

22

Capítulo

Inversor de Tensão Ponte Completa

Meta deste capítulo

Estudar os princípios de funcionamento dos inversores de tensão em ponte completa.

objetivos

- Entender o princípio de funcionamento dos inversores de tensão;
- Analisar circuitos de inversores de tensão em ponte completa;
- Simular circuitos de inversores de tensão em ponte completa;
- Implementar circuitos de inversores de tensão em ponte completa.

Pré-requisitos

Ter estudado os capítulos referentes a modulação PWM senoidal e inversores de tensão meia ponte.

Continuidade

O curso continuará com o estudo dos inversores de tensão PWM senoidais.

Prof. Clóvis Antônio Petry.
Florianópolis, junho de 2020.

1 Introdução

Os capítulos anteriores apresentaram os conceitos necessários para a compreensão do princípio de funcionamento dos conversores cc-ca, iniciando-se pelo estudo da modulação por largura de pulsos aplicada aos inversores, denominada de modulação PWM senoidal. A seguir foram apresentados conceitos gerais importantes para o estudo dos conversores cc-ca, finalizando com o estudo detalhado do inversor de tensão na configuração meia ponte.

Este segundo capítulo continuará o estudo dos conversores cc-ca, agora focando no conversor ponte completa, que é uma solução padrão utilizada na indústria, seja no acionamento de motores, filtros ativos, dentre inúmeras outras aplicações.

Os inversores de tensão em ponte completa são preferidos na indústria pela sua versatilidade, por não precisarem duas fontes na entrada ou divisor capacitivo, por permitirem usar a modulação por dois níveis ou três níveis, além de outras vantagens em relação as demais topologias de conversores.

A Figura 1 mostra um inversor de tensão aplicado na geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos. Nesta aplicação, o papel do inversor é aplicar de maneira controlada, a energia gerada em corrente contínua pelos módulos fotovoltaicos na rede de energia elétrica em corrente alternada.

Assim, neste capítulo serão estudados os principais conceitos relacionados aos conversores cc-ca e em detalhes o inversor de tensão na configuração ponte completa, serão apresentados resultados de simulação para os circuitos estudados, além de exercícios resolvidos e propostos.



Figura 1 – Exemplo de circuito interno de um inversor.

Fonte: <https://www.lojaenergialivre.com.br/>. Acesso em: 08/06/2020.

2 Inversor de Tensão Ponte Completa

2.1 Introdução

Os inversores de tensão na configuração ponte completa necessitam apenas uma fonte de tensão na entrada, como está mostrado na Figura 2, o que caracteriza uma vantagem em relação aos conversores na configuração meia ponte estudados no capítulo anterior.

A topologia mostrada na Figura 2 é de um conversor ponte completa, o qual tem dois braços, com 4 interruptores bidirecionais em corrente e unidirecionais em tensão (S_1/D_1 , S_2/D_2 , S_3/D_3 , e S_4/D_4). Estes conversores também são denominados de ponte H.

O inversor de tensão ponte completa, com filtro de saída, está mostrado na Figura 3, onde se identificam as polaridades das tensões e sentidos das correntes nos elementos do circuito. O circuito da Figura 3 será utilizado para o estudo das etapas de funcionamento do conversor, apresentadas a seguir.

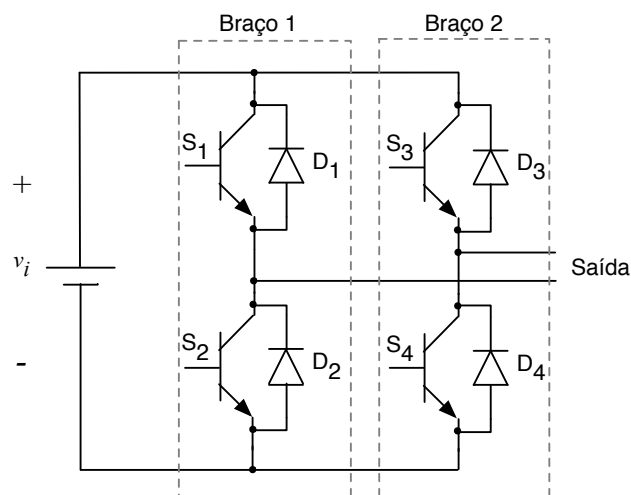


Figura 2 – Conversor ponte completa.

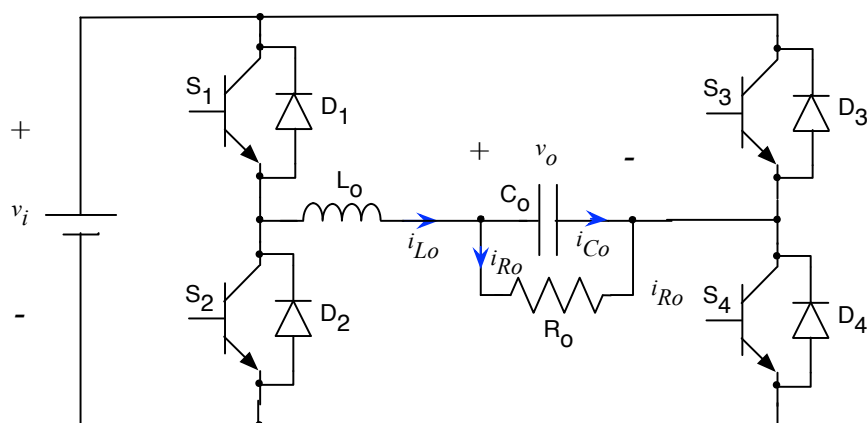


Figura 3 – Conversor ponte completa com filtro de saída.

2.2 Conversor CC-CA Ponte Completa – Modulação Bipolar

O inversor de tensão ponte completa pode operar com modulação bipolar (dois níveis) ou modulação (três níveis). Inicialmente será mostrado o funcionamento do conversor operando com dois níveis, quando a tensão de saída pode assumir o valor $+v_i$ e $-v_i$. As etapas de operação com tempo morto serão mostradas na sequência.

A análise realizada a seguir levará em conta que se está operando no semiciclo positivo da tensão na carga (v_o) e próximo ao valor máximo da mesma (pico). Assim, o estudo do inversor se assemelha a um conversor cc-cc Buck, como foi feito anteriormente neste curso.

2.2.1 Operação sem Tempo Morto

O inversor de tensão ponte completa operando no modo de condução contínua e sem tempo morto apresenta duas etapas de operação, mostradas nas Figura 4 e Figura 5. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa ($0, DT_s$) – Chaves S_1 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte, isto é, $+v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_4/D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o ;

2ª Etapa (DT_s, T_s) – Chaves S_1 e S_4 abertas (*off*) e chaves S_2 e S_3 conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte invertida, isto é, $-v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_2/D_2 e S_3/D_3 . Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor L_o .

Ao finalizar a segunda etapa retorna-se à primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do inversor de tensão ponte completa são mostradas na Figura 6. Nesta figura tem-se os sinais de comando dos interruptores (S_1/S_4 e S_2/S_3), denominados de $v_{g1,4}$ e $v_{g2,3}$, a seguir a tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} . Posteriormente se tem a corrente no indutor (i_{L_o}) e a tensão de saída (v_o).

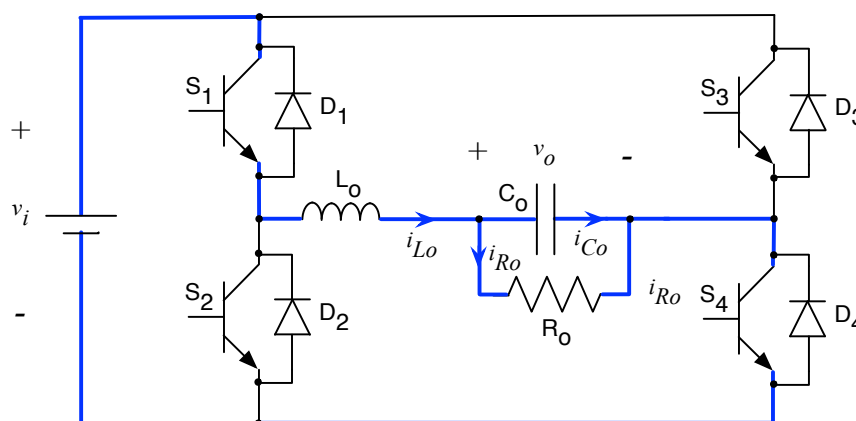


Figura 4 – Primeira etapa de operação do inversor com modulação dois níveis e sem tempo morto.

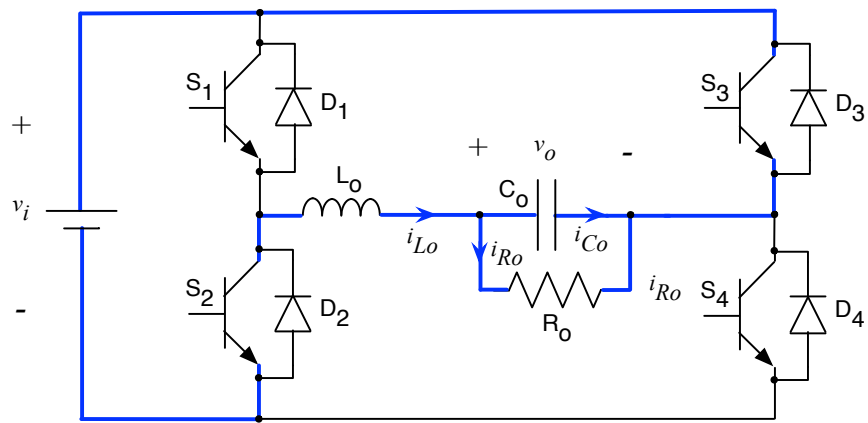


Figura 5 – Segunda etapa de operação do inversor com modulação dois níveis e sem tempo morto.

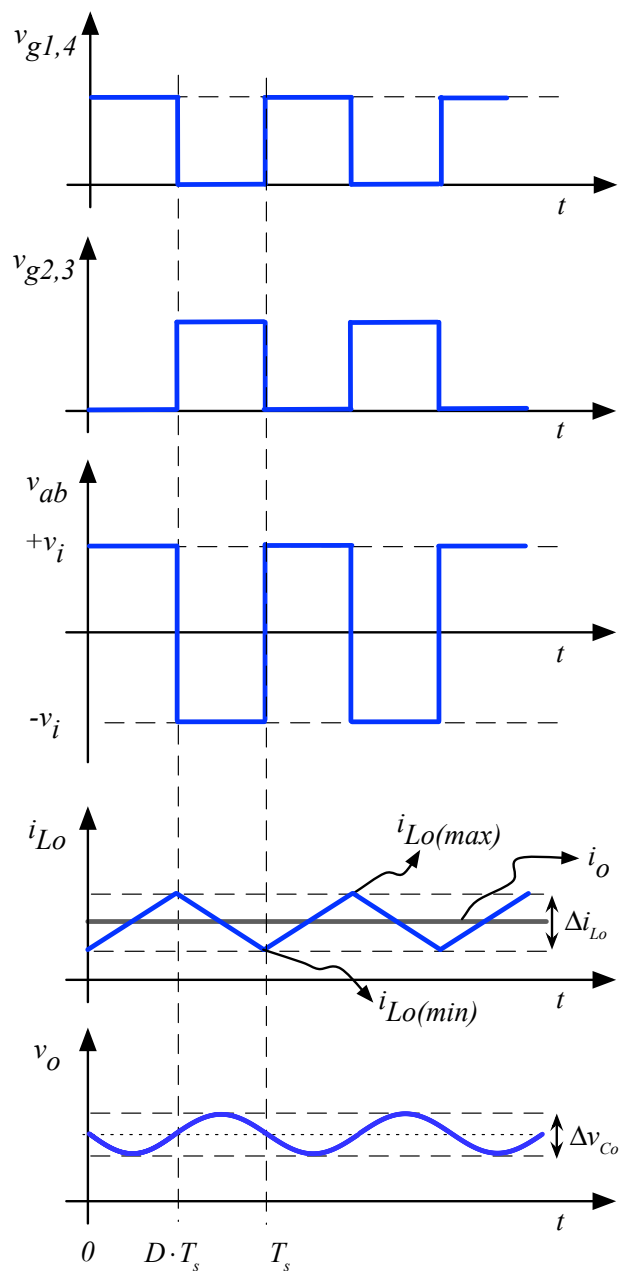


Figura 6 – Formas de onda do inversor de tensão ponte completa para modulação dois níveis e sem tempo morto.

2.2.2 Operação com Tempo Morto

O inversor de tensão ponte completa operando no modo de condução contínua e com tempo morto apresenta quatro etapas de operação. Duas etapas são semelhantes aquelas mostradas nas Figura 4 e Figura 5; enquanto as etapas de tempo morto são mostradas nas Figura 7 e Figura 8. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa ($0, DT_s$) – Chaves S_1 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte, isto é, $+v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_4/D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o ;

2ª Etapa (t_{di}) – Chaves S_1 a S_4 abertas (*off*) e diodos D_1 a D_4 conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte invertida, isto é, $-v_i$, se a corrente no indutor for positiva. Já se a corrente no indutor for negativa, então a tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte, isto é, $+v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelos diodos D_2/D_3 ou D_1/D_4 . Nesta etapa pode ocorrer a magnetização ou a desmagnetização do indutor L_o conforme o sentido da corrente;

3ª Etapa (DT_s, T_s) – Chaves S_1 e S_4 abertas (*off*) e chaves S_2 e S_3 conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte invertida, isto é, $-v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_2/D_2 e S_3/D_3 . Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor L_o ;

4ª Etapa (t_{di}) – Chaves S_1 a S_4 abertas (*off*) e diodos D_1 a D_4 conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte invertida, isto é, $-v_i$, se a corrente no indutor for positiva. Já se a corrente no indutor for negativa, então a tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte, isto é, $+v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelos diodos D_2/D_3 ou D_1/D_4 . Nesta etapa pode ocorrer a magnetização ou a desmagnetização do indutor L_o conforme o sentido da corrente.

Ao finalizar a quarta etapa retorna-se à primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do inversor de tensão ponte completa são mostradas nas Figura 9 e Figura 10. Nestas figuras tem-se os sinais de comando dos interruptores (S_1/S_4 e S_2/S_3), denominados de $v_{g1,4}$ e $v_{g2,3}$, a seguir a tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} .

Nota-se nas Figura 9 e Figura 10 que a tensão na saída do inversor de tensão ponte completa mantém a mesma forma como se a operação fosse sem tempo morto, com exceção de que conforme o sentido da corrente no indutor, o tempo em alto ou em baixo ($+v_i$ ou $-v_i$) é alterado pelo tempo morto. Considerando que o tempo morto seja pequeno em relação ao tempo de comutação dos interruptores, esta alteração nas formas de onda não será significativa e não afetará o desempenho do conversor.

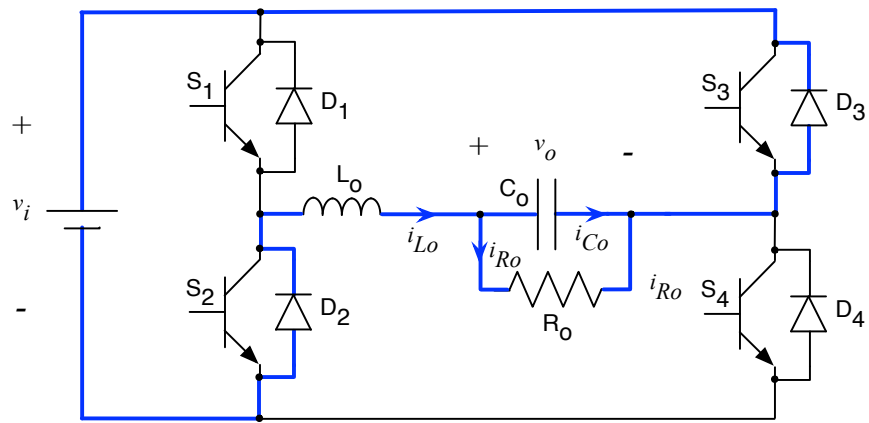


Figura 7 – Etapa de tempo morto no inversor com modulação dois níveis com corrente positiva e tempo morto.

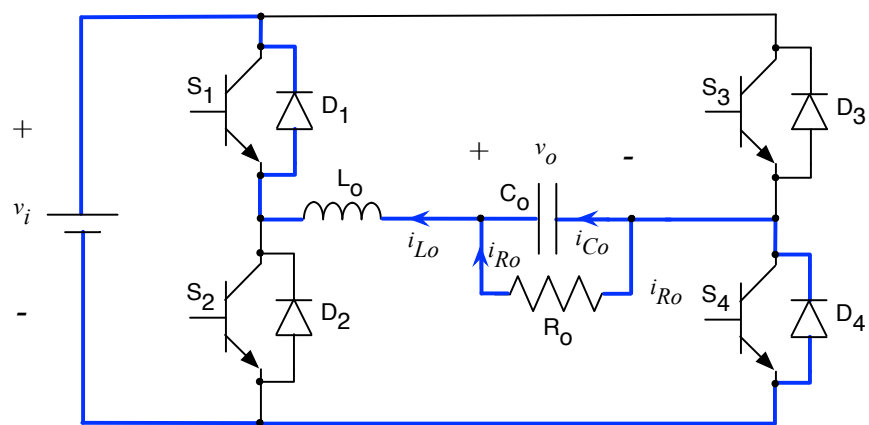


Figura 8 – Etapa de tempo morto no inversor com modulação dois níveis com corrente negativa e tempo morto.

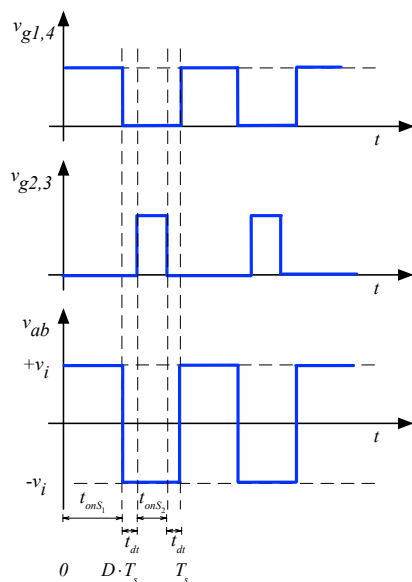


Figura 9 – Formas de onda do inversor de tensão ponte completa com tempo morto e corrente positiva no indutor.

