

Modelagem de conversor CC/CC bidirecional operando no modo DCM

Bidirectional DC/DC converter modelling operating in DCM mode

RESUMO

Dionatan Sebben Bernardi
dionatan999@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Rafael Cardoso
rcardoso@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Os conversores CC-CC são circuito eletrônicos que adequam diferentes níveis de tensão contínua propiciando uma saída regulada. Dentre os tipos de conversores CC-CC existentes, estão os não-isolados unidirecionais, não-isolados bidirecionais, isolados unidirecionais e os isolados bidirecionais. Um conversor bidirecional é obtido a partir de conversores unidirecionais, onde os diodos da ponte retificadora são substituídos por chaves semicondutoras com diodos intrínsecos em anti-paralelo. Portanto, são caracterizados pela possibilidade de transferência de potência da entrada para saída ou da saída para a entrada. Neste trabalho, aborda-se o funcionamento de um conversor CC-CC bidirecional isolado operando no modo de condução descontínua. Para isso, é realizada a análise das etapas de operação, a modelagem e validação do conversor, além de simulações para a análise e obtenção dos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Conversores CC-CC. Conversores Bidirecionais. Modelagem.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

DC-DC converters are electronic circuitry that suit different levels of direct voltage providing a regulated output. Among the existing types of DC-DC converters there are the unidirectional non-isolated, bidirectional non-isolated, unidirectional isolated and bidirectional isolated. A bidirectional converter is obtained from unidirectional converters, where the rectifier bridge diodes are replaced by semiconductor switches with intrinsic anti-parallel diodes. Therefore, they are characterized by the possibility of transferring power from input to output or from output to input. This work deals with the operation of an isolated bidirectional DC-DC converter operating in discontinuous conduction mode. The operation stages of the converter are analyzed. Then the modeling and validation of the converter model using simulations are presented.

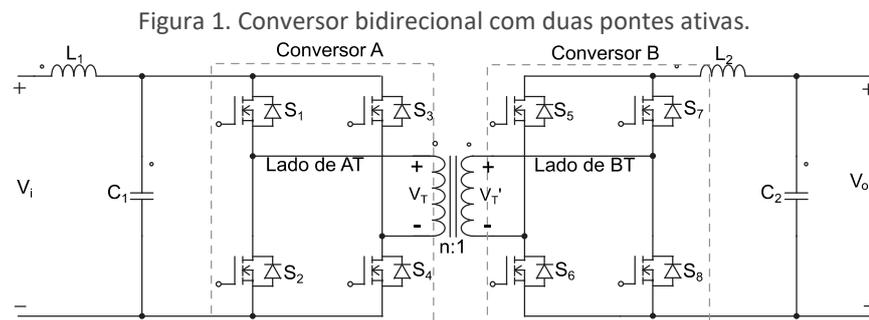
KEYWORDS: DC-DC Converters. Bidirectional Converters. Modeling.

INTRODUÇÃO

Um conversor CC-CC unidirecional isolado opera, usualmente, a partir de um inversor e um retificador. Inicialmente, o inversor converte a tensão contínua provida da entrada em tensão alternada, para adequar-se ao transformador. Posteriormente, o retificador faz a conversão da tensão alternada para contínua na saída do conversor.

Um conversor bidirecional é obtido a partir de conversores unidirecionais, onde os diodos da ponte retificadora são substituídos por chaves semicondutoras com diodos intrínsecos em anti-paralelo (HART,2011). Portanto, são caracterizados pela possibilidade de transferência de potência da entrada para saída ou da saída para a entrada.

Dentre as topologias existentes de conversores bidirecionais, para este trabalho, será utilizado o conversor desenvolvido em (CARVALHO, 2018). O modelo proposto é composto por dois inversores Ponte-Completa com característica de fonte de tensão no lado do barramento CC e, como fonte de corrente na conexão com o banco de baterias. A figura 1 demonstra o conversor bidirecional utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Do lado de alta tensão do transformador (AT), os componentes do filtro L_1 e C_1 reduzem possíveis ondulações de corrente na entrada do conversor e fornecem o modo de fonte de tensão ao conversor A. Do lado de baixa tensão do transformador (BT), o indutor L_2 reduz ondulações de corrente no processo de carga e descarga e dá característica de fonte de corrente para o conversor B. Já o capacitor C_2 é necessário para atenuar variações de tensão na saída do conversor

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR.

