

CONVERSOR CC-CC ELEVADOR (*Boost*)

RESUMO

Este artigo aborda os conversores CC-CC elevadores, também conhecidos como conversores *boost*, que são dispositivos eletrônicos de potência usados para converter uma tensão contínua de entrada numa tensão contínua de saída de valor superior. É explicado o funcionamento básico do conversor *boost*, que envolve componentes como uma bobina, um interruptor, um diodo e um condensador. O texto detalha o princípio de funcionamento no modo de condução contínua (CCM), onde a corrente na bobina nunca se anula durante um período de comutação. Além disso, é abordada a técnica da modulação por largura de impulso (PWM), que é usada para controlar o interruptor do conversor, e são apresentadas as equações matemáticas que descrevem o comportamento do conversor. É feito o dimensionamento dos componentes passivos, como a bobina e o condensador para responder aos requisitos pré-estabelecidos de ondulação de corrente e tensão do conversor. Também são abordados os efeitos das não-idealidades dos componentes no ganho estático do conversor.

1. Introdução

Os conversores CC-CC elevadores, também conhecidos como conversores *boost* (*step-up converters*), são conversores eletrônicos de potência cuja função principal é converter uma tensão contínua (CC) de entrada numa tensão contínua de saída de valor superior. Por exemplo, elevar os 3,7 V de uma bateria de lítio para os 5 V necessários para uma porta USB.

Fazem parte da família das fontes de alimentação comutadas (SMPS – *Switched-Mode Power Supply*) e são um dos blocos construtivos fundamentais e utilizados na eletrônica moderna. A sua utilização é crucial em inúmeras aplicações do nosso dia a dia, mesmo que não nos apercebamos disso [1].

O conversor CC-CC *boost* tem uma vasta gama de aplicações, que vão desde a eletrônica de consumo, circuitos de correção do fator de potência, implementação de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) em sistemas solares fotovoltaicos, a sistemas de alimentação de baterias ou aplicações automóveis. Seguem-se alguns exemplos:

- **Fontes de Alimentação para Dispositivos Portáteis:** Como computadores e telemóveis, onde a tensão da bateria precisa ser elevada para alimentar diferentes componentes.
- **Sistemas de Energia Renovável:** Em painéis solares ou células de combustível, onde a tensão gerada precisa ser aumentada para ser compatível com a rede elétrica ou para carregar baterias.
- **Automóveis Elétricos:** Para elevar a tensão da bateria e alimentar motores elétricos e outros sistemas.

O circuito elétrico do conversor *boost* ideal com controlo por Modulação por Largura de Pulso (PWM) está ilustrado na Figura 1. O conversor é composto por uma bobina L , um interruptor S_1 , um diodo D_1 , um condensador C_1 e uma carga R_0 . À entrada aplica-se uma tensão contínua V_i e à saída obtém-se uma tensão V_o de valor superior (ou igual) à entrada.

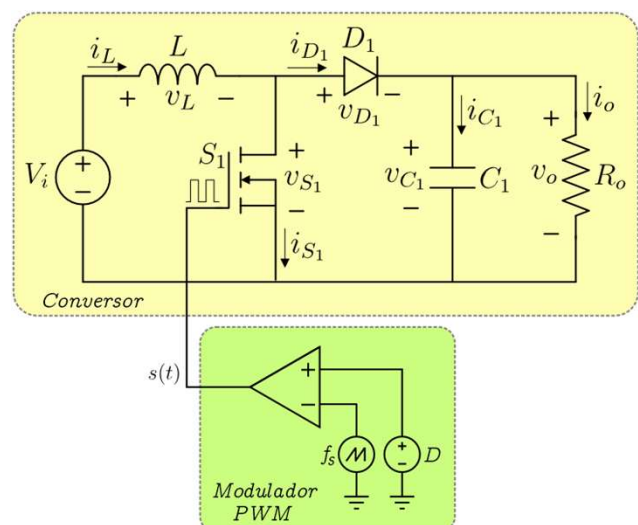


Figura 1. Circuito ideal do conversor *boost*, com modulador PWM

O modulador PWM é um circuito eletrônico que gera um sinal PWM, que é uma onda quadrada com largura de pulso variável, a partir da comparação de um sinal triangular (ou dente de serra) de frequência f_s (da ordem das dezenas/centenas de kHz) com um valor contínuo, neste caso designado por *duty-cycle* D . A Modulação por Largura de Impulso, é uma técnica de modulação digital que consiste em variar a largura dos impulsos num sinal periódico, para representar um sinal analógico ou para controlar a energia fornecida a um dispositivo. O princípio de geração do sinal PWM pode ser visualizado na Figura 2. Nela estão representados os sinais triangular (V_{tri}) que é comparado com o sinal contínuo $0 \leq D \leq 1$. O resultado dessa comparação é o sinal PWM ($s(t)$) de valor médio igual ao *duty-cycle* D . Este sinal é utilizado para controlar o interruptor, ficando este ligado durante o intervalo DT_s e desligado durante o intervalo $(1-D)T_s$, sendo T_s o período de comutação (*switching period*).

