



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



Desenvolvimento de conversor boost interleaved de três fases fases conectado a uma rede monofásica.

Design of three-phase interleaved boost converter connected to monofase grid.

Gabriel Vinicius Greguer *

Cassius Rossi de Aguiar †

RESUMO

Com o crescente interesse na área de processamento de energia, diversos trabalhos científicos buscam soluções de alta eficiência através da análise e desenvolvimento de conversores do tipo CC-CC e CC-CA. Desta forma, este trabalho apresenta uma proposta de desenvolvimento de um conversor boost interleaved conectado a uma rede monofásica para processamento de energia proveniente de fontes alternativas. Os conversores que serão estudados são modelados em espaço de estados e é feita a análise em pequenos sinais. Tais análises se tornam essenciais no projeto das plantas de controle que, por sua vez utilizam de controladores do tipo PI e PI com adição de filtro ressonante. As constantes de controle são ajustadas com auxílio do software MATLAB para que os resultados sejam satisfatórios. Ao fim, após a escolha dos componentes a serem utilizados é desenvolvida a placa de circuito impresso do sistema, tendo assim, o intuito de validar em bancada o modelo estudado.

Palavras-chave: Conversores Eletrônicos. Placa de Circuito impresso. Controladores PI.

ABSTRACT

With the growing interest in the area of energy processing, several scientific works seek high efficiency solutions through the analysis and development of DC-DC and DC-AC converters. In this way, this work presents a proposal for the development of an interleaved boost converter connected to a single-phase grid for processing energy from alternative sources. The converters that will be studied are modeled in state space and small signal analysis is performed. These analyses become essential in the design of the control plants, which in turn use PI and PI controllers with the addition of a resonant filter. The control constants are adjusted with the help of MATLAB software so that the results are satisfactory. Finally, after choosing the components to be used, the system's printed circuit board is developed, with the intention of validating the studied model on the bench.

Keywords: Electric converters. Printed circuit board. PI controllers.

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica tem se mostrado cada vez mais relacionada com a qualidade de vida dos seres humanos, em vista que pode ser usada para diversos propósitos atualmente, como aquecimento, resfriamento, iluminação dentre outros (MOAN, 2007).

Como uma grande parte da geração de energia elétrica ainda é proveniente de combustíveis fósseis, diversos problemas ambientais tem se tornado evidentes devido à emissão de carbono no momento da combustão. Em

*  Departamento de Engenharia de computação;  gabrielgreguer@alunos.utfpr.edu.br.

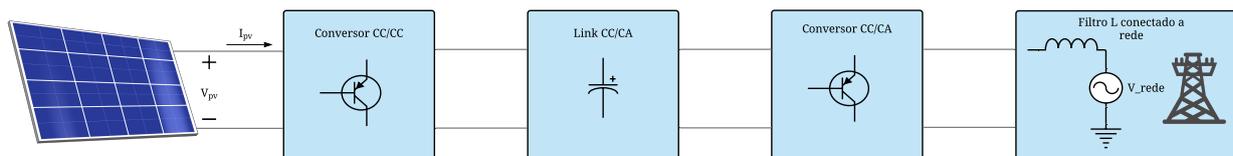
†  Coordenação de Engenharia de computação;  cassiusaguiar@utfpr.edu.br;  <https://orcid.org/0000-0002-5068-6587>.

(BODEN T. A. MARLAND, 2010) é feita uma análise ao longo de 160 anos da emissão deste tipo de poluente, os resultados tornam preocupante o futuro do meio ambiente frente a crescente demanda energética.

Com o aumento na emissão de gás poluente tem-se tornado comum a busca por soluções para geração de energia limpa no meio acadêmico partindo das mais diversas formas, como células a combustível (DE AGUIAR, 2016) e usinas eólica (M. GODOY SIMÕES N.N. FRANCESCHETTI, 1999). O Brasil por possuir um potencial de produção de energia renovável em seu território, órgãos como ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA) tem prestado apoio a iniciativa de geração a partir de fontes alternativas.

