

Modelagem e controle de um conversor *boost interleaved*

Modeling and control of an interleaved boost converter

RESUMO

Mario Cabezaolias De Santis
santis@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

Uma das soluções para energia renovável que tem atraído expressivos investimentos por parte dos setores privado e estatal é a solar, pois possibilita aos consumidores gerarem sua própria energia tornando-os independentes das concessionárias de energia e isentos de altas taxas impostas pelas mesmas. Por outro lado, esse modelo de geração de energia é afetado de forma determinante por questões relacionadas à baixa tensão de saída dos painéis e a imprevisibilidade das condições climáticas. Em virtude desses eventos indesejados, a eletrônica de potência, com estudos relacionados ao desenvolvimento e aprimoramento de conversores, elevando os baixos níveis de tensão proveniente dos painéis e ao mesmo tempo, as técnicas de controle, para a previsão temporal do controle do fluxo de potência, contribuem para reduzir essas limitações. Nesse contexto, a proposta desse trabalho está concentrada na modelagem matemática de um conversor CC-CC, associado à técnica *interleaved*, e no projeto de controladores de tensão e corrente associados ao conversor para o tratamento e gerenciamento da energia proveniente de sistemas fotovoltaicos. Por fim, a análise e desempenho do conversor é realizada, por meio de simulações no ambiente PSIM.

PALAVRAS-CHAVE: Energia renovável. Modelagem matemática. Conversor CC-CC.

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

ONE OF THE SOLUTIONS FOR RENEWABLE ENERGY THAT HAS ATTRACTED SIGNIFICANT INVESTMENTS FROM THE PRIVATE AND STATE SECTORS IS SOLAR, AS IT ENABLES CONSUMERS TO GENERATE THEIR OWN ENERGY, MAKING THEM INDEPENDENT OF THE ENERGY UTILITIES AND EXEMPT FROM HIGH TAXES IMPOSED BY THEM. ON THE OTHER HAND, THIS POWER GENERATION MODEL IS DECISIVELY AFFECTED BY ISSUES RELATED TO LOW PANEL OUTPUT VOLTAGE AND THE UNPREDICTABILITY OF WEATHER CONDITIONS. DUE TO THESE UNWANTED EVENTS, POWER ELECTRONICS, WITH STUDIES RELATED TO THE DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF CONVERTERS, RAISING THE LOW VOLTAGE LEVELS FROM THE PANELS AND AT THE SAME TIME THE CONTROL TECHNIQUES, FOR THE TEMPORAL FORECASTING OF THE POWER FLOW CONTROL, CONTRIBUTE TO REDUCING THESE LIMITATIONS. IN THIS CONTEXT, THE PURPOSE OF THIS WORK IS FOCUSED ON THE MATHEMATICAL MODELING OF A CC-DC CONVERTER, ASSOCIATED WITH THE INTERLEAVED TECHNIQUE, AND THE DESIGN OF VOLTAGE AND CURRENT CONTROLLERS ASSOCIATED WITH THE CONVERTER FOR THE TREATMENT AND MANAGEMENT OF ENERGY FROM PHOTOVOLTAIC SYSTEMS. FINALLY, THE ANALYSIS

AND PERFORMANCE OF THE CONVERTER IS PERFORMED THROUGH SIMULATIONS IN THE PSIM ENVIRONMENT.

KEYWORDS: Renewable energy. Mathematical modeling. DC-DC converter.

INTRODUÇÃO

Fontes clássicas de energia de origem fóssil como carvão, petróleo e gás natural representam mais de 80% da matriz energética mundial, segundo a empresa de pesquisa energética (EPE). Entretanto, a utilização de combustíveis fósseis está associada a diversos impactos ambientais, principalmente a liberação de gases de efeito estufa.

Tais aspectos indesejados eram tolerados uma vez que não existiam alternativas efetivas para a matriz energética. Contudo, com o avanço da tecnologia e o investimento na área de energia limpa, foi possível o desenvolvimento de métodos de geração de energia menos agressivos ao meio ambiente e mais competitivos.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento do processamento eletrônico de energia considerando como fonte primária painéis fotovoltaicos. Esta fonte, além de ser instalada perto do local de consumo, possibilita a geração de energia em regiões remotas. Além disso, é uma fonte renovável inesgotável e abundante em nosso planeta.