Neste trabalho, será realizada a modelagem do conversor CC-CC bidirecional através da análise das etapas de operação. Como este conversor opera de forma bidirecional, a modelagem será separada em duas formas de operação:

- a) Conversor operando no modo de carga (Conversor A operando como inversor e Conversor B operando como retificador);

- b) Conversor operando no modo de descarga (Conversor A operando como retificador e conversor B operando como inversor).

Considerando a modelagem descontínua do conversor CC/CC, definiu-se D como a razão cíclica e que, para ambos os casos, a Etapa 1 ocorre no intervalo de tempo $(0, D \cdot \frac{T}{2})$, a Etapa 2 no intervalo $(D \cdot \frac{T}{2}, t_d)$, a Etapa 3 de $(t_d, \frac{T}{2})$, a Etapa 4 de $(\frac{T}{2}, (1 + D) \cdot \frac{T}{2})$, a Etapa 5 de $((1 + D) \cdot \frac{T}{2}, t_d + \frac{T}{2})$ e a Etapa 6 de $(t_d + \frac{T}{2}, T)$.

Para o funcionamento adequado, é fundamental que no decorrer das seis etapas de operação do conversor bidirecional, seja aplicada uma tensão nula no transformador, (BARBI, 2002). Desse modo, os tempos relativos de operação das etapas 1-4, 2-5 e 3-6 devem ser os mesmos.

Para o modelo do conversor operando no modo de carga, considera-se que o capacitor C_1 possui um valor constante e igual ao valor de V_i .

Analisando as etapas de operação do conversor bidirecional, nota-se que as Etapas 1-4, 2-5 e 3-6 possuem a mesma modelagem, pois operam de forma similar, porém no semiciclo negativo.

A partir dessas informações e, que em regime permanente o valor médio da tensão sobre um indutor deve ser nulo, é possível obter o ganho estático do conversor CC/CC para este modo de operação, representado pela Eq. (1):

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D \cdot T}{t_d + D \cdot T} \quad (1)$$

Para obtermos o valor do ganho estático, é necessário definir o valor de t_d em função das variáveis do conversor. Para isso, é necessária uma análise da corrente do indutor L_2 . Sabe-se que em modo de corrente descontínua, a corrente média no indutor é $I_{L2\ med} = I_o$, sendo I_o a corrente na carga R, (BARBI, 2002). O de $I_{L2\ med}$, representado pela equação (2):

$$I_{L2\ med} = \frac{I_p}{2 \cdot T} \cdot \left(D \cdot \frac{T}{2} + t_d \right) = I_o \quad (2)$$

onde,

$$I_p = V_o \cdot \frac{t_d}{L_2} \quad (3)$$

Através da Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3) tem-se:

$$t_d = \frac{2 \cdot L_2 \cdot I_o \cdot n}{D \cdot V_i} \quad (4)$$

Para o modelo do conversor operando no modo de descarga, através da análise das malhas de cada etapa de operação do conversor bidirecional, é possível obter o modelo matemático para este modo de operação.

De maneira semelhante ao modo de carga, o ganho estático do conversor é obtido considerando que tensão média sobre o indutor L_2 é nula. Portanto, obtém-se o ganho estático do conversor bidirecional para a etapa de descarga e o valor de t_d :

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{D \cdot T + t_d}{t_d} \quad (5)$$

$$t_d = \frac{2 \cdot L_2 \cdot I_o \cdot n}{D \cdot V_i} \quad (6)$$

OBTENÇÃO DO MODELO MÉDIO E DE PEQUENOS SINAIS

Para a obtenção do modelo médio será utilizado o modelo médio em espaço de estados. Esse método consiste em realizar uma média ponderada dos modelos referentes a cada etapa de operação do conversor levando em consideração o tempo de duração de cada uma. Visto que o conversor bidirecional possui dois modos de operação, deve-se analisar separadamente cada um destes modos (BERNARDI; FERRARI, 2018). O objetivo desta modelagem do conversor bidirecional é representar o conversor em um modelo o qual tenha como variável de entrada a razão cíclica D .

