

CONVERSOR DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB) APLICADO À CARGA/DESCARGA DE BATERIAS EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO

PABLO F. S. COSTA*, GABRIEL ATTUATI*, SUELEN C. FREITAG, JEAN MUENCHEN*, LUCIANO SCHUCH*,
LEANDRO ROGGINA*

*Grupo de Eletrônica de Potência – GEPOC – Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência –
CEESP -Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil
CEP: 97105-900, Santa Maria, RS, BRASIL

E-mails: pablofscosta@gmail.com, ga_attuati@hotmail.com,
suelenfreitag@gmail.com, jeanmuenchen@gmail.com, schuch.prof@gmail.com,
roggin@gmail.com.

Abstract— Photovoltaic systems are assuming an important role in the integration of renewable sources in electricity generation. However, as a source of generation that has intermittent characteristics, needs to operate in conjunction with an energy storage system (battery, for example). Thus, it becomes necessary to use a DC-DC converter that fits the photovoltaic system voltage levels to the levels of the batteries and also acts on the charge / discharge process. In this context, the aim of this work is the modeling and control of a Dual Active Bridge converter. Results demonstrating the performance of the proposed topology will also be presented.

Keywords— DAB converter, phase-shift modulation, photovoltaic generation, modelling and control.

Resumo— Sistemas fotovoltaicos vêm assumindo um papel importante na inserção de fontes renováveis na geração de energia elétrica. Contudo, como é uma fonte de geração que apresenta características intermitentes, necessita operar em conjunto com um sistema de armazenamento de energia (baterias, por exemplo). Desta forma, torna-se necessário a utilização de um conversor CC-CC que adeque os níveis de tensão do sistema fotovoltaico aos níveis das baterias e ainda atue no processo de carga/descarga. Neste contexto, a proposta deste trabalho consiste na modelagem e controle de um conversor *Dual Active Bridge*. Resultados que demonstram o desempenho da topologia proposta também serão apresentados.

Palavras-chave— Conversor DAB, modulação *phase shift*, geração fotovoltaica, modelagem, controle.

1 Introdução

Historicamente, a estrutura da rede pode ser descrita por plantas de geração de energia convencionais, uma rede de transmissão e distribuição, e uma carga distribuída bem definida. Os principais centros de carga são normalmente localizados nas proximidades das grandes cidades. Porém, a fim de reduzir os gases do efeito estufa provenientes da geração de energia convencional, a rede elétrica existente passou a incorporar recursos de energia renováveis, as quais são o complemento necessário para a geração de energia tradicional (Bragard et al, 2010).

Dentre as fontes de energia renováveis, a energia solar é considerada a fonte mais promissora para ampla utilização, atraindo investimentos consideráveis em vários países (Quanyuan et al, 2013). Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em sistemas autônomos e sistemas conectados à rede. O sistema autônomo é amplamente utilizado em áreas remotas onde o acesso a eletricidade não é viável. Já os sistemas conectados à rede passaram a ser muito utilizados atualmente nos grandes centros de consumo. Porém, a geração de energia fotovoltaica apresenta natureza intermitente, onde a energia gerada varia de acordo com fatores ambientais externos (Sechilariu et al, 2013).

As incertezas produzidas pelas fontes renováveis têm afetado as decisões de diferentes atividades relacionadas com o funcionamento dos Sistemas de Potência. Um dos problemas causados pela intermitência da geração é a necessidade de redução dos picos de demanda, evitando assim a necessidade de atualizações nas fontes geradoras, na transmissão e na distribuição de energia. Uma forma eficaz de alcançar a redução no pico de demanda é a utilização de siste-

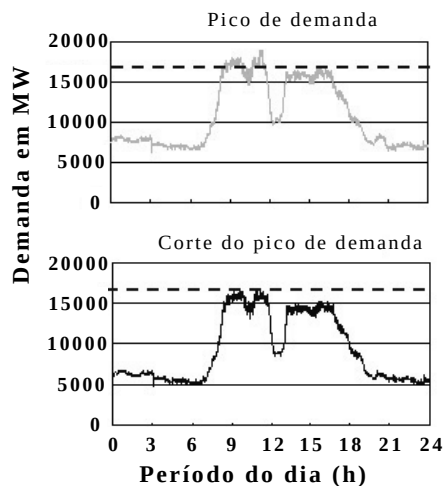


Figura 1 - Atuação das baterias em sistemas de potência.