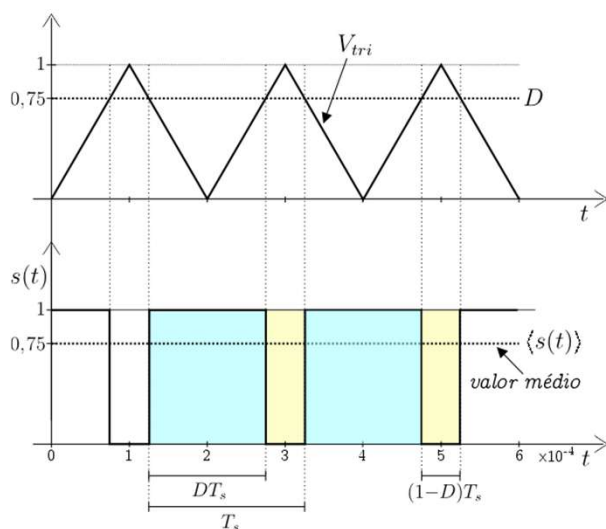


Figura 2. Geração do sinal PWM (Modulador PWM)

2. Princípio de funcionamento

O funcionamento básico de um conversor *boost* envolve a utilização de uma bobina, um interruptor (tipicamente um MOSFET ou IGBT), um diodo e um condensador. Tal como no conversor CC-CC abaixador (*buck*), na configuração *boost* o

transistor funciona como um interruptor, que controla a transferência de energia entre a fonte e a carga. Como previamente referido, em regime permanente, a tensão de saída v_o é sempre superior à tensão de entrada V_i . Além disso, atendendo que num conversor ideal a potência de entrada é igual à potência de saída ($P_i = V_i I_i = P_o = V_o I_o$), a corrente de saída será inferior à corrente de entrada. Este conversor, como outros, pode funcionar no modo de condução contínua (*Continuous Conduction Mode – CCM*), onde a corrente na bobina nunca se anula durante um período de comutação, e no modo de condução descontínua (*Discontinuous Conduction Mode – DCM*) onde a corrente atinge o valor nulo.

O modo CCM é o mais usado devido às seguintes vantagens:

1. Menor ondulação da corrente na bobine;

A baixa variação da corrente em relação à corrente média traz dois benefícios imediatos:

- a) Redução de Interferência Eletromagnética (EMI): Como a corrente de entrada é menos pulsante, o ruído gerado é menor, facilitando o projeto de filtros de entrada.
- b) A corrente que flui para o condensador de saída é menos agressiva, o que pode aumentar a vida útil do componente e reduzir a ondulação da tensão de saída (em CCM será necessário um condensador de menor capacidade para a mesma ondulação da tensão de saída do que no caso DCM).

2. Ganho de tensão independente da carga no caso ideal.

Na realidade, para o mesmo *duty-cycle* (D) o ganho estático do conversor diminui à medida que a corrente solicitada pela carga aumenta (ou seja, à medida que a potência envolvida na conversão aumenta);

Em CCM relação entre a tensão de saída e a de entrada depende exclusivamente do *duty-cycle* (no caso ideal).

3. Modo de Condução Contínua (CCM)

A Figura 3 ilustra as duas etapas de funcionamento do conversor ideal, para o modo de condução contínua: (a) quando o interruptor S_1 está ligado (ON), e (b) quando o interruptor S_1 está desligado (OFF). O estado ON significa que o interruptor está fechado e a conduzir. O estado OFF significa que o interruptor está aberto e não conduz. Como se pode perceber, quando o interruptor S_1 está no estado ON, o diodo S_1 não conduz, ao passo que quando S_1 está no estado OFF, o diodo D_1 conduz.

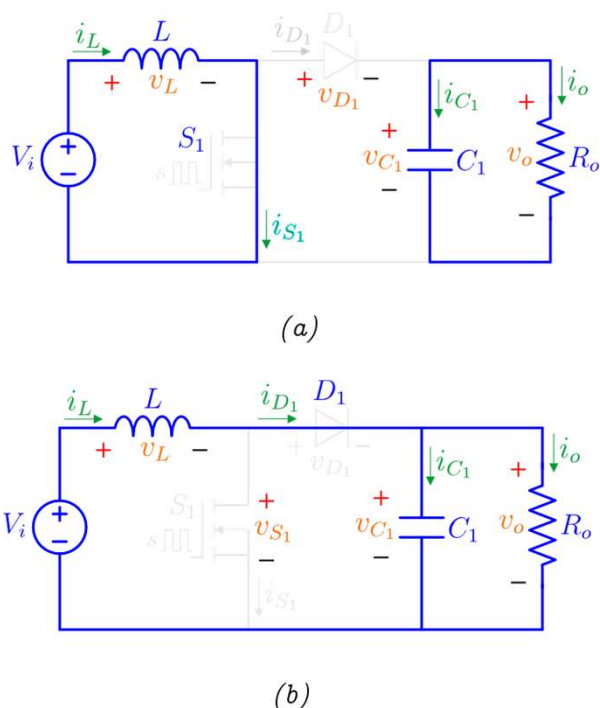


Figura 3. Etapas de funcionamento (CCM): (a) Interruptor ON, (b) Interruptor OFF

O princípio de funcionamento do conversor pode ser melhor compreendido através da análise das formas de onda idealizadas de corrente e tensão representadas na Figura 4.

