

CONVERSOR CC-CC BOOST COM CÉLULA LCL E CAPACITOR CHAVEADO

ZITO PALHANO DA FONSECA¹ e ROGER GULES²

¹Dr. em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, UEPG, Ponta Grossa-PR, zpfonseca@uepg.br;

²Dr. em Engenharia Elétrica, UTFPR, Curitiba-PR, rgules@utfpr.edu.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Este trabalho apresenta um conversor CC-CC *boost* com célula LCL (indutor-capacitor-indutor), também conhecida na literatura como *voltage lift*, juntamente com a técnica capacitor chaveado operando em MCC (Modo de Condução Contínua), objetivando elevar o ganho estático do conversor. O conversor estágio *voltage lift*, introduz apenas dois diodos, um indutor e um capacitor a mais quando comparado ao *boost* clássico e possui a característica de dobrar o ganho estático mesmo utilizando apenas um interruptor eletrônico. Utilizar o conceito capacitor chaveado eleva ainda mais o ganho estático, assim dando característica de elevado ganho estático, com poucos componentes e sem a utilização de transformador. O artigo apresenta resultados de simulação numérica para um conversor operando com 37,5 V de tensão de entrada, 200 V de tensão de saída, frequência de comutação de 75 kHz e potência nominal de 200 W.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor CC-CC, elevado ganho, capacitor chaveado, célula LCL.

DC-DC BOOST CONVERTER WITH LCL CELL AND SWITCHED CAPACITOR

ABSTRACT: This work presents a DC-DC boost converter with an LCL cell (inductor-capacitor-inductor), also known in the literature as voltage lift, together with the switched capacitor technique operating in CCM (Continuous Conduction Mode), aiming to increase the static gain of the converter. The voltage lift stage converter introduces only two diodes, an inductor and an extra capacitor when compared to the classic boost and has the characteristic of doubling the static gain even using only one electronic switch. Using the switched capacitor concept further increases the static gain, thus giving a characteristic of high static gain, with few components and without the use of a transformer. The article presents numerical simulation results for a converter operating with 37.5 V input voltage, 200 V output voltage, switching frequency of 75 kHz and nominal power of 200 W.

KEYWORDS: DC-DC converter, high gain, switched capacitor, LCL cell.

INTRODUÇÃO

Conversores CC-CC clássicos não são uma opção viável para aplicações de elevado ganho estático, devido suas limitações de resistências intrínsecas de seus componentes, que afetam o ganho estático e rendimento final, uma vez que o ganho estático não é ideal.

A elevação de ganho estático geralmente é feita através de transformadores isoladores, mas a utilização de uma relação de transformação muito elevada, reduz o fator de acoplamento e por consequência eleva sua indutância de dispersão (Cougo e Kolar, 2012).

Conversores não isolados para elevar o ganho estático utilizam técnicas de indutores acoplados, indutores chaveados e capacitores chaveados. Ao se utilizar indutores acoplados as mesmas limitações de utilização de transformador são aplicadas (Vázquez et al, 2015). O uso de indutores chaveados tem como limitação de as características construtivas dos indutores serem similares, para garantir valores de indutâncias iguais, caso seus valores não sejam perfeitamente iguais pode acarretar sobretensões nos semicondutores (Schmitz et al, 2020). As células de capacitores chaveados utilizam muitos componentes para se obter elevada tensão de saída (Tang et al, 2015).

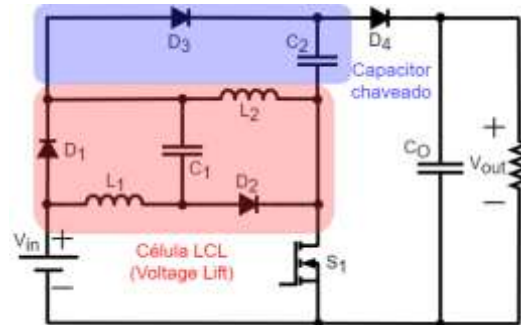
A utilização da célula *voltage lift* não apresenta característica de indutor chaveado e não utiliza o acoplamento dos indutores, desta forma não necessitando que suas indutâncias sejam exatamente iguais e elevação de sua indutância de dispersão. Ao se inserir o capacitor chaveado nesta estrutura a limitação de utilização de vários componentes é vencida e desta forma se tornando uma opção viável para se elevar o ganho estático.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um conversor CC-CC de elevado ganho de tensão, aplicando o conceito de capacitor chaveado ao conversor *Boost voltage lift*. O conversor proposto tem a vantagem de possuir um único interruptor controlado, o que reduz a complexidade e o custo.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a topologia proposta, esta estrutura possui características de funcionamento que elevam o ganho estático do conversor *Boost voltage lift* convencional, podendo assim operar com tensões de saída mais elevadas. Normalmente é utilizado um diodo na posição do capacitor C_1 , no entanto o capacitor C_1 nesta posição reduz as perdas por condução. O conversor *Boost voltage lift* convencional não apresenta o diodo D_3 e capacitor C_2 , esta combinação tem característica de capacitor chaveado e faz com que a tensão de entrada seja somada a tensão de saída.

