



CONVERSOR *BUCK-BOOST* APLICADO A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM UTILIZAÇÃO DE UM INDUTOR VARIÁVEL

S. M. Martins, Á. R. Seidel, L. Roggia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, Brasil

Resumo. Este artigo propõe a utilização de um Indutor Variável Linear (LVI) substituindo o projeto magnético usual em um conversor CC-CC do tipo buck-boost aplicado a sistemas fotovoltaicos como rastreador do ponto de máxima potência. O projeto do indutor através de ambas as técnicas é abordado no artigo. Por fim são apresentados os resultados experimentais, nos quais fica clara a possibilidade de diminuição do volume do núcleo magnético, sendo este o foco principal do trabalho.

Palavras-chave: Indutor variável, conversor CC-CC, fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

Em uma visão abrangendo o âmbito estrutural da matriz energética mundial atual, tem-se dado destaque à geração de energia elétrica proveniente da conversão direta de luz solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Fazendo frente às fontes de energia usuais, a geração fotovoltaica já representa grande parte da matriz energética de países como a Alemanha, e isto torna-se compreensível, por exemplo, quando observado o investimento recorde no ano de 2015 em nível global, da ordem de 161 bilhões de dólares sendo, portanto, a fonte de energia renovável mais atrativa a investimentos no mesmo ano [1].

A célula fotovoltaica, ou célula PV, componente que torna possível a conversão fotovoltaica de energia elétrica, apresenta as características físicas e construtivas de um semicondutor. Seu modelo elétrico pode ser

descrito como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, o que caracteriza comportamento não-linear de resposta à tensão e corrente produzidas. É importante destacar que este comportamento depende de circunstâncias externas, como temperatura ambiente e irradiação solar e, desta forma, a máxima potência extraível do sistema não apresenta comportamento constante, tornando o ponto de máxima potência (MPP) também variável [2].

A obtenção da máxima potência é possível aplicando-se o teorema da máxima transferência de energia [2], ocorrendo este comportamento quando uma fonte de energia e uma carga conectadas possuem os mesmos valores de impedância. Assim, este casamento de impedâncias para sistemas fotovoltaicos ocorre quando o valor da impedância de entrada do conversor conectado é igual a relação entre a tensão de máxima potência (V_{mpp}) e a corrente de máxima potência (I_{mpp}), conforme Eq. (1).

$$R_{op} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (1)$$

Este arranjo é possível com o emprego de conversores CC-CC, uma vez que os mesmos possuem a característica de variação de impedância de entrada em função da razão cíclica imposta na comutação dos dispositivos interruptores [2][3].

A partir disso, objetivando a redução de volume do componente magnético (indutor) do conversor CC-CC aplicado como MPPT neste trabalho, propõe-se utilizar uma configuração deste componente, comumente denominada na literatura como LVI (*Linear Variable Inductor*), apresentando indutância variável controlada aplicado a um conversor

CC-CC *buck-boost*. A variação da indutância é realizada de maneira a garantir o modo de condução crítica (BCM) para diferentes irradiâncias em um sistema fotovoltaico.

2. INDUTÂNCIA CRÍTICA

Com a finalidade de reduzir interferências eletromagnéticas (EMI), correntes de fuga, e desta forma, em aplicações de sistemas fotovoltaicos, possibilitar maior vida útil aos painéis, é de uso difundido a operação em CCM dos conversores CC-CC com finalidade de rastreamento de máxima potência [4][5].

A Fig. 1 mostra o comportamento da indutância crítica em função da corrente de saída do conversor. Para o projeto usual de um conversor com operação em CCM (L_1), considera-se como parâmetro de projeto a condição de maior indutância sob maior corrente. Em operação normal, sob menores correntes, o conversor opera com menor ondulação e menor corrente no indutor.