A peculiaridade associada a essa geração de energia limpa está relacionada a baixa tensão de saída dos painéis e a imprevisibilidade das condições climáticas. Por conta desses fenômenos, o estudo e aprimoramento de conversores eletrônicos, além do desenvolvimento de estratégias de controle do fluxo de potência, desempenham papel fundamental para essas limitações.

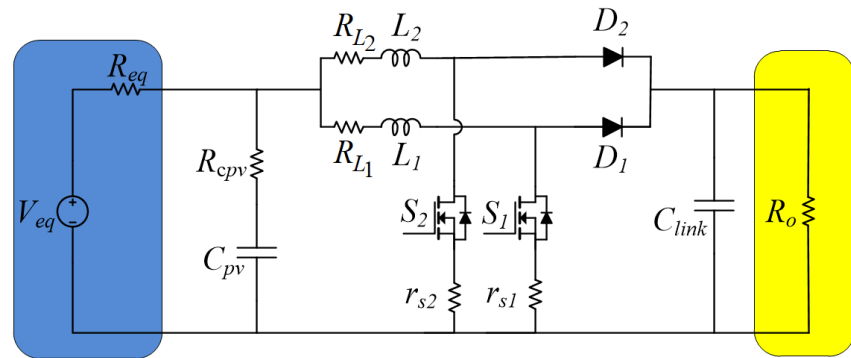
MATERIAS E MÉTODOS

O conversor desenvolvido nesse trabalho está associado a técnica *interleaved*, a qual é utilizada em diferentes áreas da tecnologia e de diversas formas. Na área de eletrônica de potência, a técnica *interleaved* possui forte apelo em aplicações de média e alta potência, na qual a ondulação do sinal de corrente é um requisito importante. Nestas aplicações, o *stress* causado pelos níveis de tensão e corrente podem ultrapassar os limites operativos suportados pelos semicondutores. Assim, a operação em paralelo através de múltiplas fases pode ser considerada uma alternativa dentro deste contexto.

De forma geral, as vantagens desta estrutura são: Menor ondulação na corrente de entrada, melhor eficiência do conversor e transitórios mais rápidos em resposta a variações de carga, além de reduzir os esforços das chaves.

Na Figura 1 é apresentado o conversor *boost interleaved* empregado neste projeto. No modelo do conversor, é considerado o circuito equivalente do arranjo de painéis fotovoltaicos, as resistências parasitas das chaves e indutores, bem como a resistência de carga.

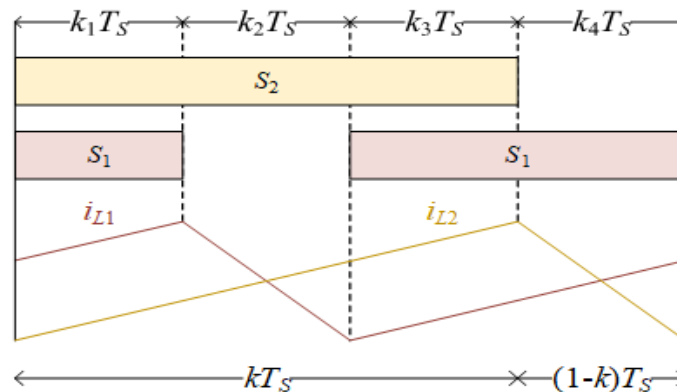
Figura 1 – Conversor proposto nesse trabalho.



Fonte: Autor.

O entrelaçamento dos semicondutores precisa estar operando na mesma frequência de chaveamento, porém com uma fase deslocada em relação a outra de 180° , sendo assim, quando o conversor operar com ciclo de trabalho superior a 0,5, haverá quatro intervalos de chaveamento distintos que podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 – Intervalo de chaveamentos do conversor.



Fonte: Autor.

- No primeiro e terceiro subintervalos as chaves S_1 e S_2 se encontram fechadas (kT_{1s} e kT_{3s});
- No segundo subintervalo apenas a chave S_2 está fechada (kT_{2s});
- E no quarto subintervalo apenas a chave S_1 está fechada (kT_{4s}).

Para realizar a modelagem média do conversor eletrônico, foi empregado o método em espaço de estados. Este método, representa o sistema através de uma combinação linear de cada subintervalo, ponderado pelo seu período relativo. Na equação (1) estão os vetores de estados (1), de entrada (2) e saída (3).

$$\mathbf{x} = [iL_1 \quad iL_2 \quad v_{cpv} \quad v_{c \text{ link}}]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = [V_{eq}] \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = [iL_1 + iL_2 \quad v_{c \text{ link}}] \quad (3)$$

Uma vez obtidas as matrizes dos quatro subintervalos (A_1, A_2, A_3, A_4), é aplicado no sistema a matriz média, que representa todo o sistema através de uma combinação linear de cada subintervalo citado acima ponderado pelo seu período relativo (k_1, k_2, k_3, k_4).