Estando clara a importância de opções que conduzem à redução do emprego de combustíveis fósseis, uma pergunta pode ser encaminhada. Como a energia gerada, a partir das fontes alternativas, pode ser processada de modo a atender consumidores locais e injetar e/ou absorver energia da rede? Neste contexto, este trabalho apresenta conversores eletrônicos do tipo CC/CC e CC/CA em conjunto com estágios de filtragem voltados para aplicação em sistemas de geração de energia renovável. A topologia proposta é demonstrada abaixo na Fig. 1 e tem o intuito de processar energia com baixa distorção harmônica para ser injetada na rede elétrica.

Figura 1 – Topologia proposta



Fonte – Autoria própria (2021).

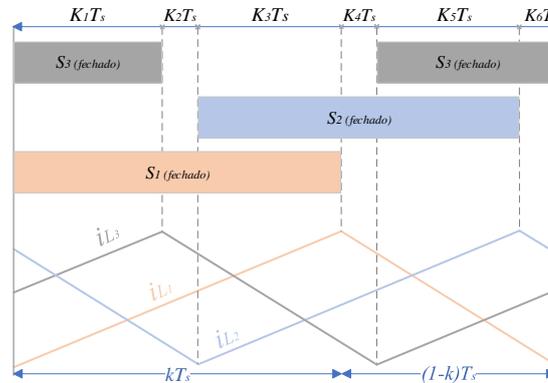
2 MÉTODO

Um problema recorrente da geração de energia renovável é a necessidade de adequar os níveis gerados em sua fonte primária como é o caso células fotovoltaicas, onde geralmente apresentam níveis bem abaixo dos necessários para utilizações futuras. Será utilizado nesse caso um conversor do tipo *boost interleaved* de três fases que além de ajustar o nível de tensão é adequado para o processamento de grande correntes, funcionando de modo em que toda a corrente de entrada seja dividida entre às três fases presentes, a aplicação de tal técnica se destaca da topologia clássica apresentando menor ondulação na corrente de entrada, resposta mais rápida a transientes e variações de carga.

Como o conversor fará o uso a técnica *interleaved* cada uma das fases opera defasada de 120° da anterior fazendo com que a dinâmica de chaveamento seja dada de acordo com a Fig. 2 onde se considera que kT_s é o tempo em que uma das chaves permanece fechada e $(1 - k)T_s$ o tempo em que uma das chaves permanece aberta existindo assim 6 subintervalos de chaveamento.

Dada a dinâmica de chaveamento é de interesse a obtenção do modelo do conversor para o projeto dos controladores que manterão o sistema estável. O modelo em espaço de estados e em pequenos sinais do conversor CC/CC é apresentado abaixo.

Figura 2 – Dinâmica de chaveamento com defasagem de 120°



Fonte – A autoria própria (2021).

Para a modelagem em espaço de estados são admitidos os vetores estados entrada e saída.

$$x = \begin{bmatrix} i_{L1} & i_{L2} & i_{L3} & V_{cin} & V_{cout} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$u = \begin{bmatrix} V_{eq} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$y = \begin{bmatrix} i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} & V_{cout} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

Considerando T_o o tempo de operação de cada intervalo e T_s o tempo total de chaveamento o modelo médio pode ser obtido pela multiplicação do operador médio de cada subintervalo (Eq. (4)) multiplicado pela matriz correspondente do intervalo. Como as matrizes \mathbf{B} obtidas no modelo em espaço de estados é invariante e a matriz \mathbf{D} é nula para todos os subintervalos o modelo médio pode ser representado de acordo com a Eq. (5).

$$k_i = \frac{T_o}{T_s} \quad (4)$$

$$\dot{x} = \sum_1^6 (\mathbf{A}_i k_i) x + \sum_1^6 (\mathbf{B}_i k_i) u = \sum_1^6 (\mathbf{A}_i k_i) x + \mathbf{B} u \quad (5)$$

