

Conversor de Alto Ganho de Tensão Boost-Zeta Aplicado a Módulo PV Integrado

Boost-Zeta High Step-Up PV Module Integrated Converter

Gustavo C. Volpato, gustavocostaufsm@gmail.com

Antônio M. S. S. Andrade

Everson Mattos

Mário L. da S. Martins

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS

Submetido em 10/05/2016

Revisado em 20/07/2016

Aprovado em 10/08/2016

Resumo: Este artigo propõe o conversor Boost-Zeta de alto ganho de tensão CC-CC aplicado no Sistema de Gerenciamento e Entrega de Energia Elétrica Renovável do Futuro (*Future Renewable Electric Energy Delivery And Management* - FREEDM). O conversor proposto é responsável pelo Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) do painel fotovoltaico (PV) e também pelo método de carregamento do banco de baterias do FREEDM. Resultados de simulação e experimentais são apresentados com o objetivo de demonstrar o funcionamento e a viabilidade do conversor aplicado no FREEDM. **Palavras chave:** Conversor CC-CC; Métodos de Carga de Bateria; Micro rede; Módulos Integrados PV.

Abstract: This paper proposes a novel single-switch DC/DC converter for the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System to implement the Distributed Renewable Energy Resources (DRER). The DRER is responsible for the Maximum Power Point Tracking (MPPT) of the PV module and also the charging method of battery pack. Experimental and Simulation results are presented for the purpose of operating the converter and also the operation of the system.

Keywords: Battery charging method; DC-DC converter; MPPT; Microgrid; PV Module Integrated.

Introdução

Atualmente combustíveis, tais como petróleo, carvão e gás natural, tem sido as maiores fontes de energia no mundo. Porém, suas reservas naturais têm diminuindo e a exploração de novas tem se tornado cada vez mais difícil (Marchetti - 2015). Contudo, os países desenvolvidos têm passado por um aumento contínuo da sua demanda energética, o que reflete o seu desenvolvimento econômico (Agency - 2010). Por outro lado a oferta de energia não é suficiente para garantir o mínimo desenvolvimento econômico e social de uma grande parte do mundo (Madani - 2015). Desta forma, deve-se esperar que num futuro próximo ocorra um grande aumento na demanda energética, não somente em consequência do maior consumo de energia pelos países em desenvolvimento, mas também pelo aumento do consumo de energia per capita em países subdesenvolvidos. Além da possibilidade do esgotamento das fontes de energia não renováveis, cada vez mais ficam evidentes as consequências do uso dessas fontes.

Ao considerar estes fatores, torna-se evidente a necessidade de se buscar novas fontes para a matriz energética (Halabi - 2015). Dentro deste contexto, a energia solar representa uma solução viável para grandes centros urbanos. Além de ser uma das fontes de energia renováveis menos poluente, também se destaca por ser uma fonte silenciosa, modular, e que necessita de baixa manutenção, possuindo curtos prazos de instalação, baixo impacto ambiental (Lucia, 2013), (Werth, 2015).

Os sistemas PV têm as características elétricas (tensão-corrente) vinculadas a fatores climáticos (irradiação e temperatura). Isto faz com que durante um dia, as variações dos fatores climáticos, modifiquem a energia fornecida pelo gerador. Para assegurar que a maior quantidade de energia seja produzida, deve-se manter o produto tensão-corrente o maior possível para cada instante de tempo. As técnicas utilizadas para este fim são conhecidas como rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT).

Em ambientes urbanos, bastante susceptíveis a irradiação não homogênea devido a anteparos que fazem parte das diferentes construções e

suas disposições, os sistemas PV constituídos por um painel solar e um conversor CC-CC, Módulo CC (*Module Integrated Converter* - MIC) apresenta como maior vantagem a sua maior produção de energia tendo em vista que é imune a problemas de sombreamento. Além disto, em uma microrrede CC, os MIC podem ser simplificados, uma vez que não é necessária a presença de um estágio inversor para conexão a rede elétrica. Isto possibilita uma redução dos estágios de processamento de energia e consequente aumento da eficiência do mesmo.