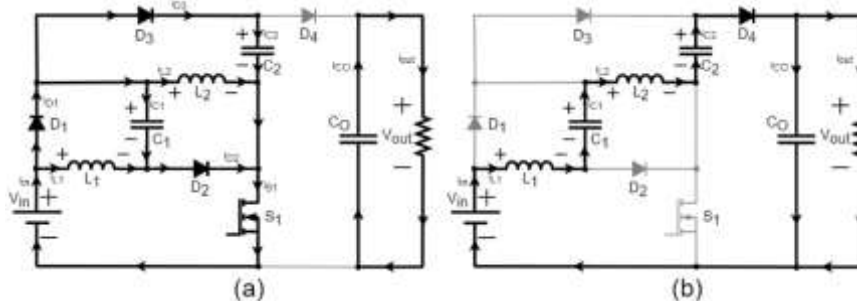
Figura 1. Topologia proposta.



Primeira etapa de operação ($t_0 - t_1$): Na primeira etapa o interruptor S_1 e os diodos D_1 , D_2 e D_3 conduzem, as correntes dos indutores L_1 e L_2 crescem linearmente, os capacitores C_1 e C_2 armazenam a tensão de entrada V_{in} . O diodo D_4 está bloqueado, com isto, a carga é alimentada pelo capacitor de saída C_0 . A primeira etapa de operação é apresentada na Figura 2a.

Segunda etapa de operação ($t_1 - t_2$): A segunda etapa de operação ocorre quando o interruptor S_1 é comandado a bloquear, o diodo D_4 entra em condução enquanto os diodos D_1 , D_2 e D_3 estão bloqueados. Durante esta etapa as correntes dos indutores L_1 e L_2 decrescem linearmente. O circuito equivalente desta etapa é apresentado na Figura 2b.

Figura 2. Etapas de operação: (a) primeira etapa de operação, (b) segunda etapa de operação.



MODELO MATEMÁTICO DO CONVERSOR

Considerando a análise do conversor no modo de condução contínuo, para a análise do conversor foram assumidas as seguintes considerações:

- O conversor opera em regime permanente;
- Os capacitores C_0 , C_1 e C_2 são suficientemente grandes para que as tensões sejam consideradas constantes;
- As tensões de entrada V_{in} e saída V_{out} são constantes;

Ganho Estático do Conversor

A definição do ganho estático é realizada a partir das equações nos indutores, onde pode-se escrever que o valor médio das tensões em L_1 e L_2 é nulo, uma vez que o conversor opera em regime permanente. Como L_1 e L_2 possuem valores iguais, então, analisando as etapas de operação, obtêm-se para L_1 :

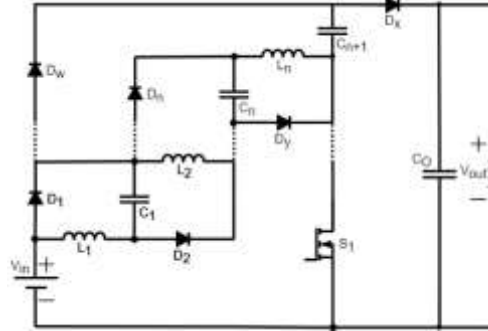
$$V_{IN}D + \left(\frac{3V_{IN} - V_{out}}{2}\right)(1 - D) = 0 \quad (1)$$

Para definir o ganho estático M , utiliza-se a equação (1). Desta forma obtêm-se a equação (2).