Nesta análise seguimos a seguinte notação: valores instantâneos são representados com letra minúscula e valores médios com letra maiúscula. Para efeitos de análise, serão inicialmente consideradas constantes as tensões de entrada (V_i) e de saída (V_o) do conversor em regime permanente [2].

No intervalo de tempo $0 < t < DT_s$ o interruptor está ligado e a tensão através do diodo é igual a $v_{D1} = -V_o$, fazendo com que este seja polarizado inversamente e, portanto, não conduza. Durante esse intervalo, a tensão através da bobina é $v_L = V_i$, o que faz com que a corrente que a percorre aumente linearmente com uma inclinação de V_i/L . Consequentemente, alguma energia é acumulada no seu campo magnético. No instante $t = DT_s$, o interruptor é desligado.

Durante o intervalo $DT_s < t < T_s$, a corrente na bobina diminui linearmente com uma inclinação de $(V_i - V_o)/L$. Pela Lei de Faraday-Lenz (como $v_L = L di_L/dt$), essa diminuição da corrente faz com que a tensão aos terminais da bobine se inverta, i.e., se torne negativa. Nestas condições, a tensão V_i é somada a V_L , pelo que V_0 é efetivamente maior que V_i (para $0 < D < 1$).

Quando o interruptor está desligado, a corrente que passa pelo diodo é igual à que passa pela bobina. Durante este período, a energia armazenada na bobina é transferida para o condensador e para a carga.

As formas de onda da Figura 4 (4a; 4b) foram obtidas em regime permanente, com o conversor a funcionar em equilíbrio. Neste caso, a energia armazenada na bobina durante uma parte do ciclo deve ser igual à energia libertada durante a outra parte do ciclo para manter o equilíbrio. Isto leva a que a tensão média na bobina durante um ciclo completo de comutação num conversor CC-CC ideal em regime permanente seja nula.

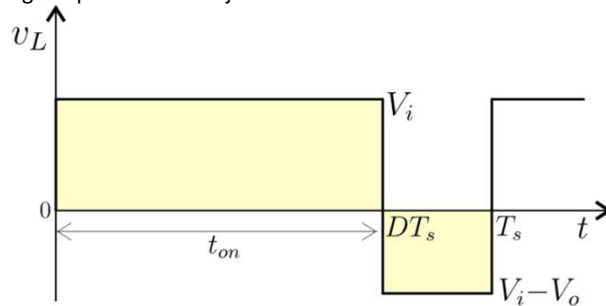


Figura 4ª. Tensão e corrente na bobina para os dois estados do modo CCM

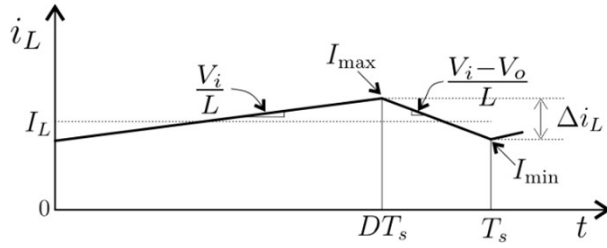


Figura 4b. Tensão e corrente na bobina para os dois estados do modo CCM

Assim, de acordo com a Figura 4a, o valor médio da tensão na bobina V_L é dado por:

$$V_L = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} V_i dt + \frac{1}{T_s} \int_{t_{on}}^{T_s} (V_i - V_o) dt = 0 \quad (1)$$

Uma vez que o valor médio da tensão na bobina tem de ser nulo, resulta que:

$$V_i \frac{t_{on}}{T_s} = -(V_i - V_o) \frac{T_s - t_{on}}{T_s} \Leftrightarrow V_i D = -(V_i - V_o)(1 - D) \quad (2)$$

Finalmente pode escrever-se que:

$$\frac{V_o}{V_i} = M(D) = \frac{1}{1 - D} \quad (3)$$

$M(D)$ representa o ganho estático do conversor CC-CC *boost* ideal. Nas equações anteriores, V_i representa o valor da tensão de entrada do conversor, e V_o o valor médio da tensão na saída, em regime permanente. A evolução do ganho estático deste conversor está representada na Figura 5. Como se pode constatar, o valor da tensão de saída do conversor ideal será sempre superior ao da tensão de entrada.