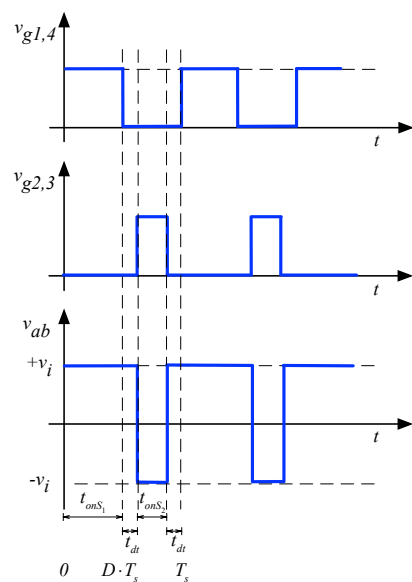


Figura 10 – Formas de onda do inversor de tensão ponte completa com tempo morto e corrente negativa no indutor.

2.1 Análise do Inversor de Tensão Completa – Modulação Bipolar

A seguir será realizada a análise do conversor em estudo, visando determinar sua tensão de saída, a corrente nos elementos do circuito e os esforços nos semicondutores, aqui para modulação dois níveis (bipolar). Nesta análise será desprezado o tempo morto e os componentes serão considerados ideais.

2.1.1 Tensão de Saída

A tensão de entrada (v_i) está representada na Figura 6 pelo seu valor médio, por se tratar de uma tensão contínua. Por sua vez, a tensão de saída (v_o) está representada por seu valor instantâneo. Seus valores de pico e eficaz (RMS) são facilmente determinados, visto se estar estudando inversores de tensão alternada com saída senoidal. Assim:

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}}$$

A frequência de comutação (chaveamento) dos interruptores será denominada de F_s . Portanto, o período de comutação será:

$$T_s = \frac{1}{F_s}$$

Os intervalos de condução (T_{on}) e bloqueio (T_{off}) das chaves serão dados por:

$$T_{on(S_1, S_4)} = D \cdot T_s;$$

$$T_{off(S_1, S_4)} = (1 - D) \cdot T_s;$$

$$T_{on(S_2, S_3)} = (1 - D) \cdot T_s;$$

$$T_{off(S_2, S_3)} = D \cdot T_s.$$

A relação entre o tempo em que as chaves S_1 e S_4 estão ligadas e o período total é denominada de razão cíclica ou razão de trabalho, dada por:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}$$

A tensão média entre os pontos “a” e “b” será determinada a seguir, com base na forma de onda mostrada na Figura 11.

$$V_{ab(med)} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} v_i \cdot dt + \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D) \cdot T_s} -v_i \cdot dt ;$$

$$V_{ab(med)} = \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot D \cdot T_s - \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot (1-D) \cdot T_s ;$$

$$V_{ab(med)} = V_i \cdot D - V_i + V_i \cdot D ;$$

$$V_{ab(med)} = V_i \cdot (2 \cdot D - 1) .$$

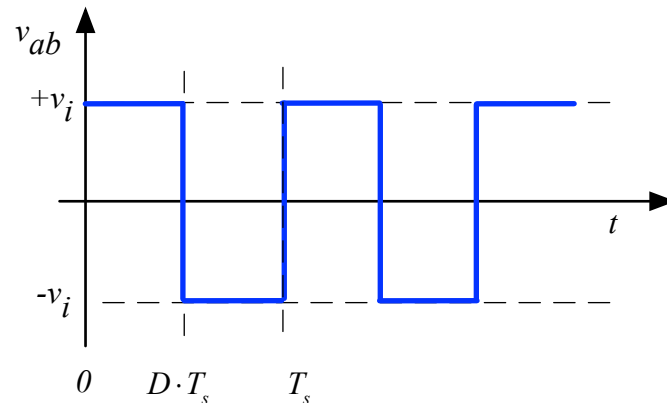


Figura 11 – Forma de onda da tensão entre os pontos “a” e “b” do inversor ponte completa com modulação bipolar (dois níveis).

Para determinar a tensão média na saída precisa-se obter a tensão média no indutor. Esta tensão em regime permanente deve ser zero, pois o indutor é magnetizado e desmagnetizado a cada período de comutação. Do contrário, o mesmo iria armazenar energia a cada período de comutação e sua corrente cresceria até infinito. A forma de onda da tensão sobre o indutor é mostrada na Figura 12.

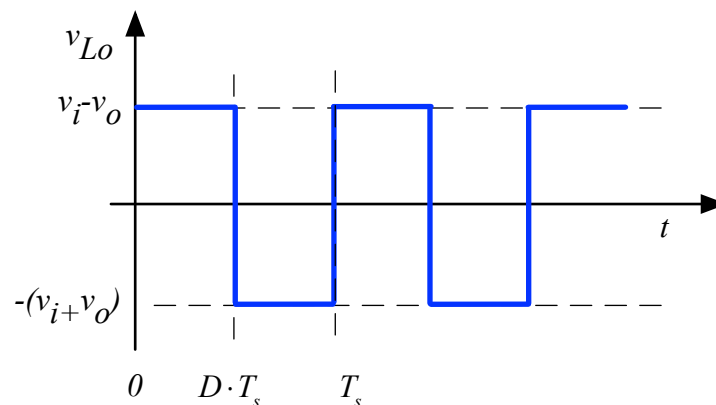


Figura 12 – Forma de onda da tensão sobre o indutor no conversor ponte completa com modulação bipolar.

Assim, conforme demonstrado nos conversores cc-cc, tem-se:

$$V_{L_o} = 0 .$$

Portanto, a tensão média na saída é obtida por:

$$V_o = V_{ab(\text{med})} = V_i \cdot (2 \cdot D - 1)$$

A relação obtida acima é idêntica aquela do conversor meia ponte, visto que a operação do conversor ponte completa com modulação dois níveis gera na saída uma forma semelhante a do conversor estudado no capítulo anterior.

2.1.2 Ganho Estático do Inversor de Tensão Ponte Completa Dois Níveis

O ganho estático de um conversor é a relação entre suas tensões de saída e entrada, em valores médios. Assim, para o inversor de tensão meia ponte em condução contínua se tem:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = (2 \cdot D - 1) \rightarrow 0 \leq D \leq 1$$

O comportamento da relação entre a tensão de saída e de entrada para variações na razão cíclica entre zero e cem (100) por cento é mostrado na Figura 13. Nota-se pela Figura 13 que o comportamento do ganho estático do conversor é linear em relação às variações da razão cíclica, em termos de valores médios. Este comportamento é idêntico ao observado nos conversores cc-cc, com a diferença que agora a variação do ganho estático assume valores positivos e negativos, visto se tratar de um inversor de tensão. Isso ocorre porque o comportamento estático do conversor independe de seu filtro (L_o e C_o). Já o comportamento transitório, para fins de controle e proteção do conversor, dependerá destes elementos.

É importante destacar, observando-se a Figura 13 e a expressão que determina a tensão de saída do conversor, que este tem característica de abaixador de tensão, isto é, a tensão de saída (V_o) sempre será menor do que a tensão de entrada (V_i), para qualquer valor de razão cíclica (D).

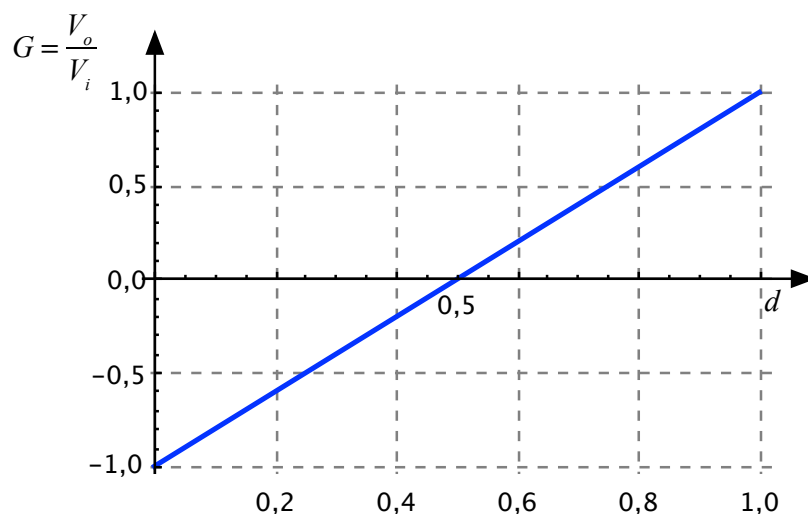


Figura 13 – Ganho estático do inversor de tensão ponte completa com modulação dois níveis.

2.1.3 Correntes no Circuito

A corrente na carga será determinada por:

$$I_{o(ef)} = \frac{I_{o(pk)}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o}$$

O valor médio da corrente no indutor será idêntico a corrente de saída, visto que a corrente média no capacitor deve ser nula. Isso ocorre em regime permanente considerando que a cada período de comutação o capacitor é carregado e descarregado, não totalmente, mas apenas para que sua tensão permaneça estabilizada. Se a corrente média no capacitor fosse diferente de zero, este seria carregado até valores infinitos de tensão, por exemplo. Deste modo:

$$I_{Lo} = I_o \rightarrow \Delta I_{Lo} \approx 0$$

Já a corrente de pico no indutor dependerá da ondulação de corrente, que pode ser determinada no intervalo de condução da chave. A corrente em um indutor é determinada pela expressão a seguir:

$$v_{Lo}(t) = L_o \cdot \frac{d_{iLo}(t)}{dt}$$

Considerando que a corrente terá comportamento linear, pode-se aproximar a expressão anterior por:

$$V_{Lo} = L_o \cdot \frac{\Delta I_{Lo}}{\Delta t}$$

Assim, considerando a primeira etapa de operação:

$$V_{Lo} = L_o \cdot \frac{\Delta I_{Lo}}{\Delta t} \rightarrow \Delta I_{Lo} = \frac{V_{Lo}}{L_o} \cdot \Delta t ;$$

$$\Delta I_{Lo} = \frac{V_{Lo}}{L_o} \cdot \Delta t = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot T_{on(S_1)} = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot D \cdot T_s ;$$

$$\Delta I_{Lo} = \frac{V_i - V_o}{L_o \cdot F_s} \cdot D = \frac{V_i - ((2 \cdot D - 1) \cdot V_o)}{L_o \cdot F_s} \cdot D$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i - V_o}{L_o \cdot F_s} \cdot D$$

A expressão anterior pode ser reescrita como:

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i - V_o}{L_o \cdot F_s} \cdot D = \frac{V_i - ((2 \cdot D - 1) \cdot V_i)}{L_o \cdot F_s} \cdot D$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} \cdot 2 \cdot D \cdot (1 - D)$$

Assim, o indutor pode ser determinado por:

$$L_o = \frac{V_i}{\Delta I_{L_o} \cdot F_s} \cdot 2 \cdot D \cdot (1 - D)$$

O comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica pode ser observada na Figura 14. Este gráfico foi elaborado considerando-se a ondulação de corrente parametrizada em função de V_i , L_o e F_s . Assim, pela Figura 14 pode-se determinar a máxima ondulação de corrente no indutor, que ocorre para $D = 0,5$, como sendo:

$$\Delta I_{L_o(\max)} = \frac{V_i}{2 \cdot L_o \cdot F_s}$$

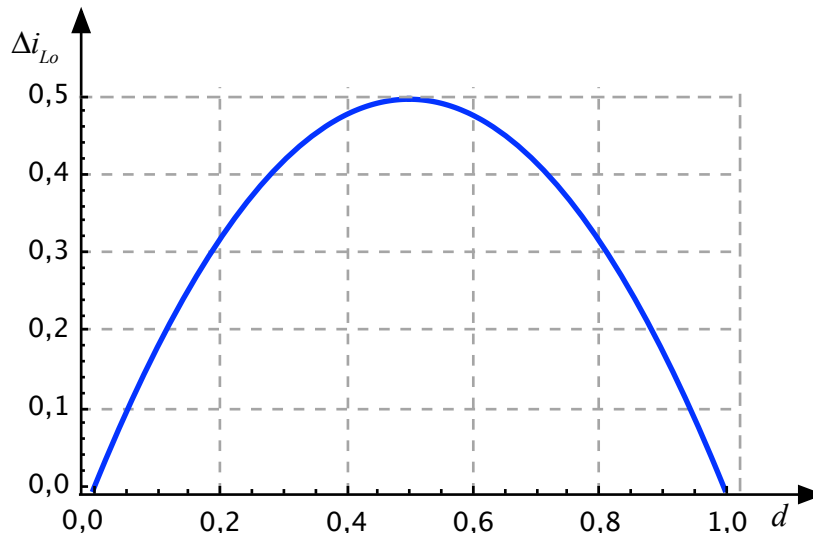


Figura 14 – Comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica.

Assim, a corrente máxima no indutor será a soma de sua corrente média/pico com a metade da ondulação de corrente, pois esta insere uma variação para mais e para menos na corrente deste elemento.

$$I_{Lo(\max)} = I_{Lo} + \frac{\Delta I_{Lo}}{2} .$$

Considerando que toda ondulação de corrente do indutor (ΔI_{Lo}) circula pelo capacitor, sua corrente eficaz em um período de comutação será dada por:

$$I_{Co(ef)} = \frac{\Delta I_{Lo}}{2 \cdot \sqrt{3}} .$$

Por sua vez, a corrente máxima (de pico) no capacitor será:

$$I_{Co(\max)} = \frac{\Delta I_{Lo}}{2} .$$

Já a corrente eficaz no indutor será a soma quadrática da corrente eficaz de saída e da corrente eficaz no capacitor de filtro:

$$I_{Lo(ef)} = \sqrt{I_{Co(ef)}^2 + I_o^2} ;$$

$$I_{Lo(ef)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{Lo}}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + (I_o)^2} .$$

Vale destacar que todas as expressões determinadas anteriormente são deduzidas a partir das formas de onda apresentadas na Figura 6. Estas expressões tem validade para um período de comutação e próximo ao pico da tensão senoidal de saída. A rigor, estas expressões deveriam ser estendidas com envoltória senoidal, para se obter seu valor ao longo do período do sinal de saída do conversor.

2.1.4 Rendimento do Conversor

O circuito é ideal, resultando sem perdas. Pode-se demonstrar que:

$$P_o = V_o \cdot I_o .$$

$$P_i = V_i \cdot I_i .$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} = 1 ;$$

$$V_o \cdot I_o = V_i \cdot I_i ;$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o} .$$

2.1.5 Esforços de Corrente e Tensão nos Semicondutores

A tensão máxima sobre as chaves e sobre os diodos é igual ao valor de pico da tensão de

entrada:

$$V_{S1 \rightarrow S4} = V_{D1 \rightarrow D4} = V_{i(pk)} = V_i$$

Já as correntes nos semicondutores, para fins de simplificação, serão consideradas igual a corrente de pico na carga:

$$I_{S1 \rightarrow S4} = I_{D1 \rightarrow D4} = I_{o(pk)}$$

2.1.6 Ondulação na Tensão de Saída

A ondulação (*ripple*) na tensão de saída é determinada a partir da corrente que circula pelo capacitor de filtro, conforme pode ser observado nas Figura 6 e Figura 15. Adota-se aqui o mesmo procedimento realizado nos conversores cc-cc, resultando em:

$$\Delta V_{Co} = \frac{4 \cdot \Delta I_{Lo}}{\pi^3 \cdot C_o \cdot F_s} \rightarrow \Delta V_{Co} = \frac{2 \cdot V_i}{\pi^3 \cdot C_o \cdot L_o \cdot F_s^2}$$

Assim, o capacitor pode ser determinado por:

$$C_o = \frac{4 \cdot \Delta I_{Lo}}{\pi^3 \cdot \Delta V_{Co} \cdot F_s} \rightarrow C_o = \frac{2 \cdot V_i}{\pi^3 \cdot \Delta V_{Co} \cdot L_o \cdot F_s^2}$$

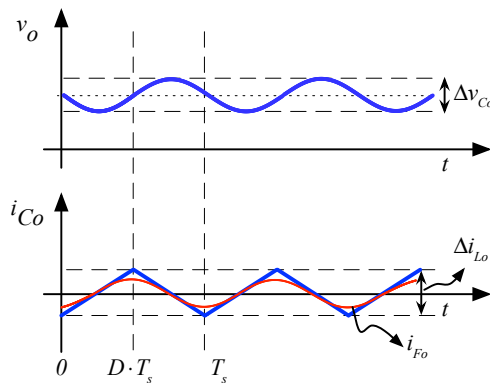


Figura 15 – Formas de onda da tensão e corrente no capacitor de filtro.

2.1.7 Índice de Modulação

A modulação de um inversor ponte completa é realizada conforme estudado nos capítulos anteriores e mostrada na Figura 16.

Lembrando que o ganho estático do conversor ponte completa dois níveis é dado por:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = (2 \cdot D - 1) \rightarrow 0 \leq D \leq 1$$

Ainda conforme a Figura 16 e de acordo com os capítulos anteriores, a razão cíclica para

modulação PWM senoidal será:

$$d(t) = D + IM \cdot \text{seno}(t)$$

Onde a razão cíclica terá parte constante (D) e parte variável ($IM \cdot \text{seno}(t)$).

O termo que determina a amplitude da parte variável é denominado de índice de modulação (IM), e na verdade, representa a razão cíclica de um inversor, visto ser o elemento que determina a amplitude da tensão de saída. O índice de modulação é definido como a relação entre a tensão de pico na saída e a tensão na entrada, podendo variar entre 0 e 1 (0 e 100%), sendo dado por:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} \rightarrow 0 \leq IM \leq 1$$

Como exemplo, se um inversor tem tensão contínua na entrada de 400 V e se a tensão de saída for de 220 V, então o índice de modulação será:

$$V_i = 400V, V_{o(pk)} = 220 \cdot \sqrt{2} = 311V ;$$

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{311}{400} = 0,78$$

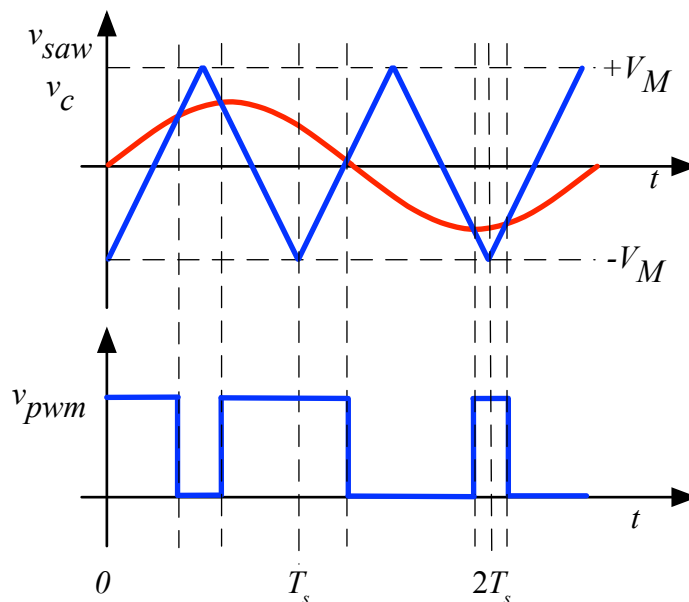


Figura 16 – Formas de onda da modulação do inversor ponte completa dois níveis.