O sistema de Gerenciamento e Entrega de Energia Elétrica Renovável do Futuro (*Future Renewable Electric Energy Delivery And Management* - FREEDM) proposto por Huang (2011), mostrado na Figura 1, é um exemplo de microrrede com barramento CC que pode fazer uso de MIC. O sistema mostrado na Figura 1 é constituído por um supervisor ou controlador da energia, por dois barramentos de corrente alternada (120 V e 12 kV), e por um barramento de corrente contínua de 240V. No barramento de 240 V estão conectadas fontes de energia renováveis e armazenadores de energia. O controle de carga do sistema de armazenamento é realizado por um conversor independente. Este conversor tem como função fazer a carga de forma adequada, por meio do uso de um

método de carga de baterias e também controlar a descarga das mesmas (Huang - 2009).

Com o intuito de contribuir no sistema FREEDM, este trabalho visa o estudo e desenvolvimento do conversor Boost-Zeta integrado com alto ganho de tensão que opere com controle de carga das baterias e com baixa ondulação de corrente de carga para preservar a vida útil das baterias.

Métodos de Carga

A escolha do método de carga que considere os fatores abordados na seção anterior tem uma influência direta no projeto e na especificação do circuito eletrônico que constitui o carregador de baterias com alto desempenho, determinando o estado de carga e a vida útil do banco de baterias. Visto que a alimentação do carregador de baterias é feito por um painel solar, é necessário associar o método de carga com o MPPT.

Desta forma, a proposta do carregador de bateria PV é que a corrente MPPT defini o nível da corrente de carga das baterias. Assim, desde que o nível de corrente de carga é menor do que a corrente de carregamento máximo ($I_{\max} = 10\%$ da capacidade da bateria), o algoritmo de MPPT controla o conversor. No instante em que a corrente de carga máxima (I_{\max}) é alcançada, o algoritmo

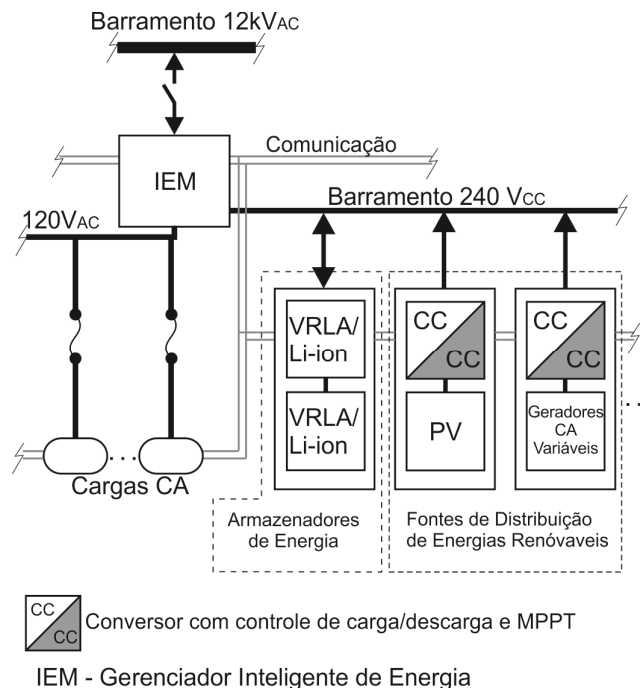


Figura 1. Diagrama da modificação proposta do sistema FREEDM

MPPT é desativado e o carregador de bateria entra no estágio CC. Desta forma, o MPPT e o método de carregamento da bateria são combinados, garantindo uma maior vida útil para as baterias juntamente com a melhor extração do módulo fotovoltaico. Isto é obtido através da introdução do algoritmo de MPPT para a fase de controle da corrente (CC).

Conversor Boost-Zeta Integrado

A fim de proporcionar uma relação de conversão alta com baixa ondulação nas correntes de entrada quanto na de saída, este trabalho propõe uma nova topologia que é nomeada, conversor Boost-Zeta integrado. Esta seção trata sobre os modos de operação do conversor Boost-Zeta integrado, apresentado na Figura 2.

Para analisar o funcionamento em regime permanente dos circuitos apresentados abaixo. As seguintes suposições são feitas para um período de comutação:

- Os conversores operam em regime permanente;
- Tensão de entrada e de saída é constante;
- Os capacitores C_{ob} , C_{oz} e C_z são grandes o suficiente que assumem os valores de tensões V_{ob} , V_{oz} , V_o e V_{Cz} são constantes e com ondulação nula;
- Os condutores são ideais, ou seja, sem perdas.

