

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE PROJETO PARA CONVERSORES BUCK *INTERLEAVED*

Renan R. Duarte

Pesquisador do curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria
renan.duarte@gedre.ufsm.br

Matheus M. Jacques

Pesquisador do curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria
matheus.jacques@gedre.ufsm.br

Adriano J. Bombardieri

Professor do curso de Engenharia Elétrica – Universidade de Santa Cruz do Sul
adrianobombardieri@unisc.br

Marco A. Dalla Costa

Professor do curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria
marcodc@gedre.ufsm.br

Resumo. Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto para conversores Buck *Interleaved* operados em modo de condução contínua (CCM). As equações apresentadas foram obtidas através da análise das etapas de operação de um conversor Buck genérico de n células. Resultados experimentais comprovam o funcionamento da metodologia desenvolvida.

Palavras-chave: Buck *Interleaved*. Projeto. Conversores *Interleaved*.

1. INTRODUÇÃO

Gradativamente, conversores de potência vêm sendo empregados nas mais variadas aplicações, exigindo valores cada vez maiores de potência sem perder confiabilidade e desempenho.

Conforme a demanda de corrente na saída desses conversores aumenta, pode-se expandir o número de conversores e/ou o número de células em um mesmo conversor operando em paralelo (MAO et al., 2007).

A conversão *interleaved* (ou intercalada) refere-se à interconexão de múltiplos conversores em paralelo para os quais a frequência de chaveamento é a mesma, mas os sinais de comando das chaves são defasados (BRAGA & BARBI,

2000). Essa topologia é utilizada em circuitos de correção de fator de potência (BELTRAME, 2009), aplicações de baixa tensão e alta corrente, como fontes de alimentação de computadores (RETEGUI et al., 2009), carros elétricos (NI et al., 2012) e energias renováveis (PADILHA, 2011).

A divisão da corrente entre as células de um conversor, ou entre conversores, possibilita a redução das perdas nos núcleos magnéticos e nos semicondutores, uma vez que o nível de corrente através desses é menor (WANG & CHUANG, 2006). Além disso, esta topologia possibilita a redução do capacitor necessário na saída do conversor devido à redução da ondulação (*ripple*) de corrente de saída (WANG & CHUANG, 2006).

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma metodologia de projeto para conversores Buck *interleaved* operando em modo de condução contínua (CCM), dimensionando os indutores e capacitores para uma aplicação de até n células.

Além disso, os conversores projetados devem ser implementados a fim de corroborar a teoria desenvolvida.

3. METODOLOGIA

Para o projeto do Buck *interleaved* parte-se do circuito genérico mostrado na Fig. 1.

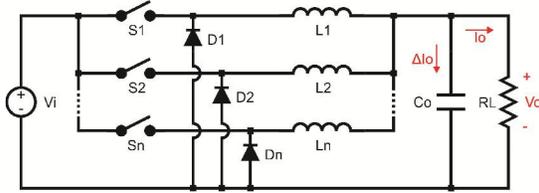


Figura 1 - *Interleaved* Buck genérico

No Buck convencional de 1 célula, o valor do indutor pode ser calculado em função da ondulação de corrente sobre ele (Eq. 1 para $n = 1 - \Delta I_L = \Delta I_o$). Já para o Buck de n células, define-se como parâmetro de projeto o *ripple* de corrente sobre o capacitor de saída (ΔI_o), que é a soma das ondulações de corrente de cada indutor.

Em um Buck de n células, o valor da indutância atinge seu máximo em $d = 1/(2 \cdot n)$, e é periódico em $1/n$ (Fig. 2). Assim, o valor dos indutores (mesmo valor para cada célula) é dado por:

$$L = \begin{cases} \frac{V_I \cdot d \cdot (1 - d \cdot n)}{\Delta I_o \cdot f} & \text{se } n = 1 \\ V_I \cdot d \cdot n \cdot \frac{\prod_{i=1}^n \left(\frac{i}{n} - d \right)}{\Delta I_o \cdot f \cdot \prod_{i=1}^{n-1} \left(\frac{i}{n} - d + \frac{1}{n} \right)} & \text{se } n \neq 1 \end{cases} \quad (1)$$