2.2 Conversor CC-CA Ponte Completa – Modulação Unipolar

No item anterior foi estudada a operação do conversor ponte completa para modulação dois níveis (bipolar), sendo que esta se assemelha a operação do inversor meia ponte do capítulo anterior deste curso. Agora se estudará o conversor ponte completa operando com modulação três níveis

(unipolar), onde se terá a tensão na saída assumindo os valores $+v_i$, $-v_i$ e zero.

2.2.1 Operação sem Tempo Morto e Semiciclo Positivo na Saída

O inversor de tensão ponte completa operando no modo de condução contínua e sem tempo morto, para modulação unipolar, durante o semiciclo positivo da tensão de saída, apresenta quatro etapas de operação, mostradas nas Figura 17 a Figura 22. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa ($0, t_1$) – Chaves S_1 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte, isto é, $+v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_4/D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o . Esta etapa está mostrada na Figura 17;

2ª Etapa (t_1, t_2) – Chaves S_1 e S_3 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_4 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_3/D_3 . Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída e ocorre a desmagnetização do indutor L_o . Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 18 e Figura 19;

3ª Etapa (t_2, t_3) – Chaves S_1 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte, isto é, $+v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_4/D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o . Esta etapa está mostrada na Figura 20;

4ª Etapa (t_3, t_4) – Chaves S_2 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_1 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_2/D_2 e S_4/D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída e ocorre a desmagnetização do indutor L_o . Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 21 e Figura 22.

Ao finalizar a quarta etapa retorna-se à primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do inversor de tensão ponte completa são mostradas na Figura 23. Nesta figura tem-se os sinais de comando dos interruptores (S_1, S_2, S_3 e S_4), denominados de v_{g1}, v_{g2}, v_{g3} e v_{g4} , a seguir a tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} . Posteriormente se tem a corrente no indutor (i_{L_o}) e a tensão de saída (v_o).

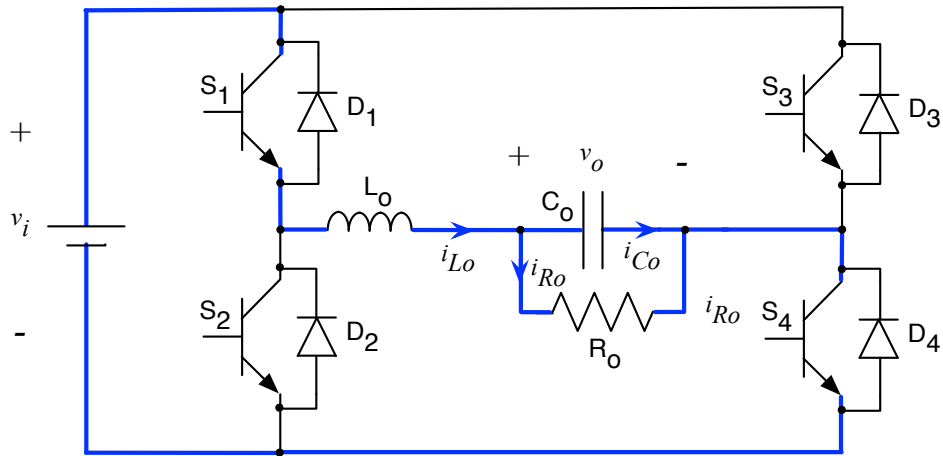


Figura 17 – Primeira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, sem tempo morto e $v_o > 0$.

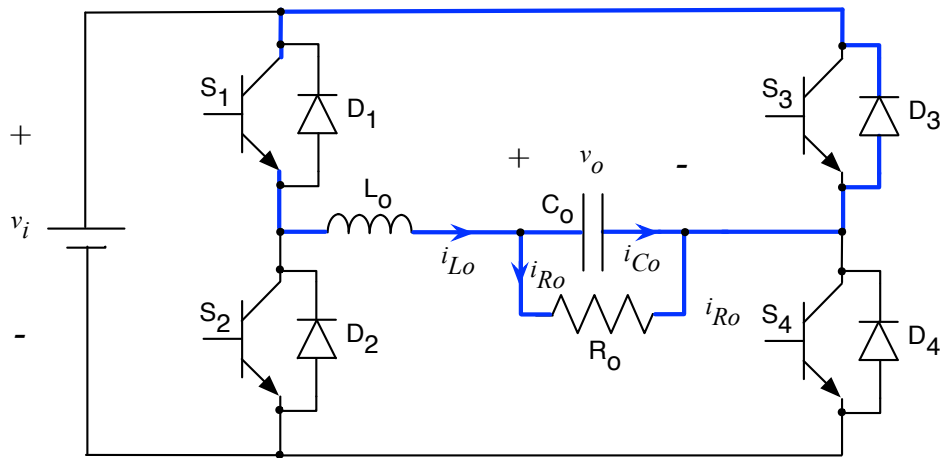


Figura 18 – Segunda etapa de operação do inversor com modulação três níveis, sem tempo morto, corrente positiva e $v_o > 0$.

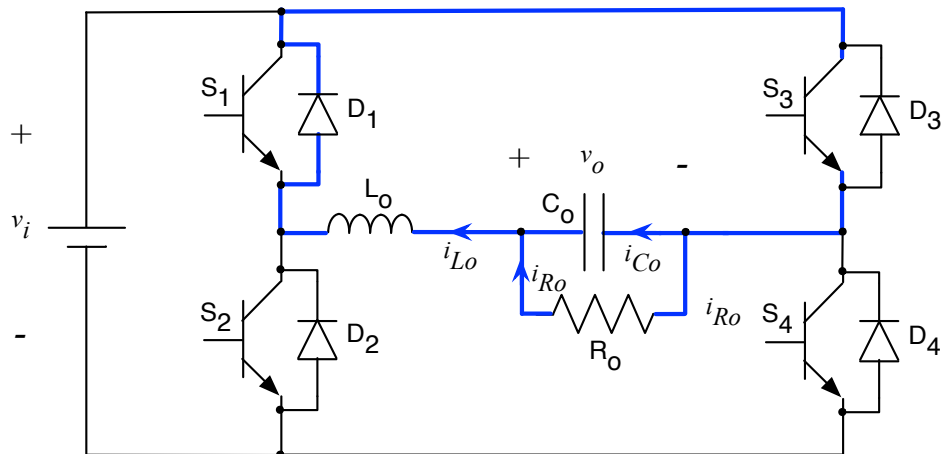


Figura 19 – Segunda etapa de operação do inversor com modulação três níveis, sem tempo morto, corrente negativa e $v_o > 0$.

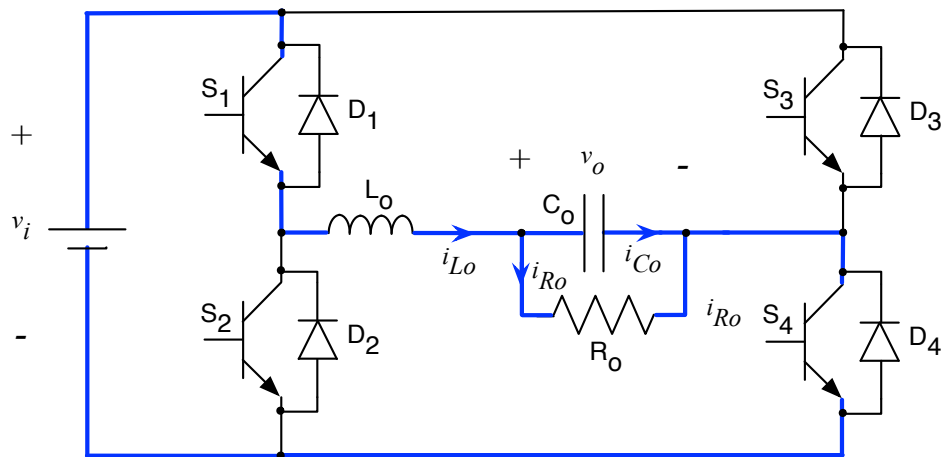


Figura 20 – Terceira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, sem tempo morto e $v_o > 0$.

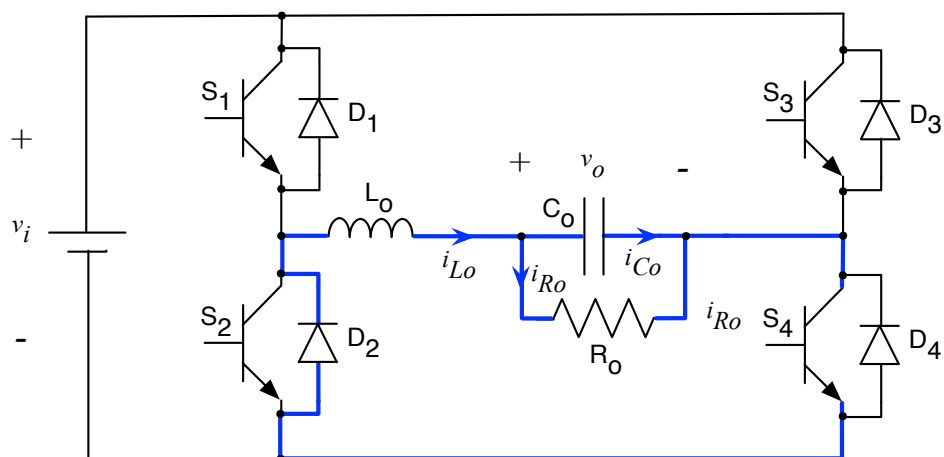


Figura 21 – Quarta etapa de operação do inversor com modulação três níveis, corrente positiva, sem tempo morto e $v_o > 0$.

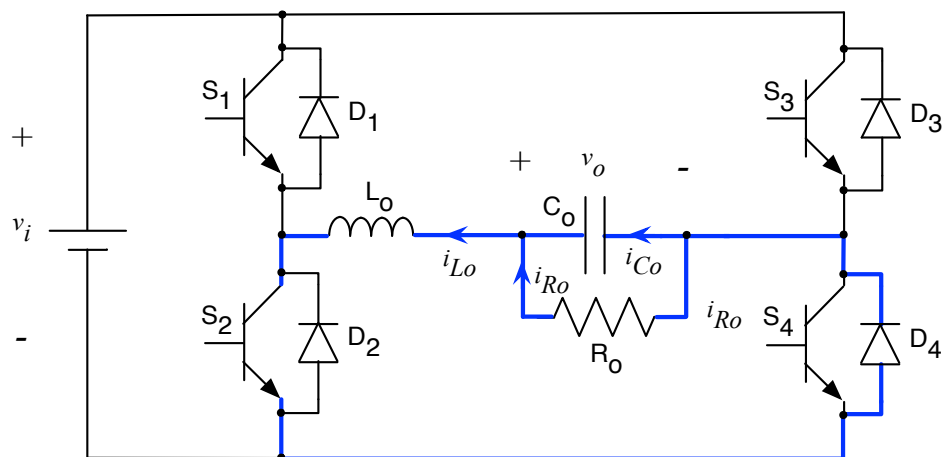


Figura 22 – Quarta etapa de operação do inversor com modulação três níveis, corrente negativa, sem tempo morto e $v_o > 0$.

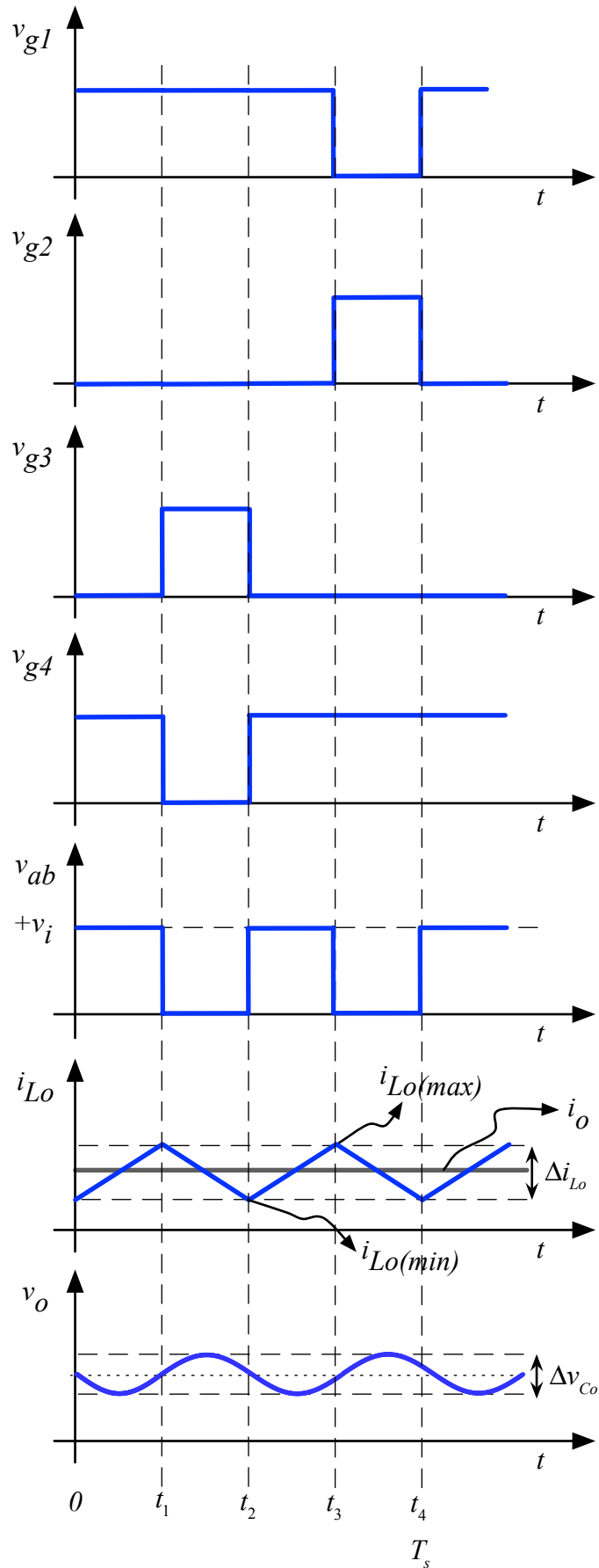


Figura 23 – Formas de onda do inversor de tensão ponte completa para modulação três níveis, sem tempo morto e $v_o > 0$.

2.2.2 Operação sem Tempo Morto e Semiciclo Negativo na Saída

O inversor de tensão ponte completa operando no modo de condução contínua e sem tempo morto, para modulação unipolar, durante o semiciclo negativo da tensão de saída, apresenta quatro etapas de operação, mostradas nas Figura 24 a Figura 29. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa (0, t₁) – Chaves S₂ e S₃ conduzindo (*on*) e chaves S₁ e S₄ abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte invertida, isto é, $-v_i$. A corrente circula por L_o, pela saída e pelas chaves S₂/D₂ e S₃/D₃. Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o. Esta etapa está mostrada na Figura 24;

2ª Etapa (t₁, t₂) – Chaves S₂ e S₄ conduzindo (*on*) e chaves S₁ e S₃ abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o, pela saída e pelas chaves S₂/D₂ e S₄/D₄. Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída e ocorre a desmagnetização do indutor L_o. Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 25 e Figura 26;

3ª Etapa (t₂, t₃) – Chaves S₂ e S₃ conduzindo (*on*) e chaves S₁ e S₄ abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte invertida, isto é, $-v_i$. A corrente circula por L_o, pela saída e pelas chaves S₂/D₂ e S₃/D₃. Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o. Esta etapa está mostrada na Figura 27;

4ª Etapa (t₃, t₄) – Chaves S₁ e S₃ conduzindo (*on*) e chaves S₂ e S₄ abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o, pela saída e pelas chaves S₁/D₁ e S₃/D₃. Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída e ocorre a desmagnetização do indutor L_o. Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 28 e Figura 29.

Ao finalizar a quarta etapa retorna-se à primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do inversor de tensão ponte completa são mostradas na Figura 30. Nesta figura tem-se os sinais de comando dos interruptores (S₁, S₂, S₃ e S₄), denominados de v_{g1} , v_{g2} , v_{g3} e v_{g4} , a seguir a tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} . Posteriormente se tem a corrente no indutor (i_{L_o}) e a tensão de saída (v_o).

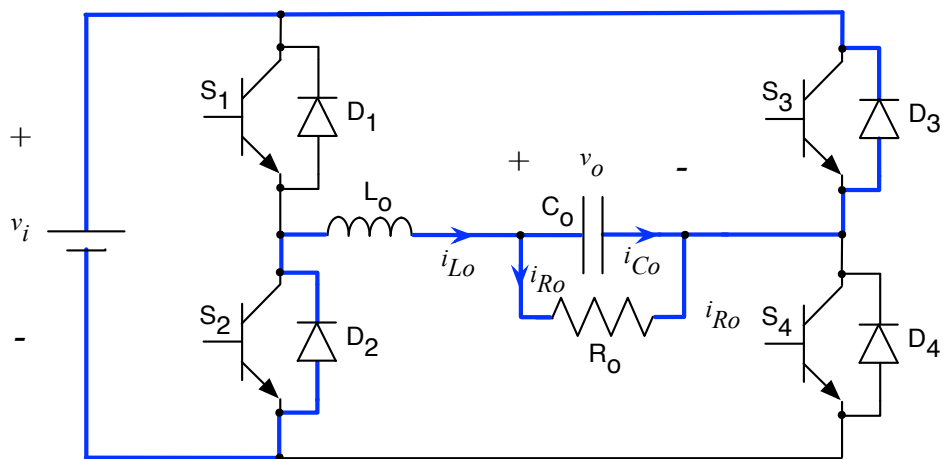


Figura 24 – Primeira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, sem tempo morto e $v_o < 0$.

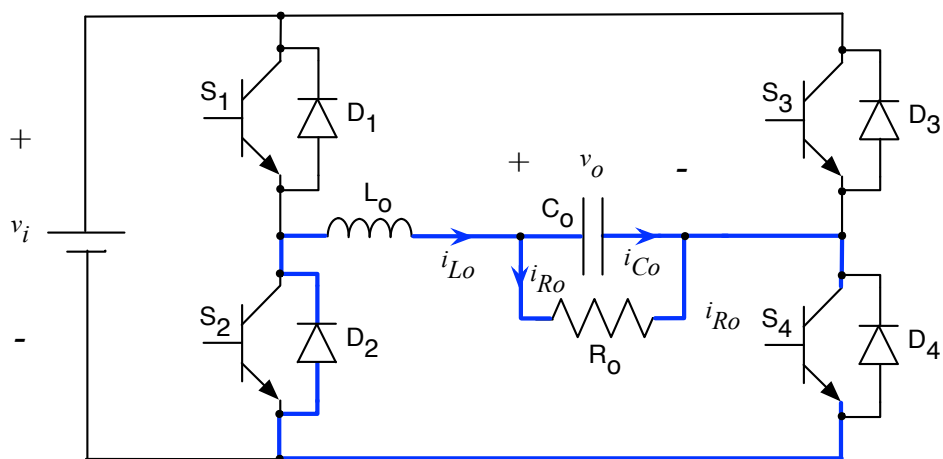


Figura 25 – Segunda etapa de operação do inversor com modulação três níveis, corrente positiva, sem tempo morto e $v_o < 0$.