De acordo com a Fig. 2 pode-se observar que $(1 - k)T_s$ é o período em que a chave permanece aberta, sendo k o ciclo de trabalho. Portanto pode-se definir $k_4 T_s + k_5 T_s + k_6 T_s = (1 - k)T_s$ quando a chave está aberta e $k_1 T_s + k_2 T_s + k_3 T_s = k T_s$ quando a chave está fechada. A partir do estudo do conversor defasado de 120° tem-se que $k_1 T_s + k_2 T_s = \frac{1}{3} T_s$, $k_3 T_s + k_4 T_s = \frac{1}{3} T_s$ e $k_5 T_s + k_6 T_s = \frac{1}{3} T_s$. Portanto, a equação que define o modelo médio do conversor *boost interleaved* de três fases é definido por (6).

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^6 \mathbf{A}_i k_i = k (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_3 - \mathbf{A}_4 + \mathbf{A}_5 - \mathbf{A}_6) + \frac{2}{3} (\mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_4 + \mathbf{A}_6) - \frac{1}{3} (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_3 + \mathbf{A}_5) \quad (6)$$

Um dispositivo como esse não pode ser representado fielmente somente pelo modelo médio, pois podem existir variações que tornem o sistema não linear. Para que o dispositivo opere da maneira desejada devemos



aplicar uma análise de pequenos sinais onde mínimas variações no sistema são consideradas. Ao serem inseridas as perturbações na entrada do sistema $\mathbf{u} = \mathbf{U} + \hat{\mathbf{u}}$, elas se propagam para o vetor de entrada $\mathbf{x} = \mathbf{X} + \hat{\mathbf{x}}$ e conseqüentemente para o vetor de saída $\mathbf{y} = \mathbf{Y} + \hat{\mathbf{y}}$ onde Y é o valor médio(CC) e $\hat{\mathbf{y}}$ o valor proveniente da perturbação(CA).

A representação em pequenos sinais resultante é exibida na Eq. (7).

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_n \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{F} \hat{k} \quad \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}} \quad (7)$$

As saídas de tensão e corrente podem ser expressas em (8) e (9) a partir do vetor de estados e a matriz de saída de tensão \mathbf{C}_v (10) e de corrente \mathbf{C}_i (11), lembrando que as matrizes \mathbf{D} são nulas.

$$\hat{v}_c = \mathbf{C}_v \hat{\mathbf{x}}(s) \quad (8)$$

$$\hat{i}_L = \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}(s) \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Aplicando a transformada de LaPlace em Eq. (7) e adotando as considerações acima obtêm-se as funções de transferência de tensão e corrente.

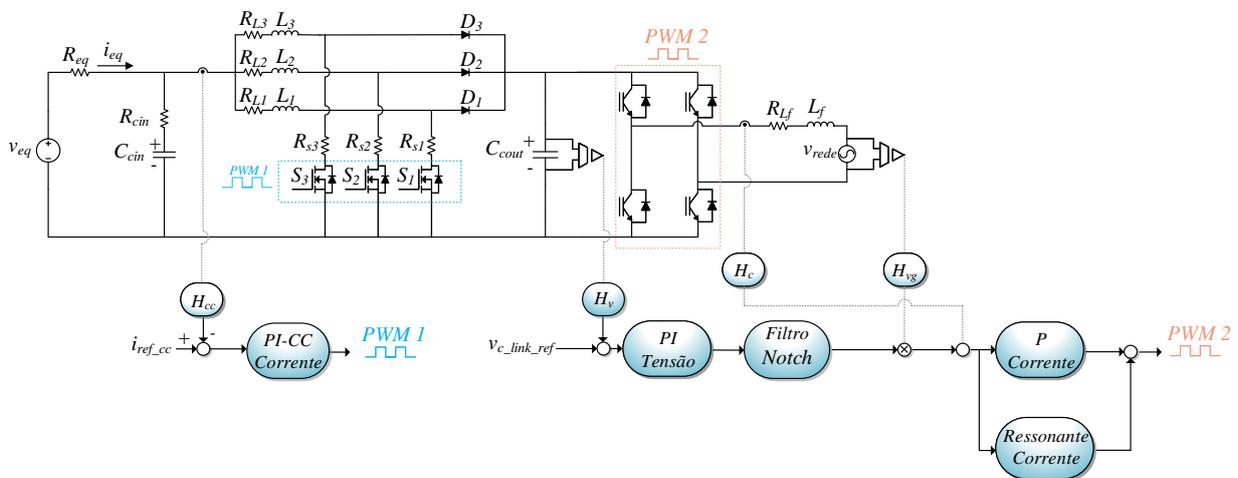
$$G_v(s) = \frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{k}(s)} = \mathbf{C}_v (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \quad (12)$$