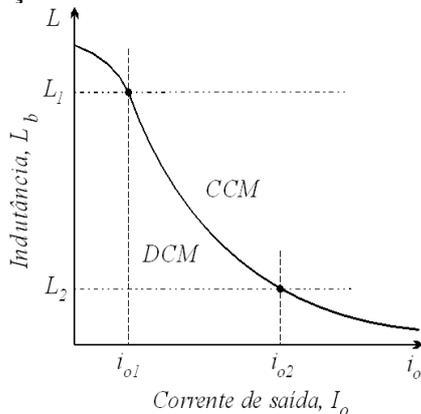


Fig. 1. Indutância L_b em relação ao nível de corrente de saída I_o

Desta forma, é possível analisar a condição de indutância crítica necessária para garantir operação em CCM, que decresce de acordo com o aumento de nível de corrente no indutor. Em sistemas fotovoltaicos é possível afirmar que sob condições de maior irradiância, a indutância crítica será menor, possibilitando assim o uso de menores valores de indutância neste ponto de operação (L_2).

A partir desta análise é proposta a implementação de um LVI. Esta concepção é

válida uma vez que, a energia armazenada sob o indutor é proporcional ao tamanho de seu núcleo, o que torna possível reduzir o volume total do sistema.

Para o exemplo que será descrito, sob condições de operação de irradiância mínima (200 W/m^2) a indutância crítica necessária para operação em CCM é de $81,06 \mu\text{H}$, reduzindo para $32,92 \mu\text{H}$, sob condições de irradiância máxima (1000 W/m^2). Para o projeto convencional de um conversor *buck-boost* é considerado a maior indutância sob a condição crítica de maior nível de corrente, neste caso $81,06 \mu\text{H}$ sob $6,66 \text{ A}$. Uma vez que a energia armazenada no indutor (E_s) é definida por

$$E_s = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2)$$

o valor correspondente ao projeto convencional é de $1,79 \text{ mJ}$.

Considerando a utilização de um LVI, para maior indutância, sob condição de menor corrente ($81,06 \mu\text{H}$ sob $1,83 \text{ A}$), a energia armazenada pelo indutor corresponde a $0,13 \text{ mJ}$. Para menor indutância, sob maiores níveis de corrente ($32,92 \mu\text{H}$ sob $6,66 \text{ A}$), a energia armazenada pelo indutor corresponde a $0,73 \text{ mJ}$. Desta forma, observa-se a possibilidade de redução do volume do núcleo utilizado em aproximadamente 60% , e com isso a redução do volume total do conversor.

3. PROJETO DO CONVERSOR

Esta seção aborda os aspectos práticos referentes ao projeto do indutor de um conversor CC-CC do tipo *buck-boost* aplicado como MPPT de um sistema fotovoltaico.

3.1 Projeto do indutor fixo em CCM

A tabela I informa as características de projeto do conversor *buck-boost* proposto, sob condições de irradiância máxima e mínima, aplicadas por um emulador fotovoltaico. São analisadas as indutâncias críticas, bem como o valor teórico de razão

cíclica e impedância de entrada referentes ao MPP.

TABELA I. VARIAÇÃO DE L_b EM FUNÇÃO DA IRRADIÂNCIA

Irradiância	R_i	L_b	Razão cíclica
200 W/m ²	17,58 Ω	81,06 μH	48%
1000 W/m ²	3,68 Ω	32,92 μH	66%

Considerando tensão fixa sob condições de temperatura constante, em MPP, v_{pv} apresenta 17,9 V. Para uma irradiância de 1000 W/m² a corrente i_{pv} apresenta valor igual a 4,84 A, enquanto que para menor a irradiância considerada, i_{pv} apresenta valor igual a 0,996 A.

Para o projeto magnético usual deste conversor, considera-se a maior indutância e o maior nível de corrente para uma ondulação mínima, garantindo o modo de operação contínua. Este parâmetro de projeto é sobredimensionado, uma vez que com aumento de corrente sobre o indutor a indutância crítica diminui, podendo-se obter o modo de operação contínua sob menores valores de indutância.