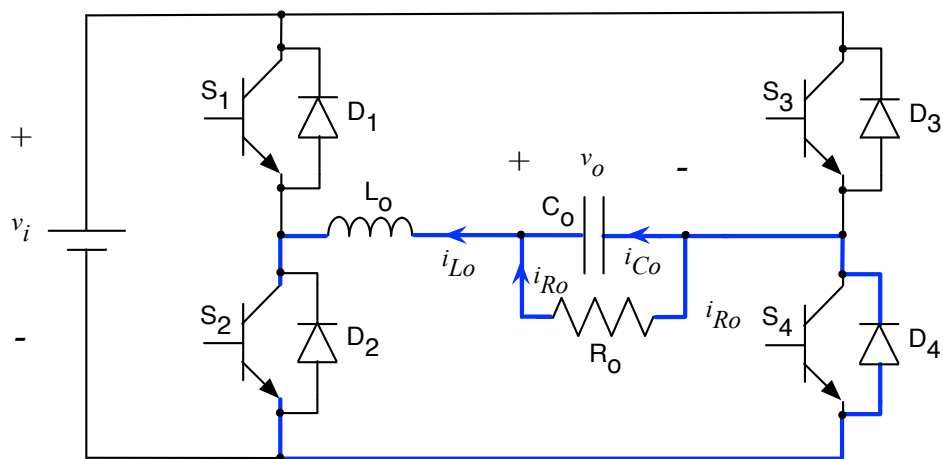


Figura 26 – Segunda etapa de operação do inversor com modulação três níveis, corrente negativa, sem tempo morto e $v_o < 0$.

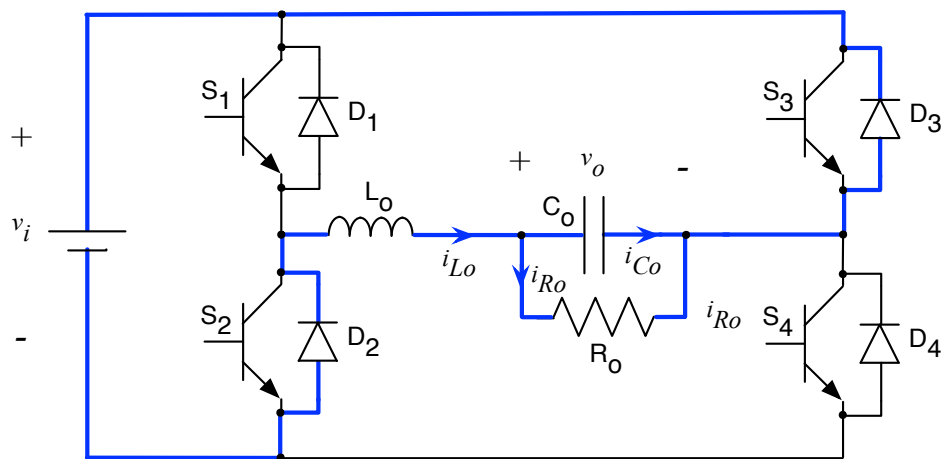


Figura 27 – Terceira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, sem tempo morto e $v_o < 0$.

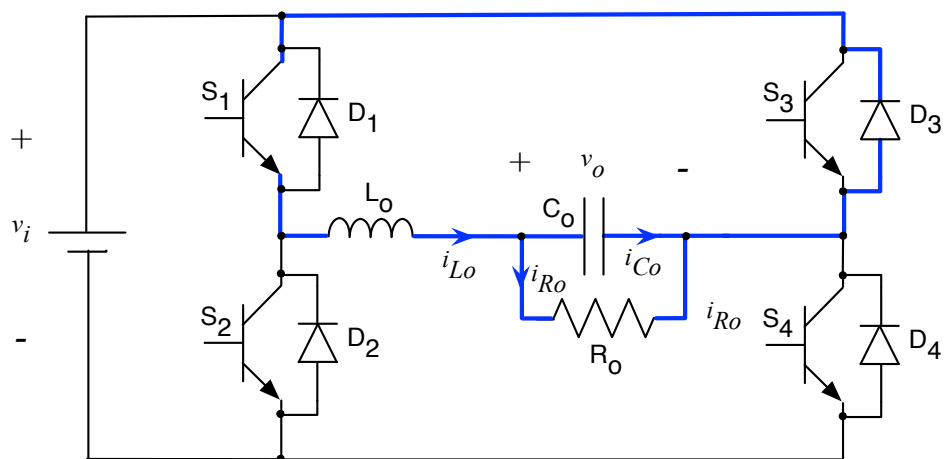


Figura 28 – Quarta etapa de operação do inversor com modulação três níveis, corrente positiva, sem tempo morto e $v_o < 0$.

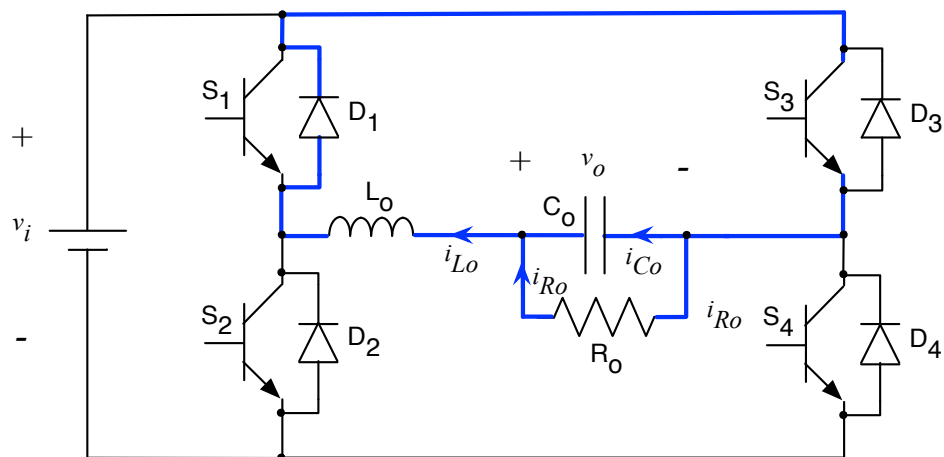


Figura 29 – Quarta etapa de operação do inversor com modulação três níveis, corrente negativa, sem tempo morto e $v_o < 0$.

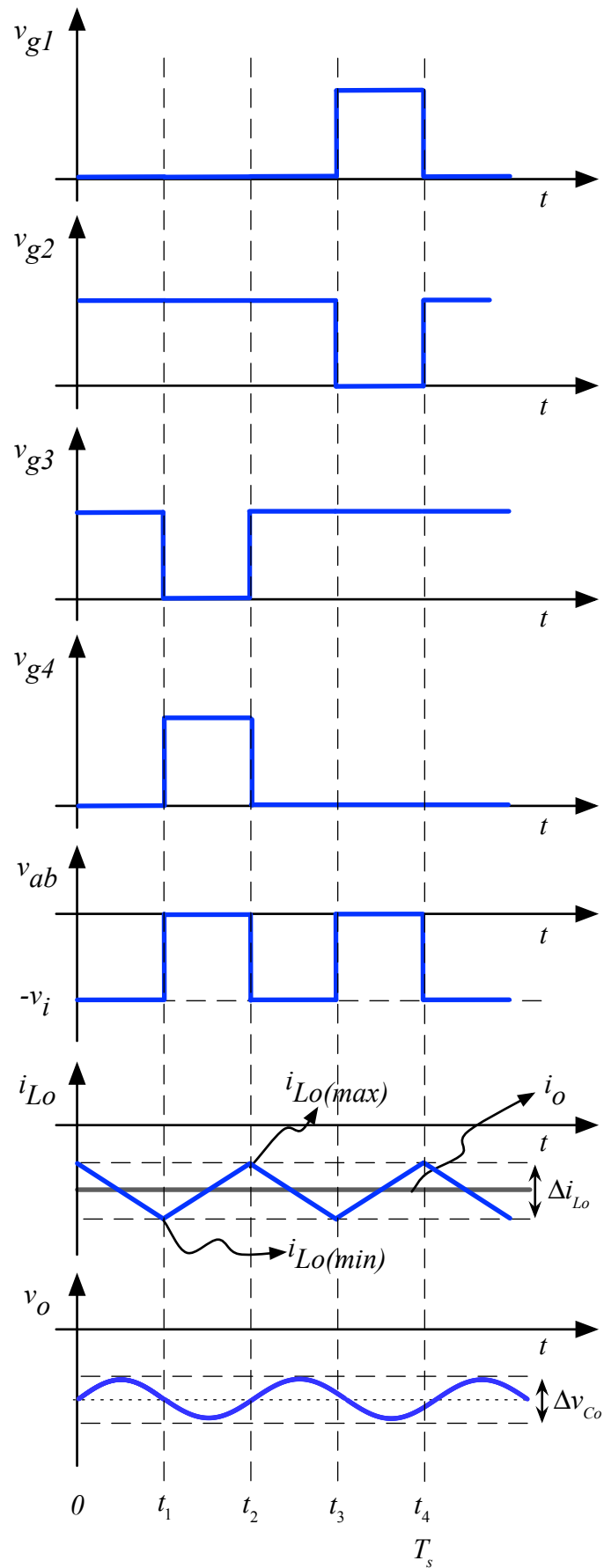


Figura 30 – Formas de onda do inversor de tensão ponte completa para modulação três níveis, sem tempo morto e $v_o < 0$.

2.2.1 Operação com Tempo Morto e Semiciclo Positivo na Saída

O inversor de tensão ponte completa operando no modo de condução contínua e com tempo morto, para modulação unipolar, durante o semiciclo positivo da tensão de saída, apresenta oito etapas de operação, mostradas nas Figura 31 a Figura 40. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa ($0, t_1$) – Chaves S_1 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte, isto é, $+v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_4/D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o . Esta etapa está mostrada na Figura 31;

2ª Etapa (t_1, t_2) – Chave S_1 conduzindo (*on*) e chaves S_2, S_3 e S_4 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero ou igual a $+v_i$, dependendo do sentido da corrente no indutor. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e D_3 ou S_1/D_1 e D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) está ou não desconectada da saída e ocorre a magnetização ou desmagnetização do indutor L_o , dependendo do sentido da corrente no mesmo, e por isso se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 32 e Figura 33. Nesta etapa, o tempo morto ocorre entre a comutação da chaves S_3 e S_4 ;

3ª Etapa (t_2, t_3) – Chaves S_1 e S_3 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_4 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_3/D_3 . Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída e ocorre a desmagnetização do indutor L_o . Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 34 e Figura 35;

4ª Etapa (t_3, t_4) – Idêntica a segunda etapa;

5ª Etapa (t_4, t_5) – Idêntica a primeira etapa (Figura 36);

6ª Etapa (t_5, t_6) – Chave S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_1, S_2 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero ou igual a $+v_i$, dependendo do sentido da corrente no indutor. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_4/D_4 e D_2 ou S_4/D_4 e D_1 . Nesta etapa a fonte (v_i) está ou não desconectada da saída e ocorre a magnetização ou desmagnetização do indutor L_o , dependendo do sentido da corrente no mesmo, e por isso se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 37 e Figura 38. Nesta etapa, o tempo morto ocorre entre a comutação da chaves S_1 e S_2 ;

7ª Etapa (t_6, t_7) – Chaves S_2 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_1 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_2/D_2 e S_4/D_4 . Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída

e ocorre a desmagnetização do indutor L_o . Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 39 e Figura 40.

8ª Etapa (t_7, t_8) – Idêntica a sexta etapa.

Ao finalizar a oitava etapa retorna-se à primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do inversor de tensão ponte completa são mostradas na Figura 41. Nesta figura tem-se os sinais de comando dos interruptores (S_1, S_2, S_3 e S_4), denominados de v_{g1}, v_{g2}, v_{g3} e v_{g4} , a seguir a tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} . Posteriormente se tem a corrente no indutor (i_{L_o}) e a tensão de saída (v_o).

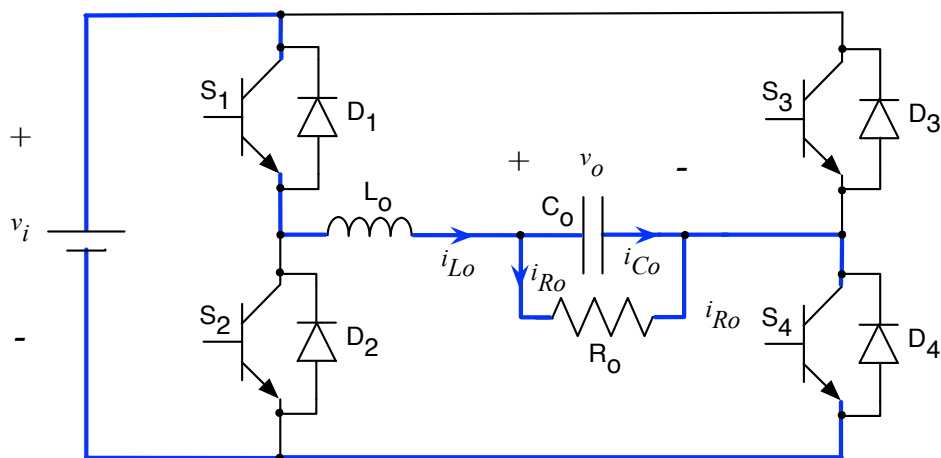


Figura 31 – Primeira (e quinta) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto e $v_o > 0$.

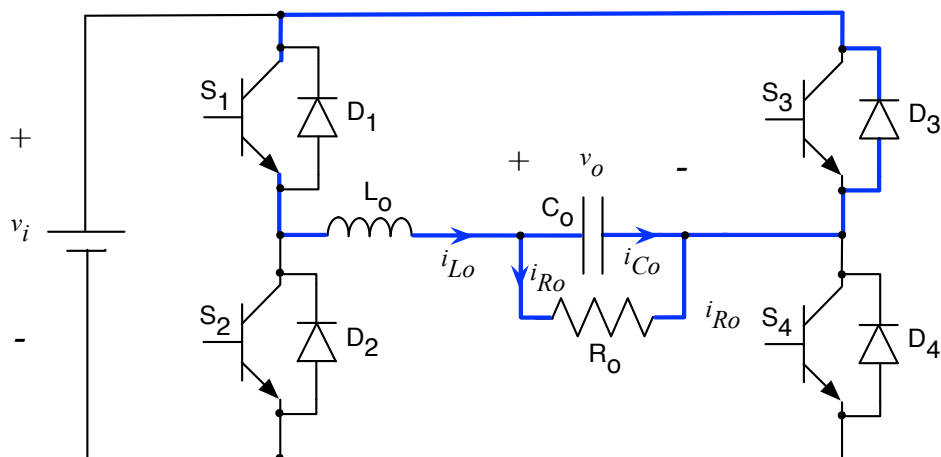


Figura 32 – Segunda (e quarta) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o > 0$.

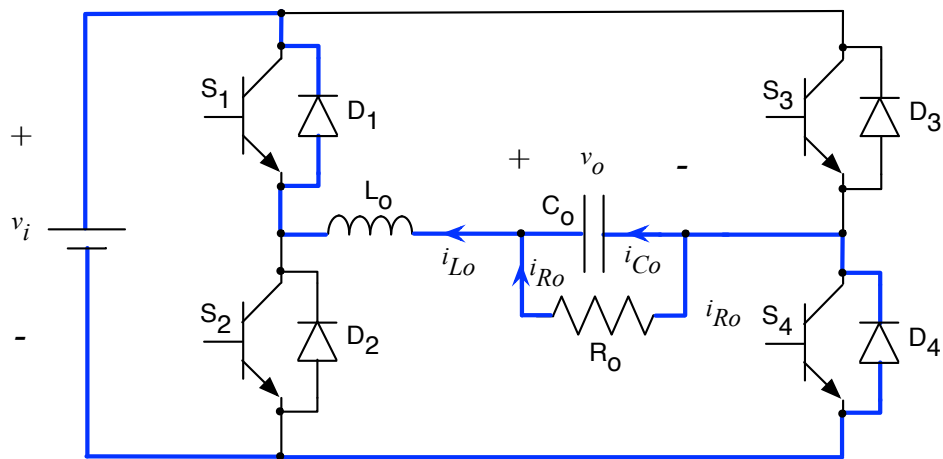


Figura 33 – Segunda (e quarta) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o > 0$.

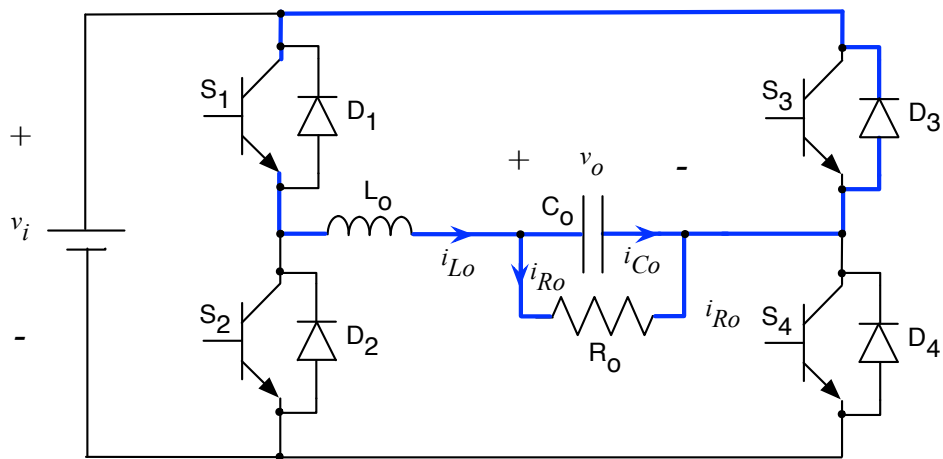


Figura 34 – Terceira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o > 0$.