$$G_i(s) = \frac{\hat{i}_{L1}(s) + \hat{i}_{L2}(s) + \hat{i}_{L3}(s)}{\hat{k}(s)} = \mathbf{C}_i (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{F} \quad (13)$$

Como é de interesse que a energia gerada seja injetada na rede se torna necessária a conversão do sinal CC que foi obtido e controlado em corrente alternada. Para tal fim é proposto no presente trabalho um inversor monofásico com chaveamento PWM unipolar devido a fácil implementação e resultado satisfatório de ondulação de corrente se utilizado com filtragem adequada. Com o tipo do chaveamento proposto apenas 3 níveis de tensão serão sintetizados na saída do inversor (-Vdc, 0, +Vdc) o que acaba ocasionando uma oscilação no dobro da frequência da rede. Para solucionar tal problema será utilizado um filtro notch em 120Hz em conjunto filtro ressonante na etapa controle de corrente a fim de dar um ganho na frequência estipulada na rede extraindo o máximo sinal possível. Uma amostra do sinal da rede é extraído com um ganho H_{vg} e utilizado na sincronização dos dois sinais para garantir que o fator de potência de mantenha alto.

A topologia completa com a planta de controle é demonstrada abaixo. Os sinais H_{cc} H_v H_c e H_{vg} são os ganhos obtidos a partir dos sensores de corrente no estágio CC, tensão do link CC, corrente no estágio CA, e amostra de sinal de tensão na rede respectivamente. São consideradas as resistências parasitas dos semicondutores e do capacitor de entrada para que o modelo se aproxime dos componentes reais.

Figura 3 – Topologia completa do conversor com malhas de controle

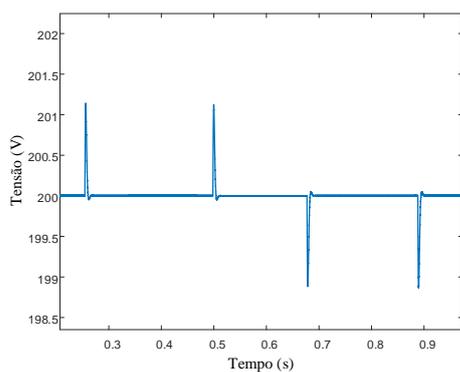


Fonte – A autoria própria (2021).

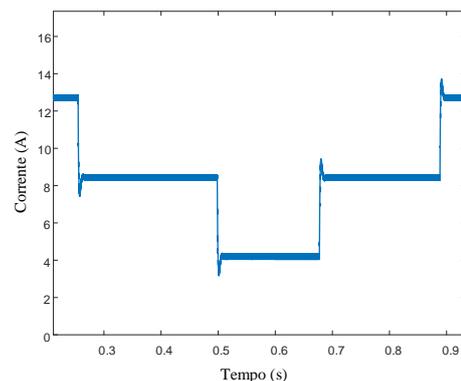
3 RESULTADOS

Os resultados dos controladores projetados para o estágio CC podem ser vistos na Fig. 4 onde degraus de carga de 1KW para 666W e de 666W para 333W são aplicados. Tanto o controle de tensão de saída como o de corrente de entrada se mostraram eficientes, O pico de tensão devido ao degrau fica em torno de 0.6%.

