

Análise e implementação de um conversor CC-CC de três níveis com saída em tensão

Analysis and implementation of a three level DC-DC converter with capacitive output filter

RESUMO

Matheus Tauffer de Paula
matheusp.2016@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Eloi Agostini Junior
eloiaagostini@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

O presente trabalho objetiva a apresentação da análise estática de um conversor CC-CC de três níveis com tensão de saída imposta, e a realização de um projeto de 1 kW desse conversor. O conversor proposto é uma topologia vantajosa para processamento de energia elétrica a partir de fontes de elevada tensão, pois submete os interruptores a apenas metade da tensão de entrada. A metodologia de análise adotada consiste na descrição das etapas de operação do conversor e em seu equacionamento para a obtenção das principais equações de projeto. Após a realização do projeto, o conversor é simulado, e a comparação entre os resultados teóricos e simulados obtidos é realizada, permitindo a validação da análise desenvolvida.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrônica de potência. Energia elétrica. Transistores de potência.

ABSTRACT

This paper aims to present the static analysis of a three level DC-DC converter with capacitive output filter, and to carry out a design of a 1 kW converter. The proposed converter is an advantageous topology to process electrical energy from high voltage sources, because the voltage across switches is half the input voltage. The adopted analysis methodology consists in a explanation of the operating stages of the converter and in its mathematical description, to obtain the main equations for the project. Once the project is finalized, it is simulated, and the comparison between the theoretical and simulated results is performed, allowing the validation of the presented analysis.

KEYWORDS: Power electronics. Electrical energy. Power transistors.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

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



INTRODUÇÃO

As limitações operacionais apresentadas pelos dispositivos semicondutores amplamente utilizados em Eletrônica de Potência constituem um desafio para a indústria, que busca continuamente expandir esses limites através de novos materiais e/ou tecnologias. Porém, novos dispositivos possuem elevados custos e não estão amplamente disponíveis no mercado.

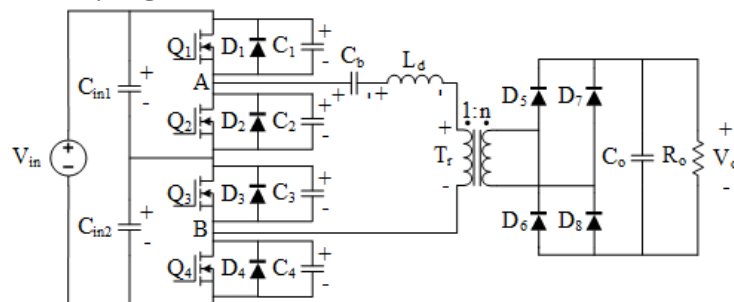
Os esforços nos dispositivos são resultados da topologia do conversor empregado. Segundo Barbi e Pinheiro (1992), para o processamento de elevadas potências é muito utilizado o conversor CC-CC ponte completa ZVS-PWM, porém, esse conversor submete os interruptores a uma tensão igual ao valor da fonte de entrada, limitando seu uso em aplicações de elevada tensão de entrada.

Barbi e Pinheiro (1992) propõem um conversor capaz de processar altas potências e submeter os interruptores a apenas a metade da tensão de entrada. O presente trabalho visa a apresentação e análise de um conversor semelhante ao proposto por Barbi e Pinheiro (1992), com o diferencial de operar com tensão de saída imposta. Como exemplo de aplicações pode-se citar as microredes CC.

MATERIAIS E MÉTODOS

A topologia do conversor proposto para a análise está apresentada na Figura 1. O conversor opera com comutação suave do tipo ZVS (*Zero-Voltage-Switching*), em que a comutação dos interruptores ocorre sob tensão nula. A presença do transformador proporciona isolamento galvânica e permite atuar no ganho estático, de modo que é possível operar o conversor com a razão cíclica que resulte no máximo rendimento.

