

ESTUDO E ANÁLISE DE CONVERSORES CC-CC PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO DE ENERGIA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

STUDY AND ANALYSIS OF DC-DC CONVERTERS FOR APPLICATIONS IN POWER CONDITIONING SYSTEMS AND DISTRIBUTED GENERATION

Edgar E. R. Forni¹, Sérgio A. O. da Silva², Leonardo P. Sampaio³

RESUMO

Este artigo abordará o funcionamento e dimensionamento dos Conversores CC/CC, bem como sua modelagem. Além disso, serão abordados o estudo de Sistemas de Condicionamento de Energia (Sistemas UPQC, Filtros Ativos de Potência, assim como os Sistemas de Geração Distribuída, destacando os Sistemas Fotovoltaicos. Por fim, serão apresentadas aplicações de Conversores CC/CC em Condicionadores de Energia e em Sistemas de Geração Distribuída Fotovoltaicos.

PALAVRAS-CHAVE: Conversores CC/CC, Modelagem, Fotovoltaicos e Condicionadores de Energia.

ABSTRACT

This article will address the operation and sizing of DC-DC Converters, as well as their modeling. Additionally, it will cover the study of Power Conditioning Systems (UPQC Systems, Active Power Filters) and Distributed Generation Systems, focusing on Photovoltaic Systems. Finally, applications of DC-DC Converters in Power Conditioners and Photovoltaic Distributed Generation Systems will be presented.

KEYWORDS: DC-DC Converters, Modeling, Photovoltaics, and Power Conditioners.

INTRODUÇÃO

O estudo dos conversores CC/CC é de suma importância no âmbito da engenharia. Esses dispositivos desempenham um papel crucial em diversas aplicações, sendo essenciais para a eficiência energética em sistemas de potência, permitindo a conversão eficaz de energia entre diferentes níveis de tensão. A geração distribuída de energia elétrica com fontes renováveis e alternativas tem recebido muita atenção em diversos países desenvolvidos, que buscam ampliar sua capacidade de geração e diversificar suas matrizes energéticas, priorizando e incentivando o uso de energias limpas [1].

No entanto, o amplo uso de sistemas baseados em eletrônica de potência tem aumentado o ônus no sistema de energia, gerando harmônicos em tensões e correntes, juntamente com um aumento na corrente reativa [2]. Os Sistemas UPQC têm como objetivo aprimorar a qualidade da energia elétrica em um sistema de distribuição.

Um exemplo de geração distribuída são os sistemas fotovoltaicos (PV) aplicados em residências, que empregam painéis solares para captar a energia dos fótons oriundos da radiação solar, através do fenômeno do efeito fotoelétrico [3]. Outro exemplo representativo

¹ Voluntário do CNPQ. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: edgarforni@gmail.com. ID Lattes: 9385916253310036.

² Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: augus@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7428189879295593.

³ Docente no Curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: sampaio@utfpr.edu.br. ID Lattes: 5320781796971939.

de aplicação de conversores CC-CC é a configuração distribuída do conversor Buck-Boost, que busca maximizar a eficiência na captação de energia de módulos fotovoltaicos [4]. Além disso, há também o emprego de um conversor boost para otimizar a utilização de fontes de geração distribuída [5].

DESENVOLVIMENTO

Análise teórica dos Conversores CC/CC:

A análise dos conversores (Figura 1) foi realizada em modo de condução contínua e após a conclusão da segunda etapa dos conversores, o ciclo se reinicia de forma contínua.

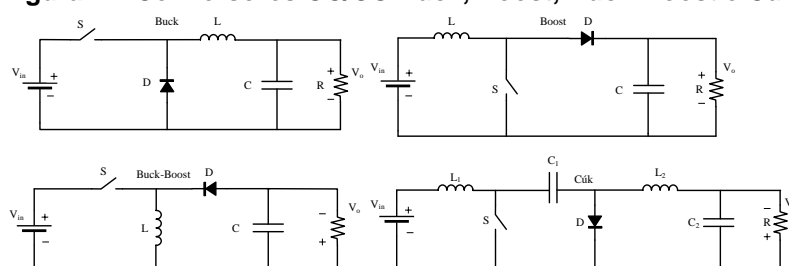
O Conversor Buck é um conversor CC/CC utilizado para abaixar a tensão de entrada para uma tensão de saída menor. Na primeira etapa ($t=0$), a chave S fecha e o diodo D_1 bloqueia. A corrente de entrada passa pelo circuito, carregando o indutor L e, em seguida, alimentando a carga R através do capacitor. Na segunda etapa ($t=t_1$), a chave S abre e o diodo D_1 conduz. O indutor descarrega, fornecendo energia para a carga R .