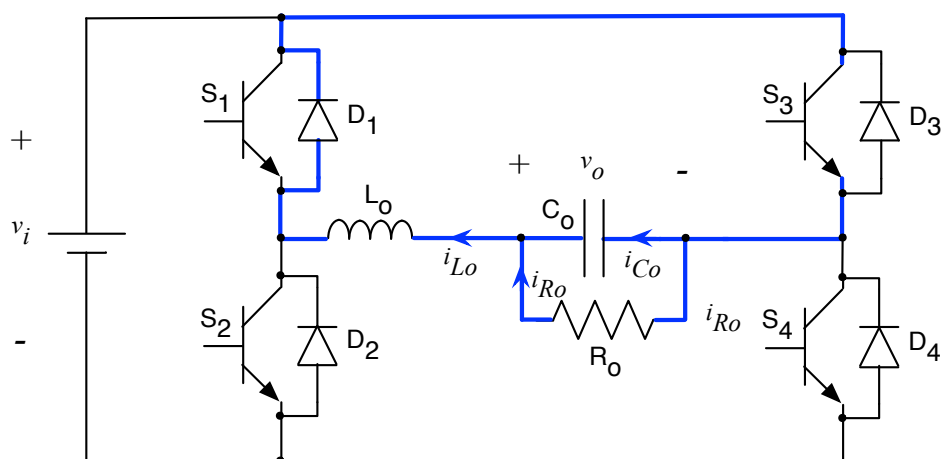


Figura 35 – Terceira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o > 0$.

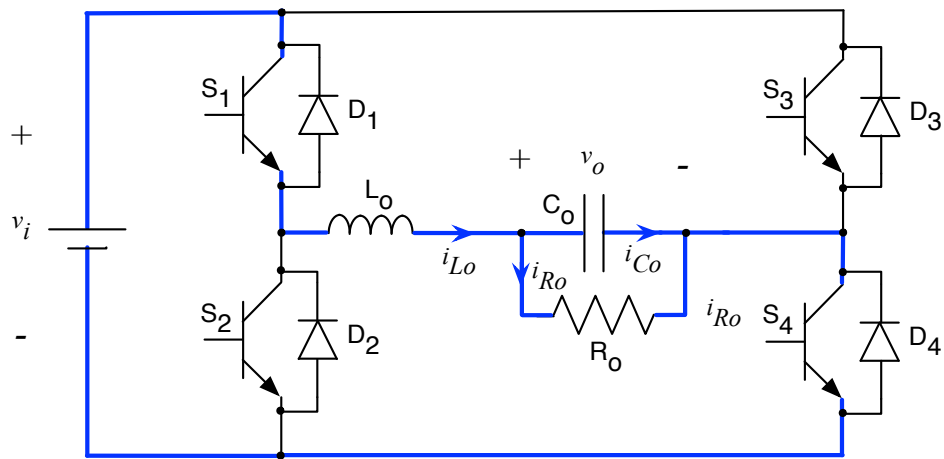


Figura 36 – Quinta etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto e $v_o > 0$.

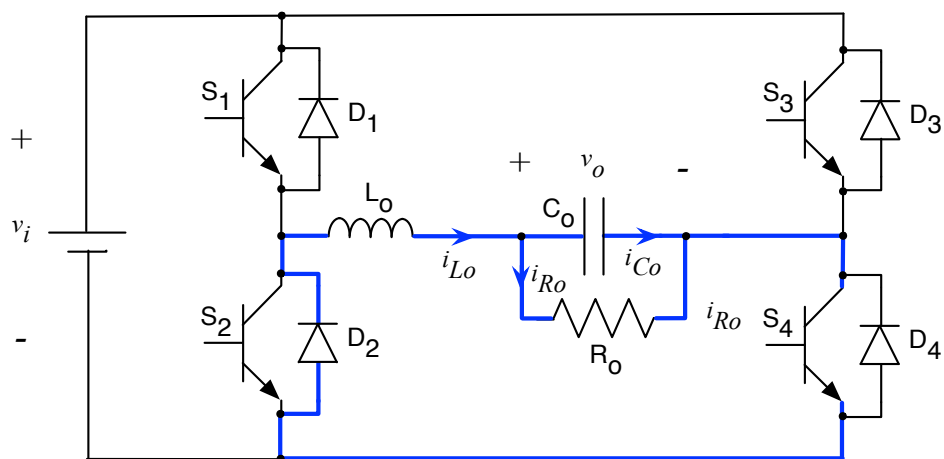


Figura 37 – Sexta (e oitava) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o > 0$.

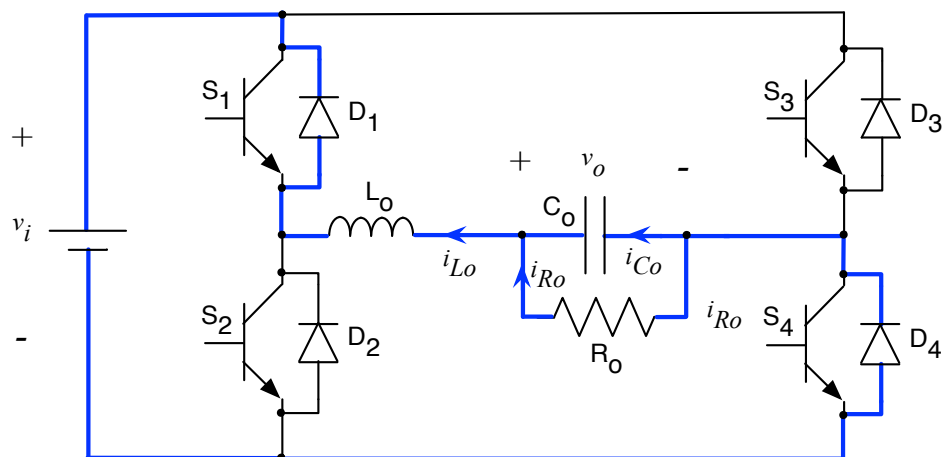


Figura 38 – Sexta (e oitava) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o > 0$.

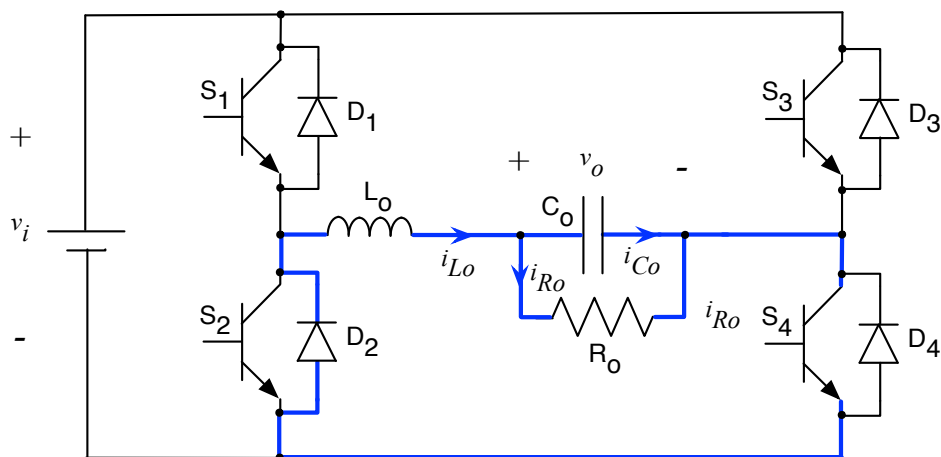


Figura 39 – Sétima etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o > 0$.

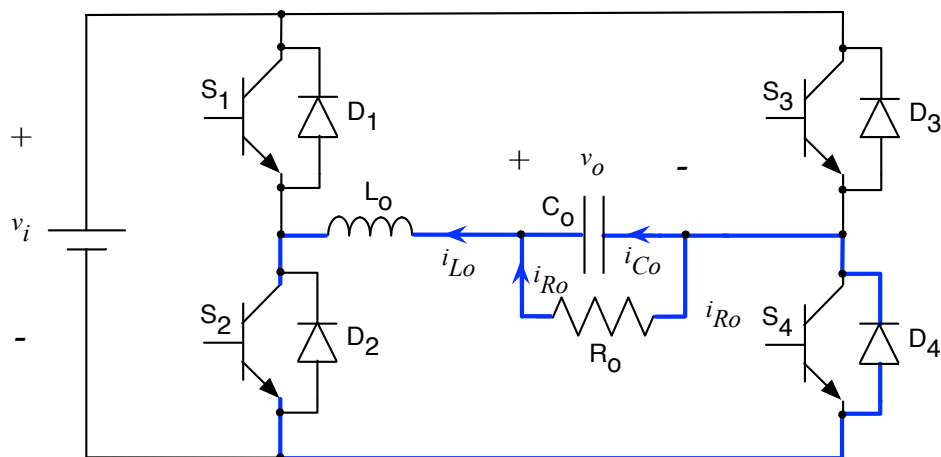


Figura 40 – Sétima etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o > 0$.

O número de etapas de conversor ponte completa operando com modulação três níveis e tempo morto é grande, a depender de como foi realizada a estratégia de modulação. Em outras palavras, a sequência de etapas pode ficar diferente conforme a implementação do circuito de modulação. Por exemplo, no tempo morto, pode-se usar a estratégia de abrir todas as chaves. Neste caso as etapas ficariam ligeiramente diferentes, inclusive afetando as formas de onda mostradas na Figura 41. Por isso, a sequência apresentada aqui é a mais comum empregada em inversores de tensão.

Destaca-se ainda que a alternância entre o comando das chaves S_1 e S_3 e S_2 e S_4 para gerar o nível zero na saída é realizado para distribuir de maneira uniforme o aquecimento entre as chaves, utilizando todas elas, seja no semiciclo positivo da tensão de saída, ou no semiciclo negativo, como será visto na sequência.

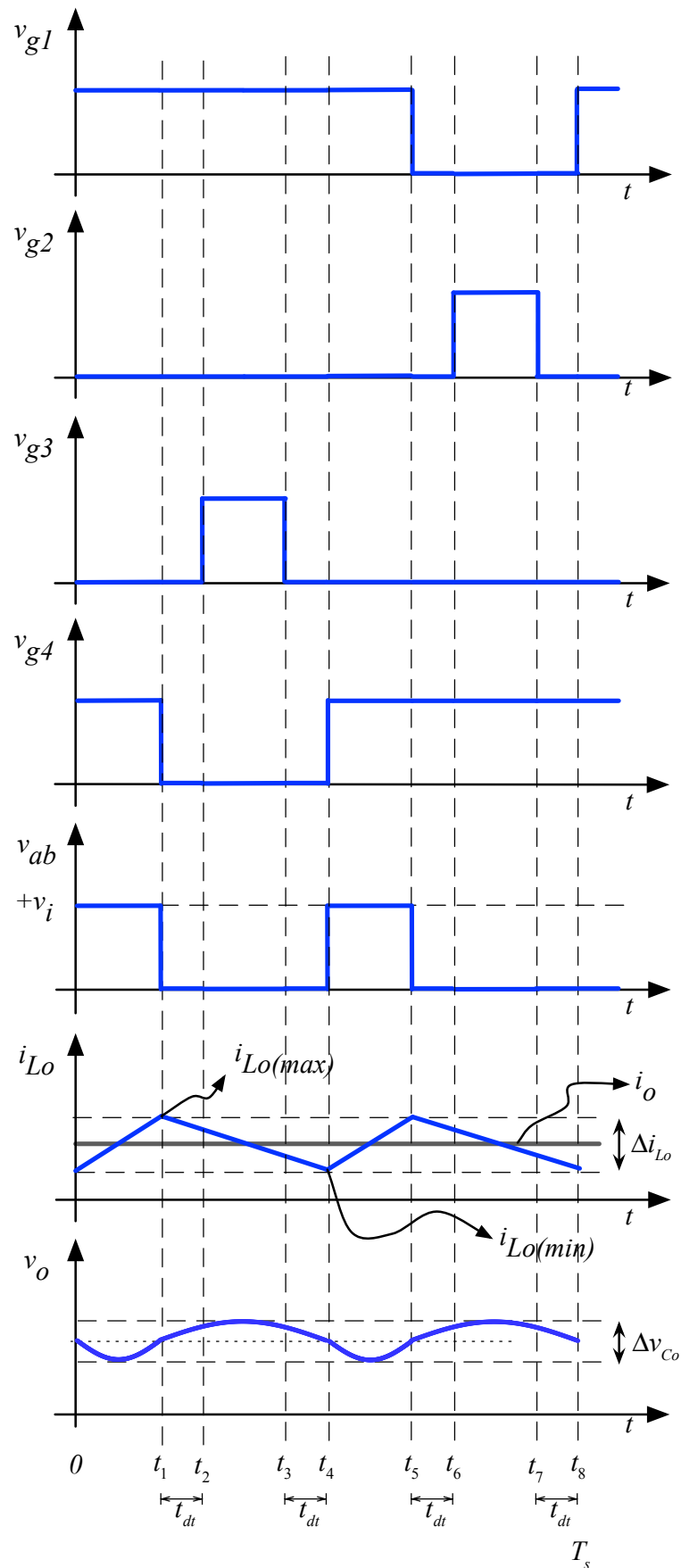


Figura 41 – Formas de onda do inversor de tensão ponte completa para modulação três níveis, com tempo morto e $v_o > 0$.

2.2.1 Operação com Tempo Morto e Semiciclo Negativo na Saída

O inversor de tensão ponte completa operando no modo de condução contínua e com tempo morto, para modulação unipolar, durante o semiciclo negativo da tensão de saída, apresenta oito etapas de operação, mostradas nas Figura 42 a Figura 51. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa ($0, t_1$) – Chaves S_2 e S_3 conduzindo (*on*) e chaves S_1 e S_4 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte invertida, isto é, $-v_i$. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_2/D_2 e S_3/D_3 . Nesta etapa a fonte (v_i) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o . Esta etapa está mostrada na Figura 42;

2ª Etapa (t_1, t_2) – Chave S_2 conduzindo (*on*) e chaves S_1, S_3 e S_4 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero ou igual a $-v_i$, dependendo do sentido da corrente no indutor. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_2/D_2 e D_4 ou S_2/D_2 e D_3 . Nesta etapa a fonte (v_i) está ou não desconectada da saída e ocorre a magnetização ou desmagnetização do indutor L_o , dependendo do sentido da corrente no mesmo, e por isso se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 43 e Figura 44. Nesta etapa, o tempo morto ocorre entre a comutação da chaves S_3 e S_4 ;

3ª Etapa (t_2, t_3) – Chaves S_2 e S_4 conduzindo (*on*) e chaves S_1 e S_3 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_3/D_3 . Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída e ocorre a desmagnetização do indutor L_o . Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 45 e Figura 46;

4ª Etapa (t_3, t_4) – Idêntica a segunda etapa;

5ª Etapa (t_4, t_5) – Idêntica a primeira etapa (Figura 47);

6ª Etapa (t_5, t_6) – Chave S_3 conduzindo (*on*) e chaves S_1, S_2 e S_4 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero ou igual a $-v_i$, dependendo do sentido da corrente no indutor. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_3/D_3 e D_1 ou S_3/D_3 e D_2 . Nesta etapa a fonte (v_i) está ou não desconectada da saída e ocorre a magnetização ou desmagnetização do indutor L_o , dependendo do sentido da corrente no mesmo, e por isso se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 48 e Figura 49. Nesta etapa, o tempo morto ocorre entre a comutação da chaves S_1 e S_2 ;

7ª Etapa (t_6, t_7) – Chaves S_1 e S_3 conduzindo (*on*) e chaves S_2 e S_4 abertas (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a zero. A corrente circula por L_o , pela saída e pelas chaves S_1/D_1 e S_3/D_3 . Nesta etapa a fonte (v_i) está desconectada da saída

e ocorre a desmagnetização do indutor L_o . Conforme o sentido da corrente no indutor se tem a condução de chaves e diodos diferentes, como mostrado nas Figura 50 e Figura 51.

8ª Etapa (t_7, t_8) – Idêntica a sexta etapa.

Ao finalizar a oitava etapa retorna-se à primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do inversor de tensão ponte completa são mostradas na Figura 52. Nesta figura tem-se os sinais de comando dos interruptores (S_1, S_2, S_3 e S_4), denominados de v_{g1}, v_{g2}, v_{g3} e v_{g4} , a seguir a tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} . Posteriormente se tem a corrente no indutor (i_{L_o}) e a tensão de saída (v_o).

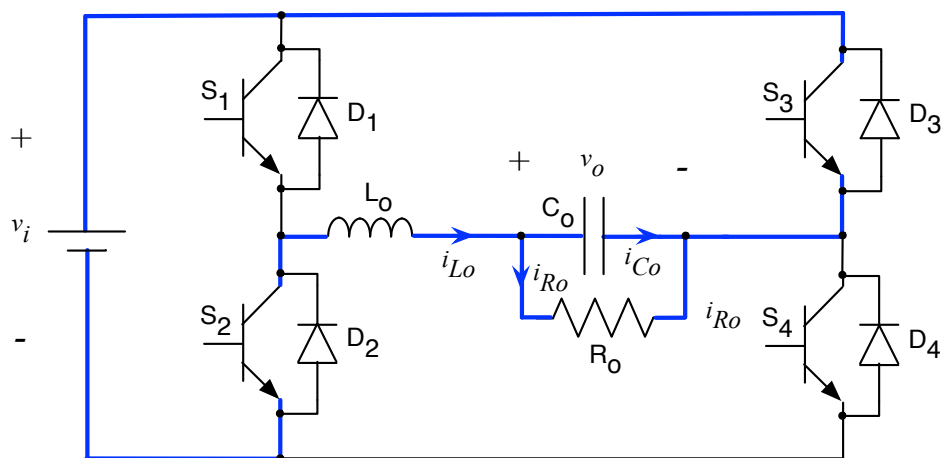


Figura 42 – Primeira (e quinta) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto e $v_o < 0$.

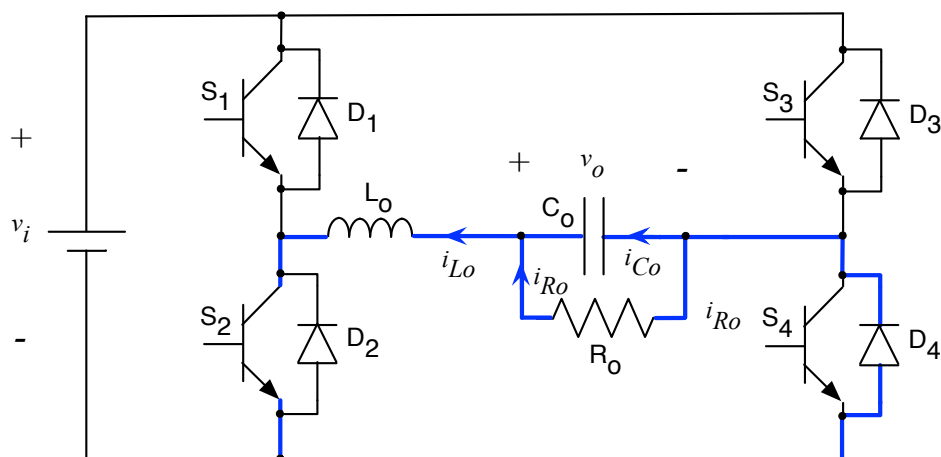


Figura 43 – Segunda (e quarta) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o < 0$.