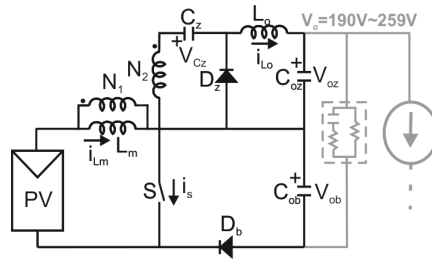


Figura. 2 Conversor Boost-Zeta Integrado.

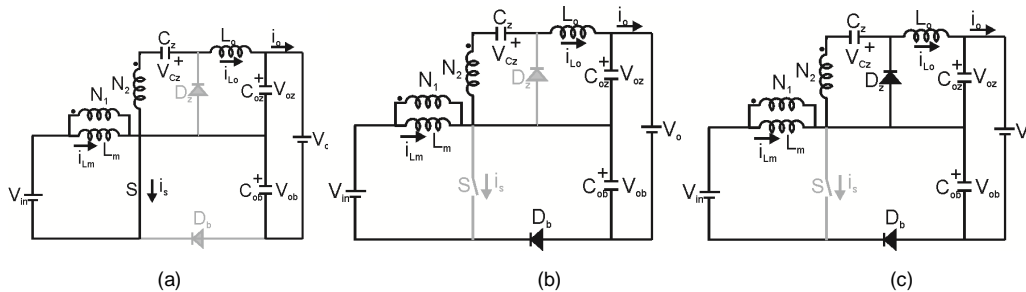


Figura 3 - Estágios de Operação Boost-Zeta. (a) Estágio 1; (b) Estágio2; (c) Estágio 3.

Conversor Boost-Zeta em Princípio de Operação CCM

O circuito proposto apresenta três diferentes estágios de operação sendo estes apresentados na Figura 3. Primeiramente analisa-se o período de chaveamento em CCM (modo de condução contínua). Neste caso o conversor opera em três estados, nome Estágio1 (etapa de magnetização dos indutores), Estágio 2 e Estágio 3 (etapa de desmagnetização dos indutores). As formas de onda para operação em modo de condução contínua é apresentado na Figura 4.

• Estágio 1 ou Estágio de Magnetização – (Figura 3 (a); $t_0 < t < t_1$):

Nesta etapa, a chave está comutada e diodos D_b e D_{oz} estão inversamente polarizados com a tensão equação $-(NV_{in} + V_{oz})$ e $-V_{ob}$, respectivamente. Ambos os indutores L_m e L_o são magnetizados com V_{in} e NV_{in} , respectivamente. Assim, as correntes i_{Lm} e i_{Lo} crescem linearmente. Com isso a corrente através do comutador S é dada pela soma da corrente dos indutores.

• Estágio 2 ou Magnetização L_o - (Figura 2 (b); $t_1 < t < t_2$):

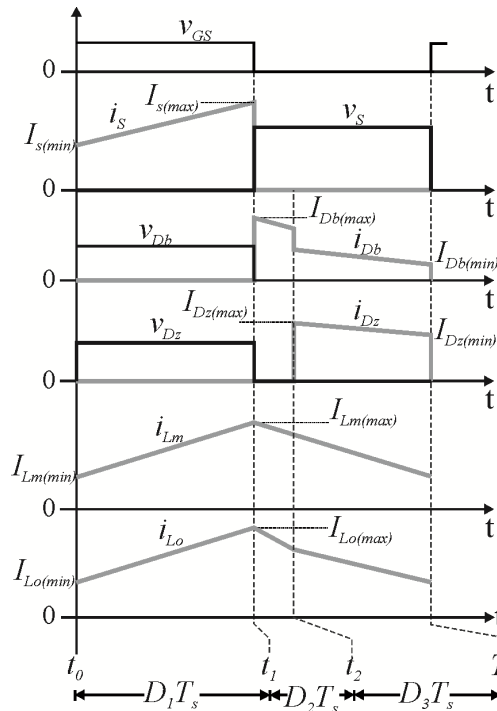


Figura 3 - Indutores L_o e L_m corrente e Diodos D_b e D_z corrente em CCM.

Este estágio inicia quando a chave S é bloqueada, o diodo D_b entra em condução. Neste estágio, todas as características relacionadas com indutores, capacitores e diodo D_z permanecem iguais ao estágio anterior.

