

Projeto e controle de um conversor CC-CC bidirecional

Project and control of a bidirectional DC-DC converter

RESUMO

Raphael Sauer de Castro
raphaelcastro@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

A adoção de fontes alternativas de energia é um dos principais desafios enfrentados no século XXI. Neste sentido, esse trabalho tem o objetivo de desenvolver um conversor CC-CC para o gerenciamento de fontes alternativas de energia, como a energia solar. Devido a natureza intermitente da geração de energia solar, se torna necessário armazenar essa energia para momentos em que a demanda energética não condiz com a produção de energia. O conversor que melhor se adequa às necessidades da microrrede proposta são os conversores bidirecionais. Com o intuito de realizar um controle do conversor escolhido, foi utilizada a análise em espaço de estados na topologia do conversor, determinando suas funções de transferência. A malha de controle foi estabelecida e foram adotados dois controladores PI para o controle do conversor. Foi utilizado o *software* MatLab para obter as constantes proporcionais e integrais adequadas. Resultados parciais foram obtidos utilizando um ambiente de simulação de circuitos de potência. O controle digital foi realizado em linguagem de programação C utilizando um recurso de simulação de DSP do ambiente de *software* de simulação escolhido. Os resultados obtidos permitem averiguar o funcionamento correto do conversor nos cenários de atuação estipulados.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor CC-CC. Armazenamento de energia. Fontes alternativas de energia.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

The adoption of alternative energy sources is one of the main challenges of the 21st century. In this sense, this article aims to develop a DC-DC converter for the management of alternative energy sources, such as solar energy. Because of the intermittent nature of solar energy, it is necessary to store power for situations where the energy demand is not evenly matched to the energy production. The converters that accomplish all the proposed microgrid's needs are the bidirectional converters. The state-space analysis of the converter was carried out to determine its transfer functions. The control mesh was established using two PI controllers. MatLab was used to obtain the adequate proportional and integral constants of the controller, and partial results were collected using a power electronics simulation environment. The digital control was programmed in C using the DSP simulation resource of the software employed. The results obtained demonstrate the correct operation of the power converter in the stipulated use scenarios.

KEYWORDS: DC-DC converter. Energy storage. Alternative energy sources.

INTRODUÇÃO

A participação de fontes alternativas de energia na matriz energética global tem aumentado desde o final do século XX. Fatores como as mudanças climáticas e a redução dos custos para a produção de energia limpa contribuíram para esse aumento. Entre as fontes alternativas de energia mais utilizadas, existem aquelas que necessitam de armazenadores de energia para serem efetivas, como a energia solar. A produção de energia por painéis fotovoltaicos está intrinsecamente ligada à disponibilidade de luz solar. (Agência Internacional de Energia, 2016)

Essa dependência, em um contexto de microrredes, gera diferentes cenários de produção energética. O primeiro cenário é o da produção excedente, em que o conjunto de painéis fotovoltaicos consegue suprir às demandas da carga. O excedente de energia é armazenado para ser usado em outros cenários. O segundo cenário possível é aquele no qual a produção de energia não seja suficiente para atender às demandas da carga. A energia armazenada no primeiro cenário é utilizada junto com a produção de energia dos painéis fotovoltaicos para suprir as necessidades da carga. Uma situação onde não há produção de energia também pode ser estabelecido, onde a energia armazenada deve suprir às demandas da carga sozinha. (KRAEMER, 2017)

Com o intuito de desenvolver soluções para estes cenários, é empregado um conversor de potência entre os armazenadores de energia e a saída de energia solar processada, o barramento CC. Esse conversor precisa controlar o fluxo de energia em dois sentidos, a direção barramento-armazenadores e armazenadores-barramento. A classe de conversores que atende essa demanda é a dos conversores bidirecionais. Entre os conversores bidirecionais foi escolhido o conversor *Buck-Boost* para ser utilizado nesse projeto.