mas de armazenamento de energia (Karanki et al, 2013), no qual a energia elétrica pode ser armazenada durante o período de pico de geração e extraída durante o período de pico de carga ou demanda, como pode ser visualizado na Figura 1.

Além do nivelamento da demanda, aos sistemas de armazenamento de energia podem ser amplamente utilizados para o controle de frequência, regulação de tensão e melhoria da qualidade de energia no sistema de distribuição. Todas estas aplicações servem para aumentar a confiabilidade e a estabilidade da rede (Karanki et al, 2013). Dentre as várias tecnologias de sistemas de armazenamento de energia existentes, algumas são mais adequadas para estas aplicações, como as baterias de Li-íon (Divya et al, 2009).

Para realizar a interface e controlar o fluxo de energia entre o banco de baterias e um barramento CC no qual este esteja conectado, torna-se necessário utilizar um conversor bidirecional com isolamento galvânico com elevado ganho de tensão (Alonso et al, 2010). Topologias como a do conversor *Buck-Boost* proposto em (Verma et al, 2011), derivados do conversor *Dual Active Bridge* (DAB) como proposto em (Zhang et al, 2009), conversor full-bridge e push-pull apresentado em (Chen et al, 2000) são utilizados com a finalidade de carregar/descarregar baterias, células combustíveis e supercapacitores. Contudo, devido ao alto ganho de tensão, à robustez, isolamento galvânica entre a entrada e saída e ao elevado rendimento o conversor DAB têm sido estudado e utilizado para aplicações como carregador de baterias.

Este artigo apresenta um conversor bidirecional CC-CC (DAB) para realizar a interface entre o barramento CC e o banco de baterias em um sistema fotovoltaico. A modelagem matemática, o controle e os resultados da aplicação serão apresentados.

2 Método de carga de baterias de Li-íon

Estudos sobre os diversos tipos de armazenamento de energia vem sendo desenvolvidos em todo o mundo. Uma visão geral das diferentes tecnologias de armazenamento, suas aplicações e limitações são discutidas em (Divya et al, 2009). Atualmente o foco principal dos estudos recaem sobre a utilização de baterias de Li-íon e as baterias de Enxofre de Sódio (NaS) em sistemas de potência. Porém, neste artigo serão utilizadas as baterias de Li-íon, a seguir será apresentado o método de carga para estas baterias.

Para obter melhor rendimento das baterias o método de carga deve ser escolhido de modo a não degradar a vida útil das baterias, desta forma o modo de funcionamento do carregador deve ser dependente da resistência interna da bateria, temperatura durante o carregamento, tensão e corrente no final da carga (Yang et al, 2006).

As baterias de Li-íon podem ser carregadas por dois métodos distintos. O método de tensão constante, o qual apresenta maior simplicidade de aplicação

e, o método *Constant Current/Constant Voltage* Corrente Constante/Tensão Constante - CC/CV) o qual é o mais aplicado a este tipo de baterias.

O primeiro método consiste em manter a tensão de saída constante com o valor da tensão nominal da bateria. A corrente pode ser limitada a valores inferiores ou até mesmo ao valor nominal da bateria. Deste modo, quando a bateria está carregada a corrente de carga é rapidamente reduzida. Assim, a bateria é considerada completamente carregada quando a corrente de carga reduz para um valor inferior a 0.1C (Isaacson et al, 2000).