• **Estágio 3 ou Desmagnetização – (Figura 2 (c); $t_2 < t < t_3$):**

Este estágio inicia quando o diodo D_z começa a conduzir. Neste estágio, a tensão através do indutor L_m e L_o é igual $-(V_{in}-V_{ob})$ e $-V_{oz}$, respectivamente. A energia armazenada, L_m é transferida para o capacitor C_z e C_{ob} . Já a energia armazenada em L_o se transfere para o capacitor de filtro C_{oz} . As correntes i_{L_m} e i_{L_o} são definidas pelas expressões (8) e (9), respectivamente. A corrente através do diodo D_b é dada pela soma da corrente dos indutores L_m e a corrente do primário do transformador (i_{pri}). Já a corrente através do diodo D_z é dado pela soma da corrente do indutor L_o e pela corrente do secundário do transformador (i_{sec}). Este estágio dura até o diodo D_z para de conduzir. Na operação CCM, o diodo para de conduzir em T_s .

Conversor Boost-Zeta Integrado em Princípio de Operação DCM

O circuito proposto tem cinco diferentes estágios de operação apresentados na Figura 5.

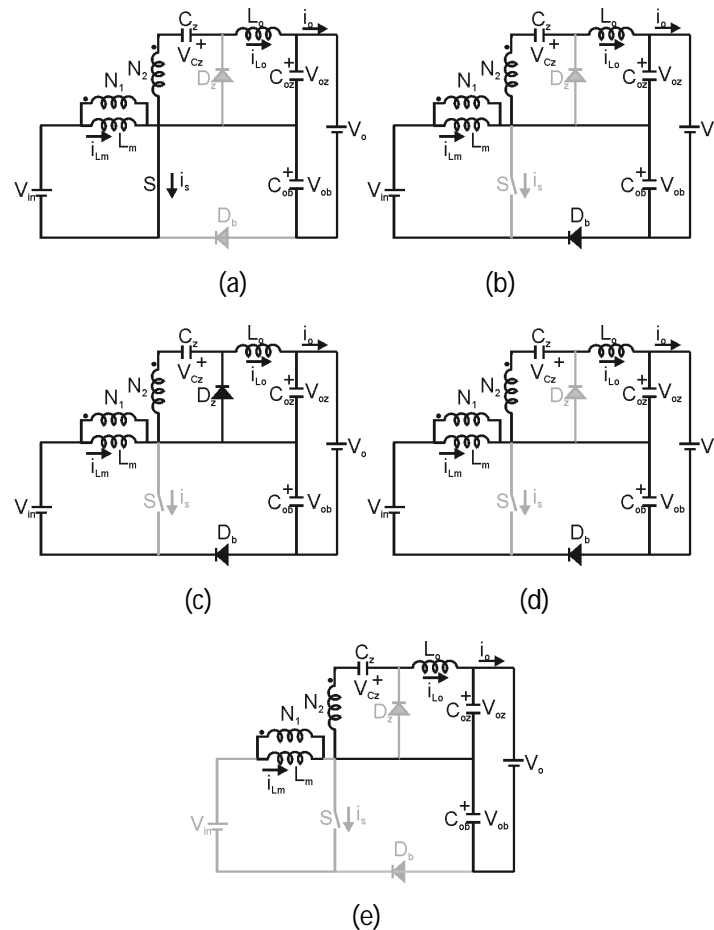


Figura 5 – Estágios de operação do conversor Boost-Zeta (a) Estágio 1; (b) Estágio 2; (c) Estágio 3; (d) Estágio 4; (e) Estágio 5.

Em um período de comutação, em modo de condução descontínua (DCM), o conversor opera em cinco estágios diferentes, chamados de Estágio1, Estágio2, Estágio 3 (da mesma forma de operação em modo de condução

continua), Estágio 4 e Estágio 5. As formas de onda para operação de chave DCM são mostrados na Figura 6.

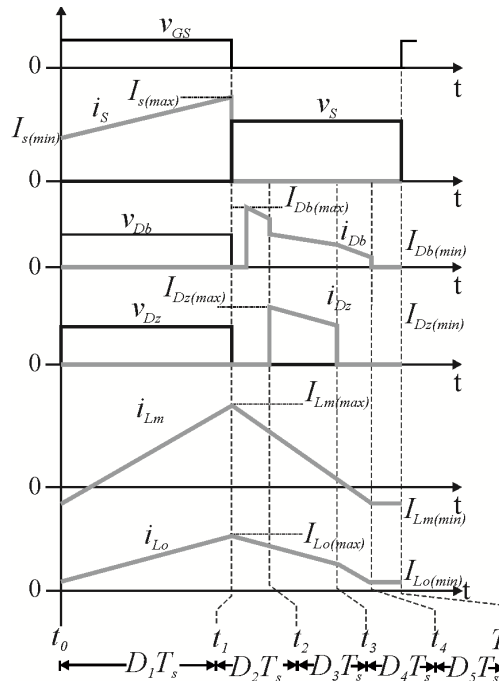


Figura 6 – Formas de onda para operação de chave DCM.