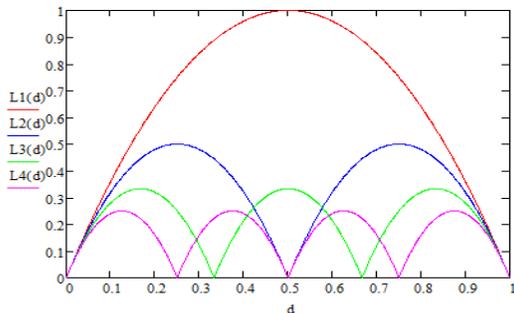


Figura 2 - Indutância normalizada em função da razão cíclica

Quanto ao capacitor de saída, o único parâmetro que se altera com o aumento do

número de células é a frequência da corrente sobre ele que é n vezes maior do que a frequência de chaveamento. Assim, pode-se calcular o capacitor de saída por:

$$C = \frac{\Delta I_o}{n \cdot 8 \cdot \Delta V_o \cdot f} \quad (2)$$

A única restrição ao aumento do número de células é a manutenção do modo de condução. Assim, para garantir que o conversor opere em CCM, deve-se calcular o valor da ondulação de corrente sobre cada indutor (Eq. 3) e garantir que esse valor não é maior do que o valor RMS da corrente em cada célula ($i_{\text{cell}} = i_o/n$).

$$\Delta I_L = \frac{V_I \cdot d \cdot (1 - d)}{L \cdot f} \quad (3)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento de protótipos

A fim de comprovar a metodologia de projeto desenvolvida e estabelecer uma comparação entre o conversor Buck convencional e o conversor *interleaved*, foram implementados dois protótipos de 35W, com uma e duas células, em CCM. Os parâmetros de projeto são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do projeto

Parâmetros	Valores
Tensão de entrada (V_i)	250 V
Tensão de saída (V_o)	85 V
Ripple máximo da tensão de saída (ΔV_o)	1 V
Corrente de saída (I_o)	0.415 A
Ripple máximo de corrente sobre o capacitor de saída (ΔI_o)	0.15 A
Frequência de chaveamento (f)	50 kHz

Como o objetivo do projeto é apenas demonstrar o funcionamento do conversor *interleaved*, optou-se pelo desenvolvimento em malha aberta. Porém, para assegurar que

haja a possibilidade de uma futura implementação em malha fechada, os componentes foram projetados para o pior cenário possível (máxima indutância) a fim de garantir a máxima excursão do valor da razão cíclica sem extrapolar os limites definidos no projeto, como as ondulações de tensão e corrente de saída.

4.2 Resultados experimentais

A Figura 3 mostra as formas de onda para a tensão e corrente na saída do conversor de uma célula. O valor eficaz da tensão de saída é 85.8 V e o da corrente 421 mA, resultado em uma potência de 36.1 W. O *ripple* de corrente sobre o capacitor de saída pode ser visto na Fig. 4. Pode-se observar que a ondulação apresenta um valor pico-a-pico menor do que o limite definido no projeto (150 mA) e uma frequência igual a de chaveamento.

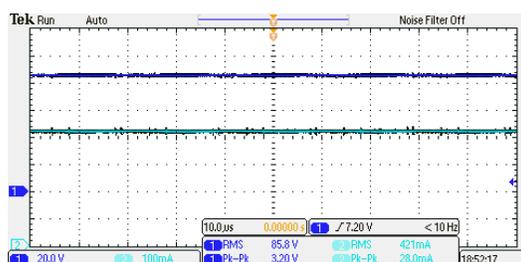


Figura 3 - Tensão e corrente na saída do conversor de uma célula (20V/div, 100mA/div, 10us/div)

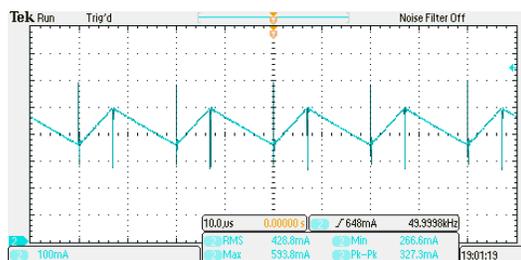


Figura 4 - Ondulação da corrente sobre o capacitor de saída (100mA/div, 10us/div)

Para o conversor Buck de duas células, as formas de onda da tensão e corrente na saída do conversor são mostradas na Fig. 5. Para esse conversor, a potência de saída atinge 35.7 W, com uma tensão eficaz de