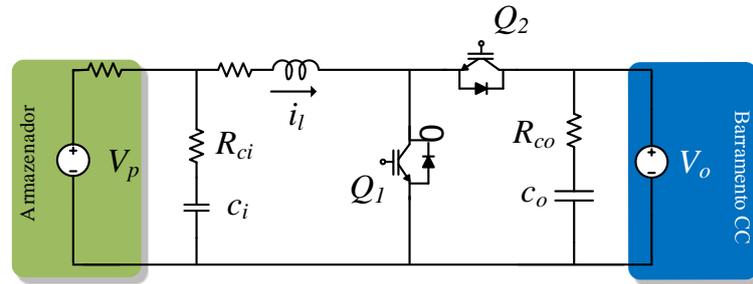
MATERIAL E MÉTODOS

A topologia do conversor Buck-Boost é apresentada na Figura 1. A nomenclatura dos elementos adotada na Figura 1 será utilizada durante a análise matemática. A análise é baseada nos métodos utilizados por Kraemer (2017) e Aguiar (2017), que fazem uso da análise em espaço de estados do conversor.

As variáveis definidas como variáveis de estado são adotadas baseado em Bhardwaj (2015). Elas são a tensão no capacitor de saída c_o (V_{c_o}), a tensão no capacitor de entrada c_i (V_{c_i}) e a corrente no indutor (i_l). As variáveis de estado correspondem aos elementos armazenadores de energia do circuito.

A equação utilizada na análise em espaço de estados é dada pela Equação 1, onde a matriz X correspondem às variáveis de estado, a matriz \dot{X} corresponde à matriz das derivadas de primeira ordem das variáveis de estado e a matriz U contém a tensão na carga (V_o) e a tensão de entrada (V_p). A equação de saída da análise em espaço de estados é fornecida pela Equação 2.

Figura 1 – Topologia do conversor Buck-Boost



Fonte: Kramer, 2017

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

$$Y = CX + EU \quad (2)$$

A análise matemática é feita buscando encontrar as matrizes **A**, **B** e **C** utilizadas na análise em espaço de estados. Para obter essas matrizes é necessário analisar o conversor em seus subintervalos, de acordo com Bhardwaj (2015). O conversor possui duas chaves que operam sempre de forma complementar. Adota-se que a chave Q_1 é ligada por um período D e a chave Q_2 é ligada por um período $(1 - D)$ de tempo. Portanto existem dois subintervalos de operação.

O primeiro subintervalo é com a chave Q_1 ligada e a chave Q_2 desligada. Utiliza-se as leis de análise de circuito, como a LKT e LKC com o intuito de obter as matrizes **A**, **B** e **C** para o subintervalo D . O mesmo procedimento é realizado para o segundo subintervalo, porém com a chave Q_1 desligada e a chave Q_2 ligada em um período de $(1 - D)$.

Os dois conjuntos de matrizes obtidos pelas descrevem o mesmo conversor, porém em intervalos distintos. É possível obter o modelo médio do conversor ponderando as matrizes pelo tempo. Assim é obtido o modelo em regime estacionário do conversor. Também é feita a análise em pequenos sinais. Nessa análise, o número um subscrito representa uma matriz do primeiro subintervalo. Termos em regime permanentes são representados com um traço, enquanto pequenas perturbações nesses termos são representadas com um acento circunflexo.

Para a análise em pequenos sinais, considera-se que as derivadas dos termos em regime estacionário são zero. Outra definição utilizada por Bhardwaj (2015) é assumir que o produtor de duas pequenas perturbações é nulo. Também é considerado que os termos **U** não possuem perturbações. Como o objetivo da análise em pequenos sinais é obter as funções de transferência para as variáveis de interesse, faz-se o uso da transformada de Laplace. Isola-se o ciclo de trabalho pois as funções de transferências são dadas em relação a esse termo. A equação resultante é a Equação 3. O termo **A** são as matrizes A_1 e A_2 ponderadas pelo seu ciclo de trabalho.

$$\frac{\hat{x}(s)}{\hat{u}(s)} = (sI - A)^{-1}[(A_1 - A_2)\bar{X} + (B_1 - B_2)\bar{U}_1] \quad (3)$$

A mesma análise é empregada para as variáveis de saída. Aplicando-se os mesmos métodos, e ponderando as matrizes C_1 e C_2 . Com o intuito de obter a função de transferências do indutor e da tensão no capacitor de saída, as matrizes C_1 e C_2 são manipuladas para obter somente os termos necessários para a função

de transferência. A equação 4, referente ao indutor, e a equação 5, referente ao capacitor, são frutos dessa manipulação.

$$\frac{\hat{i}_i(s)}{\hat{d}(s)} = \mathbf{C}\{(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}[(\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2)\bar{\mathbf{X}} + (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2)\bar{\mathbf{U}}_i]\} \quad (4)$$