Figura 1 – Topologia do conversor três níveis ZVS-PWM com saída em tensão



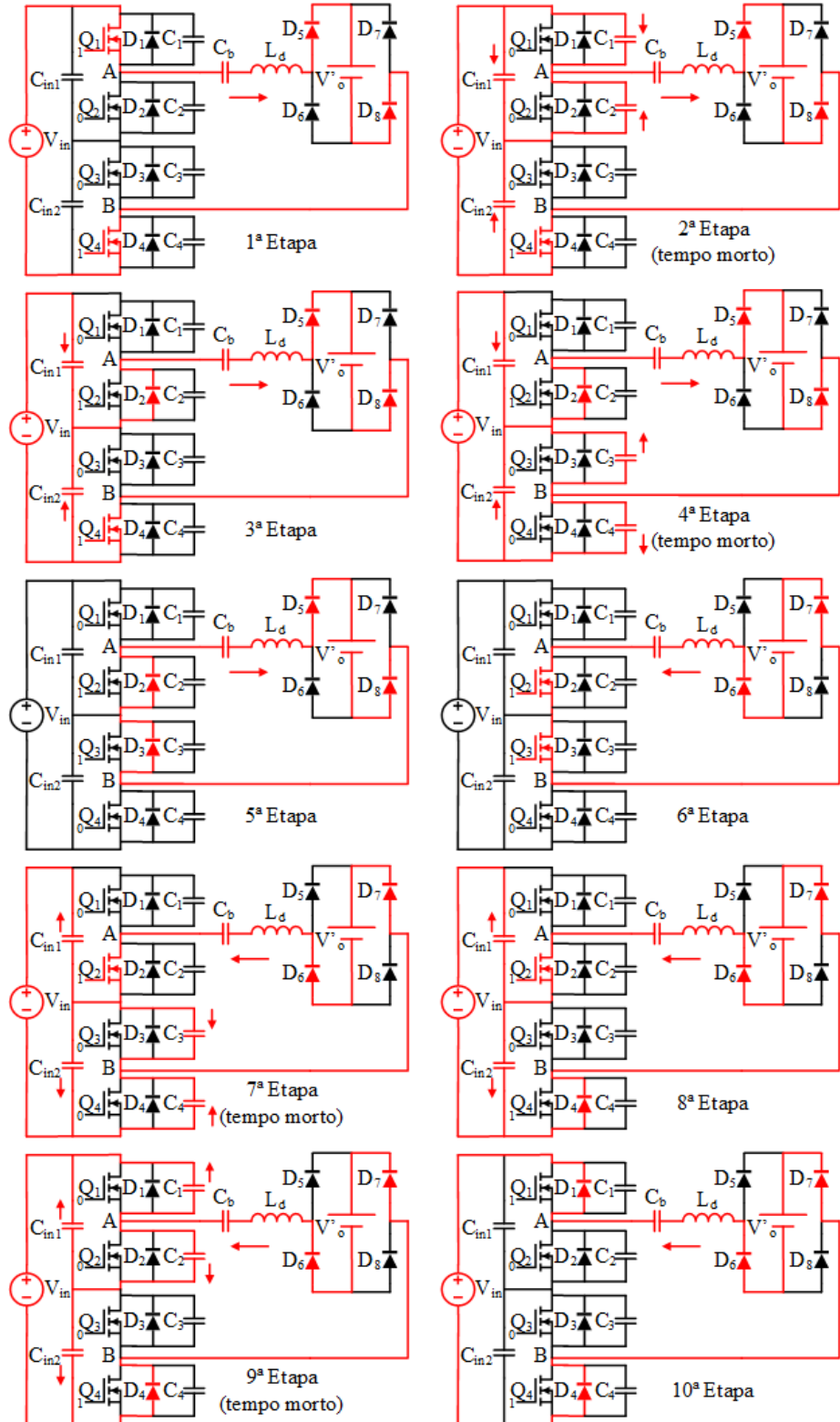
Fonte: Autoria própria (2020).

A metodologia de análise é segmentada em análise qualitativa e quantitativa. Na parte qualitativa são apresentadas as 10 etapas de operação para o modo de condução contínua (MCC), e na análise quantitativa é realizado o equacionamento, e em seguida, apresentadas as principais equações de projeto. A operação também poderia ocorrer em modo de condução descontínua (MCD) resultando em 8 etapas de operação, ou em modo de condução crítica (MCCr) mas esses modos não são apresentados no presente trabalho.

Para a análise assumem-se as seguintes hipóteses simplificativas: o conversor opera em regime permanente, a tensão de saída é imposta pelo capacitor C_o , não há ondulação de tensão nos capacitores do barramento (C_{in1} e C_{in2}) e no capacitor

de bloqueio (C_b). A Figura 2 mostra os estados topológicos assumidos pelo conversor. Apenas para fins de análise o transformador foi eliminado do circuito e R_o e C_o foram substituídos por uma fonte de tensão constante (V'_o).

Figura 2 – Estados topológicos para as 10 etapas para operação no CCM



Fonte: Autoria própria (2020).