$$M = \frac{V_{out}}{V_{IN}} = \frac{(3 - D)}{(1 - D)} \quad (2)$$

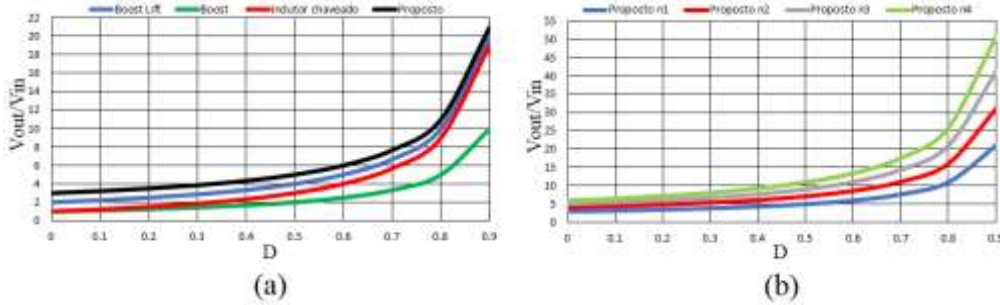
O conversor proposto pode operar com n células *voltage lift*, assim como é apresentado na Figura 3. Desta forma aumentando seu ganho estático.

Figura 3. Conversor proposto com n células de *voltage lift*.



A Figura 4a apresenta o ganho estático do conversor proposto para diferentes valores de razão cíclica e comparasse com os ganhos dos conversores *Boost*, *Boost Voltage Lift* sem capacitor chaveado e topologia *Boost* com indutor chaveado. Observa-se que o ganho estático do conversor proposto é maior do que o ganho dos conversores comparados para qualquer valor de razão cíclica. A Figura 4b apresenta a curva de razão cíclica para o conversor proposto operando com n células *voltage lift*.

Figura 4. Ganho estático: (a) Conversor proposto, (b) Conversor proposto com n células de *voltage lift*.



Projeto dos Indutores do Conversor

Os indutores são dimensionados pelo critério de ondulação de corrente. Analisando-se a primeira etapa de operação, obtêm-se:

$$L_1 = L_2 = \frac{V_{IN}D}{\Delta i_L f_S} \quad (3)$$

Projeto dos Capacitores do Conversor

O capacitor de saída é dimensionado pelo critério de ondulação de tensão. Ao se analisar uma das etapas de operação, encontra-se as seguintes equações de projeto:

$$C_0 = \frac{V_{out}D}{R\Delta v_{out}f_S} \quad (4)$$

A capacitância da célula capacitor chaveado é especificada a partir do modo de operação desejado. Existem três modos diferentes de operação: completo carga, carga parcial e nenhuma carga (da Silva, 2018). No modo de carga completa, a corrente no capacitor apresenta altos valores de pico, desta forma elevando as perdas de condução nos semicondutores. No modo sem carga, a corrente no capacitor não apresenta nenhum pico de corrente, mas altas capacitâncias são necessárias. Por essas condições, a modalidade que proporciona o maior custo/benefício é o modo de carga parcial. O limite entre a carga parcial e o modo sem carga ocorre 1,44 (da Silva, 2018). Assim, a capacitância máxima pode ser calculada por (5).

$$C_1 = C_2 \leq \frac{1,44}{(r_{on} + r_c)f_S} \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conversor foi projetado para operar com as especificações de projeto apresentadas na Tabela 1. Observa-se que para atender as especificações de projeto, o conversor deverá operar com um ganho igual a 5,33. Aplicando-se as especificações de projeto nas equações de projeto do conversor, apresenta-se na Tabela 2 os valores dos componentes armazenadores de energia. O conversor deve operar com um valor nominal da razão cíclica igual a 0,538.

A Figura 5a apresenta as formas de onda da tensão de entrada e de saída do conversor, sendo o valor médio da tensão de saída igual a 200 (V). Na Figura 5b pode-se observar a corrente de entrada e de saída do conversor, onde verifica-se que a corrente média de saída é de 1(A) e a corrente de entrada apresenta característica pulsada. Portanto, o conversor processa uma potência igual a 200 (W).