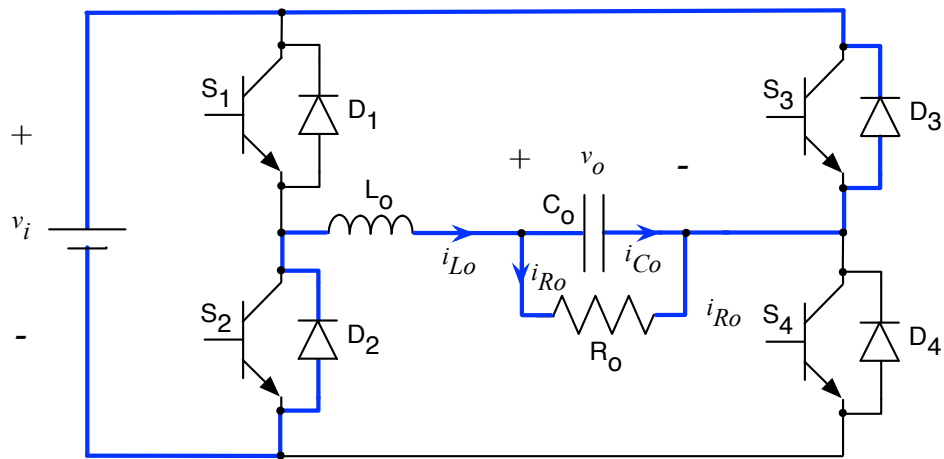


Figura 44 – Segunda (e quarta) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o < 0$.

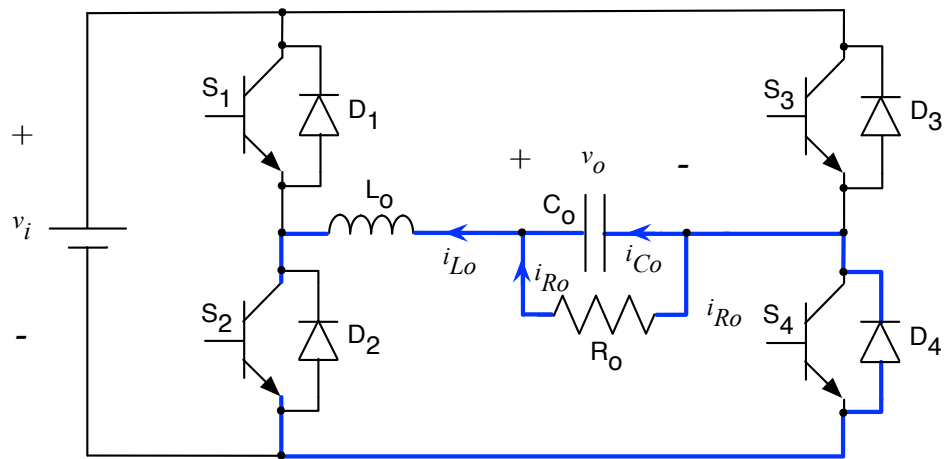


Figura 45 – Terceira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o < 0$.

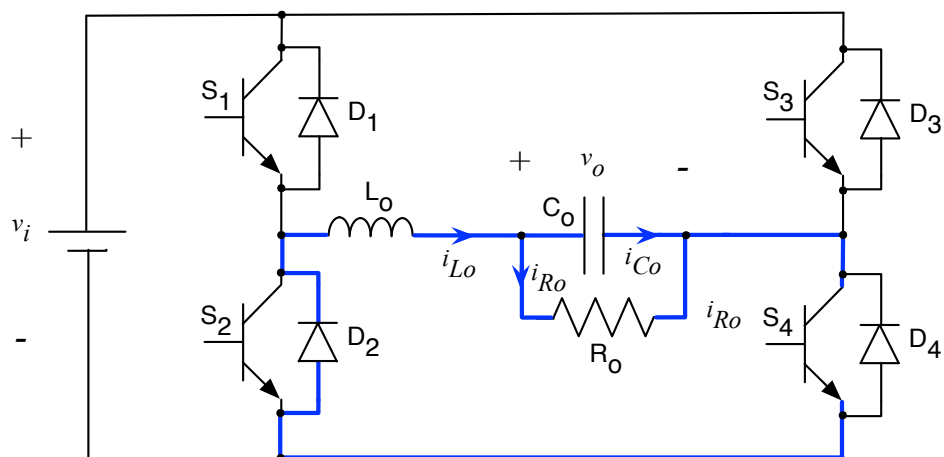


Figura 46 – Terceira etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o < 0$.

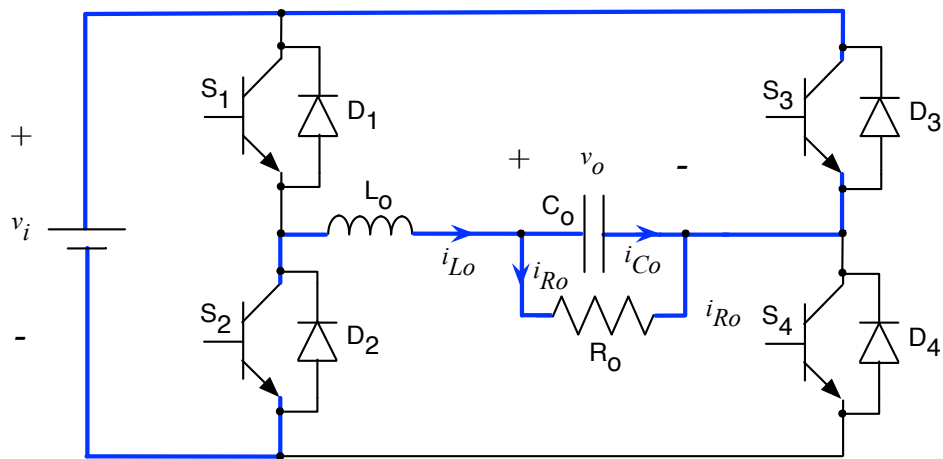


Figura 47 – Quinta etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto e $v_o < 0$.

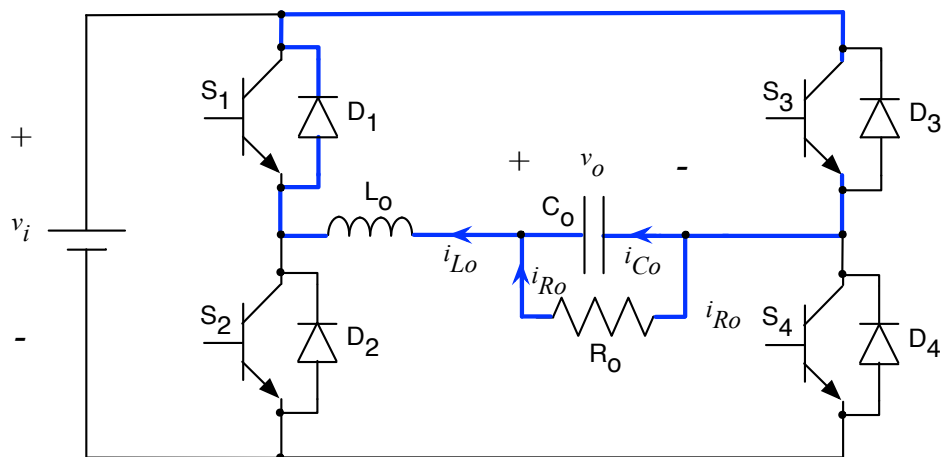


Figura 48 – Sexta (e oitava) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o < 0$.

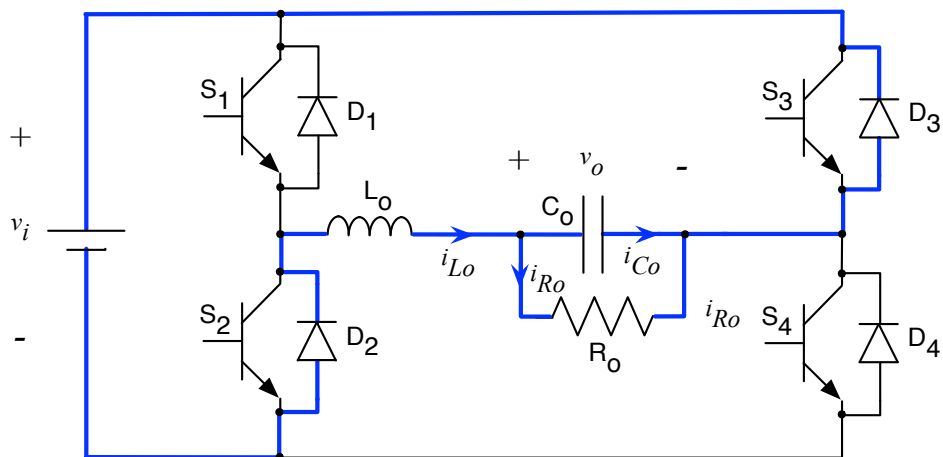


Figura 49 – Sexta (e oitava) etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o < 0$.

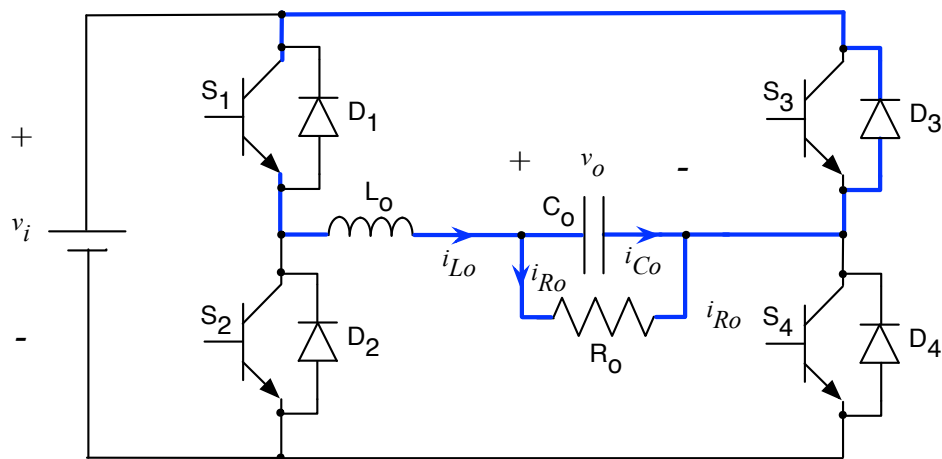


Figura 50 – Sétima etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente positiva e $v_o < 0$.

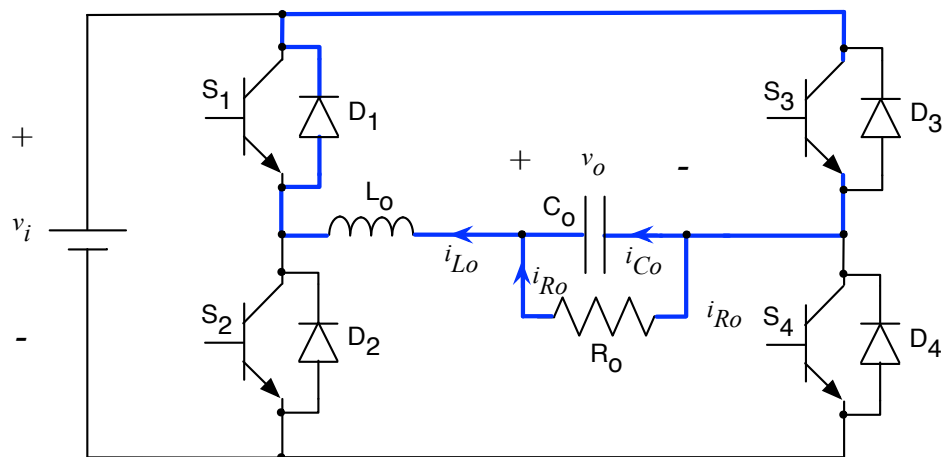


Figura 51 – Sétima etapa de operação do inversor com modulação três níveis, com tempo morto, corrente negativa e $v_o < 0$.

O número de etapas de conversor ponte completa operando com modulação três níveis e tempo morto é grande, a depender de como foi realizada a estratégia de modulação. Do mesmo modo que nas etapas de operação para o semiciclo positivo, a sequência de etapas pode ficar diferente conforme a implementação do circuito de modulação.

Na modulação três níveis, as etapas no semiciclo negativo são diferentes das etapas do semiciclo positivo. No conversor dois níveis, as etapas são semelhantes nos dois semiciclos da tensão de saída, mudando apenas a largura de pulsos dos interruptores correspondentes (S_1 e S_4 ou S_2 e S_3), por exemplo.

Assim como no semiciclo positivo, o tempo morto sendo pequeno, interferirá pouco nas formas de onda da saída do conversor, por isso na análise teórica é comum se desprezar este tempo. De todo modo, destaca-se que na modulação três níveis são quatro etapas de tempo morto por período de comutação, o que de fato pode implicar um tempo razoável nestas etapas de operação.

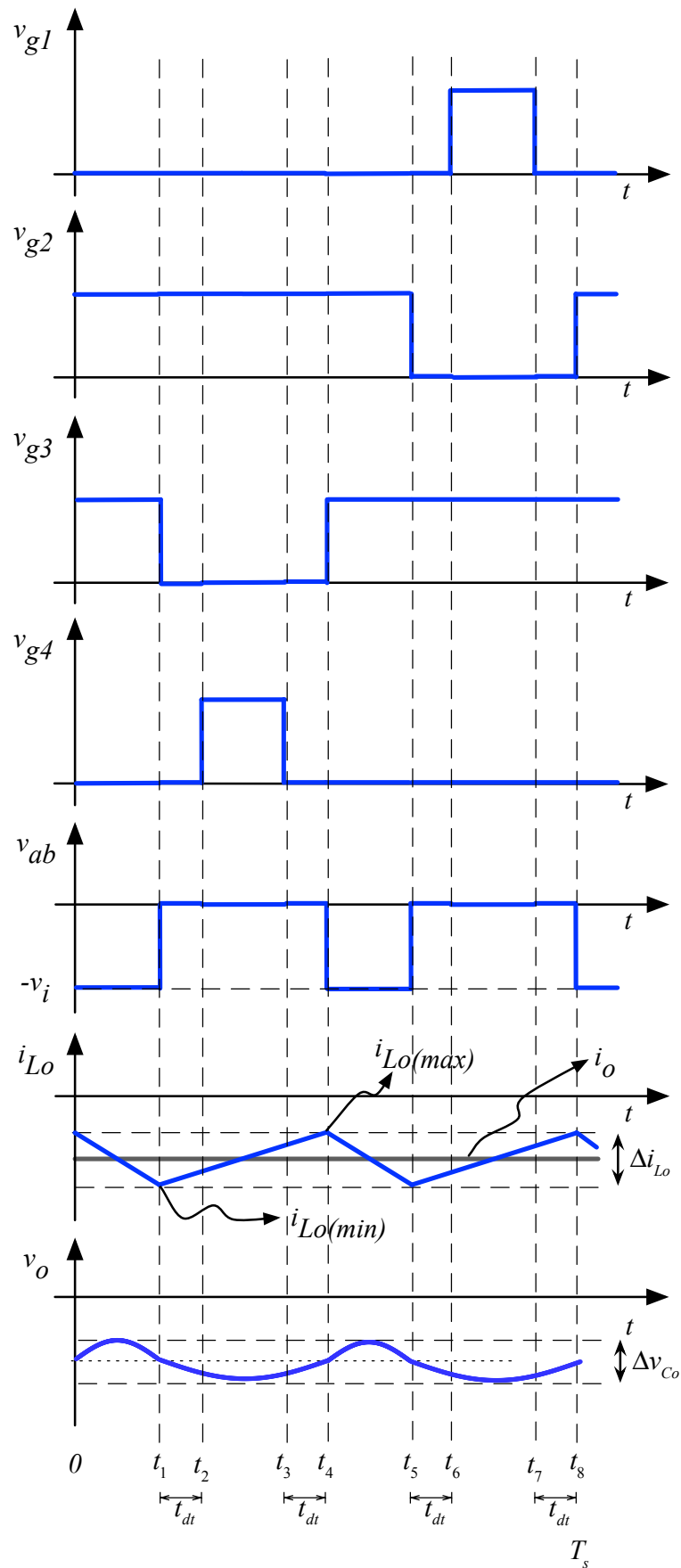


Figura 52 – Formas de onda do inversor de tensão ponte completa para modulação três níveis, com tempo morto e $v_o < 0$.

2.3 Análise do Inversor de Tensão Completa – Modulação Unipolar

A seguir será realizada a análise do conversor em estudo, visando determinar sua tensão de saída, a corrente nos elementos do circuito e os esforços nos semicondutores, neste caso para operação com modulação três níveis (unipolar). Nesta análise será desprezado o tempo morto e os componentes serão considerados ideais.

2.3.1 Tensão de Saída

A tensão de entrada (v_i) está representada na Figura 6 pelo seu valor médio, por se tratar de uma tensão contínua. Por sua vez, a tensão de saída (v_o) está representada por seu valor instantâneo. Seus valores de pico e eficaz (RMS) são facilmente determinados, visto se estar estudando inversores de tensão alternada com saída senoidal. Assim:

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}}$$

A frequência de comutação (chaveamento) dos interruptores será denominada de F_s . Portanto, o período de comutação será:

$$T_s = \frac{1}{F_s}$$

Os intervalos de condução (T_{on}) e bloqueio (T_{off}) das chaves serão dados por:

$$T_{on(S_1)} = D \cdot T_s;$$

$$T_{off(S_2)} = (1 - D) \cdot T_s;$$

$$T_{off(S_3)} = D \cdot T_s + \Delta t;$$

$$T_{on(S_4)} = (1 - D) \cdot T_s + \Delta t.$$

Deve-se lembrar que os tempos de comutação dos interruptores S_3 e S_4 , em relação aos interruptores S_1 e S_2 , possuem uma defasagem (Δt), em virtude da modulação três níveis.