Neste tipo de conversor, embora a corrente no diodo seja sempre descontínua, a corrente fornecida pela fonte e a corrente na bobina podem ser contínuas ou descontínuas. Este modo de funcionamento depende do nível de energia que é armazenada na bobina durante o tempo de condução do interruptor (transistor) S_1 . A Figura 6 ilustra as formas de onda das correntes no conversor *boost* ideal para o regime permanente no modo de condução contínua (CCM).

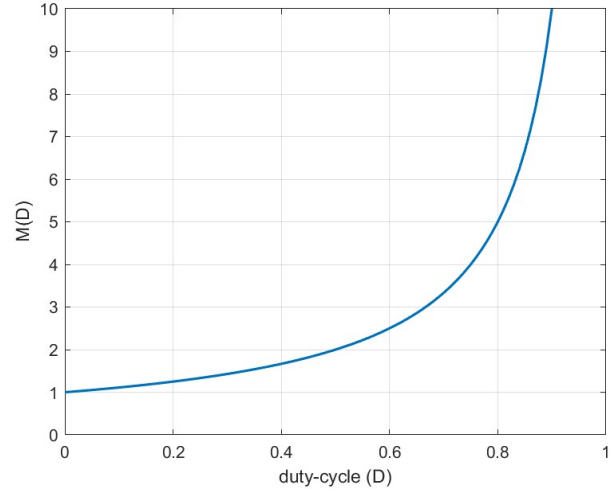


Figura 5. Ganho estático do conversor *boost* ideal

Quando o interruptor S_1 está em condução, a tensão de entrada é aplicada à bobina e a corrente que a atravessa cresce linearmente de acordo com a seguinte expressão (válida entre $0 < t < DT_s$):

$$i_L(t) = I_{Lmin} + \frac{V_i}{L} t \quad (4)$$

Quando $t = t_{on} = DT_s$ a corrente na bobina atinge o seu valor máximo I_{Lmax} , ou seja:

$$I_{Lmax} = I_{Lmin} + \frac{V_i}{L} DT_s \quad (5)$$

Durante o período em que o interruptor está em aberto e, consequentemente, o diodo está a conduzir, a tensão na bobina será igual à diferença entre as tensões de entrada e saída (válida entre $DT_s < t < T_s$), pelo que se pode escrever:

$$i_L(t) = i_{D1}(t) = I_{Lmax} - \frac{V_o - V_i}{L} t' \quad (6)$$

onde t' é o tempo decorrido desde a abertura do interruptor (transistor). Quando $t' = t_{off} = (1 - D)T_s$ pode escrever-se que:

$$I_{Lmin} = I_{Lmax} - \frac{V_o - V_i}{L} (1 - D)T_s \quad (7)$$

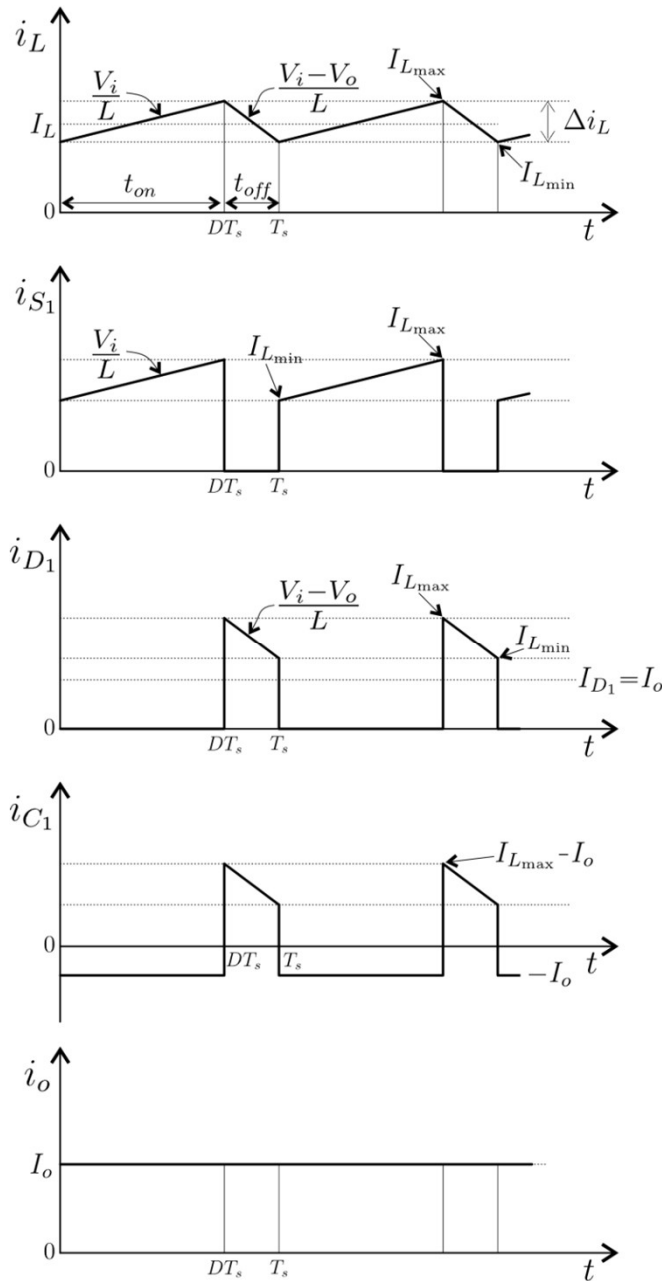


Figura 6. Formas de onda das correntes no conversor *boost* em modo CCM

4. Ondulação da corrente na bobina

A partir da forma de onda da corrente na bobina ilustrada na Figura 6, pode escrever-se que:

$$\Delta i_L = \frac{V_i}{L} t_{on} = \frac{V_i T_s}{L} D = \frac{V_i}{L f_s} D \quad (8)$$

Onde: $f_s = \frac{1}{T_s}$

Analisando agora as potências de entrada e saída, pode escrever-se:

$$P_{in} = V_i \cdot I_L \quad (9)$$

que representa a potência fornecida pela fonte, e:

$$P_{out} = V_o \cdot I_o = \frac{V_o^2}{R_o} \quad (10)$$

Recorrendo a (3), obtém-se:

$$P_{out} = \frac{V_i^2}{R_o} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} \quad (11)$$

que representa a potência recebida (dissipada) pela carga. Admitindo que o conversor é ideal, onde todos os componentes são ideais, a potência fornecida pela fonte é transferida na totalidade para a carga, pelo que:

$$P_{in} = P_{out} \Leftrightarrow V_i \cdot I_L = \frac{V_i^2}{R_o} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} \quad (12)$$

Isolando I_L , obtém-se:

$$I_L = \frac{V_i}{R_o} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} \quad (13)$$

O fator de ondulação da corrente de entrada, obtém-se dividindo (8) por (13), o que resulta em:

$$r_i = \frac{\Delta i_L}{I_L} = \frac{V_i T_s}{L} D \cdot \frac{R_o}{V_i} (1-D)^2 = \frac{R_o}{L} T_s D (1-D)^2 \quad (14)$$

Desta forma:

$$r_i = \frac{\Delta i_L}{I_L} = K \cdot D (1-D)^2 = K \cdot \beta \quad (15)$$

Onde: $K = \frac{R_o}{L} T_s$

Esta expressão representa a ondulação relativa da corrente de entrada, ou fator de ondulação do conversor *boost*. Construindo um gráfico de $\beta = \frac{r_i}{K}$, em função do *duty-cycle*, verifica-se que a ondulação relativa máxima ocorre para um valor de $D = 1/3$, como ilustra a Figura 7.

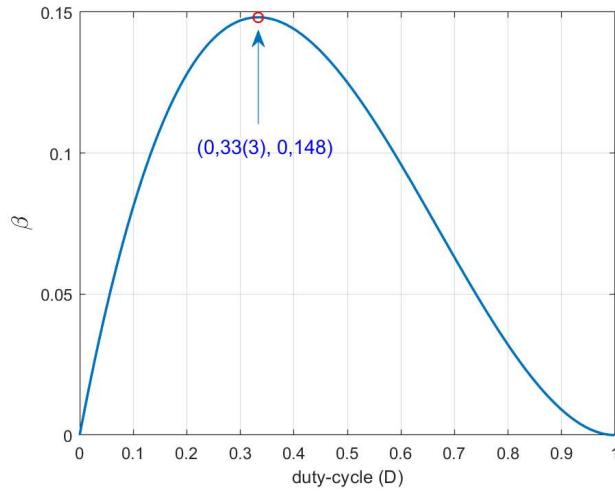


Figura 7. Ondulação relativa da corrente de entrada do conversor *boost* ideal

Este fator é vital para determinar o modo de condução (CCM ou DCM) do conversor. Se $r_i < 2$, o conversor funciona no modo de condução contínua (CCM), ou seja, a corrente não atinge o valor de zero [2].

5. Ondulação da tensão de saída

Na análise da ondulação da corrente de entrada considerou-se que a ondulação da tensão na saída era desprezável e foi considerado o seu valor médio V_o . Esta análise da ondulação da tensão de saída será realizada a partir da ondulação de tensão no condensador de saída C_1 . Será considerada também uma constante de tempo $R_o C_1$ suficientemente elevada de forma que o condensador carregue e descarregue linearmente a cada período de funcionamento.