O Conversor Boost é um conversor CC/CC utilizado para subir a tensão de entrada para uma tensão de saída maior. Na primeira etapa ($t=0$), a chave S fecha e o diodo D_1 bloqueia. A corrente de entrada carrega o indutor L . Na segunda etapa ($t=t_1$), a chave S abre e o diodo D_1 conduz. A corrente do indutor fornece energia para a carga R , passando pelo capacitor.

O Conversor Buck-Boost é um conversor CC/CC utilizado para abaixar/elevar a tensão de entrada para uma tensão de saída menor/maior. Na primeira etapa ($t=0$) a corrente de entrada carrega o indutor L com a chave S fechada e o diodo D_1 bloqueado. Na segunda etapa ($t=t_1$), com a chave S aberta e o diodo D_1 conduzindo, o indutor descarrega, fornecendo energia para a carga R .

O Conversor Cúk é um conversor CC/CC utilizado para abaixar/elevar a tensão de entrada para uma tensão de saída menor/maior, assim como o conversor Buck-Boost. O Conversor Cúk tem como característica o armazenamento capacitivo. Em modo de condução contínua, na primeira etapa ($t=0$), com a chave S fechada e o diodo D_1 bloqueado, a corrente de entrada carrega o indutor L_1 . A energia inicial armazenada no capacitor C_1 é transferida para o indutor L_2 , o capacitor C_2 e a carga R . Na segunda etapa ($t=t_1$), com a chave S aberta e o diodo D_1 conduzindo, o indutor L_2 descarrega, fornecendo energia para a carga R .

Figura 1 – Conversores CC/CC Buck, Boost, Buck-Boost e Cúk.



Fonte: Autoria própria.

Modelagem dos Conversores CC/CC:

As funções de transferência que caracterizam a tensão de saída dos conversores Buck, Boost, Buck-Boost e Cúk são expostas a seguir, na sequência correspondente.

$$\widehat{v}_o(s)_{Buck} = D \left(\frac{1}{1+s\frac{L}{R}+s^2LC} \right) \widehat{v}_{in}(s) + V_{in} \left(\frac{1}{1+s\frac{L}{R}+s^2LC} \right) \hat{d}(s);$$

$$\widehat{v}_o(s)_{Boost} = \frac{1}{D'} \left(\frac{1}{1+s\frac{L}{D'^2R}+s^2\frac{LC}{D'}} \right) \widehat{v}_{in}(s) + \frac{V_{in}}{D'} \left(\frac{1-\frac{sLI}{D'V_{in}}}{1+s\frac{L}{D'^2R}+s^2\frac{LC}{D'}} \right) \hat{d}(s);$$

$$\widehat{v}_o(s)_{Buck_Boost} = \left(\frac{-sLIR+D'V_{in}+D'V_o}{s^2LCR+sL+D'^2} \right) \hat{d}(s);$$

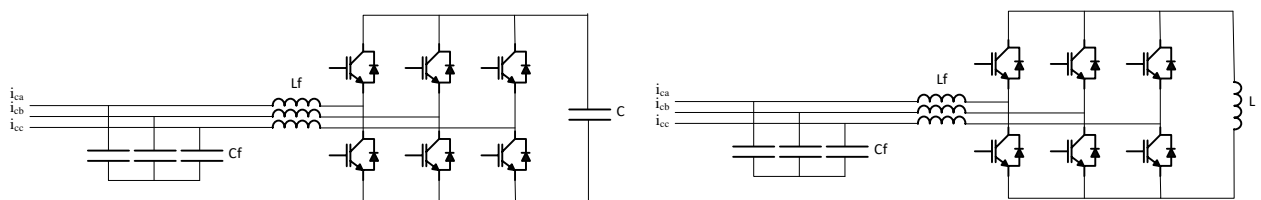
$$\widehat{v}_o(s)_{Cúk} = \left(\frac{s^2(L_1C_1V_cR)+s(-L_1^2IDR-L_1IL_2DR)+(2D'DV_cR)}{s^4(L_1L_2C_1C_2R)+s^3(L_1L_2C_1)+s^2(L_1C_1R+L_2DD'^2C_2R+L_1D^2C_1R)+s(L_2DD'+L_1D^2)+(DD')^2} \right) \hat{d}(s).$$

Sistemas de Condicionamento de Energia (Sistemas UPQC, Filtros Ativos de Potência)

Um UPQC, é formado pela integração de um condicionador ativo em configuração paralela e outro em configuração série, que atuam de maneira coordenada. Esse dispositivo combina as capacidades de correção de corrente de um Filtro Ativo Paralelo (FAP) com as capacidades de correção de tensão de um Filtro Ativo Série (FAS), o que viabiliza a solução para diversas questões relacionadas à qualidade de energia, como a compensação de harmônicos de corrente e tensão, a correção de desequilíbrios de tensão, a melhora do fator de potência [6].