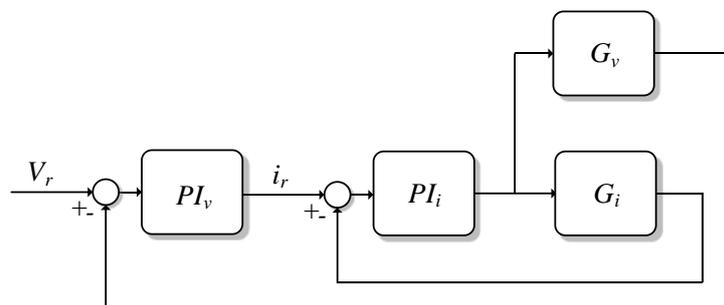
$$\frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \mathbf{C}\{(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}[(\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2)\bar{\mathbf{X}} + (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2)\bar{\mathbf{U}}_i]\} + (\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2)\bar{\mathbf{X}} \quad (5)$$

Tendo posse das equações das funções de transferência, foi utilizado o software MatLab para o cálculo dessas equações. Todo o procedimento descrito até esse ponto foi programado como um script para o MatLab.

Para o projeto dos controladores, primeiro, adotou-se a frequência de comutação de 12 kHz para as chaves. Outra definição adotada foi do tipo de controlador a ser utilizado no projeto, um controlador proporcional integral (PI).

A definição do tipo do controlador permite descrever a malha de controle que será adotada pelo projeto. Optou-se por utilizar a malha descrita por Kramer (2017), porém a adaptando para os controladores usados. A tensão de referência (V_r) é comparada com um a saída da planta de tensão (G_v) e o erro passa para o controlador PI_v . A saída desse controlador apresenta a referência para a corrente (i_r), que é comparada com a saída da planta de corrente (G_i). Esse segundo erro é alimentado para o controlador PI_i , a partir do qual o sinal vai para as plantas de corrente e tensão.

Figura 2 – Malha de controle utilizada



Fonte: Kraemer, 2017

A malha de controle foi projetada no *software Simulink*, com o intuito de obter as constantes corretas dos controladores. As frequências dos controladores usados foram de 120 Hz e 1,2 kHz para o primeiro e segundo controladores respectivamente. A margem de fase de 60° foi adotada segundo Ogata (2010).

O conversor foi, então, montado no ambiente de *software PSIM*. O controlador PI precisa ser escrito de forma discreta para sua implementação no DSP simulado pelo *software*. Para essa discretização utilizou-se o método de equações de diferenças, baseado em Kramer (2017). Também foi implementado, para o controle digital, um mecanismo de *anti-windup*, descrito em Buso e Mattavelli (2006). O DSP faz uso de PWM para realizar a comutação das chaves.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui apresentados são fruto da simulação do circuito de potência no *software PSIM*. Aqui serão analisados dois cenários de funcionamento

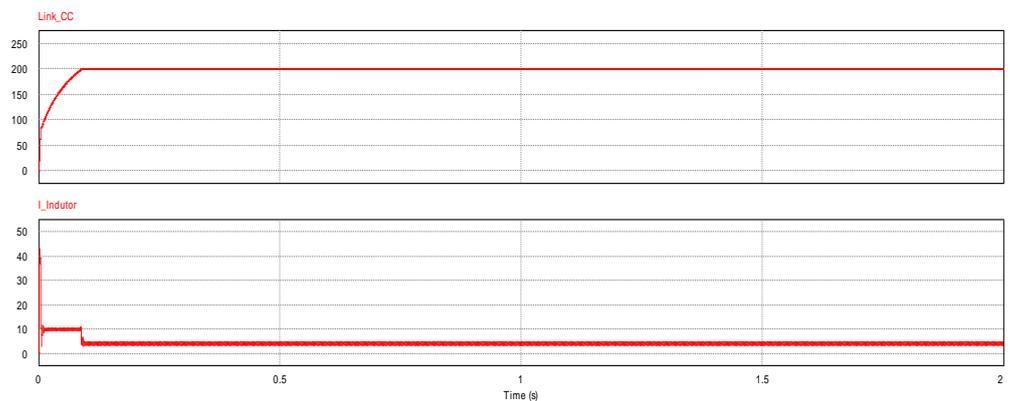
do conversor: um cenário de carga dos armazenadores e um cenário de descarga. O painel solar foi simulado como uma fonte de corrente ligada à carga.