Considerando que o conversor possui um comportamento não linear e que a inserção da perturbação no vetor de entrada se propaga aos vetores de estados e de saída e, que o ciclo de trabalho k se modifica, de ciclo em ciclo, em torno do ponto de linearização, tem-se $k = K + \hat{k}$, sendo K o valor médio em regime permanente e \hat{k} o valor CA em torno do ponto de linearização.

$$G_v(s) = \frac{\hat{v}_{c \text{ link}}(s)}{\hat{k}(s)} = \mathbf{C}_v (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \quad (4)$$

$$G_i(s) = \frac{\hat{i}_{L1}(s) + \hat{i}_{L2}(s)}{\hat{k}(s)} = \mathbf{C}_i (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \quad (5)$$

Sendo:

$$\mathbf{A}_n = [(-\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_4) + \mathbf{K}(2\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)] \quad (6)$$

$$\mathbf{F} = (2\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_4)\mathbf{X} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \hat{k} \quad (8)$$

$$\hat{v}_c = \mathbf{C}_v \hat{\mathbf{x}}(s) \quad (9)$$

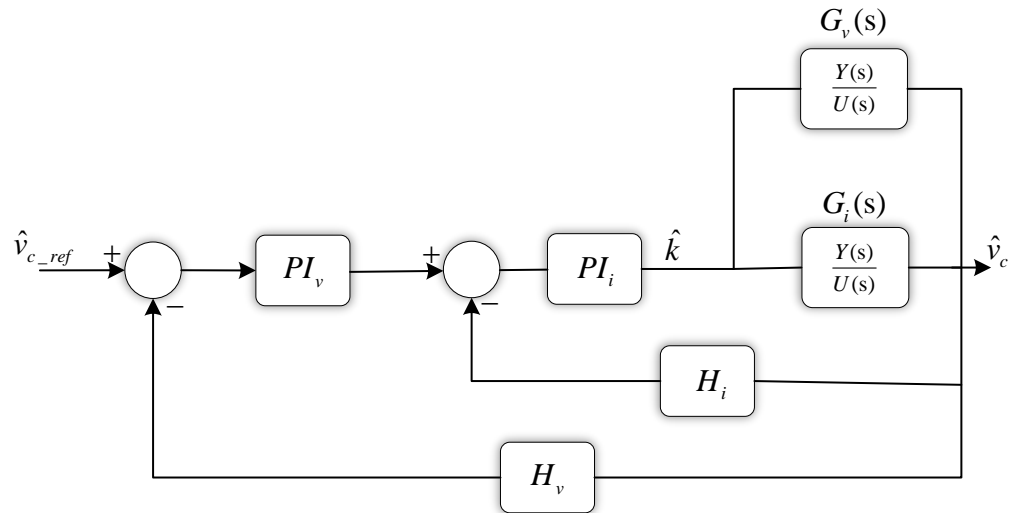
$$\hat{i}_l = \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}(s) \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_i = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_v = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 1]^T \quad (12)$$

Obtido as funções de transferência do conversor, o próximo passo foi projetar dois controladores com as constantes Proporcional Integral (PI), tanto para a malha fechada mais interna de corrente, quanto para malha mais externa fechada de tensão. Na figura 3 é apresentada a planta do controle proposto, onde se encontram os controladores do tipo PI, e para suas sintonizações foi utilizado a ferramenta *SIMULINK* do MATLAB que fornece as constantes dos controladores a partir dos parâmetros especificados.

Figura 3 – Planta de controle do sistema.



Fonte: Autor.

RESULTADOS

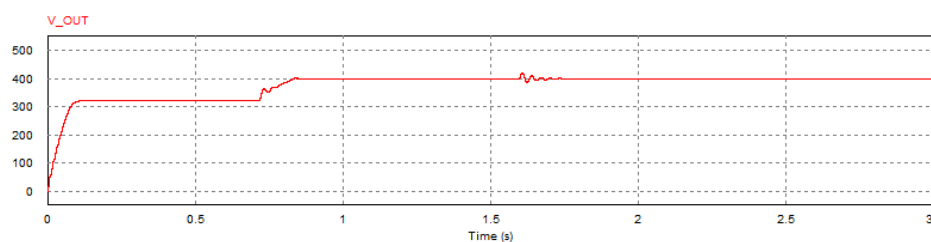
Com os controladores de corrente e tensão projetados, utilizou-se o software PSIM para simular o circuito *boost interleaved* com um processador digital de sinais (DSP) afim de certificar-se a eficiência da topologia e as estratégias de controle do fluxo de potência escolhidas.