A 1ª etapa de operação inicia-se com a inversão da corrente em L_d . Durante essa etapa ocorre o crescimento linear da corrente nessa indutância e a tensão entre os pontos A e B é igual a V_{in} . A etapa finaliza quando Q_1 é bloqueado.

Com o bloqueio de Q_1 dá-se início à 2ª etapa, na qual C_1 é carregado e C_2 é descarregado e ao final da etapa a tensão entre os pontos A e B é igual a $V_{in}/2$. O final da etapa ocorre quando C_2 é completamente descarregado e permite a condução de D_2 .

Na 3ª etapa, Q_2 é comandado a conduzir, mas devido ao sentido da corrente em L_d , essa flui através de D_2 . A tensão entre os pontos A e B é igual a $V_{in}/2$ durante toda a etapa. O final da etapa ocorre devido ao bloqueio de Q_4 .

Durante a 4ª etapa, C_3 é descarregado e C_4 é carregado. Ao final da etapa, C_3 está completamente descarregado e a tensão entre os pontos A e B é nula.

Na 5ª etapa é dado o comando de condução para Q_3 mas devido ao sentido da corrente em L_d , a condução ocorre através de D_3 . Durante toda a etapa a tensão entre os pontos A e B é nula. A 5ª etapa é findada no instante em que a corrente em L_d se anular.

Com a inversão de corrente em L_d dá-se início a 6ª etapa de operação. Nessa etapa, a corrente de L_d flui através de Q_2 e Q_3 , os diodos D_6 e D_7 da ponte entram em condução e D_5 e D_8 bloqueiam. A tensão entre os pontos A e B é nula durante toda a etapa. Ao final da etapa a corrente em L_d atinge seu máximo negativo. A etapa termina quando Q_3 é comandado a bloquear.

Na 7ª etapa com Q_3 bloqueado, ocorre a carga de C_3 e a descarga de C_4 . A tensão entre os pontos A e B ao final da etapa é igual a $V_{in}/2$. A etapa termina quando C_4 estiver completamente descarregado.

Na 8ª etapa é dado o comando para Q_4 entrar em condução, mas devido ao sentido da corrente em L_d a condução ocorre através de D_4 . Por toda a duração da etapa, a tensão entre os pontos A e B é igual a $V_{in}/2$. O fim da 8ª etapa ocorre com o bloqueio de Q_2 .

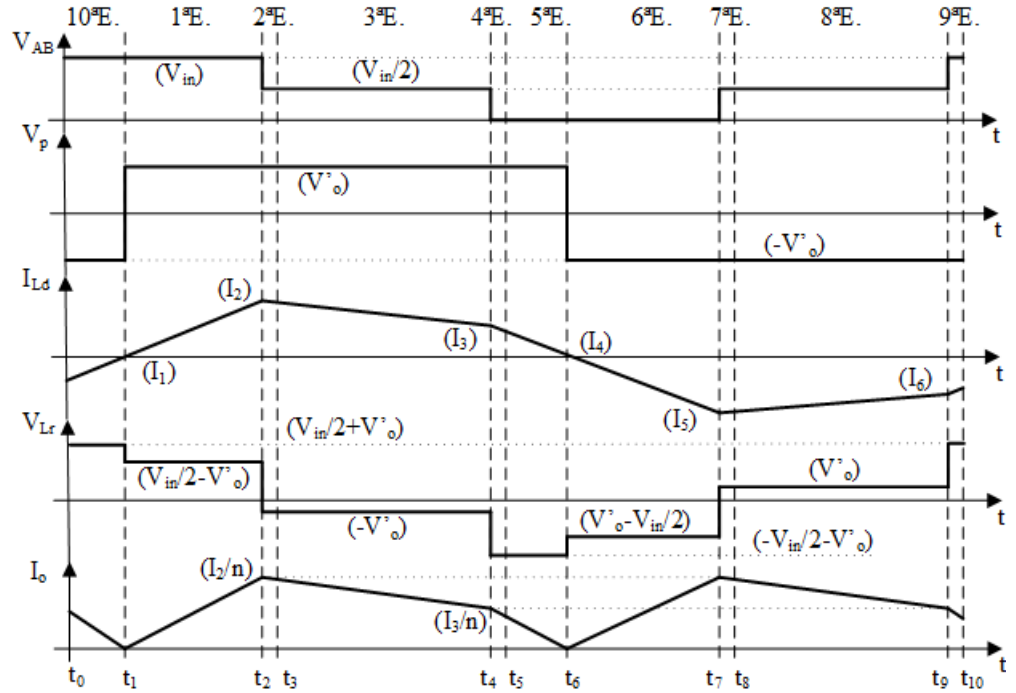
No instante de bloqueio de Q_2 dá-se início a 9ª etapa de operação. Nessa etapa, ocorre a descarga de C_1 e a carga de C_2 . A tensão entre os pontos A e B ao fim da etapa é igual a V_{in} . A etapa termina quando ocorre a descarga completa de C_1 possibilitando a entrada de D_1 em condução.