No método de carga (CC/CV), o carregamento inicia com um valor constante de corrente (0,1 - 1 C). Durante essa fase, a tensão da bateria deverá atingir a tensão de equalização V_{eq} . Quando a tensão atinge este valor, a bateria terá a corrente reduzida a fim de que a sua tensão não ultrapasse a tensão V_{eq} . Mantendo-se a tensão de equalização a corrente de carregamento naturalmente reduzirá, atingido um valor de aproximadamente 2% C. Por fim, encerra-se a etapa de equalização e passa-se para a etapa de flutuação onde a tensão de referência passa ser a tensão da célula (V_{flu}) (Isaacson et al, 2000). O método de carga CC-CV é mostrado na Figura 2.

Outro fator importante para que ocorra o carregamento adequado das baterias é a equalização de tensão entre as células ligadas em série. Este processo deve ser realizado antes do início do carregamento das baterias. O desbalanceamento causa tensões individuais diferentes entre as células, o que pode causar uma redução de até 25 % da capacidade de um pacote de células. As células de bateria são consideradas balanceadas quando a diferença de tensão entre célula possuir valor inferior a 3 % da tensão nominal das células (Teofilo et al, 1997).

3 Conversor *Dual Active Bridge* (DAB)

Em sistemas fotovoltaicos conversores CC-CC unidirecionais são utilizados para realizar a interface entre os geradores fotovoltaicos e o barramento CC. A função destes conversores é elevar ou reduzir a tensão do painel fotovoltaico e rastrear o *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Já os conversores CC-CC bidirecionais são utilizados para carregar ou des-

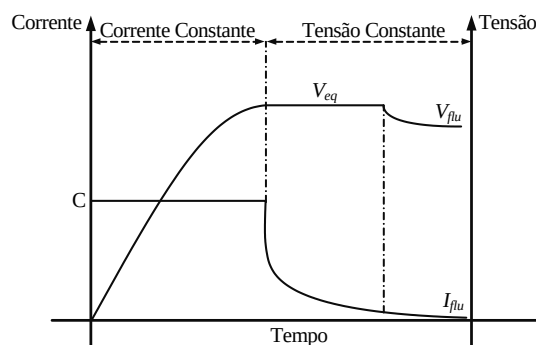


Figura 2- Método de carga CC-CV.

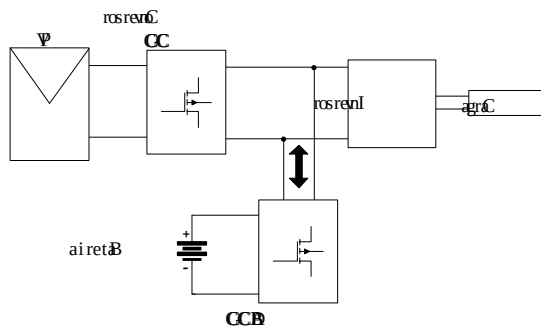


Figura 3- Sistema PV com conversor DAB.

carregar as baterias, como pode ser visualizado na Figura 3.

O conversor bidirecional DAB foi originalmente proposto em (De Doncker et al, 1991), é um conversor CC-CC bidirecional com base em duas pontes ativas interligadas por um transformador de alta frequência, permitindo o fluxo de energia em ambos os sentidos em caso de carga ativa (Alonso et al, 2010). O conversor DAB típico é ilustrado na Figura 4, o qual além de permitir o fluxo bidirecional proporciona transferência de altas densidades de energia e potência entre entrada e saída. O mesmo é constituído por um transformador de alta frequência e duas pontes ativas localizadas nos lados primário e secundário do transformador, respectivamente. Cada ponte é controlada com ciclo de trabalho constante (50%) para garantir uma forma de onda de tensão quadrada de alta frequência nos terminais do transformador.

Considerando a presença da indutância do transformador e uma indutância auxiliar com um valor controlado e conhecido, o fluxo de potência entre as portas nesse caso é controlado fazendo uso da modulação *Phase Shift* (PSM). Deste modo a transferência bidirecional de potência pode ser alcançada (Alonso et al, 2010).

