

Conversor *Boost*-SEPIC modificado para alto ganho de tensão

RESUMO

Este relatório apresenta um conversor CC-CC não isolado com elevado ganho de tensão fundamentado nas topologias *Boost* e SEPIC isolado em modo de condução contínua. Justificada pela necessidade de se elevar a tensão de entrada a grandes níveis com corrente contínua, como a de painéis fotovoltaicos e aerogeradores, esta topologia apresenta auto grampeamento de tensão em todos os semicondutores não exigindo nenhum circuito de grampeamento externo. O conversor permite maior ganho de tensão a uma razão cíclica reduzida por possuir dois capacitores e dois diodos que atuam como multiplicadores de tensão. De forma diferente do SEPIC isolado clássico, esta proposta utiliza o indutor acoplado como transformador pois não armazena energia em nenhum intervalo de tempo durante as etapas de operação. Além disso, as tensões sobre os capacitores que formam o barramento de saída são sempre uma parcela da tensão total. Outras características do circuito estudado são o alto rendimento, a regeneração de energia que seria perdida na comutação da chave através do diodo e capacitor *Boost* e a baixa ondulação da corrente de entrada. São apresentados a metodologia de projeto, análise qualitativa, equacionamento matemático, ensaios do protótipo e formas de onda em regime permanente. Para os ensaios foram utilizados como parâmetros uma tensão de entrada de 48V, tensão de saída de 400V, potência nominal de 500W e frequência de comutação de 100kHz.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor CC-CC.*Boost*-SEPIC. Alto ganho de tensão. Painéis solares.

Modified *Boost*-SEPIC converter to high voltage gain

ABSTRACT

This paper presents a non-isolate high-voltage-gain DC-DC converter based on *Boost* and isolated SEPIC topologies in continuous driving mode. Justified for needing to elevate the input voltage to high levels with continuous current, like in photovoltaics panels and aerogenerators, this topology features snubber in all semiconductors not requiring external snubber circuit. The converter allows more voltage gain with reduced duty cycles by owning two capacitors and two inductors which act as voltages multipliers. Differently of isolate classic SEPIC topology, this paper propose utilizes the coupled inductor as transformer because don't storage energy in any operation step. Besides that, the capacitors voltages, which form the output bus, are always a portion of total voltage. Others characteristics of the studied converter are the high efficiency, energy regeneration that would be lost during the switch commutation through the *Boost*'s diode and capacitor, as well as, the low input current ripple. Are presented the project methodology, qualitative analysis, mathematics equations, prototype essays and stead state waves forms. For the essays were used as parameters the input voltage of 48V, output voltage of 400V, nominal power of 500W and switch frequency of 100kHz.

KEYWORDS: DC-DC converter,*Boost*-SEPIC. High-voltage-gain. Photovoltaic panels.

Bruno Gomes de Assis
elaric_10@outlook.com
Universidade Tecnológica
Federal do Paraná – PG
Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Prof. Dr. Eloi Agostini Júnior
eloiaagostini@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica
Federal do Paraná – PG
Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Eduardo Pacheco Carreiro Braga
eduardopcbra@ gmail.com
Universidade Tecnológica
Federal do Paraná – PG
Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Prof. Dr. Claudinor Bitencourt Nascimento
claudinor@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica
Federal do Paraná – PG
Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Recebido: 31 ago. 2018.

Aprovado: 04 out. 2018.

Direito autorial:

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



INTRODUÇÃO

É sabido que o consumo de energia cresce de maneira exponencial ao longo dos últimos anos e, segundo o IEA (*International Energy Agency, 2017*), o consumo de energia tende a crescer em 40% até 2040, o equivalente a adicionar uma China e Índia à demanda global de hoje. Analisando a matriz energética mundial vê-se necessidade de diversificar a produção de energia global, focando em geração por meios renováveis. Dentre elas, a energia fotovoltaica, renovável e limpa, possui a maior estimativa de produção até 2022, IEA (2017).

A energia adquirida por uma célula fotovoltaica é da forma contínua (CC) e de pequena tensão, cerca de 48 V, o que não satisfaz as especificações das cargas utilizadas no dia-a-dia. Depara-se, portanto, com um grande problema: “Como transformar esta pequena energia em valores mais elevados para que, após isso, seja convertida em corrente alternada (CA)?”.