A relação entre o tempo em que a chave S_1 está ligada e o período total é denominada de razão cíclica ou razão de trabalho, dada por:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}$$

A tensão média entre os pontos “a” e “b” será determinada a seguir, com base na forma de

onda mostrada na Figura 53.

$$V_{ab(\text{med})} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} v_i \cdot dt ;$$

$$V_{ab(\text{med})} = \frac{1}{T_s} \cdot V_i \cdot D \cdot T_s ;$$

$$V_{ab(\text{med})} = V_i \cdot D .$$

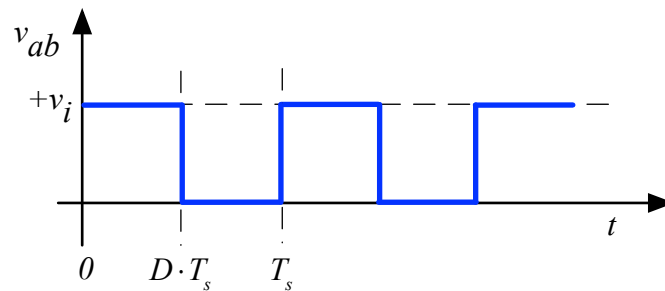


Figura 53 – Forma de onda da tensão entre os pontos “a” e “b” do inversor ponte completa com modulação bipolar (dois níveis).

Para determinar a tensão média na saída precisa-se obter a tensão média no indutor. Esta tensão em regime permanente deve ser zero, pois o indutor é magnetizado e desmagnetizado a cada período de comutação. Do contrário, o mesmo iria armazenar energia a cada período de comutação e sua corrente cresceria até infinito. A forma de onda da tensão sobre o indutor é mostrada na Figura 54.

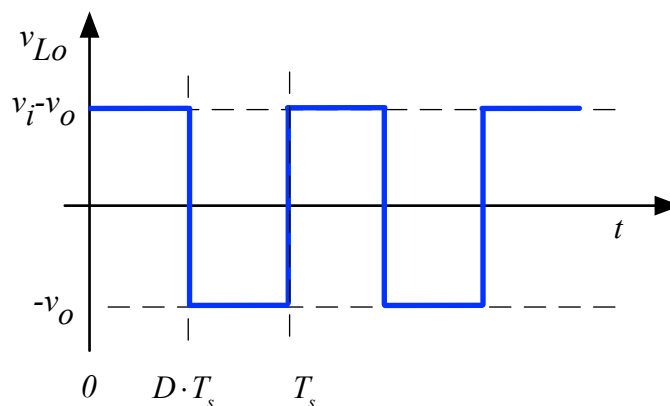


Figura 54 – Forma de onda da tensão sobre o indutor no conversor ponte completa com modulação bipolar.

Assim, conforme demonstrado nos conversores cc-cc, tem-se:

$$V_{L_o} = 0 .$$

Portanto, a tensão média na saída é obtida por:

$$V_o = V_i \cdot D \rightarrow -1 \leq D \leq 1$$

A relação obtida acima é idêntica aquela do conversor Buck cc-cc, estudado nos capítulos anteriores deste curso, com a diferença de que agora a razão cíclica irá variar entre -1 e 1.

2.3.2 Ganho Estático do Inversor de Tensão Ponte Completa Três Níveis

O ganho estático de um conversor é a relação entre sua tensão de saída e entrada, em valores médios. Assim, para o inversor de tensão ponte completa em condução contínua se tem:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = D \rightarrow -1 \leq D \leq 1$$

O comportamento da relação entre a tensão de saída e de entrada para variações na razão cíclica entre menos cem (-100) e cem (100) por cento é mostrado na Figura 55. Nota-se pela Figura 55 que o comportamento do ganho estático do conversor é linear em relação às variações da razão cíclica, em termos de valores médios. Este comportamento é idêntico ao observado nos conversores cc-cc, com a diferença que agora a variação do ganho estático assume valores positivos e negativos, visto se tratar de um inversor de tensão. Isso ocorre porque o comportamento estático do conversor independe de seu filtro (L_o e C_o). Já o comportamento transitório, para fins de controle e proteção do conversor, dependerá destes elementos.

É importante destacar, observando-se a Figura 55 e a expressão que determina a tensão de saída do conversor, que este tem característica de abaixador de tensão, isto é, a tensão de saída (V_o) sempre será menor do que a tensão de entrada (V_i), para qualquer valor de razão cíclica (D).

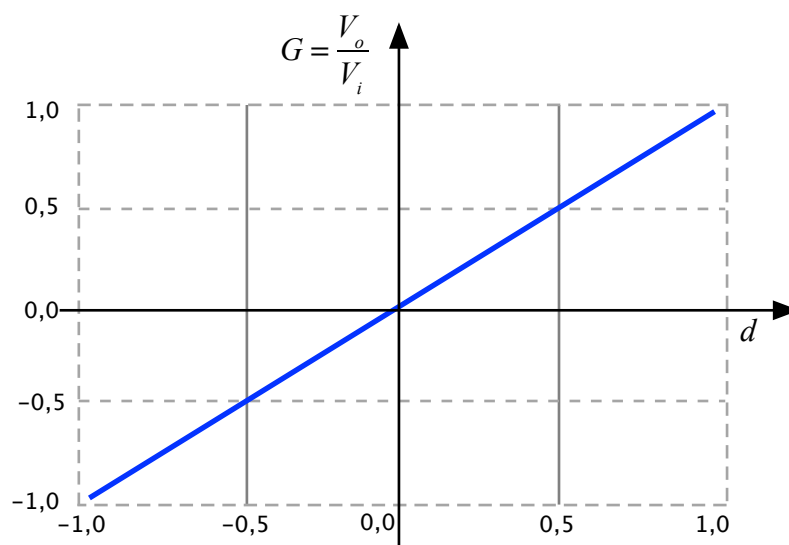


Figura 55 – Ganho estático do inversor de tensão ponte completa com modulação três níveis.

2.3.3 Correntes no Circuito

A corrente na carga será determinada por:

$$I_{o(ef)} = \frac{I_{o(pk)}}{\sqrt{2}} .$$

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} .$$

O valor médio da corrente no indutor será idêntico a corrente de saída, visto que a corrente média no capacitor deve ser nula. Isso ocorre em regime permanente considerando que a cada período de comutação o capacitor é carregado e descarregado, não totalmente, mas apenas para que sua tensão permaneça estabilizada. Se a corrente média no capacitor fosse diferente de zero, este seria carregado até valores infinitos de tensão, por exemplo. Deste modo:

$$I_{L_o} = I_o \rightarrow \Delta I_{L_o} \approx 0 .$$

Já a corrente de pico no indutor dependerá da ondulação de corrente, que pode ser determinada no intervalo de condução da chave. A corrente em um indutor é determinada pela expressão a seguir:

$$v_{L_o}(t) = L_o \cdot \frac{d_{iL_o}(t)}{dt} .$$

Considerando que a corrente terá comportamento linear, pode-se aproximar a expressão anterior por:

$$V_{L_o} = L_o \cdot \frac{\Delta I_{L_o}}{\Delta t} .$$

Assim, considerando a primeira etapa de operação:

$$V_{L_o} = L_o \cdot \frac{\Delta I_{L_o}}{\Delta t} \rightarrow \Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o}}{L_o} \cdot \Delta t ;$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o}}{L_o} \cdot \Delta t = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot T_{on(S_1)} = \frac{V_i - V_o}{L_o} \cdot D \cdot T_s ;$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i - V_o}{L_o \cdot F_s} \cdot D = \frac{V_i - (D \cdot V_i)}{L_o \cdot F_s} \cdot D ;$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} \cdot (1 - D) \cdot D$$

Assim, o indutor pode ser determinado por:

$$L_o = \frac{V_i}{\Delta I_{L_o} \cdot F_s} \cdot (1 - D) \cdot D$$

O comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica pode ser observada na Figura 56. Este gráfico foi elaborado considerando-se a ondulação de corrente parametrizada em função de V_i , L_o e F_s . Assim, pela Figura 56 pode-se determinar a máxima ondulação de corrente no indutor, que ocorre para $D = 0,5$, deve-se também considerar $F_s = 2F_s$, como sendo:

$$\Delta I_{L_o(\max)} = \frac{V_i}{8 \cdot L_o \cdot F_s}$$

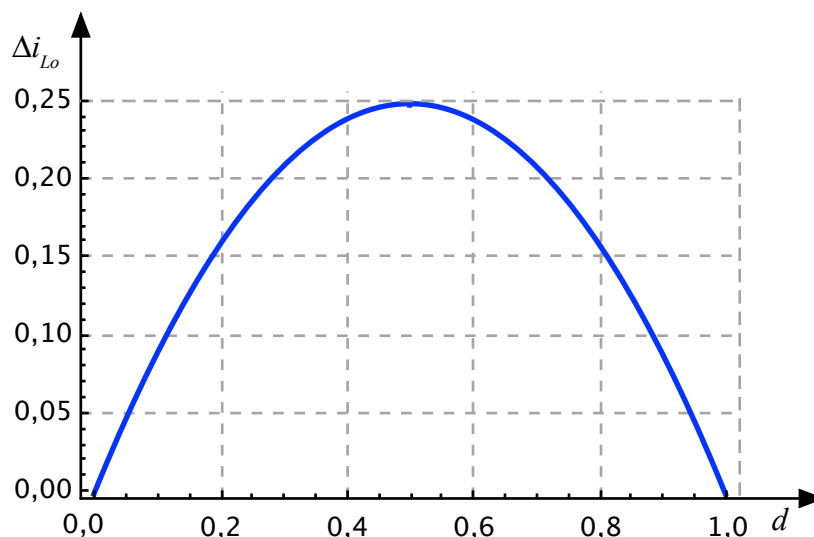


Figura 56 – Comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica.

Assim, a corrente máxima no indutor será a soma de sua corrente média/pico com a metade da ondulação de corrente, pois esta insere uma variação para mais e para menos na corrente deste elemento.

$$I_{L_o(\max)} = I_{L_o} + \frac{\Delta I_{L_o}}{2}$$

Considerando que toda ondulação de corrente do indutor (ΔI_{L_o}) circula pelo capacitor, sua corrente eficaz será dada por:

$$I_{Co(ef)} = \frac{\Delta I_{Lo}}{2 \cdot \sqrt{3}}.$$

Por sua vez, a corrente máxima (de pico) no capacitor será:

$$I_{Co(max)} = \frac{\Delta I_{Lo}}{2}.$$

Já a corrente eficaz no indutor será a soma quadrática da corrente eficaz de saída e da corrente eficaz no capacitor de filtro:

$$I_{Lo(ef)} = \sqrt{I_{Co(ef)}^2 + I_o^2};$$

$$I_{Lo(ef)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{Lo}}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + (I_o)^2}.$$

Vale destacar que todas as expressões determinadas anteriormente são deduzidas a partir das formas de onda apresentadas na Figura 52. Estas expressões tem validade para um período de comutação e próximo ao pico da tensão senoidal de saída. A rigor, estas expressões deveriam ser estendidas com envoltória senoidal, para se obter seu valor ao longo do período do sinal de saída do conversor.

2.3.4 Rendimento do Conversor

O circuito é ideal, resultando sem perdas. Pode-se demonstrar que:

$$P_o = V_o \cdot I_o.$$

$$P_i = V_i \cdot I_i.$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} = 1;$$

$$V_o \cdot I_o = V_i \cdot I_i;$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o}.$$

2.3.5 Esforços de Corrente e Tensão nos Semicondutores

A tensão máxima sobre as chaves é igual ao valor de pico da tensão de entrada:

$$V_{S1 \rightarrow S4} = V_{D1 \rightarrow D4} = V_{i(pk)} = V_i.$$

Já as correntes nos semicondutores, para fins de simplificação, serão consideradas igual a corrente de pico na carga:

$$I_{S1 \rightarrow S4} = I_{D1 \rightarrow D4} = I_{o(pk)}$$

2.3.6 Ondulação na Tensão de Saída

A ondulação (*ripple*) na tensão de saída é determinada a partir da corrente que circula pelo capacitor de filtro, conforme pode ser observado na Figura 57. Adota-se aqui o mesmo procedimento realizado nos conversores cc-cc, resultando em:

$$\Delta V_{Co} = \frac{2 \cdot \Delta I_{Lo}}{\pi^3 \cdot C_o \cdot F_s} \rightarrow \Delta V_{Co} = \frac{4 \cdot V_i}{\pi^3 \cdot C_o \cdot L_o \cdot F_s^2}$$

Assim, o capacitor pode ser determinado por:

$$C_o = \frac{2 \cdot \Delta I_{Lo}}{\pi^3 \cdot \Delta V_{Co} \cdot F_s} \rightarrow C_o = \frac{4 \cdot V_i}{\pi^3 \cdot \Delta V_{Co} \cdot L_o \cdot F_s^2}$$

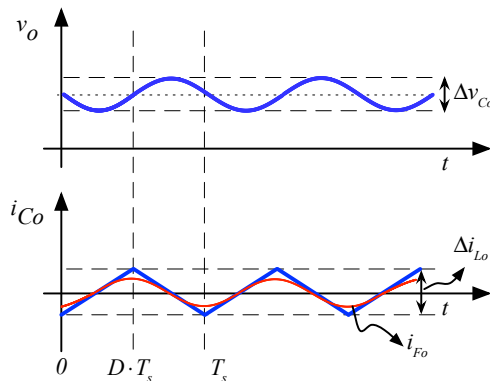


Figura 57 – Formas de onda da tensão e corrente no capacitor de filtro.

2.3.7 Índice de Modulação

A modulação de um inversor ponte completa é realizada conforme estudado nos capítulos anteriores e mostrada na Figura 58.

Lembrando que o ganho estático do conversor ponte completa três níveis é dado por:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = D \rightarrow -1 \leq D \leq 1$$

Ainda conforme a Figura 58 e de acordo com os capítulos anteriores, a razão cíclica para modulação PWM senoidal será:

$$d(t) = IM \cdot \text{seno}(t)$$

Onde a razão cíclica é composta unicamente pela parte variável ($IM \text{seno}(t)$).

O termo que determina a amplitude da parte variável é denominado de índice de modulação

(IM), e na verdade, representa a razão cíclica de um inversor, visto ser o elemento que determina a amplitude da tensão de saída. O índice de modulação é definido como a relação entre a tensão de pico na saída e a tensão na entrada, podendo variar entre 0 e 1 (0 e 100%), sendo dado por:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} \rightarrow 0 \leq IM \leq 1$$

Como exemplo, se um inversor tem tensão contínua na entrada de 400 V e se a tensão de saída for de 220 V, então o índice de modulação será:

$$V_i = 400V, V_{o(pk)} = 220 \cdot \sqrt{2} = 311V ;$$

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{311}{400} = 0,78$$

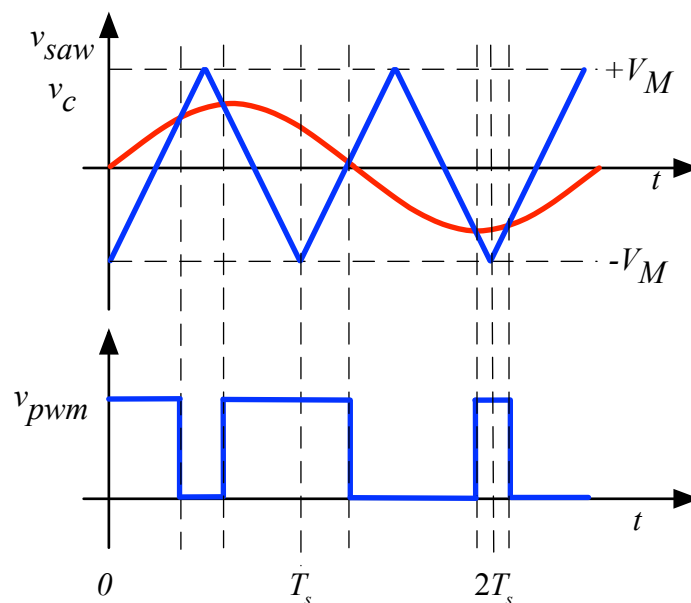


Figura 58 – Formas de onda da modulação do inversor ponte completa três níveis.

3 Simulação dos Circuitos Estudados

A simulação do inversor ponte completa operando com modulação PWM senoidal é realizada para fins de entendimento do princípio de funcionamento dos inversores de tensão, operando com modulação dois níveis e três níveis. Os valores utilizados são semelhantes aqueles que se utilizarão em laboratório, sendo com tensões e correntes compatíveis com os equipamentos de bancada disponíveis, pois o objetivo aqui é entender o princípio de funcionamento destes conversores. Em aplicações usuais estes conversores operam com tensões no nível da rede de energia elétrica.

3.1 Simulação do Inversor Ponte Completa Dois Níveis

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 59, com características semelhantes aquelas que serão utilizadas na aula de laboratório. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 20 V (médios). A carga possui uma resistência de 270 Ω . O filtro é formado pela indutância de 3 mH e pela capacitância de 680 μF . O tempo de simulação pode ser entre 150 ms e 200 ms e passo de cálculo de 0,001 ms (1 μs). Note que a frequência de comutação é de 1 kHz. Os elementos ON1 a ON4 são utilizados pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a *drivers* de acionamento do interruptor.

O modulador implementado no Psim é mostrado na Figura 60, sendo que a tensão modulante é variável de 0 a 1 V e a portadora é uma triangular com amplitude de 1 V, como está mostrado na Figura 61.

A forma de onda para operação com índice de modulação de 20% é mostrada na Figura 61 onde se nota a tensão de entrada, a tensão de saída do inversor antes do filtro e a tensão filtrada. Também se mostra a corrente no indutor, onde se nota que o conversor está operando em condução contínua. Ainda, se mostram também as formas de onda da modulante, portadora e sinal de comando para o interruptor.

A Figura 62 mostra as mesmas formas de onda para o conversor operando com índice de modulação de 50%. Por sua vez, a Figura 63 mostra as mesmas formas de onda, mas onde se modificou a frequência de comutação para 10 kHz, e os componentes da saída do conversor para $L_o = 500 \mu\text{H}$, $C_o = 10 \mu\text{F}$ e $R_o = 10 \Omega$. Isso foi feito para se ter uma situação mais próxima da real em aplicações industriais, mostrando-se a tensão de entrada, saída antes da filtragem e depois da filtragem, além da corrente na carga; notando-se o formato senoidal das mesmas.

Assim, esta primeira simulação tem por objetivo mostrar o funcionamento do inversor com ponte completa com modulação dois níveis. Na sequência serão apresentados os resultados para o conversor operando com modulação três níveis.