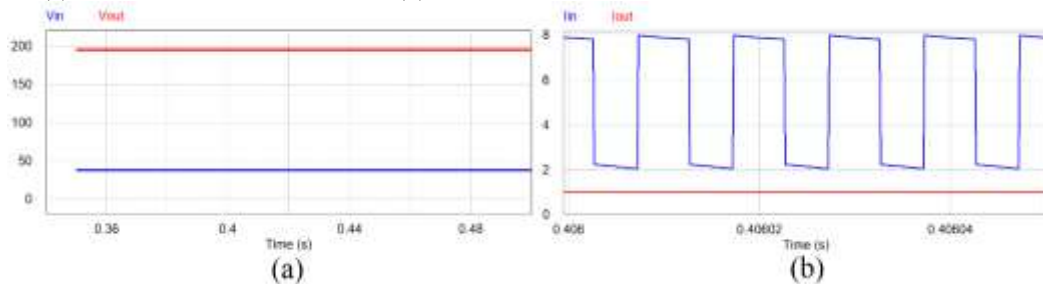
Tabela 1. Especificações de projeto

Especificações	Valor
Tensão de entrada (V_{in})	37,5V
Tensão de saída (V_{out})	200V
Potência de saída (P_{out})	200W
Frequência de chaveamento (f_s)	75kHz
Ondulação de tensão no capacitor C_0 (Δv_{out})	1%
Ondulação de corrente nos indutores L_1 e L_2 (ΔI_L)	10%
Resistência do interruptor (r_{on})	45m Ω
Resistência dos capacitores ($r_{c1}= r_{c2}$)	5m Ω

Tabela 2. Componentes

Componente	Valor
Indutores L_1 e L_2	1mH
Capacitores C_1 e C_2	100 μ F
Capacitor C_0	10 μ F
Carga (R)	200 Ω

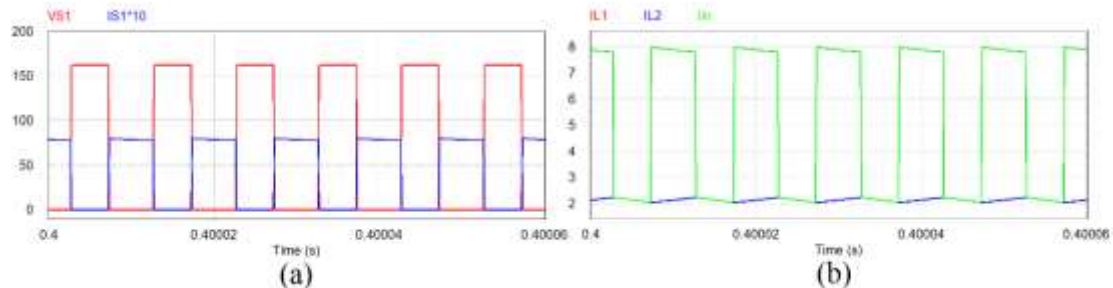
Figura 5. (a) Tensão de entrada e de saída, (b) Corrente de entrada e de saída.



A Figura 6a apresenta a tensão e corrente sobre o interruptor S_1 , observa-se que a tensão máxima sobre o interruptor é menor que a tensão de saída. Na Figura 6b pode-se observar a corrente de entrada e a corrente sobre os indutores L_1 e L_2 , observasse que o valor médio sobre os indutores é de 2,13 (A).

A Figura 7a apresenta as correntes sobre o interruptor S_1 e diodos D_1 , D_2 e D_3 , observa-se que as correntes sobre os diodos apresentam valores distintos, uma vez que as correntes se dividem durante a primeira etapa de operação. Na Figura 7b pode-se observar as tensões sobre o interruptor S_1 , diodos D_1 , D_2 , D_3 e tensão de entrada V_{in} .

Figura 6. (a) Tensão e corrente sobre o interruptor S_1 , (b) Tensões sobre o interruptor S_1 , diodos D_1 , D_2 , D_3 e tensão de entrada V_{in} .



A Figura 8a apresenta as tensões sobre L_1 , L_2 , C_1 , C_2 e tensão de entrada V_{in} , pode-se observar que a tensão nos indutores e capacitores possuem valores iguais a tensão de entrada. Na Figura 8b pode-se observar as correntes nos capacitores C_1 e C_2 , através desta figura pode-se verificar que a corrente sobre estes capacitores chaveados apresentam característica de carga parcial.

Na Tabela 3 apresenta-se uma análise comparativa do conversor proposto com outros dois conversores de elevado ganho e com o conversor *Boost* convencional. Todos os conversores têm as características comuns de serem do tipo *Boost*. Quando comparado aos conversores da Tabela 3, observa-se que o conversor proposto

apresenta um maior número de componentes. Porém, este pode operar com ganhos estáticos mais elevados. O conversor proposto também apresenta máxima tensão no interruptor reduzida em comparação as estruturas convencionais.

Figura 7. (a) Correntes sobre o interruptor S_1 e diodos D_1 , D_2 e D_3 , (b) Corrente de entrada e sobre os indutores L_1 e L_2 .