4 Modelagem matemática do conversor DAB

O objetivo da aplicação do conversor DAB proposto é realizar a interface entre o banco de baterias e o barramento CC do sistema de geração de energia fotovoltaico apresentado na Figura 3. Para a modulação PSM a potência ativa do conversor é uma função

do ângulo de defasagem δ . Dessa maneira, o objetivo do modelo matemático é a obtenção de um modelo de pequenos sinais que represente a relação entre a variação do ângulo de defasagem δ e a variação da corrente da bateria (Δi_o). Este modelo será utilizado para o projeto de um sistema em malha fechada que controle a corrente e a tensão da bateria conforme a referência desejada.

A corrente no indutor L_1 do conversor DAB possui forma de onda alternada para um período de comutação. Deste modo, um modelo matemático médio por espaço de estados não pode ser utilizado, pois a condição de aproximação por pequenas ondulações é inválida. Sendo assim, a seguir será apresentada a modelagem através do Modelo Médio Generalizado.

4.1 Modelo Médio Generalizado

A modelagem matemática do conversor DAB utilizando um Modelo Médio Generalizado foi apresentada em (Qin et al, 2012), baseando-se no método de modelagem proposto originalmente em (Sanders et al, 1991). Enquanto um modelo médio considera apenas termos contínuos, o Modelo Médio Generalizado utiliza mais termos na série de Fourier das variáveis do sistema, podendo assim representar corretamente o comportamento de sistemas com variáveis que apresentam grandes ondulações.

Para a aplicação do Modelo Médio Generalizado no conversor DAB, o seu circuito é reorganizado de acordo com a Figura 5. As pontes completas são representadas por fontes de tensão, que dependem dos valores das tensões V_{in} e $V_o(t)$, e de duas funções de chaveamento $S_1(\tau)$ e $S_2(\tau)$.

Essas funções de chaveamento dependem do estado de chaveamento de cada uma das pontes com-

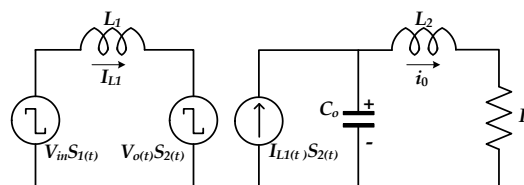


Figura 5 - Circuito equivalente conversor DAB para aplicação do Modelo Médio Generalizado.

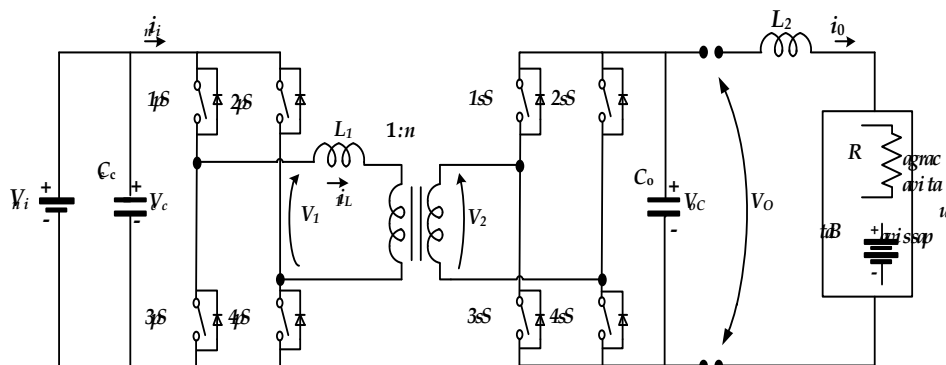


Figura 4- Conversor bidirecional CC-CC DAB.

pletas. Isto é, dependendo do comando das chaves, as pontes completas podem fazer com que as tensões V_1 ou V_2 tenham valores positivos ou negativos. Sendo assim, as equações (1) e (2) definem as funções de chaveamento $S_1(\tau)$ e $S_2(\tau)$.

$$S_1(\tau) = \begin{cases} 1, 0 \leq \tau \leq \frac{T_s}{2} \\ -1, \frac{T_s}{2} \leq \tau \leq T_s \end{cases} \quad (1)$$

$$S_2(\tau) = \begin{cases} 1, d\frac{T_s}{2} \leq \tau \leq \frac{T_s}{2} + d\frac{T_s}{2} \\ -1, \frac{T_s}{2} + d\frac{T_s}{2} \leq \tau \leq T_s \end{cases} \quad (2)$$

Por outro lado, as equações de estado do conversor são não lineares e variantes no tempo. Porém, através da aplicação da técnica do Modelo Médio Generalizado é possível obter um modelo linear e invariante tempo. Isso ocorre através da representação dos estados por mais termos na série de Fourier.