Na 10ª etapa de operação é aplicado o comando para a condução de Q_1 , porém, devido ao sentido da corrente em L_d a condução ocorre através de D_1 . A tensão entre os pontos A e B durante toda essa etapa é igual a V_{in} . A etapa é findada quando a corrente em L_d se anular, bloqueando D_1 , D_2 , D_6 e D_7 , e colocando em condução os diodos D_5 e D_8 .

A Figura 3 apresenta as principais formas de onda de tensão e de corrente importantes para análise da operação do conversor para o MCC.

Aproveitando a simetria entre a primeira metade do ciclo de comutação com a segunda metade devido a corrente imposta na saída, considera-se o período $T_s/2$ para realizar a modulação dos interruptores. A estratégia de modulação adotada consiste em comandar Q_1 e Q_3 com pulsos com duração proporcional a razão cíclica (D), porém, defasados em 180° . Q_2 e Q_4 são complementares a Q_1 e Q_3 .

Figura 3 – Principais formas de onda para o conversor no CCM



Fonte: Autoria própria (2020).

A seguir serão apresentadas as equações obtidas na análise qualitativa, para isso analisou-se os estados topológicos e as formas de ondas. Devido à curta duração dos intervalos de tempo morto, esses são desconsiderados na análise quantitativa. As Eq. (1), (2) e (3) permitem determinar a duração de cada etapa.

$$\Delta t_{4-3} = \Delta t_{9-8} = \frac{(1-D)}{2} T_S \quad (1)$$

$$\Delta t_{6-5} = \Delta t_{1-0} = \frac{(D-2q)}{4} T_S \quad (2)$$

$$\Delta t_{7-6} = \Delta t_{2-1} = \frac{(D+2q)}{4} T_S \quad (3)$$

$$q = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{nV_{in}} \quad (4)$$

Com a duração de cada etapa determinada é possível obter a magnitude de I_2 e I_3 . As Eq. (5) e (6) fornecem o valor dessas duas correntes, respectivamente.

$$I_2 = \frac{V_{in}}{8L_d f_S} (1 - 2q)(D + 2q) \quad (5)$$

$$I_3 = \frac{V_{in}}{8L_d f_S} (1 + 2q)(D - 2q) \quad (6)$$

Os elementos armazenadores de energia do conversor são determinados através das Eq. (7), (8), (9) e (10).

$$L_d = \frac{V_{in}(2D-D^2-4q^2)}{16nI_o m d f_S} \quad (7)$$

$$C_b = \frac{V_{in}(2D-D^2-4q^2)}{32\Delta V_{Cb} L_d f_S^2} \quad (8)$$

$$C_{in1} = C_{in2} = \frac{V_{in}(1-D)(D-4q^2)}{32\Delta V_{Cin} L_d f_S^2} \quad (9)$$

$$C_o = \frac{V_{in}}{512n\Delta V_{Co}L_d f_s^2} \frac{[D^2 - 4q^2 + 4(1-D)q]^2}{q(1-2q)} \quad (10)$$

A Tabela 1 apresenta as especificações para o projeto do conversor. O projeto é realizado através das equações anteriormente apresentadas.

Tabela 1 – Especificações de projeto do conversor

Especificação	Valor
Potência nominal de saída (P_o)	1 kW
Tensão de entrada (V_{in})	400 V
Tensão de saída (V_o)	50 V
Frequência de comutação	50 kHz
Ganho estático (q)	0,18
Razão cíclica (D)	0,5
Ondulação de tensão no barramento (ΔV_{Cin})	4 V
Ondulação de tensão em C_b (ΔV_{Cb})	2 V
Ondulação da tensão de saída (ΔV_{Co})	2 V

Fonte: Autoria própria (2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação do desenvolvimento teórico realizou-se a simulação numérica do conversor no *software* PSIM®. Os resultados teóricos e simulados são apresentados na Tabela 2 juntamente com o erro relativo para cada grandeza.