Existem duas topologias de inversores frequentemente utilizadas como filtros ativos de potência. Uma delas é o inversor de fonte de tensão (VSI - Voltage Source Inverter) (Figura 2) [7-8], que possui apenas um capacitor no barramento de corrente contínua (CC). A outra é chamada de inversor de fonte de corrente (CSI - Current Source Inverter) (Figura 2) [8-9], a qual apresenta apenas um indutor no barramento de corrente contínua (CC).

Figura 2 – FAP com conversor VSI e FAP com conversor CSI.



Fonte: Autoria própria.

Tanto o VSI quanto o CSI devem atuar como fontes de corrente, fornecendo de forma instantânea à carga as correntes harmônicas de compensação necessárias.

O Filtro Ativo Série (FAS) é inserido em série entre a carga e a rede elétrica. Sua principal finalidade é remover as componentes harmônicas presentes nas tensões da rede de alimentação que excedem os padrões aceitáveis. O sistema é constituído por um inversor, um modulador, um controlador do filtro ativo encarregado do gerenciamento e produção

das referências de tensão para compensação, juntamente com um transformador série e componentes passivos de filtragem.

Sistemas de Geração Distribuída (Sistemas Fotovoltaicos)

Os painéis solares são constituídos por células fotovoltaicas que transformam a energia solar em eletricidade. Além disso, os painéis fotovoltaicos precisam ser instalados em uma orientação e inclinação apropriadas para maximizar a captação da luz solar.

O sistema fotovoltaico sempre busca extrair máxima potência elétrica. Em um sistema fotovoltaico sem sombreamento, existe apenas um ponto de máxima potência elétrica. No entanto, em um sistema com sombreamento, há múltiplos pontos de máxima potência. O ponto de máxima potência (MPP) em um sistema fotovoltaico é o estado de operação em que o painel solar está produzindo a máxima potência elétrica para as condições específicas de luz solar e temperatura a que está exposto.

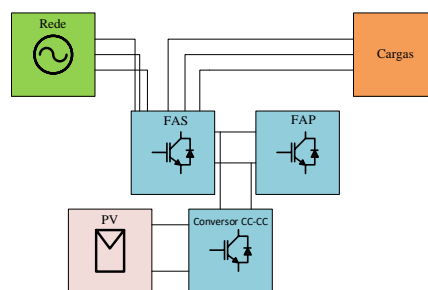
A busca desse ponto é feita por meio de técnicas, como P&O (Perturbe e Observe), Condutância Incremental, Beta, Oscilação do Sistema, dentre outros. O P&O possui um algoritmo que consiste no incremento ou decremento de uma variável de controle de forma contínua (tensão/razão cíclica do painel).

Aplicações de Conversores CC/CC em Condicionadores de Energia

Os conversores CC/CC têm um papel central em diversas aplicações nos sistemas de condicionamento de energia. Eles desempenham funções cruciais na conversão, controle e distribuição eficaz da energia em variados cenários, abrangendo desde sistemas fotovoltaicos até veículos elétricos [6].

Topologias que incorporam tanto o filtro ativo em série quanto o filtro ativo em paralelo são utilizadas em sistemas unificados de condicionamento de qualidade de energia elétrica (UPQC - Unified Power Quality Conditioner) [10-11], como representado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de blocos de uma UPQC com fotovoltaico.



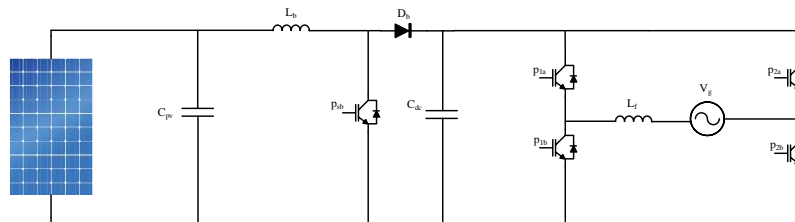
Fonte: Autoria própria.

Implementação

No Matlab Simulink, foi implementado um sistema fotovoltaico com conversor Boost e inversor monofásico, ambos conectados à rede elétrica (Figura 5). O capacitor C_{dc} atua como componente de desacoplamento no barramento CC entre o conversor CC/CC e o

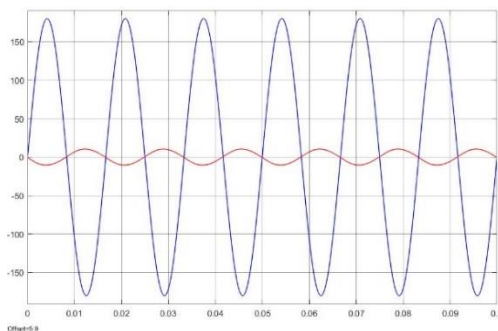
inversor. As células solares convertem luz em eletricidade e o conversor eleva a tensão para o nível adequado de CC, garantindo o funcionamento correto do inversor, que converte CC em CA. O inversor foi projetado para sincronizar a frequência e fase com a rede elétrica. A técnica P&O foi empregada para determinar o MPPT do arranjo fotovoltaico.