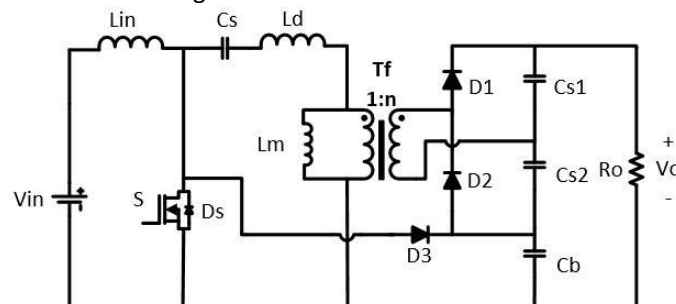
A resposta é a utilização de conversores de energia. Na eletrônica de potência conversores de energia possuem a capacidade de transformar a energia elétrica alternada ou contínua na forma alternada ou contínua com valores de tensão e corrente variados, dependendo das necessidades de projeto (BARBI, Ivo. 2008). Um sistema de obtenção e tratamento da energia realizada por uma célula fotovoltaica pode ser vista pelo diagrama de blocos da Figura 1.

Figura 1- Diagrama de blocos de um sistema de obtenção e tratamento da energia solar utilizando painéis fotovoltaicos e conversores.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2- Conversor *Boost*-SEPIC.



Fonte: Autoria própria.

O relatório apresenta um conversor não isolado CC-CC com elevado ganho de tensão fundamentado nas topologias *Boost* e SEPIC isolado em modo de condução contínua, representado pelo Bloco 2 da Figura 1. A topologia apresenta auto grampeamento de tensão em todos os semicondutores, não exigindo nenhum circuito de grampeamento externo. A topologia proposta é apresentada na Figura 2. Nele, elementos como a indutância de entrada L_{in} e a chave S são compartilhadas. Os componentes C_s , C_{s1} , C_{s2} , D_1 , D_2 e T_f compõem o restante do conversor SEPIC, enquanto C_b e D_3 completam o segmento *Boost*. Diferente

do SEPIC isolado clássico, este conversor utiliza o indutor acoplado como transformador pois não armazena energia em nenhum intervalo de tempo durante as etapas de operação.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do conversor CC-CC com alto ganho de tensão foi realizado primeiramente os estudos dos conversores CC-CC não isolados para melhor entendimento das topologias existentes e da nova topologia proposta. Seguiu-se então com a análise matemática do conversor *Boost*-SEPIC juntamente com sua simulação realizada em programa de simulação de circuitos (PSIM® e ORCAD®). Realizou-se a construção de um protótipo para testes em bancada e, por fim, foram mensuradas todas as formas de onda para validação da topologia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo são apresentadas as análises qualitativas e quantitativas do conversor *Boost*-SEPIC atuando no modo de condição contínua. Com uma análise detalhada do conversor em regime permanente, verificam-se cinco etapas de operação, sendo assim, cinco variantes no tempo.

Primeira etapa de operação ($t_0 - t_1$): Em t_0 a chave S entra em condução, o diodo Boost, D_3 , está em corte. A corrente I_{LD} decresce e a tensão sobre L_m é igual a V_{CS1}/n . Nesta etapa D_1 , C_{S2} e C_b entregam energia para a carga e D_1 entrega energia para C_{S1} . Esta etapa acaba quando I_{LD} chega a zero levando D_1 ao bloqueio.

Segunda etapa de operação ($t_1 - t_2$): Em t_1 I_{LD} zera, bloqueando D_1 . A chave S permanece fechada. D_2 conduz permitindo que a tensão em L_m seja $-V_{CS2}/n$. A indutância L_D começa a armazenar energia. Nesta etapa D_2 , C_{S1} e C_b entregam energia para a carga e D_2 entrega energia para C_{S2} .

Terceira etapa de operação ($t_2 - t_3$): Em t_2 , S bloqueia polarizando diretamente o diodo D_3 permitindo que a energia sobre L_D seja entregue à carga. D_2 continua polarizado e a tensão no indutor primário do transformador é $-V_{CS2}/n$. Nesta etapa D_2 e C_{S1} entregam energia para a carga, D_2 entrega energia para C_{S2} e D_3 para C_b e para a carga.

Quarta etapa de operação ($t_3 - t_4$): Em t_3 , I_{LD} chega a zero levando o diodo D_2 ao bloqueio. D_1 entra em condução permitindo que a tensão sobre L_m seja V_{CS1}/n . Nesta etapa S permanece aberta, D_3 em condução e a corrente sobre L_D cresce. D_1 e C_{S2} entregam energia para a carga, D_1 entrega energia para C_{S1} e D_3 fornece energia para C_b e para a carga.