Durante a condução do interruptor S_1 , o condensador C_1 fornece energia à carga. Dessa forma, a sua carga interna diminui, diminuindo também a tensão aos seus terminais. Quando o interruptor S_1 deixa de conduzir, a energia armazenada na bobina é transferida para a carga e para o condensador C_1 através do diodo D_1 . Desta forma o condensador carrega, elevando a tensão aos seus terminais.

Considerando o regime permanente, estes dois modos de funcionamento produzem uma ondulação da tensão aos terminais do condensador de valor constante e igual a Δv_{C_1} .

A Figura 8 ilustra as principais formas de onda das tensões no conversor.

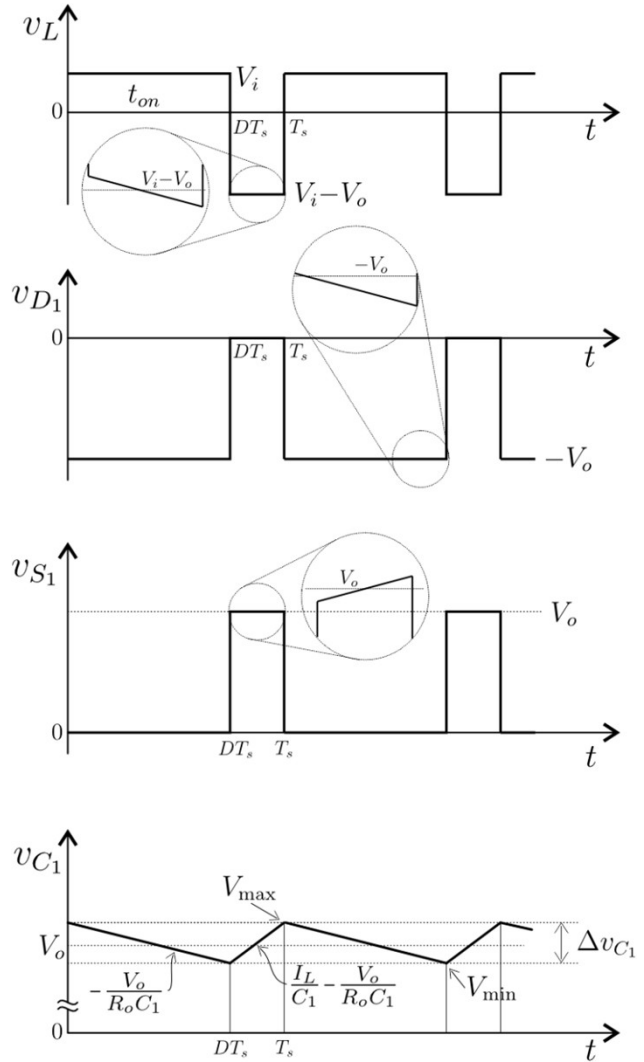


Figura 8. Formas de onda das tensões no conversor *boost* em modo CCM

Durante o intervalo de tempo $0 < t < DT_s$, o condensador alimenta a carga com corrente constante I_o . Assim, a ondulação de tensão é dada por:

$$i_{C_1} = C_1 \frac{dv_{C_1}}{dt} \quad (16)$$

$$I_o = -C_1 \frac{\Delta v_{C_1}}{\Delta t} \quad (17)$$

Analisando a figura pode escrever-se:

$$\Delta v_{C_1} = -I_o \frac{\Delta t}{C_1} = -\frac{V_o}{R_o C_1} \Delta t \quad (18)$$

Assim, como $\Delta t = DT_s$, a expressão anterior pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta v_{C_1} = -I_o \frac{DT_s}{C_1} = -\frac{V_o}{R_o C_1} DT_s \quad (19)$$

O valor médio da tensão no condensador é igual a V_o , e pode ser obtido a partir de (3). Explicitando o *duty-cycle* pode escrever-se que:

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} \quad (20)$$

Substituindo (20) em (19) obtém-se:

$$|\Delta v_{C_1}| = \frac{I_o}{f_s C_1} \cdot \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{V_o}{f_s R_o C_1} \cdot \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{V_o - V_i}{f_s R_o C_1} \quad (21)$$

que é a ondulação da tensão no condensador de saída. Esta equação é utilizada para calcular o valor da capacidade do condensador para se obter uma determinada ondulação na tensão de saída (*ripple*).

6. Dimensionamento dos componentes passivos

Nesta secção mostra-se como dimensionar a bobina e o condensador de forma que a ondulação de corrente de entrada e a ondulação da tensão de saída satisfaçam os requisitos definidos, ou seja, definem-se esses requisitos para depois se calcularem a indutância da bobina e capacitância do condensador.

O valor da indutância é calculado com base em (8), para determinada ondulação de corrente (Δi_L) e frequência de comutação (f_s). A ondulação nada mais é do que o *ripple* em alta frequência presente na corrente.