Estágio 1 ou Estágio de Magnetização – (Figura 5 (a); $t_0 < t < t_1$) e Estágio 2 ou Magnetização L_o – (Figura 5(b); $t_1 < t < t_2$) é igual com o modo de condução contínua (CCM). Entretanto o Estágio 3 ou estágio de Desmagnetização - (Figura 2 (c); $t_2 < t < t_3$) o período de operação é diferente. Este estágio tem seu fim quando o diodo D_b inverte sua polaridade ou quando a corrente i_D chega a zero.

- **Estágio 4 ou Desmagnetização L_m (Figura 5 (d); $t_3 < t < t_4$):**

Neste estágio, o diodo D_z para de conduzir. As correntes i_{Dz} são iguais a zero. Esta fase permanece até o diodo D_b parar de conduzir.

- **Estágio 5 ou estágio de Corrente Constante (Figura 3 (e); $t_4 < t < T_s$):**

Todos os semi-condutores estão desligados. Neste estágio as correntes i_{Db} e i_{Dz} são iguais a zero. A corrente i_{Lo} e i_{Lm} são iguais em módulo mas em sentidos opostos. Dependendo da seguinte situação L_m/L_o e I_{in}/I_o os dois casos podem ocorrer.

1º caso) $I_{Lm(0)} > 0$ e $I_{Lo(0)} < 0$;

2º caso) $I_{Lm(0)} < 0$ e $I_{Lo(0)} > 0$:

Esta fase dura até que o interruptor seja ligado.

Ganho de tensão do Conversor Boost-Zeta Integrado

O ganho de tensão do conversor proposto é a soma do ganho de tensão do conversor Boost com o conversor Zeta, que é dada por (1).

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{ND + 1}{1 - D} \quad (1)$$

Metodologia de Projeto do Conversor Boost-Zeta Integrado

Nesta seção, um procedimento de projeto de como determinar os parâmetros para conversor Boost-Zeta integrado é apresentado.

Para esta análise, o ganho do conversor é dado por:

$$M_{max} = \frac{V_{o(max)}}{V_{in(min)}} \quad (2)$$

A partir daí, a relação de transformação do indutor N, é dado por:

$$N = \frac{1 - D}{D} M \quad (3)$$

sendo D a razão cíclica.

É considerado 40% de ripple, que é dado abaixo:

$$\Delta I_o = 0.4 I_{o(max)} \quad (4)$$

Quando $I_{o(max)}$ é a corrente máxima de saída do conversor.

Considerando-se os parâmetros dados acima, o valor do indutor de saída L_o pode ser dada por:

$$L_o = \frac{NV_{in(max)}DT_s}{\Delta I_o} \quad (5)$$

A partir das formas de onda mostradas na Figura 6, uma relação entre L_m e L_o foi encontrada, garantindo que a corrente através do indutor L_o é sempre positiva.

$$L_m = \frac{\frac{D^2}{2} \left(1 + \frac{V_{in}}{V_o} \right) \frac{NV_{in}T_s}{I_{in} + I_o} L_o}{1 - \frac{D^2}{2} \left(1 + \frac{V_{in}}{V_o} \right) \frac{NV_{in}T_s}{I_{in} + I_o} \frac{1}{L_o}} \quad (6)$$

Quando esta no período de chaveamento T_s . Para calcular os capacitores, foi considerado as tensões de ondulação de saída:

$$\Delta V_o = \frac{1}{2}(V_{eq} - V_{flut}) \quad (7)$$

O valor do capacitor C_z pode ser obtido por:

$$C_z = \frac{I_o D}{\Delta V_{oz} f_s} \quad (8)$$

Enquanto os capacitores C_{oz} e C_{ob} podem ser obtidos por:

$$C_{oz} = \frac{1-D}{8f_s^2 L_o \Delta V_{oz}} V_{oz} \quad (9)$$

$$C_{ob} = \frac{DV_{ob}}{Rf_s \Delta V_{ob}} \quad (10)$$

Avaliação experimental do conversor Boost-Zeta Integrado

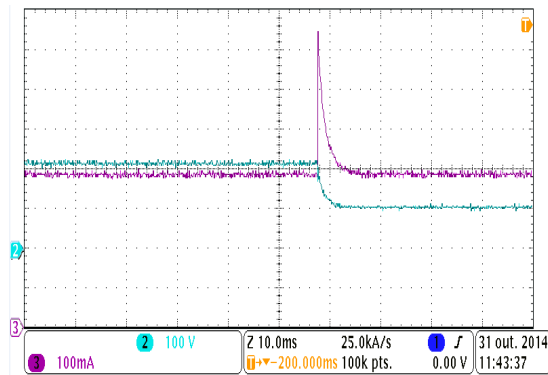
Para verificar a viabilidade e o desempenho do sistema proposto, um exemplo é avaliado. Os dados de entrada são dados pela Kyocera PV FV-250W e a bateria UNIPOWER GP12-7, são definidos segue:

- $P_{in} = 250$ W, potência de entrada;
- $V_{in} = 30$ V, tensão de entrada;
- $V_o = 240$ V, tensão de saída;
- $V_{ob} = 60$ V, tensão de saída conversor Boost;
- $V_{oz} = 180$ V, tensão de saída conversor Zeta;
- $I_o = 0.7$ A, corrente de carga;
- $D = 0.5$, razão cíclica;
- $f_s = 100$ kHz, frequência de chaveamento.

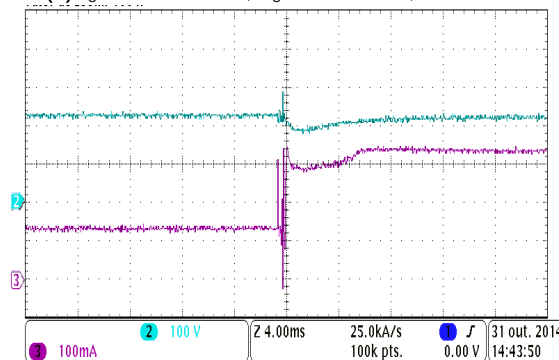
Os parâmetros do conversor Boost-Zeta integrado são calculados e apresentados na Tabela 1.

Símbolo	Parâmetros Calculados	Protótipo
N	6	6
L_m	95.2 μ H	95.2 μ H
L_o	10.12 mH	10.12 mH
C_z	902.02 nF	1 μ F
C_{oz}	45.1 nF	68 nF
C_{ob}	4 μ F	3.3 μ F
f_s	100 kHz	100 kHz
MOSFET	60 V/ 8A	IRFP460A (500V/20A)
D_z	360 V/ 0.7A	MUR880EG (800 V/8 A)
D_b	60 V/ 8A	MBR20200CT (200 V/20 A)

Tabela 1 – Comparação entre os parâmetros calculados e o protótipo.



(a) $i_o = 100\text{mA/div}$; $v_o = 100\text{V/div}$; 10ms/div .



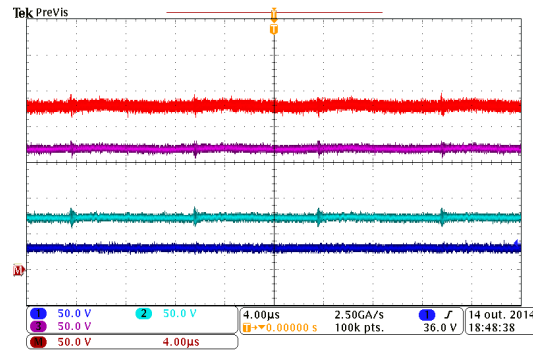
(b) $i_o = 100\text{mA/div}$; $v_o = 100\text{V/div}$; 4ms/div .

Figura 7 – Resposta em frequência. (a) Corrente de saída i_{LO} ; (b) Tensão de de saída V_o .