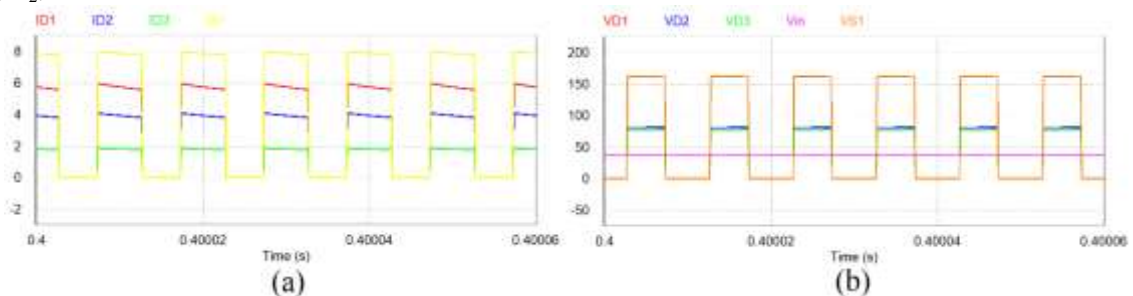


Figura 8. (a) Tensão de entrada V_{in} , tensão sobre L_1 , L_2 , C_1 e C_2 , (b) Corrente sobre os capacitores C_1 e C_2 .

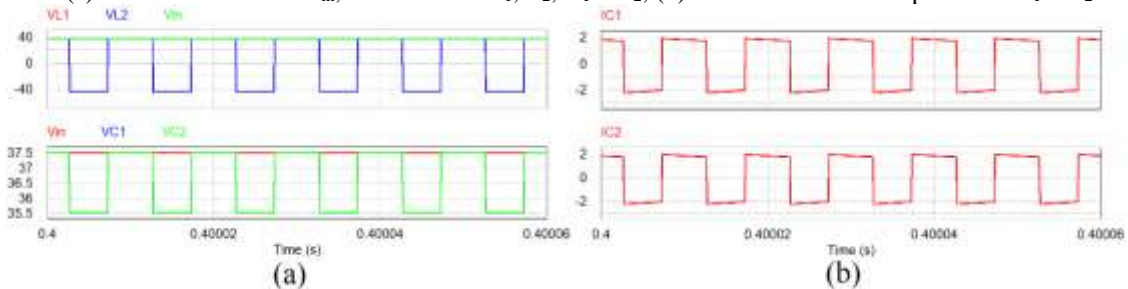


Tabela 3. Análise comparativa

Característica	Boost	Indutor Chaveado	Boost Voltage Lift	Proposto
Ganho estático	1	$1 + D$	2	$3 - D$
Máxima Tensão nos interruptores	$\frac{V_{in}}{1 - D}$	$\frac{V_{in}}{1 - D}$	$\frac{2V_{in}}{1 - D}$	$\frac{2V_{in}}{1 - D}$
Transistores	1	2	1	1
Capacitores	1	1	2	3
Indutores	1	2	2	2
Diodos	1	1	3	4
Corrente de entrada	Continua	Pulsada	Pulsada	Pulsada

CONCLUSÃO

O trabalho propõe um conversor CC-CC *Boost voltage lift* com célula de capacitor chaveado de elevado ganho estático. Apresenta-se a análise estática do conversor, as equações de projeto dos elementos armazenadores de energia e resultados de simulação numérica. Os resultados de simulação numérica mostram que o conversor pode operar com elevado ganho de tensão. A solução apresentada tem a vantagem possuir elevado ganho estático, máxima tensão sobre o interruptor menor que a tensão de saída e um único interruptor controlado. Como desvantagem, tem-se um aumento no número de componentes.

REFERÊNCIAS

- Cougo, B. e Kolar, J.W.. Integration of leakage inductance in tape wound core transformers for dual active bridge converters. In 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2012
- da Silva, R.L., Lazzarin, T.B., Barbi, I.: 'Reduced switch count step-up/stepdown switched-capacitor three-phase AC-AC converter', IEEE Trans. Ind. Electron., (2018),
- Schmitz, L., Martins, D.C., e Coelho, R.F. Comprehensive conception of high step-up dc-dc converters with coupled inductor and voltage multipliers techniques. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, (2020)
- Tang, Y., Wang, T., and Fu, D. Multicell switched-inductor/switched-capacitor combined active network converters. IEEE Transactions on Power Electronics, (2014).
- Vázquez, N., Medina, F., Hernandez, C., Arau, J., e Vázquez, E. Double tapped-inductor boost converter. IET Power Electronics, 8(5), (2015).