Tabela 2 – Resultado teórico e simulado

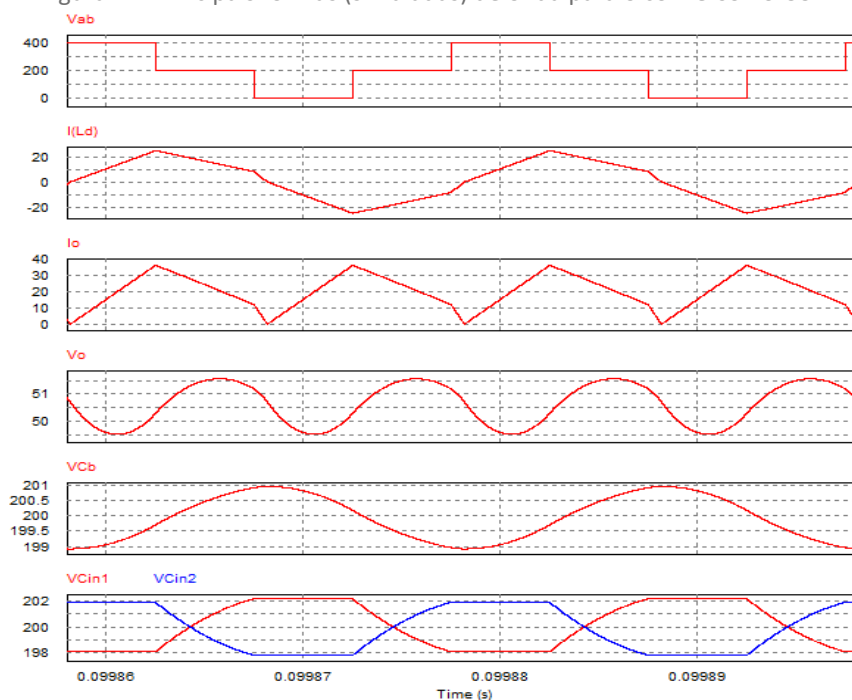
Grandeza	Resultado teórico	Resultado simulado	Erro relativo (%)
$\Delta t_{4-3}, \Delta t_{9-8}$	5 μ s	4,999 μ s	0,02
$\Delta t_{6-5}, \Delta t_{1-0}$	700 ns	673 ns	4,01
$\Delta t_{7-6}, \Delta t_{2-1}$	4,3 μ s	4,322 μ s	0,51
I_2	24,648 A	24,976 A	1,31
I_3	8,527 A	8,277 A	3,02
V_o	50 V	50,622 V	1,23
I_o	20,133 A	20,277 A	0,71
ΔV_{Co}	2 V	2,047 V	2,30
ΔV_{Cb}	2 V	2,025 V	1,23
ΔV_{Cin}	4 V	4,043 V	1,06

Fonte: Autoria própria (2020).

É notável a concordância entre os resultados teóricos e simulados, validando a análise desenvolvida. O erro relativo máximo obtido foi de 4,01 % para a duração da 5ª e 10ª etapa. Esse erro justifica-se devido à desconsideração da ondulação de tensão em C_b e C_o para a obtenção da duração das etapas.

A Figura 4 apresenta algumas formas de onda obtidas por simulação.

Figura 4 – Principais formas (simuladas) de onda para o converso no CCM



Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi apresentada a análise estática para o conversor três níveis ZVS-PWM com saída em tensão. Na análise qualitativa foram apresentadas as etapas de operação do conversor operando no MCC, enquanto que na análise quantitativa foram fornecidas as principais equações pertinentes ao projeto.

O projeto de um conversor de 1 kW foi realizado juntamente com a simulação numérica no *software* PSIM® para que fosse possível realizar a comparação entre os resultados teóricos e simulados. Os resultados considerados foram concordantes, e, portanto, o desenvolvimento teórico apresentado foi validado. Infelizmente devido às restrições impostas pela Covid-19 não foi possível realizar a implementação prática do conversor em laboratório.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Eloi Agostini Junior, por todo o apoio prestado.

Ao mestrando José Luiz, pelo trabalho que originou essa IC.

E a Fundação Araucária, pelo apoio financeiro para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

BARBI, I; PINHEIRO, J. R. The three-level ZVS PWM converter-a new concept in high voltage DC-to-DC conversion. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, CONTROL, INSTRUMENTATION, AND AUTOMATION, 1., 1992, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 1992.