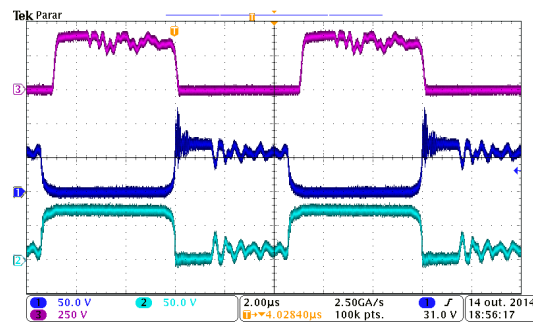
A fim de verificar a análise teórica do design de controle do protótipo do conversor Boost-Zeta Integrado. Pode ser visto na Figura 7 (a) a resposta da corrente de saída para uma mudança de carga de $500\ \Omega$ a $250\ \Omega$. Na Figura 7 (b) mostra-se a resposta da tensão de saída para uma mudança de carga de $2\ \text{k}\Omega$ para $1\ \text{k}\Omega$.

As principais formas de onda para o conversor Boost-Zeta Integrado – CC-CC foram obtidos no laboratório e são apresentadas na Figura 8. Na Figura 8(a) que a tensão de saída ($V_o = 240\ \text{V}$ vermelho), a tensão de saída do Zeta ($V_{oz} = 180\ \text{V}$ roxo), a tensão do Boost ($V_{OB} = 60\ \text{V}$ azul) e tensão de entrada (V_{in}

= 30 azul escuro). Já na Figura 8 (b) pode ser visto a acentuação de tensão na V_s (azul), V_{DB} (azul) e V_{DZ} (roxo).



(a) todos 50V/div; 4us/div.



(b) V_s (azul escuro) and V_{Db} (azul) 50V/div; V_{Dz} (roxo) 250V/div; 2us/div.

Figura 9 – Resultados Experimentais. (a) Tensões V_{in} , V_{ob} , V_{oz} e V_o ; (b) Tensão em V_s , V_{Db} e V_{Dz} .

Conclusão

Os conversores fotovoltaicos podem apresentar vantagem em sistemas FREEDM, reduzindo sua complexidade, bem como os custos para o usuário final. Este artigo apresentou os conversores Boost Zeta integrados com ganho de tensão alta, fornecendo um barramento CC 240V no sistema FREEDM. O conversor de energia é responsável pelo acompanhamento de ponto de potência máxima para o PV e também controlar a carga da bateria que é conectado ao barramento. Para garantir a baixa ondulação através das baterias e alta voltagem do conversor, o conversor Zeta isolado foi escolhido. O conversor é projetado para operar no CCM e modos de DCM e durante a carga baterias, regula ambos, corrente e tensão em baterias. Para garantir as melhores condições de carga, o conversor Boost-Zeta integrada foi projetado para que em operação DCM a

saída de corrente i_o é sempre positivo. Resultados de simulação e experimentais são apresentados e confirmam a análise teórica.

Referências

Lucia, O.; Cvetkovic, I.; Sarnago, H.; Boroyevich, D.; Mattavelli, P.; Lee, F.C., **Design of Home Appliances for a DC-Based Nanogrid System: An Induction Range Study Case, Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, IEEE Journal of , vol.1, no.4, pp.315,326, Dec. 2013

Werth, A.; Kitamura, N.; Tanaka, K., **Conceptual Study for Open Energy Systems: Distributed Energy Network Using Interconnected DC Nanogrids, Smart Grid**, IEEE Transactions on , vol.6, no.4, pp.1621,1630, July 2015

S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, **A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules**, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 5, pp. 1292- 1306, Sept.-Oct. 2005.

A. Q. Huang, **Renewable energy system research and education at the NSF FREEDM systems center**, in Proc. IEEE Power Energy Soc. (PES) Gen. Meeting, Calgary, AB, Canada, 2009, pp. 1–6.

Zhigang Liang; Rong Guo; Jun Li; Huang, A.Q., **A High-Efficiency PV Module-Integrated DC/DC Converter for PV Energy Harvest in FREEDM Systems**, Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.26, no.3, pp.897,909, March 2011

Huang, A.Q.; Crow, M.L.; Heydt, G.T.; Zheng, J.P.; Dale, S.J., **The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet**, Proceedings of the IEEE , vol.99, no.1, pp.133,148, Jan 2011.

Andrade, A.M.S.S.; Dreher, J.R.; da S Martins, M.L., **High step-up integrated DC-DC converters: Methodology of synthesis and analysis**, Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian , vol., no., pp.50,57, 27-31 Oct. 2013.

Andrade, A.M.S.S.; Beltrame, R.C.; Schuch, L.; da S Martins, M.L., **PV module-integrated single-switch DC/DC converter for PV energy harvest with battery charge capability**, Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEE/IAS International Conference on , vol., no., pp.1,8, 7-10 Dec. 2014