Quinta etapa de operação ($t_4 - t_5$): Em t_4 a corrente I_{LD} atinge o mesmo valor de I_{Lin} levando D_3 ao corte. A chave S continua bloqueada e D_1 polarizado diretamente, logo a tensão imposta sobre o indutor L_m é V_{CS1}/n . Nesta etapa D_1 , C_{S2} e C_b entregam energia para a carga e D_1 entrega energia para C_{S1} .

A análise quantitativa das etapas descritas anteriormente são simplificadas nas quações abaixo:

$$I_{Ld}(\Delta t_1) \tag{1}$$

$$= I_{Lin} - \frac{\left(V_{in} + \frac{V_{CS1}}{n}\right)}{Ld} \cdot \Delta t_1$$

$$I_{Ld}(\Delta t_2) = \frac{1}{Ld} \cdot \left(-\frac{V_{CS2}}{n} - V_{in}\right) \cdot \Delta t_2 = -I_{min} \tag{2}$$

$$I_{Ld}(\Delta t_3) = -I_{min} + \frac{1}{Ld} \cdot \left(\frac{V_{Cs2}}{n} + V_{Cb} - V_{in} \right) \cdot \Delta t_3 = 0 \quad (3)$$

$$I_{Ld}(\Delta t_4) = \frac{1}{Ld} \cdot \left(-\frac{V_{Cs1}}{n} + V_{Cb} - V_{in} \right) \cdot \Delta t_4 = I_{Lin} \quad (4)$$

$$I_{Ld}(\Delta t_5) = I_{Lin} \quad (5)$$

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 = D \cdot T_s = \frac{D}{f_s} \quad (6)$$

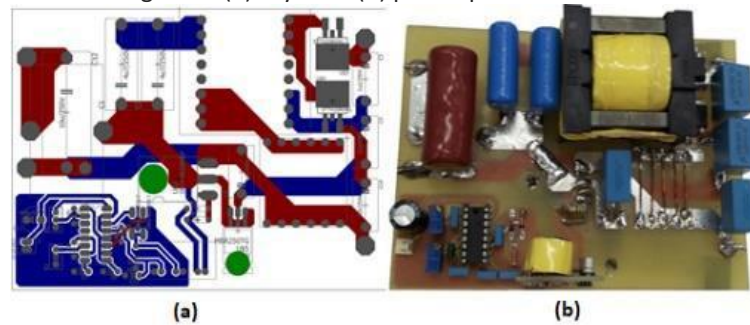
$$\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 = (1 - D) \cdot T_s = \frac{(1 - D)}{f_s} \quad (7)$$

$$V_{Cs1} + V_{Cs2} + V_{Cb} = V_o \quad (8)$$

$$\Delta I_{Lin} = \frac{D \cdot V_{in}}{f_s \cdot L_{in}} \quad (9)$$

Após realizada todas as análises, desenvolveu-se o *layout* do circuito através do programa Eagle®. Em seguida, o protótipo foi construído em laboratório, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3- (a) Layout e (b) protótipo do conversor.



Fonte: Autoria própria.

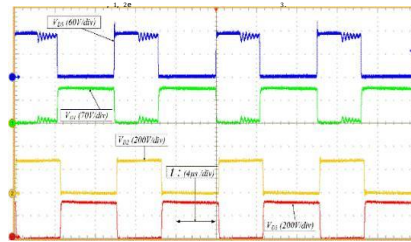
Na Figura 4 as tensões de bloqueio V_{Ds} , V_{D1} , V_{D2} e V_{D3} são observadas. É perceptível uma oscilação em V_{D3} , como resultado da recuperação reversa de D_3 juntamente com as indutâncias dispersas do *layout*. Formas de onda adequadas foram verificadas para V_{D1} e V_{D2} sem adicionar nenhum circuito de grampeamento auxiliar ao conversor, sendo esta uma diferença central entre a solução proposta e o conversor *Boost-SEPIC* convencional apresentado por Ki Park (PARK, Ki, 2010).

A Figura 5 traz as formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída, comprovando um valor de 48V na entrada, como especificado nos parâmetros de projeto, e uma corrente de entrada com baixíssima ondulação.