Em (Qin et al, 2012) é apresentado que o conversor DAB pode ser modelado a partir do coeficiente $k=1$ da corrente do indutor L_1 e do coeficiente $k=0$ da tensão de saída. Nesta modelagem matemática ainda há a variável de estado da corrente do indutor L_2 . Dessa maneira para esta variável de estado será assumido que o sinal possui pequenas ondulações, ou seja, será utilizado apenas o coeficiente contínuo $k=0$.

O modelo de pequenos sinais é obtido através da aplicação de perturbação e linearização das variáveis de corrente, tensão e razão cíclica, obtendo-se $\Delta i_{L_{1R}}$, $\Delta i_{L_{1I}}$, $\Delta i_{o,0}$, $\Delta v_{o,0}$ e Δd .

Na obtenção do modelo de pequenos sinais a entrada V_{in} é desconsiderada, pois o objetivo é obter a relação da variação do ângulo de defasagem com a variação das variáveis de estado, especificamente da corrente de saída. Dessa maneira, o modelo de pequenos sinais para o conversor DAB em análise é definido pela equação (3).

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta i_{L_{1R}}} \\ \dot{\Delta i_{L_{1I}}} \\ \dot{\Delta i_{o,0}} \\ \dot{\Delta v_{o,0}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & 0 & \frac{2\sin(D\pi)}{L_1\pi} \\ -\omega_s & 0 & 0 & \frac{2\cos(D\pi)}{L_1\pi} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ -\frac{4\sin(D\pi)}{C_o\pi} & -\frac{4\cos(D\pi)}{C_o\pi} & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\times \begin{bmatrix} \Delta i_{L_{1R}} \\ \Delta i_{L_{1I}} \\ \Delta i_{o,0} \\ \Delta v_{o,0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2VO_0 \cos(\pi D)}{L_1} \\ \frac{-2VO_0 \sin(\pi D)}{L_1} \\ 0 \\ -\frac{4}{C_o}(\cos(\pi D)IL_{1R} - \sin(\pi D)IL_{1I}) \end{bmatrix} \Delta d$$

A Figura 6 apresenta as respostas do modelo médio generalizado encontrado para o conversor DAB e o comportamento da corrente desta topologia em resposta ao degrau unitário.

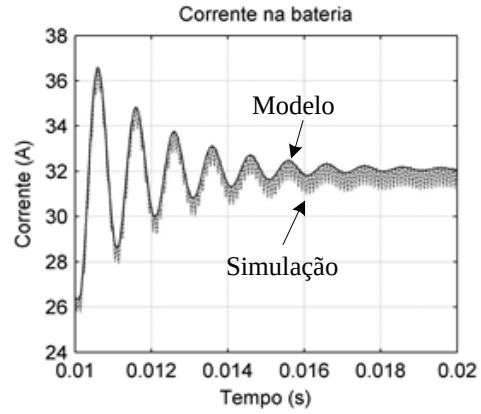


Figura 6- Comparação entre o modelo médio e a corrente do DAB em resposta ao degrau.

5 Sistema de controle

Para o projeto do sistema de controle em malha fechada do conversor DAB os seguintes requisitos e objetivos foram definidos:

- O controle deve ser capaz de controlar a corrente e a tensão da bateria para toda a faixa de operação do conversor, tanto de carga quanto descarga.
- Resposta ao degrau sem oscilações ou sobressinal, comportamento superamortecido.
- Resposta ao degrau rápida, porém respeitando as condições de oscilações e sobressinal.