85.9 V e uma corrente de 416 mA. A Figura 6 apresenta as correntes nos indutores do conversor e o *ripple* de corrente sobre o capacitor de saída. O desequilíbrio entre as correntes dos indutores se deve a operação em malha aberta do conversor, fenômeno que torna essencial uma malha de controle realimentada para correção do desequilíbrio e aumento do rendimento. É interessante ressaltar ainda, que a ondulação de corrente sobre o capacitor de saída apresenta um valor pico-a-pico semelhante a do conversor de uma célula, porém, com uma frequência duas vezes maior do que a de chaveamento, fato que torna possível a redução progressiva desse capacitor à medida que o número de células aumenta.

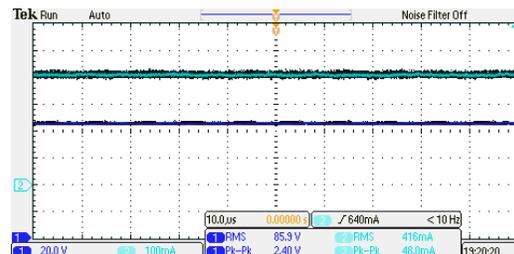


Figura 5 - Tensão e corrente na saída do conversor de duas células (20V/div, 100mA/div, 10us/div)

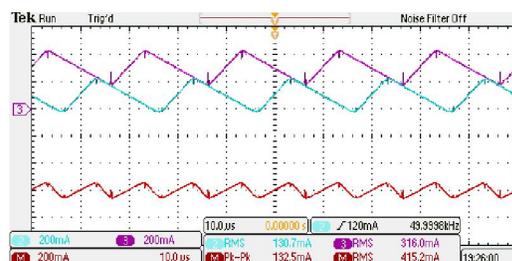


Figura 6 - Ondulação de corrente nos indutores (acima) e sobre o capacitor de saída (200 mA/div, 10us/div)

A título de comparação entre os conversores, avaliou-se o tamanho dos elementos magnéticos empregados e o rendimento. Apesar do valor das indutâncias para o conversor Buck de duas células ser metade do valor do Buck convencional, o volume dos magnéticos foi significativamente reduzido, devido principalmente à menor corrente em cada

um dos indutores. Para o conversor de uma célula, obteve-se um rendimento de 93%, enquanto que para o de duas, obteve-se 96%, o que pode ser explicado pelas menores perdas por efeito Joule nos elementos do circuito de duas células.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método de projeto dos componentes de conversores Buck *interleaved* de até n células com base nas características desejáveis do conversor.

A metodologia proposta foi testada através da implementação de conversores de uma e duas células, os quais comprovaram o desenvolvimento matemático e obtiveram desempenho satisfatório.

Portanto, sugere-se, para trabalhos futuros, a implementação dos mesmos circuitos em malha fechada, com o intuito de reduzir fatores indesejáveis, como o desequilíbrio das correntes nos indutores e maximizar o rendimento dos mesmos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELTRAME, F. **Análise Comparativa de Conversores Monofásicos Aplicados à Correção de Fator de Potência**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2009. 152 p.

BRAGA, H. A. C.; BARBI, I. **Conversores Estáticos Multiníveis – Uma Revisão**. **SBA Controle & Automação**. Campinas - SP, V.11, n.01, p. 20-28, 2000.

MAO, H. et al. Analysis of inductor current sharing in nonisolated and isolated multiphase DC-DC converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. V.54, n.6, p. 3379-3388, 2007.

NI, L.; PATTERSON, D. J.; HUDGINS, J. L. High Power Current Sensorless Bidirectional 16-Phase Interleaved DC-DC Converter for Hybrid Vehicle Application.

IEEE Transactions On Power Electronics. V.27, n.3, p. 1141-1151, 2012.

PADILHA, F. J. C. **Topologias de Conversores CC-CC Não Isolados Com Saídas Simétricas Para Sistemas Fotovoltaicos**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2011. 175 p.

RETEGUI, R. G. et al. FPGA-based Modulator for Multi-phase Interleaved DC/DC Converters. **Proceedings of the Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications 2009**: 21-35. 2009.

WANG, J. B.; CHUANG, S. A study of the interleaved buck derived converters. **IEEE International Conference on Industrial Technology**, ICIT 2006. 2006.