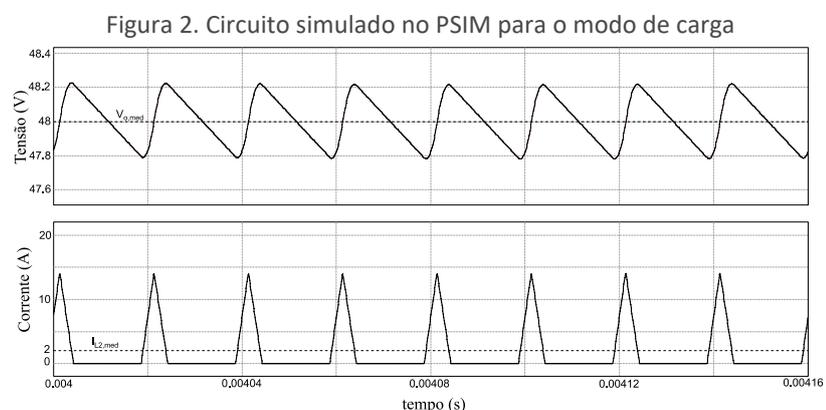
Após analisar de forma individual cada etapa de operação, o modelo médio é obtido através da média ponderada de cada um dos modelos obtidos. Todavia, nota-se que o modelo obtido é não-linear. Sendo assim, não é possível projetar um controlador considerando somente a razão cíclica como entrada. Observa-se que o comportamento do conversor depende do tempo t_d , o qual varia em função de D e da corrente I_o .

Dessa forma, é necessária uma análise em pequenos sinais para representar o modelo em espaços de estados. Entretanto, há diversas abordagens para resolver este problema e, as estudadas até o momento, não apresentaram resultados suficientemente representativos. Portanto, é sugerido para que trabalhos futuros investiguem essa situação de forma a resolver o problema.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de validar o modelo médio em espaço de estados, foram realizadas simulações do conversor CC/CC bidirecional operando no modo descontínuo. Foi utilizado o *software PSIM* para simular a operação do circuito do conversor e, o *software Matlab* para simular o modelo médio em espaço de estados encontrado.

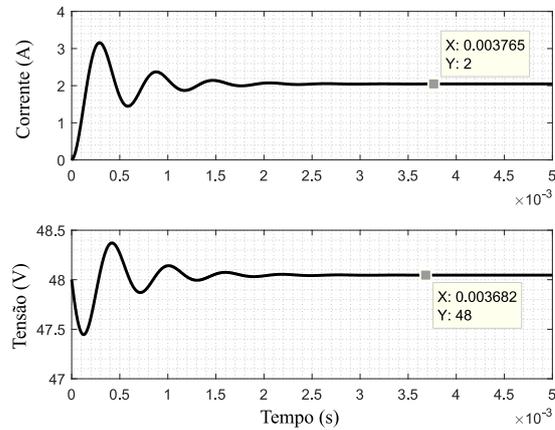
Para o modo de carga, a partir da simulação do conversor, foi possível garantir seu funcionamento. Através da figura 2, onde é apresentada a tensão sobre o resistor R e, a corrente no indutor L_2 , nota-se que o conversor operou na forma descontínua. A corrente no indutor e a tensão na saída atingiram o valor médio esperado de 2 A e 48 V, respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

Na simulação do *software* Matlab, também, obteve-se os valores pré-definidos para a corrente e a tensão de saída. Dessa forma foi possível garantir que o modelo médio obtido representa o conversor bidirecional de forma coerente.