É possível visualizar as cinco etapas de operação do conversor proposto através da corrente sobre o indutor de dispersão, L_d , mostrado pela Figura 6. Além disso, com a tensão do capacitor C_s comprova-se que a ondulação da tensão está de acordo com as simulações e dos valores calculados, cerca de 10%.

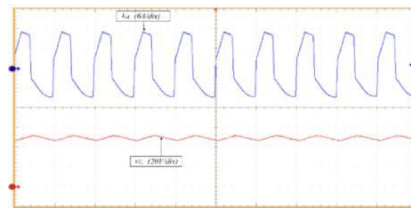
A Figura 7 apresenta as formas de onda e seus valores no tempo das tensões de saída V_o e sobre os capacitores que formam o barramento de saída (V_{Cs1} , V_{Cs2} e V_{Cb}). O conversor, portanto, entrega valores de tensão como especificado e com baixíssima ondulação. É importante salientar que a tensão sobre os capacitores é sempre uma parcela da tensão total de saída.

Figura 4. Tensões de bloqueio



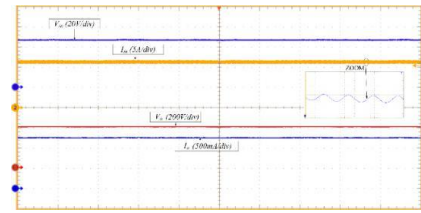
Fonte: Autoria própria.

Figura 6. Corrente e tensão



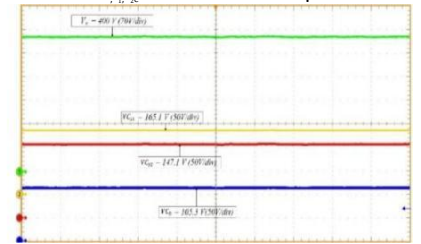
Fonte: Autoria própria.

Figura 5. Resultados de e



Fonte: Autoria própria.

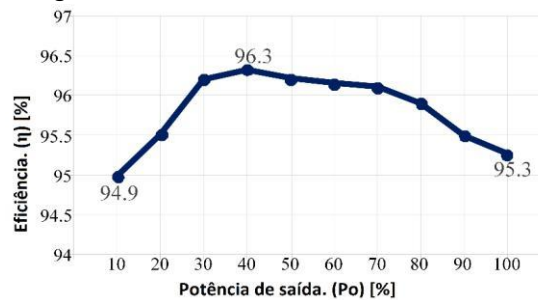
Figura 7. Valores das tensões



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 mostra os valores do rendimento (P_o/P_{in}) para diferentes parcelas da potência nominal de 500W, comprovando o alto rendimento do conversor proposto.

Figura 8. Gráfico do rendimento do conversor Boost-SEPIC.



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÃO

Para a obtenção de energia fotovoltaica, uma energia renovável crescente no mundo, é imprescindível a utilização de conversores de energia para a adequação dos níveis de tensão como o proposto por este relatório. Diante dos fatos abordados na discussão, podemos concluir que o conversor proposto não precisa de circuito de grampeamento externo, uma vez que essa propriedade é intrínseca, assim, uma menor quantidade de componentes é utilizado, garantindo um maior rendimento. A corrente de entrada é livre de ondulações não necessitando de filtros na entrada. O conversor garantiu alto rendimento, marcando 95,3% em carga nominal, possuindo apenas uma chave comutadora, a qual nunca está sob um alto potencial devido a integração do conversor Boost. Ademais, a energia que seria perdida na comutação da chave é regenerada pelo segmento Boost. Todas as formas de onda esperadas pela análise matemática e por simulação batem com os resultados obtidos em bancada, comprovando a funcionalidade do conversor.



REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo; CRUZ, Denizar. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. 3. ed. Florianópolis: 2008.

K. B. Park, G. W. Moon, and M. J. Youn. Nonisolated High Step-up Boost Converter Integrated with SEPIC Converter. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 9, pp. 2266-2275, Sept. 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5439959/>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

Renewable Energy. U.S. Energy Information Administration, revisado em junho 2018. Disponível em: <<https://www.eia.gov/>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a instituição UTFPR pelo incentivo, pela bolsa de Iniciação Científica e ambiente disponibilizado; ao meu orientador Prof. Dr. Eloi Agostini Júnior e Prof. Dr. Claudinor Bitencourt pela paciência e suporte. Ao amigo Eduardo Pacheco e a todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, ajudaram para a concretização desse trabalho.