Desta forma, pelo projeto de magnéticos para fontes chaveadas proposto em [6], define-se o tipo de núcleo a ser utilizado, e através de seus parâmetros de área da janela (A_w) e área efetiva de seção transversal (A_e) é observada a possibilidade de execução por seu produto em

$$A_e A_w = \frac{L * I_{Max} * I_{rms}}{K_w * B_{sat} * J} \quad (2)$$

dependendo da indutância a ser projetada (L), da corrente máxima de pico (I_{Max}), e da corrente RMS presente no indutor (I_{rms}) considerando um fator de ocupação máximo da janela ($K_w = 0,5$), densidade de fluxo onde ocorre a saturação ($B_{sat} = 0,3 T$) e densidade de corrente no condutor ($J = 300 A/cm^2$). O número de espiras (NL) é definido em

$$NL = \frac{I_{Max}}{A_e * B_{sat}} \quad (2)$$

resultando, para este caso, em um projeto executável em núcleo de ferrite tipo EE 42/21/20 ou superior. Esta condição define o indutor utilizado para modo de operação em

CCM com menores ondulações para o aumento de potência, com uma indutância de 81,06 μH.

3.2 Projeto do indutor variável

Para o conversor *buck-boost* proposto, é considerada a faixa de variação da indutância de de 81,06 μH – 32,92 μH garantindo modo de condução crítica sob as condições de máxima e mínima irradiâncias incididas sobre o painel fotovoltaico.

O número de espiras de N_c é definido através dos parâmetros construtivos, tipo de material utilizado no núcleo, bem como a definição da máxima corrente por

$$N_c = \frac{k B_{sat} * l_{ext}}{0,5 * \mu_k B_{sat} * \mu_0 * I_{dc_max}} \quad (2)$$

em que l_{ext} corresponde ao comprimento do caminho magnético externo do núcleo, sendo que a variável k multiplicada pela densidade de fluxo onde ocorre saturação do núcleo (B_{sat}) garante a operação fora desta faixa. A variável $\mu_k B_{sat}$ corresponde à permeabilidade do material para esta mesma condição, sendo ainda definido a permeabilidade do vácuo e a máxima corrente CC aplicada ao enrolamento auxiliar (I_{dc_max}).

A construção de um LVI segue as técnicas e teorias propostas na literatura [7], de modo que para I_{dc_max} o número de espiras do enrolamento de controle NC dado por (9) corresponde a 100 espiras, divididas entre os dois caminhos externos do núcleo duplo E.

Com esta faixa de variação de indutância é possível atingir o BCM para toda faixa de irradiância de 200 W/m² até 1000 W/m². Desta forma, a energia armazenada pelo núcleo não ultrapassa os valores de projeto, o qual não é sobredimensionado possibilitando a redução de volume.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram obtidos os resultados experimentais de corrente sobre o indutor fixo e sobre o LVI. De modo a emular as

curvas do painel fotovoltaico, foi utilizado o emulador E4360A *Agilent Technologies* com os dados característicos das curvas do módulo fotovoltaico de 85 Wp SPM085P *Solartech*. A Fig. 2(a) mostra o protótipo do conversor proposto, bem como a Fig. 2(b) mostra o comparativo entre os indutores construídos.

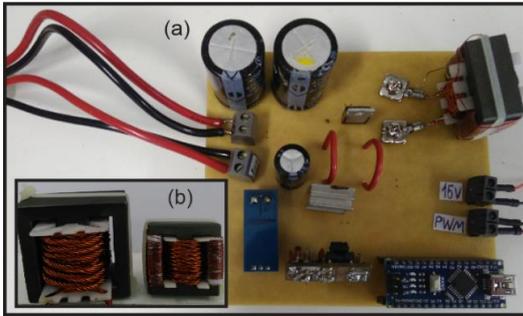


Fig. 2. (a) Protótipo do conversor proposto; (b) Comparação entre o indutor projetado para CCM (esquerda) e o indutor projetado com a técnica de LVI (direita)

A Fig. 3 mostra a corrente e tensão de entrada, tensão de saída, bem como a corrente sobre o indutor, para indutor fixo sob condições de irradiância igual a 1000 W/m², e é possível perceber o funcionamento em CCM. Com o projeto deste indutor fixo com a aplicação de um núcleo EE42/21/20 obtém-se um volume magnético de 23,3 cm³.