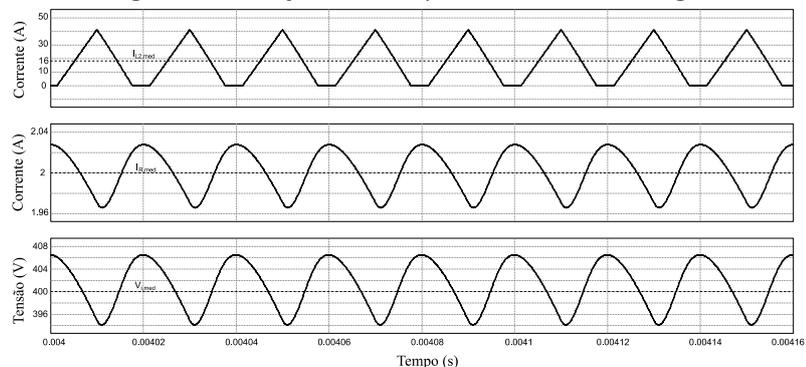
Figura 3. Simulação no Matlab para o modo de carga



Fonte: Autoria própria.

Analogamente ao modo de carga, o conversor operando no modo de descarga funcionou de acordo com o esperado. Através da simulação no *software* PSIM, representada pela figura 4, que demonstra o comportamento da corrente no indutor L_2 , a tensão de saída (neste caso V_i) e a corrente de saída.

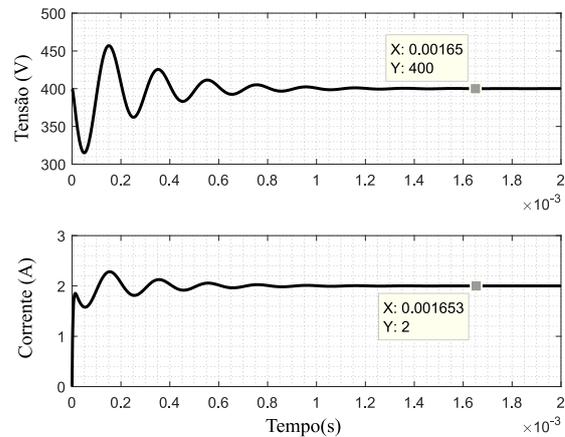
Figura 4. Simulação no PSIM para o modo de descarga.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o conversor operou no modo descontínuo através da corrente do indutor L_2 e, que a corrente e tensão de saída, alcançaram os valores pré-definidos de 2 A e 400 V. A partir da figura 5, a qual representa a simulação do modelo médio no *software* Matlab, é possível garantir que o modelo médio obtido para o modo de operação de descarga representa o conversor bidirecional de forma a validar seu funcionamento.

Figura 5. Simulação do modelo no Matlab para o modo de descarga.



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÕES

Partindo da análise da operação do conversor bidirecional escolhido, especificou-se dois modos de operação: carga e descarga. Sendo cada modo de operação separado em 6 etapas de funcionamento, para cada uma, definiu-se um tempo de duração. Posteriormente foi realizada a modelagem de cada modo de operação a fim de obter o modelo médio do conversor CC-CC bidirecional. Porém, visto que o conversor possui um modelo não-linear, foi necessária modelagem em pequenos sinais. Todavia, notou-se que esse conversor possui um modelo complexo para pequenos sinais. Sendo assim, foi realizado a validação do modelo médio somente para grandes sinais onde obteve-se êxito, visto que o conversor operou na forma descontínua e atingiu os valores pré-estabelecidos.

Dessa maneira, após a validação dos dois modos de operação do conversor em grandes sinais, sugere-se para trabalhos futuros o estudo do modelo em pequenos sinais, para que, seja possível realizar o controle do conversor.

REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo. **Projeto de Fontes Chaveadas**. Edição do Autor, Florianópolis, SC, 2002.

BERNARDI, Dionatan S.; FERRARI, Valquíria G. (2018) **Sistema de Conversão de energia com Armazenamento para Geração Distribuída**. 120p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

CARVALHO, Edivan Laercio. **Desenvolvimento de um conversor Bidirecional Isolado para Controle de Carga e Descarga de Banco de Baterias**. 174 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

HART, Daniel. **Power Electronics**. Mc-Graw-Hill Education, 2011.