O Modelo Médio Generalizado obtido na seção anterior será utilizado para o projeto do controlador. Este modelo apresenta uma grande oscilação de magnitude e fase na frequência de chaveamento do conversor característica da topologia do conversor DAB.

Para realizar o projeto do controlador é necessário definir o ponto de operação para o modelo, pois o conversor pode operar dentro de toda a faixa de carga e descarga da bateria. Dessa maneira, para cada ângulo de defasagem o modelo apresenta diferentes ganhos na resposta em frequência. Sendo assim, para o projeto do controlador o ângulo de linearização foi definido em $\delta = 20^\circ$, porém, em (De Doncker et al, 1991) o ângulo de defasagem para esta topologia pode variar de -90 a 90° . Mas, devido a energia não ativa circulante no conversor este ângulo deve ficar compreendido entre -45 e 45° para que a diferença entre a energia ativa e não ativa seja reduzida. Por este motivo e por possuir uma resposta em frequência que representa uma média da resposta de todos os outros ângulos de operação definiu-se o ângulo do sistema em 20° .

O sistema de controle de corrente e tensão propostos para a implementação no conversor DAB são apresentados na Figura 7. No controle de corrente, para a eliminação do erro em regime permanente foi utilizado um integrador, como mostra a Figura 7 (a). Este filtro foi sintonizado na frequência do pico de ressonância, que neste sistema específico é de 1 kHz. Para o controle de tensão foi

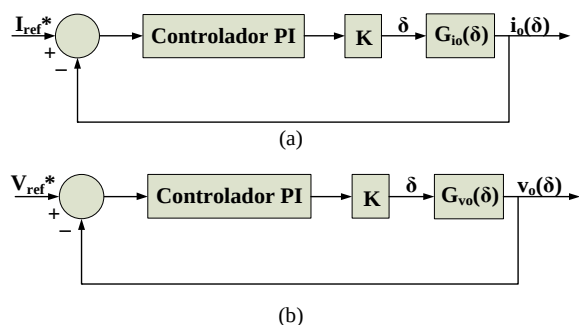


Figura 7 - Sistemas de controle: (a) Malha de Corrente; (b) Malha de tensão.

utilizado um controlador Proporcional Integral (PI), como apresenta a Figura 7 (b). Ainda foi definida uma atenuação de 20 dB para a área de atuação do controle. O ganho k do sistema foi ajustado para que seja obtida uma margem de fase, ganho e frequência de cruzamento adequados. Todo o processo de ajuste do controlador foi realizado utilizando o ambiente *Sisotool* do software MATLAB.

O sistema inicial apresenta uma margem de fase pequena, próxima a zero, o que causa uma resposta oscilatória. Porém, com a adição do controlador o sistema passou a apresentar uma margem de fase de 72,6 dB, uma margem de ganho de 20,2 dB e frequência de cruzamento de 156 Hz.

6 Resultados

De modo a validar o controle desenvolvido para o conversor proposto, esta seção apresenta alguns resultados de simulação. Os parâmetros utilizados encontram-se descritos na Tabela 1.

Para as simulações foram consideradas 24 baterias MLiX-P140 da Mitsubishi. Os dados das baterias podem ser encontrados em (Mukai, et al, 2012).

A verificação da eficácia do sistema de controle implementado ocorreu pela simulação do conversor DAB com diversos degraus de corrente aplicados na corrente de referência. Inicialmente foram definidos degraus de 25 A na corrente da bateria até chegar ao valor nominal de 50 A, tanto no modo carga quanto

no modo de descarga das baterias, conforme demonstra a Figura 8. Ainda na Figura 8 pode-se perceber que a tensão da bateria cresce conforme a corrente responde aos impulsos. Outro ponto que pode ser analisado é a bidirecionalidade do fluxo de potência