Figura 4 – Resposta ao degrau de carga do estágio CC



(a) Resposta ao degrau do controle de tensão.

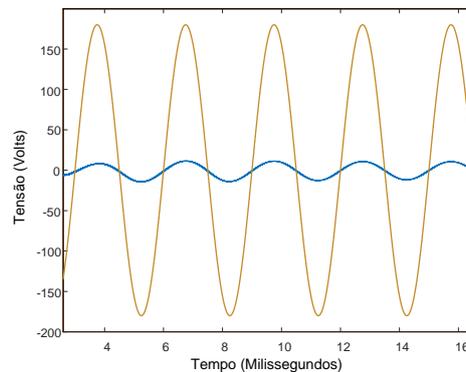


(b) Resposta ao degrau do controle de corrente.

Fonte – A autoria própria (2021).

O resultado em simulação da topologia proposta, assim como, dinâmica de controle projetada para o estágio CA é mostrada abaixo. O sinal de corrente a ser injetada na rede em fase com a tensão garante um alto fator de potência. A distorção harmônica fica em torno dos 3,9% e o fator de potência em 96,3% o que torna a injeção de corrente na rede possível dentro da norma ABNT NBR 16149:2013. A tensão estipulada para a saída do inversor é de 127 Volts RMS a 60 Hz como as utilizadas em aplicações residenciais no Brasil.

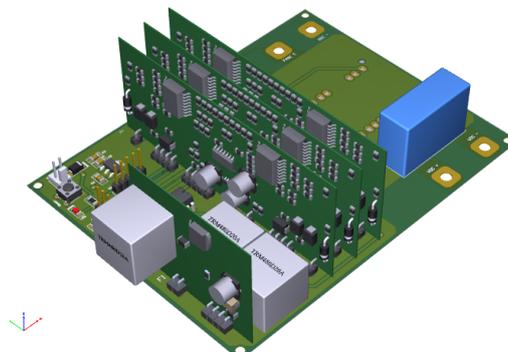
Figura 5 – Sinal de tensão da rede em laranja e corrente a ser injetada na rede em azul.



Fonte – Autoria própria (2021).

Para o desenvolvimento da placa de circuito de impresso optou-se por uma placa com semicondutores que pudessem atuar atuasse como inversor ou conversor do estágio CC. foram utilizados portanto os IGBTs SEMiX151GD066HDs que possuem 6 semicondutores que podem trabalhar com altas tensões de V_{ce} . A placa projetada é mostrada na figura abaixo.

Figura 6 – Placa de circuito impresso projetada.



Fonte – Autoria própria (2021).

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a construção de um sistema de conversores para o tratamento de energia proveniente de fontes renováveis. Os resultados obtidos em simulação comprovam a eficácia das topologias escolhidas. As principais características do projeto apresentado são a baixa distorção harmônica de corrente e elevado fator de potência que garantem a efetividade do sistema e a possibilidade de injeção de corrente na rede dentro dos parâmetros estipulados nas normas ABNT.



AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo auxílio prestado durante a execução do trabalho.

REFERÊNCIAS

- BODEN T. A. MARLAND, G. **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions**. [S.l.]: Oak Ridge National Laboratory., 2010.
- DE AGUIAR, Cassius Rossi. **Contribuição ao gerenciamento e controle de células a combustível e armazenadores de energia para a operação em geração distribuída**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2016.
- M. GODOY SIMÕES N.N. FRANCESCHETTI, Bimal K. Bose. **OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA ATRAVÉS DE CONTROLE FUZZY**. [S.l.: s.n.], 1999.
- MOAN, L. J.; SMITH. **Energy Use Worldwide: A Reference Handbook**. [S.l.]: ABC-CLIO, 2007.