Parâmetros do sistema:

Vout	Vin	Potência	Kp V	Kp I	Ki V	Ki I
400 V	270 V	10 kW	0.76	5	1.756	18.121

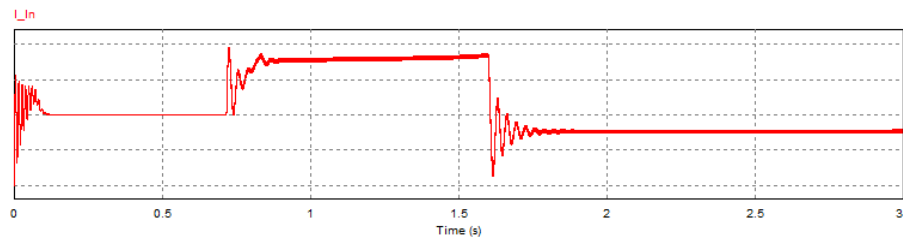
Na figura 4 e 5, foi inserido uma carga em degrau com a metade da potência máxima projetada, ou seja, 5kW. Posteriormente, na Figura 5 e 6, foi inserido também outro degrau de carga, diferente da primeira vez, com o dobro do potencial máximo.

Figura 4 – Resposta no tempo do conversor reduzindo em 50% a carga em degrau



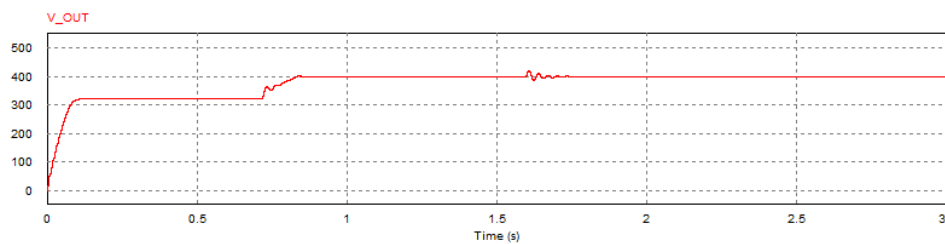
Fonte: Autor.

Figura 5 – Resposta no tempo do conversor reduzindo em 50% a carga em degrau



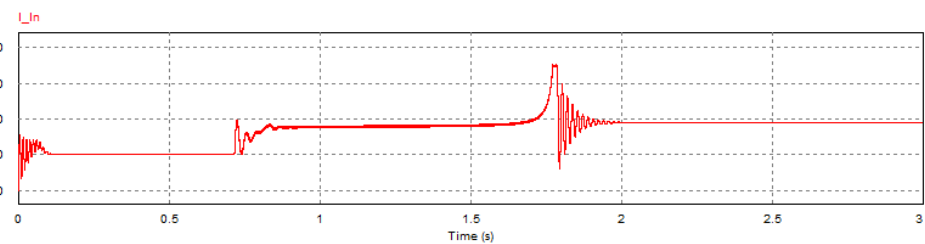
Fonte: Autor.

Figura 6 – Resposta no tempo do conversor elevando 100% de carga em degrau.



Fonte: Autor.

Figura 7 – Resposta no tempo do conversor elevando 100% de carga em degrau.



Fonte: Autor.

CONCLUSÃO

Como discorrido nesse artigo, a topologia de conversor CC-CC escolhida para a elevação de tensão de entrada mostrou-se eficiente, na mesma medida que a técnica de controle empregada, mantendo a tensão de saída estável nas aplicações de carga em diversas circunstâncias tendo um pico de variação de 1,25%, quando a carga é dobrada ou reduzida pela metade.

REFERÊNCIAS

C. Shih-Jen, L. Yu-Kang, C. Huang-Jen, and K. Shu-Wei, "High-Efficiency DigitalControlled Interleaved Power Converter for High-Power PEM Fuel-Cell Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 773-780, 2013.

DE AGUIAR, C. R. Contribuição ao gerenciamento e controle de células a combustível e armazenadores de energia para a operação em geração distribuída. Dissertação de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, 2016.