Normalmente, define-se esse parâmetro para se situar entre 20% e 40% do valor médio da corrente da bobina que, no caso do conversor *Boost*, é igual à corrente de entrada. Assim, o valor da indutância é dado por:

$$L = \frac{V_i T_s}{\Delta i_L} D = \frac{V_i}{\Delta i_L f_s} D$$

Além do valor da indutância será necessário saber o valor máximo da corrente que a bobina deve suportar, uma vez que a corrente varia em torno do valor médio I_L . Assim, pode escrever-se que:

$$I_{L_{\max}} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_o}{1-D} + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o}{(1-D)R_o} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (23)$$

Desta forma, para evitar a saturação do seu núcleo, deve escolher-se uma bobina cuja corrente de saturação seja superior ao valor calculado a partir de (23).

No que se refere ao condensador de saída, o valor da sua capacidade é obtido com base em (21). Assim, o valor da capacidade do condensador será:

$$C_1 \geq \frac{V_o - V_i}{f_s \Delta v_{C_1} R_o} \quad (24)$$

Onde Δv_{C_1} representa a ondulação de tensão desejada, tipicamente entre 1% e 5% do valor médio da tensão de saída V_o .

Neste tipo de conversor, o condensador é submetido a um maior stress uma vez que a corrente que por ele circula é descontínua, como se pode verificar através da Figura 6. Desta forma é importante calcular o valor eficaz da corrente que circula através do condensador, que é dada por:

$$I_{C_1(rms)} = I_o \sqrt{\frac{D}{1-D}} \quad (26)$$

Utilizando o valor da corrente eficaz que atravessa o condensador, pode calcular-se o valor das perdas na resistência série (ESR) do mesmo. De notar que a vida útil de um condensador (especialmente os eletrolíticos de alumínio) é extremamente sensível à temperatura interna.

A regra prática diz que cada aumento de 10°C na temperatura de operação reduz a vida útil para metade. A queda de tensão nesta resistência também provoca um aumento da ondulação de tensão. Desta forma, o condensador deve ser capaz de suportar a corrente calculada anteriormente e também apresentar uma ESR máxima dada por [3]:

$$ESR_{(max)} = \frac{\Delta V_o(ESR)}{\frac{I_o}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2}} \quad (26)$$

onde $\Delta V_o(ESR)$ é o aumento da ondulação da tensão de saída devido à ESR do condensador.

7. Efeito da não-idealidade da bobina no ganho estático

O ganho estático do conversor *boost* expresso por (3) mostra que a tensão de saída aumenta com o *duty-cycle* e, quando este se aproxima da unidade, a tensão na saída tende para infinito. No entanto, o funcionamento real deste conversor contradiz este cenário. Quando $D=1$, o interruptor fica sempre fechado e o diodo não conduz. Isto significa que a saída fica isolada da alimentação, o que leva a que a tensão de saída caia para zero, pois não há energia a ser transferida para a carga. De notar também que, com o interruptor sempre fechado, a bobina entra em saturação.

Nestas condições, a indutância da bobina cai abruptamente para zero pelo que a fonte V_i é curto-circuitada, levando à eventual destruição do equipamento.

Esta situação (tensão de saída tender para infinito) fica resolvida quando são introduzidas as não-idealidades nos componentes do circuito. A Figura 9 mostra o circuito elétrico do conversor *boost* assim como os subcircuitos para as situações de condução e não condução do interruptor (transistor), com a introdução da resistência do enrolamento da bobina r_L , enquanto os restantes componentes se mantêm ideais. Notar que a única "não idealidade" considerada é r_L , mas existem outras que também são relevantes, tais como a resistência r_{on} do MOSFET, a queda de tensão no diodo, e a ESR do condensador que já se referiu anteriormente.

Para se obter o ganho estático do conversor não ideal, utiliza-se a tensão na bobina, que deve ter valor médio nulo num período. Assim, pode escrever-se:

$$(V_i - r_L I_L)DT_s = (V_o - r_L I_L - V_i)(1 - D)T_s \quad (27)$$

onde I_L representa o valor médio da corrente na bobina. Simplificando a expressão anterior obtém-se:

$$V_i = r_L I_L + (1 - D)V_o \quad (28)$$

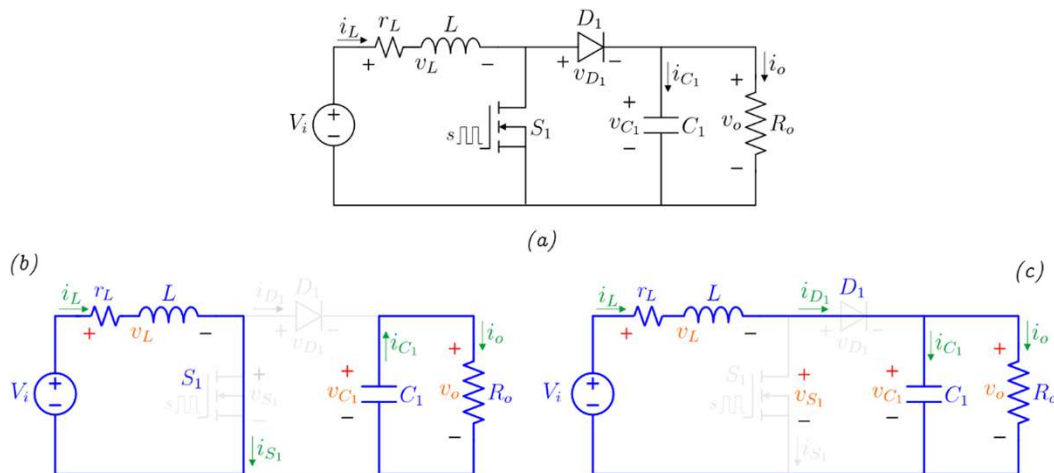


Figura 9. Conversor *boost* não ideal. Circuito elétrico e etapas para o modo CCM

Por outro lado, considerando que a corrente média no condensador é nula, pode escrever-se:

$$\frac{V_o}{R_o} DT_s = \left(\frac{V_o}{R_o} - I_L \right) (1 - D) T_s \quad (29)$$

Simplificando a expressão anterior, resulta em:

$$\frac{V_o}{R_o} = I_L (1 - D) \quad (30)$$

O ganho estático em tensão pode ser obtido resolvendo as expressões e de forma a eliminar I_L . A expressão obtida resulta no produto do ganho estático do conversor ideal por um fator que tem em conta com a resistência do enrolamento da bobina [4]. Resolvendo e simplificando as expressões anteriores, obtém-se:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{(1 - D)^2} \cdot \frac{r_L}{R_o}} \right) \quad (31)$$

O parâmetro principal nesta correção é a razão $\frac{r_L}{R_o}$. A Figura 10 mostra as curvas do ganho estático calculadas a partir da expressão anterior, para diferentes valores de $\frac{r_L}{R_o}$, desde o caso ideal, onde esta razão é nula. É importante notar que a razão $\frac{r_L}{R_o}$ limita o ganho máximo em tensão que o conversor pode atingir. Por exemplo, no caso de $\frac{r_L}{R_o} = 0,02$, o ganho em tensão atinge um máximo de 3,535 quando $D=0,859$, diminuindo a partir desse valor, até atingir o zero.

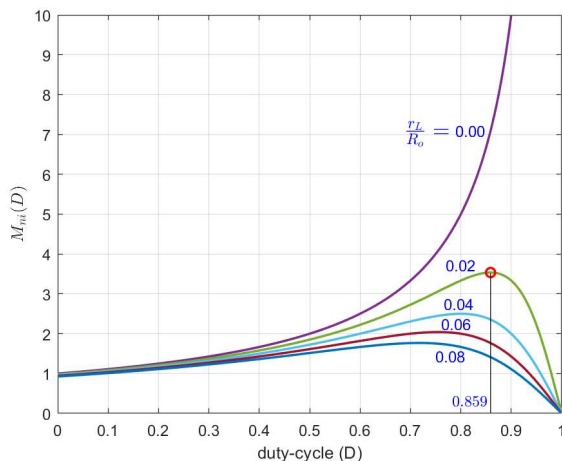


Figura 10. Ganho estático do conversor *boost* com não-idealidade da bobina (r_L)

8. Conclusão

Este artigo aborda o princípio de funcionamento dos conversores CC-CC elevadores, também conhecidos como conversores *boost*, no modo de condução contínua. O conversor *boost* é um dispositivo essencial na eletrônica moderna, utilizado para elevar a tensão contínua de entrada para um valor superior na saída. Os conversores *boost* têm uma ampla gama de aplicações, incluindo fontes de alimentação para dispositivos portáteis, sistemas de energia renovável e automóveis elétricos. A sua utilização é crucial em inúmeras aplicações do nosso dia a dia.

Este conversor pode funcionar em dois modos principais: o modo de condução contínua (CCM) e o modo de condução descontínua (DCM). No modo CCM, a corrente na bobina nunca se anula durante um período de comutação, enquanto no modo DCM, a corrente atinge o valor nulo.

O dimensionamento dos componentes passivos, como a bobina e o condensador, para atender aos requisitos de ondulação de corrente e tensão é crucial para garantir a eficiência e a longevidade do conversor. Por outro lado, as não-idealidades dos componentes, como a resistência do enrolamento da bobina, afetam o ganho estático do conversor.

Referências

- [1] R. W. Erickson e D. Maksimovc, *Fundamentals of Power Electronics*, New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [2] D. C. Martins e I. Barbi, *Conversores CC-CC Básicos não Isolados*, Florianópolis - SC, 2006.
- [3] B. Hauke, "Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage," Texas Instruments, 2022.
- [4] B. Choi, *Pulsewidth Modulated Dc-to-Dc Power Conversion: Circuits, Dynamics, Control, and Dc Power Distribution Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2022.