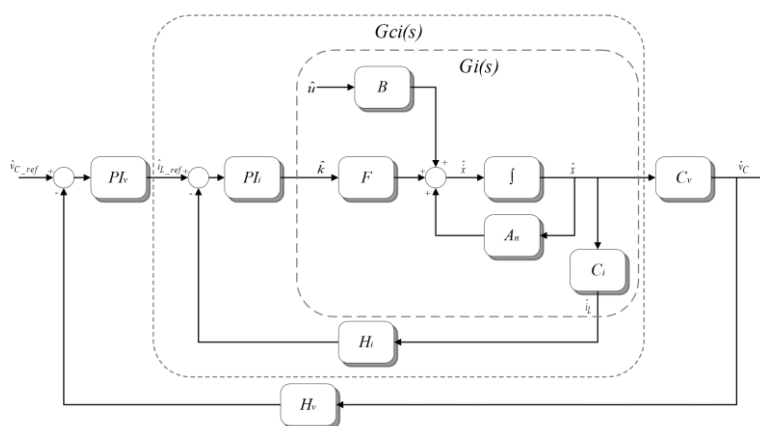
$$G_v(s) = \frac{\hat{v}_{Co}}{\hat{k}} = C_v(sI - A_n)^{-1}F \quad (5)$$

De posse das funções de transferência do conversor, projeta-se os controladores de tensão e corrente. Serão utilizados controladores do tipo PI (*Proportional Integral*) representado na (Eq. 6), onde Kp é a constante proporcional e Ki é a constante integral, os quais se mostraram suficientes para controlar o sistema.

$$PI(s) = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (6)$$

Na Figura 2, é apresentada a planta do modelo do controle proposto, na qual estão representados dois controladores do tipo PI em série, um para a corrente nos indutores PI_i e um para a tensão no capacitor de saída PI_v .

Figura 2 – Diagrama da topologia de controle do conversor boost interleaved



Fonte: Autoria própria.

Existem inúmeros métodos para o projeto dos controladores de um sistema, contudo utilizou-se a ferramenta *Simulink* do *software MATLAB* para fazer a malha fechada do sistema e depois foi utilizado um critério de 1/10 da frequência de corte do sistema para a sintonização dos controladores, assim obtendo as constantes dos controladores.

Após obtidos os controladores do conversor, é possível simular o funcionamento do mesmo. Para isso, optou-se por utilizar o *software PSIM* por fornecer ferramentas para a análise de circuitos de processamento de energia e por ter módulos de energia renováveis para a representação de painéis solares.

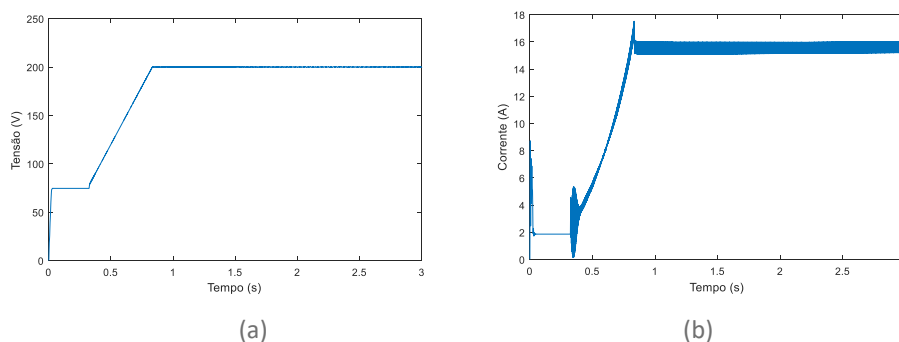
Por fim, os controladores serão discretizados e implementados em um *Digital Signal Processor (DSP)* simulado no *PSIM*, utilizado para efetuar o controle do sistema. Isso para que, então, fosse possível extrair resultados simulados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conversor foi simulado utilizando o *software PSIM*. Nele é possível simular um DSP programado em C com a discretização dos controladores projetados.

Na Figura 3 (a), é apresentada a resposta da inicialização do sistema do controle de tensão, e na Figura 3 (b) tem-se a resposta do controle de corrente. Observa-se que com o controle proposto, a resposta dinâmica da tensão não apresenta sobressinais ao passo que o sinal de corrente do conversor possui um *overshoot* de 7,5%.

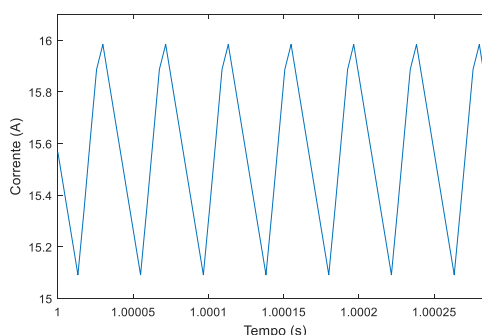
Figura 3 – Resposta a inicialização do sistema (a esquerda tensão e a direita corrente)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4 mostra a ondulação residual da corrente em regime permanente, é evidenciado que o *ripple* não ultrapassa 6% da corrente média de entrada.

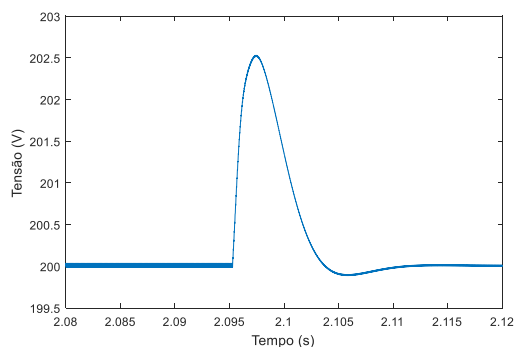
Figura 4 – *Ripple* da corrente de entrada controlada em regime estacionário.



Fonte: Autoria própria.

Ao mesmo tempo, no resultado apresentado da Figura 5, a carga é alterada de 1 kW para um terço de seu valor (333 W) no instante de 2,095 s. Ainda na Figura 5 é mostrado o instante do chaveamento de carga. Analisando o resultado apresentado, nota-se que a tensão tem um pico de 1,25% quando comparado ao valor de regime.

Figura 5 – Resposta do sistema a uma queda instantanea de potência de 1 kW para 333 W



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou e discutiu o projeto e a modelagem de um conversor *boost interleaved* de duas fases. Nesse projeto, foram utilizados a modelagem em espaços de estados média e a análise de pequenos sinais para obtenção da função de transferência do conversor e assim poder projetar os controladores. Os resultados apresentados, mostram a eficácia do controle de tensão, com sobressinal menor do que 1,5% com elevada variação de carga, bem como a reduzida ondulação residual no sinal de corrente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Araucária FA - Paraná/Brasil.

REFERÊNCIAS

BODEN, T.; ANDRES, R.; MARLAND, **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions (1751 - 2010) (V. 2013)**. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; Carbon Dioxide Information Analysis Center(CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2013.

Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2016**. [s.n.], 2016.v. 0484. ISBN 2025866135.

BLAABJERG, F. et al. **Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 53, n. 5, p. 1398–1409, out. 2006.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. 2019.
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.
Acesso em: 3 mai. 2019