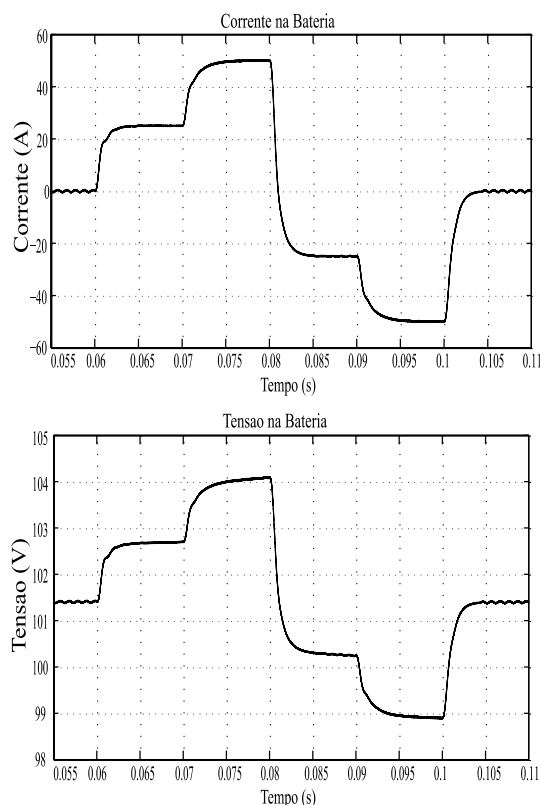


Figura 8 – Comportamento da corrente de saída com controlador.

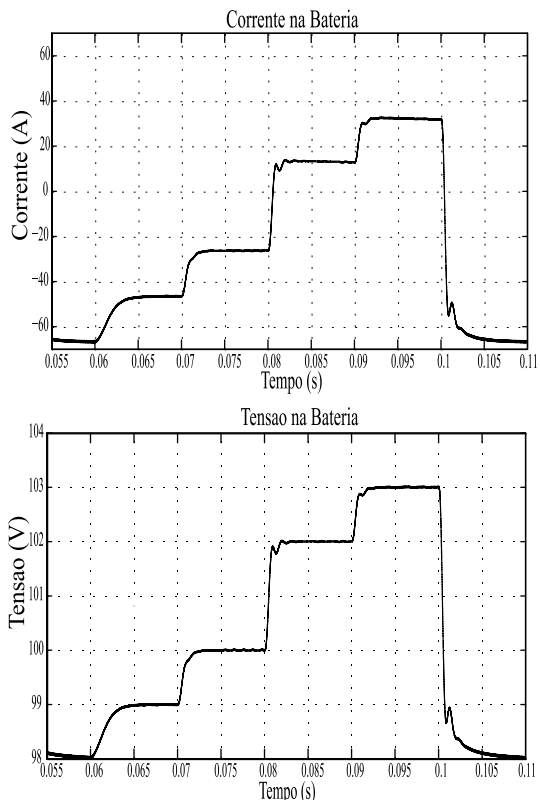


Figura 9 – Corrente e tensão da bateria no modo controle de tensão.

Tabela 1 - Parâmetros do conversor DAB.

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada (V_{in})	600 V
Tensão nominal da bateria (V_o)	100 V
Corrente de saída máxima (i_o)	50 A
Frequência de comutação	10 kHz
Resistência interna da bateria	10 mΩ
Indutância L_1	675 μH
Indutância L_2	10 μH
Capacitor de saída (C_o)	2500 μF
Relação de transformação	1/6
Ângulo de defasagem nominal (δ)	45°

da topologia. Ao emular um degrau negativo de corrente, ou seja, realizar a inversão do sentido do fluxo de potência, o controlador responde de maneira satisfatória e dentro dos limites estipulados, comprovando assim o funcionamento do controle de corrente.

A Figura 9 mostra o comportamento da tensão e da corrente de saída com a atuação do controlador de tensão. Como pode-se visualizar a tensão de saída responde a impulsos com amplitude unitários, crescendo de acordo com o passar do tempo. Assim como na simulação do controlador de corrente, uma inversão de sentido do fluxo de potência é simulada, com o controlador respondendo adequadamente.