Figura 5 – Arranjo fotovoltaico com conversor boost e inversor monofásico.

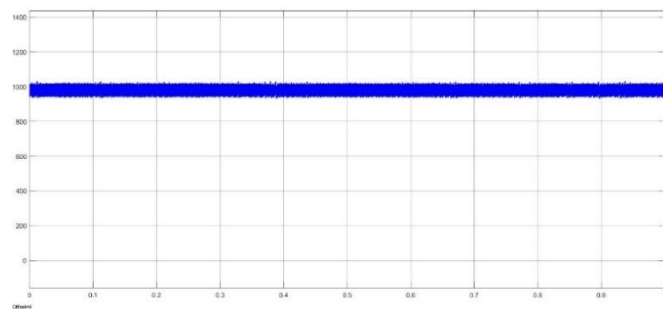


Fonte: Autoria própria.

Figura 6 – (a) Tensão na rede (azul) e corrente na saída do inversor (vermelho); (b) Potência extraída dos painéis.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Figura 6(a), é notável que a corrente se encontra em oposição de fase em relação à tensão da rede. Isso representa que a corrente está sendo injetada na rede elétrica.

Conforme ilustrado na Figura 6(b), observa-se a eficácia do rastreamento do MPPT, uma vez que o arranjo fotovoltaico está atualmente produzindo uma potência de 1000W. Este resultado confirma a adequada operação do sistema de controle de potência do arranjo fotovoltaico.

CONCLUSÕES

Neste artigo foi evidenciada a importância dos conversores CC-CC em sistemas de condicionamento de energia e geração distribuída. Através da análise realizada foi possível constatar que esses dispositivos desempenham um papel crucial na eficiência e na estabilidade desses sistemas. A escolha adequada do tipo de conversor, levando em consideração a aplicação específica, pode trazer benefícios substanciais em termos de eficiência energética e controle de potência. Portanto, este estudo reforça a importância dos conversores CC-CC como componentes fundamentais em sistemas de condicionamento de energia e geração distribuída, e destaca a necessidade contínua de



pesquisa e inovação nesta área para promover avanços significativos na eficiência e na confiabilidade desses sistemas.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- [1] VILLALVA, Marcelo Gradella. Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica . 2010. Tese de Doutorado, Unicamp, p.1, p.30.
- [2] V. Khadkikar, "Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 5, pp. 2284-2297, May 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2172001.
- [3] G. Y. Aguirre, J. A. Marteniuk and F. Botterón, "Implementación de estrategias de MPPT para sistemas de generación fotovoltaicos en un convertidor boost CC-CC," 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), Bariloche, Argentina, 2014, pp. 352-357, doi: 10.1109/ARGENCON.2014.6868519.
- [4] L. R. Côrtes, A. S. de Moraes, D. P. Carvalho, F. L. Tofoli, L. Ribeiro and A. C. Gomes, "Distributed Application Of The Four-Switch Buck-Boost Converter To Maximize Power Extraction In Photovoltaic Modules," 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Chicago, IL, USA, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEDG51384.2021.9494175.
- [5] A. Elamathy and G. Vijayagowril, "Multiport DC-DC interleaved boost converter supplemented by hybrid system of different capacities PV and battery power system," 2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), Coimbatore, India, 2015, pp. 921-925, doi: 10.1109/ECS.2015.7125049.
- [6] PEIXOTO, Daniel Filipe Araújo. Desenvolvimento de um conversor CC-CC para um UPQC trifásico para interface com painéis solares fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia. 2018. Tese de Doutorado, p.6, p. 96.
- [7] Akagi H., Kanagawa Y. and Nabae A., "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components". IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. IA-20 No 3, pp. 625, 1984.
- [8] Fukuda S. and Endoh T., "Control Method for a Combined Active Filter System Employing a Current Source Converter and a High Pass Filter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 3, May/June 1995.
- [9] Hayashi Y., Sato N., and Takahashi K., "A Novel Control of a Current-Source Active Filter for ac Power System Harmonic Compensation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 2, March/April 1995.
- [10] R. A. Modesto, S. A. O. Silva, A. A. Oliveira Jr., and V. D. Bacon, "A versatile unified power quality conditioner applied to three-phase four-wire distribution systems using a dual control strategy," IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 8, pp. 5503-5514, Aug. 2016.
- [11] Akagi H., Kanagawa Y. and Nabae A., "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in the Three-Phase Circuits". JIEE IPEC-Tokyo pp.1375, 1983.