O primeiro cenário simulado é o cenário onde ocorre produção de energia, porém não o suficiente para alimentar a carga. A carga possui 400 watts. O resultado mostra que a carga recebe a potência solicitada, e a análise da corrente do indutor mostra que ocorre um fluxo positivo, ou seja, dos armazenadores de bateria em direção ao barramento CC. Para simular o painel foi utilizada uma fonte de corrente de 1 A conectada à carga. Ocorreu, portanto, uma descarga dos armazenadores de energia. Os resultados são mostrados na Figura 4.

O segundo cenário simulado é onde o painel é capaz de suprir a demanda da carga sozinho. O resultado mostra que os 200 V são atingidos, e uma análise da corrente do indutor mostra uma corrente negativa, ou seja, o fluxo ocorre da carga em direção aos armazenadores de energia. Os armazenadores de energia estão, portanto, sendo carregados. O resultado pode ser visualizado na Figura 5.

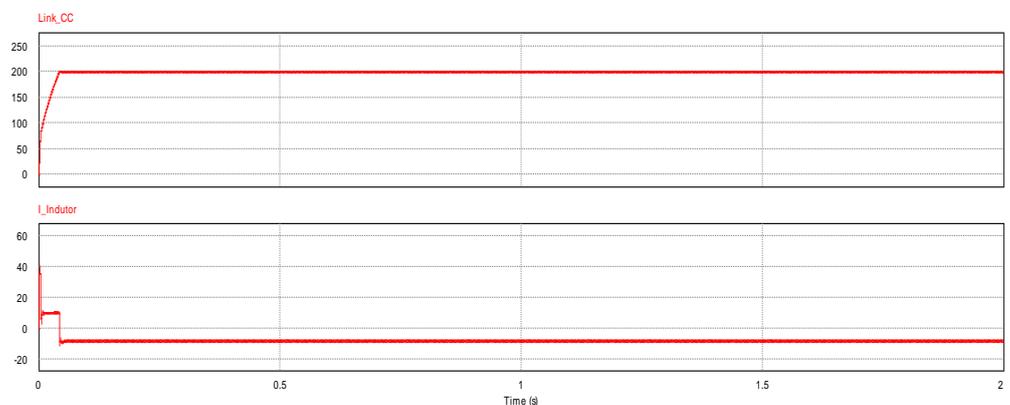
Os resultados evidenciam o correto funcionamento do conversor para os cenários de uso estipulados.

Figura 4 – Resultado do segundo cenário proposto. O quadro superior representa a tensão no barramento CC (V) e o quadro inferior representa a corrente no indutor (A).



Fonte: autoria própria.

Figura 5 – Resultado do terceiro cenário proposto. O quadro superior representa a tensão no barramento CC (V) e o quadro inferior representa a corrente no indutor (A).



Fonte: autoria própria.

CONCLUSÃO

A modelagem matemática do conversor, bem como o projeto de seus controladores e controle digital foram validados pelos resultados das simulações. O conversor apresenta o correto funcionamento para os cenários de carga e descarga propostos, servindo como uma interface entre um conjunto de painéis fotovoltaicos e um banco de baterias.

A próxima etapa para esse projeto trata da construção de um protótipo de conversor, com confecção das placas de circuito impressas adequadas (PCBs), programação em um DSP e interface com um *driver* para o acionamento das chaves.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. Statistics | World - Total Primary Energy Supply by source. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPESbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES>. Acesso em: 19 ago. 2019.

GERENCIAMENTO do fluxo de potência. In: KRAEMER, Rodrigo Antonio Sbardeloto. GERENCIAMENTO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA BASEADA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS. Orientador: Cassius Rossi de Aguiar. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017. p. 62-74.

INTERFACE de potência - estágio CC-CC. In: AGUIAR, Cassius Rossi de. Contribuição ao gerenciamento e controle de células a combustível para a operação em geração distribuída. Orientador: Ricardo Quadros Machado. 2016. Tese (Doutorado em engenharia elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. p. 69-82.

BHARDWAJ, Manish. Modeling Bi-Directional Buck/Boost Converter for Digital Control Using C200 Microcontrollers. [S. l.], 2015. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/sprabx5/sprabx5.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2019.

OGATA, Katsuhiko. Modern Control Engineering. Nova Jersey: Prentice Hall, 2010. ISBN 0136156738.

BUSO, Simone; MATTAVELLI, Paolo. Digital Control in Power Electronics. Estados Unidos da América: Morgan & Claypool Publishers, 2006. ISBN 1598291122.