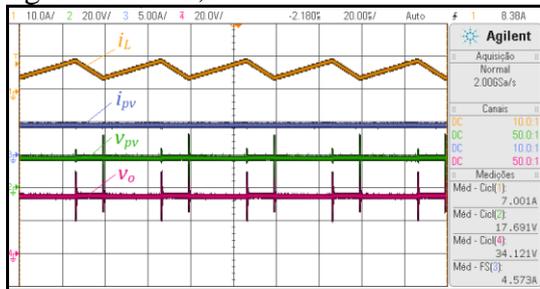


Fig. 10. Corrente no indutor fixo projetado para CCM, corrente e tensão de entrada e tensão de saída com irradiância incidida sobre o painel igual a 1000 W/m²

A Fig. 11 mostra os resultados para a corrente do LVI sob a condição de 1000 W/m², bem como tensão e corrente na conexão com o painel. Nesta condição é aplicada uma corrente de 1,7 A sobre N_c de modo que a corrente sobre o indutor atinja a condução crítica e o conversor funcione em BCM. Nesta condição, a indutância crítica teórica apresenta valor de 32,92 μ H. Com o projetado deste LVI com a aplicação de um

núcleo de ferrite EE 30/15/14 obtém-se um volume magnético de 8,17 cm³.

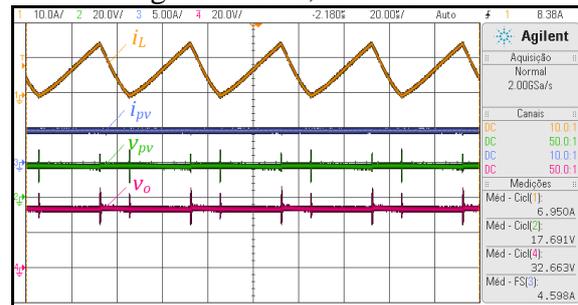


Fig. 11. Corrente no indutor variável, corrente e tensão de entrada e tensão de saída com irradiância incidida sobre o painel igual a 1000 W/m²

Desta forma é evidente a possibilidade de redução do volume do componente magnético em 64%, valor muito próximo do teorizado por (7), validando assim a proposta deste artigo.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a utilização de um indutor com indutância variável aplicado a um conversor *buck-boost* utilizado como MPPT de um sistema fotovoltaico. Esta variação de indutância torna possível o projeto do indutor considerando uma menor energia armazenada pelo núcleo, e sendo assim, o projeto com um volume magnético reduzido. Conclui-se que com a utilização deste método foi possível a redução do núcleo magnético em 64%, possibilitando a redução do volume total do conversor.

REFERÊNCIAS

- [1] IEA, "PVPS Annual Report 2016," 2016.
- [3] P. De Assis, S. Jr, M. G. V. D, P. G. Barbosa, H. Antônio, C. Braga, J. R. G. D, E. R. D, and A. A. Ferreira, "Comparative analysis of current and voltage-controlled photovoltaic maximum power point tracking," in COBEP, pp. 858–863, 2011.
- [4] D. Hamza, S. Member, M. Qiu, and P. K. Jain, "Application and Stability Analysis of a Novel Digital Active EMI Filter Used in a Grid-Tied PV Microinverter Module," *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 28, no. 6, pp. 2867–2874, 2013.
- [5] C. Pan and M. Cheng, "Current Ripple-Free Module Integrated Converter (MIC) with More Precise Maximum Power Tracking Control for PV Energy Harvesting," in PEDS, pp. 1328–1334, 2013.
- [6] I. Barbi, "Eletrônica de Potência: Projetos de Fontes Chaveadas." Edição do Autor, p. 332, 2001
- [7] D. Medini and S. Ben-yaakov, "A current-controlled variable-inductor for high frequency resonant power circuits," in APEC, vol. 2, no. 2, 1994.