7 Conclusão

Este trabalho apresentou a modelagem e o projeto de controle de corrente e de tensão para um conversor DAB, o qual deve realizar a carga e a descarga de um banco de baterias de Li-íon a partir de um barramento CC conectado a um sistema fotovoltaico. Através dos resultados apresentados pode-se constatar que os objetivos foram alcançados, uma vez que a corrente e a tensão de saída respondem às ações de controle. Ainda torna-se possível verificar que a ondulação de corrente de saída é reduzida (aproximadamente 3%).

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)” pelo suporte fornecido no desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Alonso, A.; Sebastian, J.; Lamar, D.; Hernando, M.; Vazquez, A. (2010). An Overall Study of a Dual Active Bridge for Bidirectional DC/DC Conversion. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1129-1135.
- Bragard, M.; Soltan, N.; Thomas, S.; Doncker, R. W. (2010). The Balance of Renewable Sources and User Demands in Grids: Power Electronics for Modular Battery Energy Storage Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.25, No. 12; pp. 3049 – 3056.
- Chen, G.; Lee, Y. S.; Xu, D.; Wang, Y. (2000). A novel soft-switching and low conduction-loss bidirectional DC-DC converter. Proceedings International Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 03, pp. 1166-1171.
- De Doncker, R. W.; Divan D.; Kheraluwala, M. (1991). A Three-phase Soft Switched High Power Density DC/DC Converter for High Power Applications. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, pp. 63-73.
- Divya, K.C.; Ostergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 4, pp. 511-520.
- Isaacson, M. J.; Hollandsworth, R. P.; Giampaoli, P. J.; Linkowsky, F. A.; Salim, A.; Teofilo, V. L. (2000). Advanced lithium ion battery charger. Battery Conference on Applications and Advances, pp. 193 – 198.
- Karanki, S. B.; Xu, D.; Venkatesh, B.; Singh, B. N. (2013). Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 4553 - 4558, 2013.
- Mukai, D.; Kobayashi, K.; Kurahashi, T.; Matsueda, N.; Hashizaki, K.; Kogure, M. (2012). Development of Large High-performance Lithium-ion Batteries for Power Storage and Industrial Use. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 49, No. 1.
- Qin, H.; Kimball, J. W. (2012). Generalized Average Modeling of Dual Active Bridge DC-DC Converter. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, no. 4, pp.2078-2084.
- Quanyuan, J.; Meidong, X.; Guangchao, G. (2013). Energy Management of Micro-Grid in Grid-Connected and Stand-Alone modes. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 28; pp. 3380-3389.
- Sanders, S. R.; Noworolski, J. M.; Liu, X. Z.; Verghese, G. C. (1991). Generalized averaging method for power conversion circuits. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, no. 2, pp.251-259.
- Sechilariu, M.; Wang, B.; Locment, F. (2013). Building Integrated Photovoltaic System with Energy Storage and Smart Grid Communication. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, pp. 1607 - 1618.
- Teofilo, V. L.; Merritt, L. V.; Hollandsworth, R. P. (1997). Advanced lithium ion battery charger. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, pp. 30 – 36.
- Verma, A.; Singh, B.; Shahani, D. (2011). Grid to Vehicle and Vehicle to Grid Energy Transfer using Single-Phase Bidirectional AC-DC Converter and Bidirectional DC - DC converter. Energy. Automation and Signal (ICEAS), International Conference on, pp. 1-5.
- Yang, F. C.; Chen, C. C.; Chen, J. J.; Hwang, Y. S.; Lee, W. T. (2006). Hysteresis Current-Controlled Buck Converter Suitable for Li-Ion Battery Charger. Communications, Circuits and Systems Proceedings, International Conference, Vol. 4, pp. 2723 – 2726.
- Zhang, Z.; Thomsen, O. Z.; Andersen, M. A. E.; Schmidt, J. D.; Nielsen, H. R. (2009). Analysis and design of bi-directional DC-DC converter extended run time DC UPS system based on fuel cell and supercapacitor. Proceedings IEEE Power Electronics Specialist Conference, pp. 714-719.