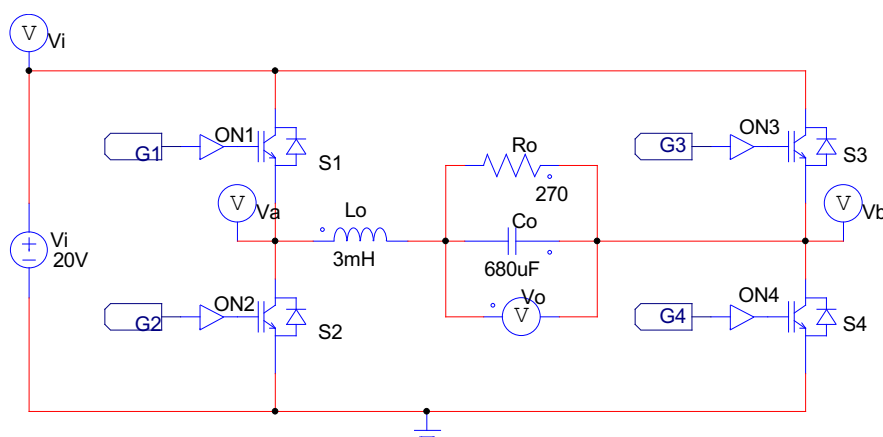


Figura 59 – Estágio de potência do conversor ponte completa simulado.

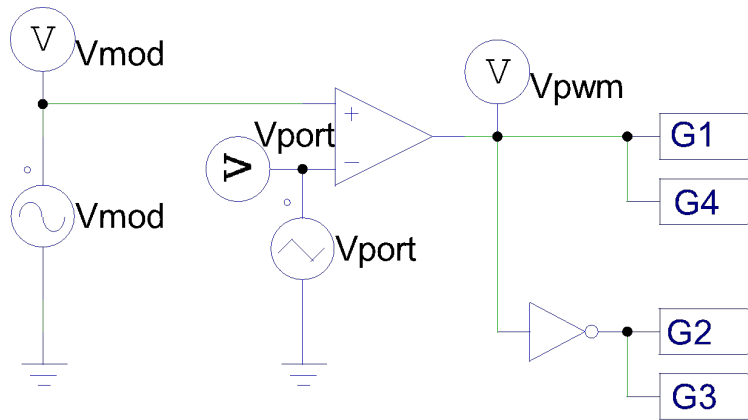


Figura 60 – Circuito da modulação PWM senoidal para dois níveis.

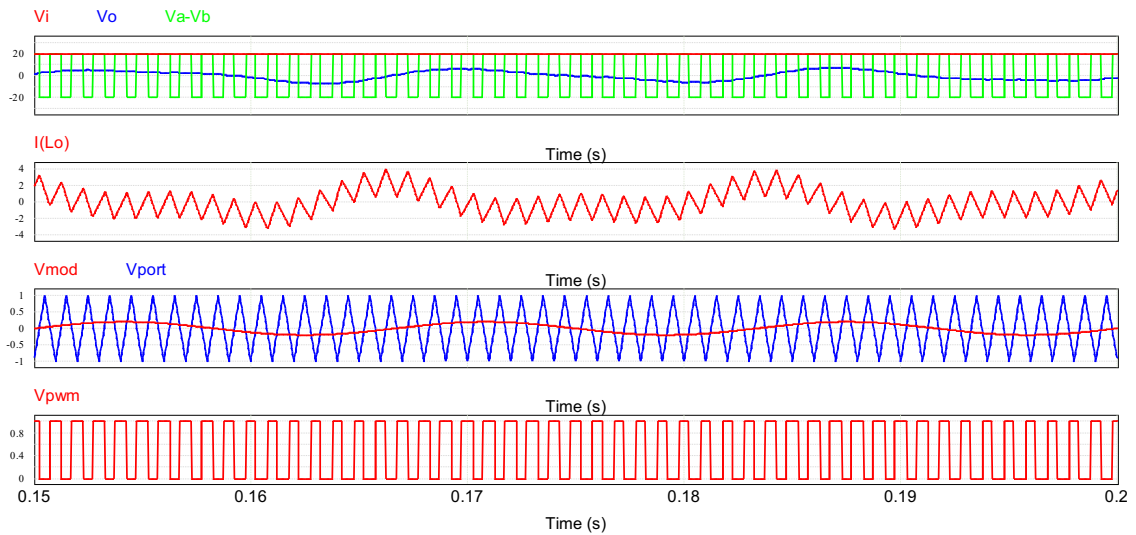


Figura 61 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 20%

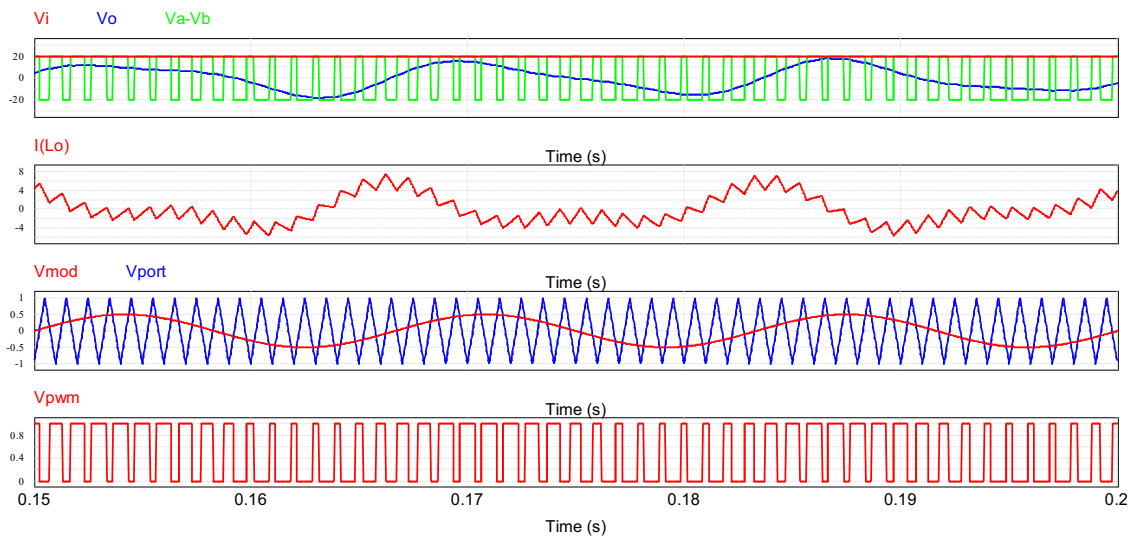


Figura 62 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 50%.

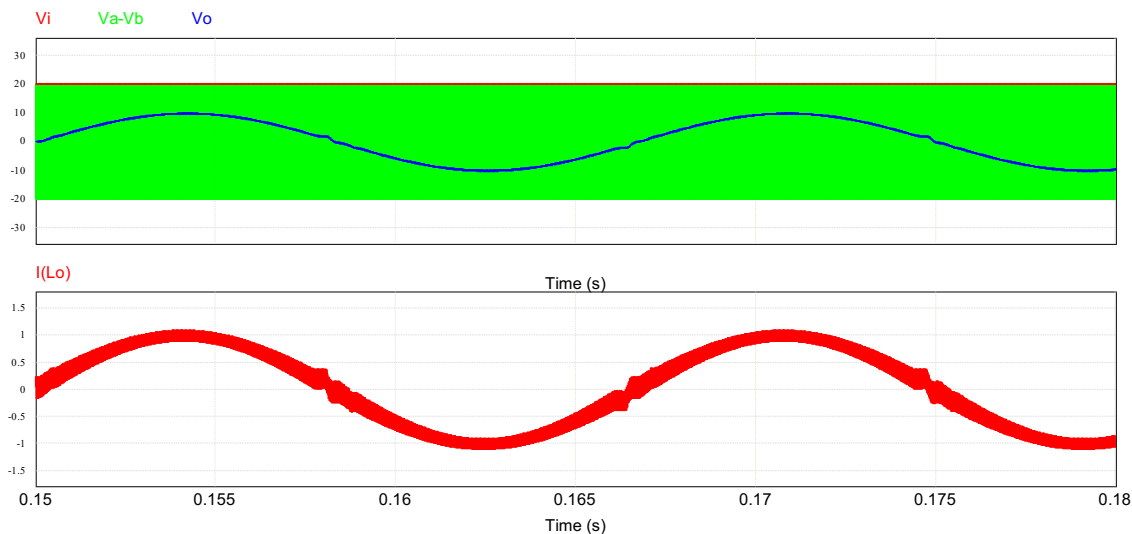


Figura 63 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 50% e alteração nos componentes e parâmetros do circuito.

3.2 Simulação do Inversor Ponte Completa com Três Níveis

O conversor inversor de tensão anteriormente simulado foi novamente utilizado, mas agora com modulação três níveis, conforme mostrado na Figura 64. Neste caso a geração dos sinais dos interruptores são independentes entre um braço e outro.

As Figura 65 e Figura 66 mostram os resultados de simulação para índices de modulação de 20% e 50%, respectivamente. É interessante notar nas formas de onda que a ondulação de corrente no indutor e a ondulação de tensão no capacitor de saída diminuíram significativamente, conforme foi visto no estudo teórico. Na Figura 67 repete-se a simulação com alteração de parâmetros e componentes do conversor para mostrar o desempenho para uma situação mais próxima da real.

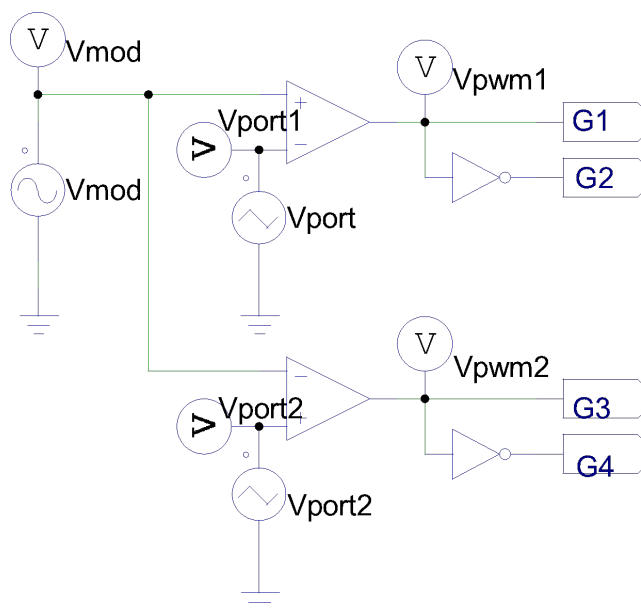


Figura 64 – Circuito da modulação PWM senoidal para três níveis.

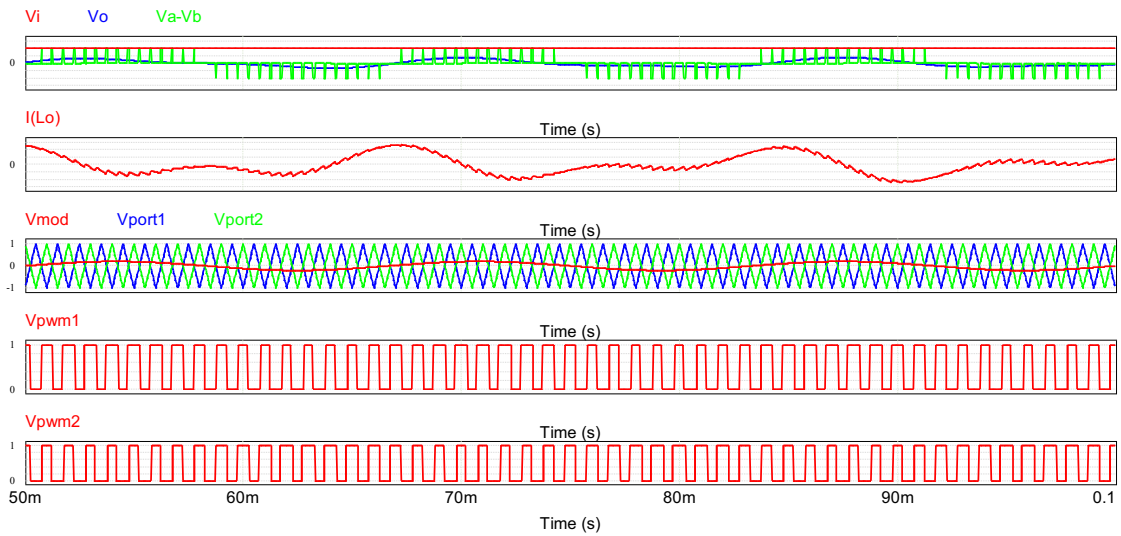


Figura 65 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 20%.

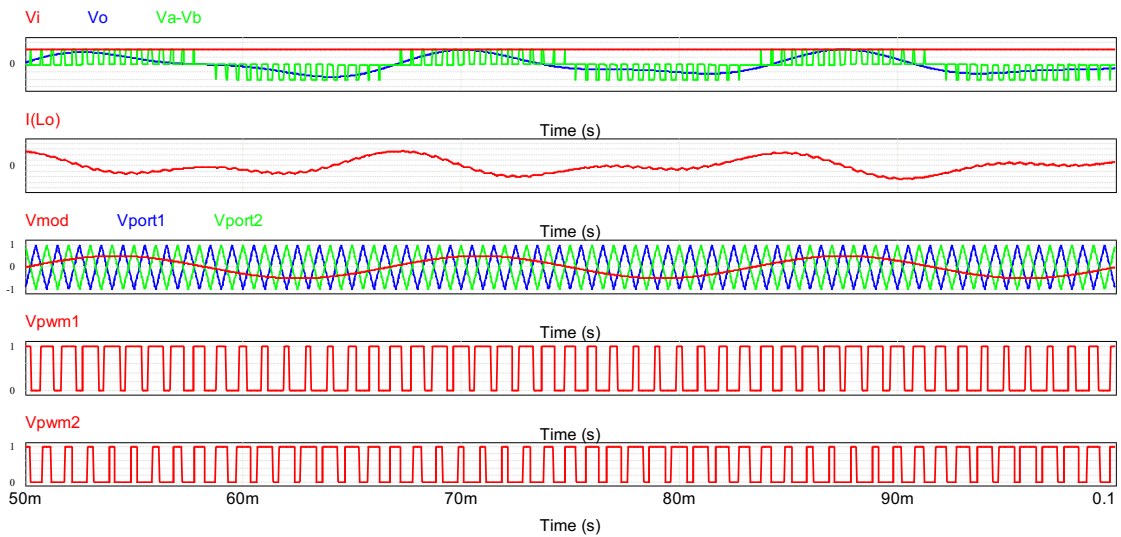


Figura 66 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 50%.

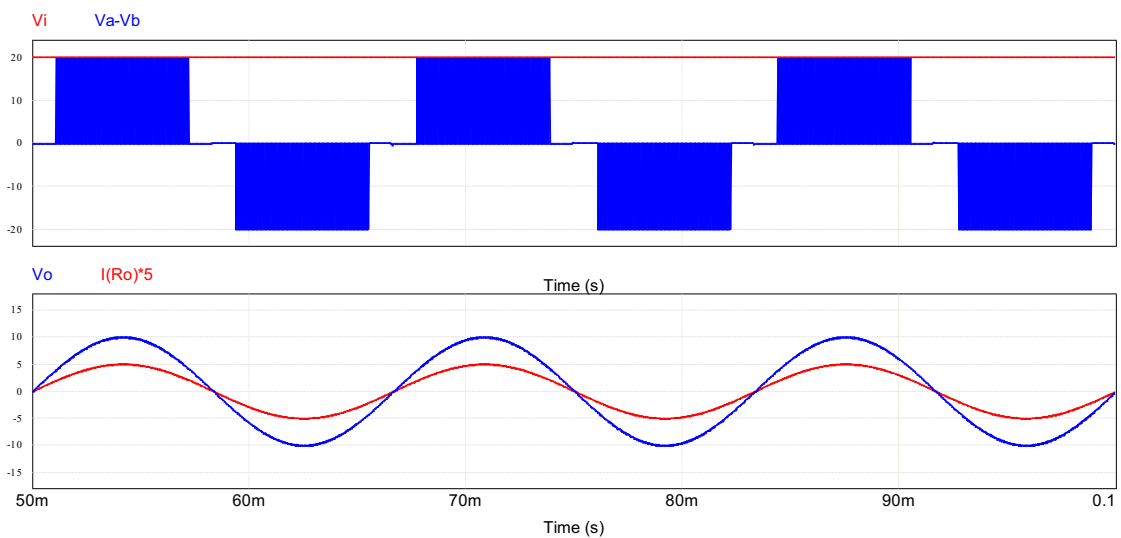


Figura 67 – Formas de onda com alteração nos componentes e parâmetros do circuito.

4 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 59, determine:

- A tensão de entrada do inversor;
- A máxima tensão de pico na saída;
- A máxima tensão eficaz na carga;
- A máxima corrente de pico na carga;
- A máxima corrente eficaz na carga.

A tensão de entrada será igual a tensão da fonte. Assim:

$$V_{i(inv)} = V_i = 20V$$

A tensão de pico na saída, considerando que os componentes são ideais, será igual a tensão de entrada do inversor, ou seja, 20 V.

A tensão eficaz na carga, considerando índice de modulação de 100%, será:

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{ab(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{i(in)}}{\sqrt{2}} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14,14V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{20}{270} = 74mA$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{14,14}{270} = 52,4mA$$

ER 02) Considerando a Figura 16, determine o índice de modulação para:

- Tensão de carga eficaz de 5 V;
- Tensão de carga eficaz de 3 V;
- Tensão de carga de pico de 7 V.

O índice de modulação é dado por:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i}$$

No circuito da Figura 59, a tensão de entrada do inversor ($V_{i(inv)}$) é de 20 V, então para obter 5 V de tensão eficaz na carga se tem:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{5 \cdot \sqrt{2}}{20} = 0,35 = 35\%$$

Para os níveis de modulação utilizados na Figura 16 e conforme a Figura 60, se tem:

$$D = \frac{V_C}{V_M} \rightarrow IM = \frac{V_{C(ca)}}{V_M/2} \rightarrow V_{C(ca)} = IM \cdot \frac{V_M}{2} = 0,35 \cdot \frac{1}{2} = 0,18V$$

Para 3 V de tensão eficaz na carga se terá:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{20} = 0,21 = 21\%$$

$$V_{C(ca)} = IM \cdot \frac{V_M}{2} = 0,21 \cdot \frac{1}{2} = 0,11V$$

Para 7 V de tensão de pico na carga se terá:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{7}{20} = 0,35 = 35\%$$

$$V_{C(ca)} = IM \cdot \frac{V_M}{2} = 0,35 \cdot \frac{1}{2} = 0,175V$$

ER 03) Considerando a Figura 58, determine o índice de modulação para:

- Tensão de carga eficaz de 5 V;
- Tensão de carga eficaz de 3 V;
- Tensão de carga de pico de 7 V.

O índice de modulação é dado por:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i}$$

No circuito da Figura 59, a tensão de entrada do inversor ($V_{i(inv)}$) é de 20 V, então para obter 5 V de tensão eficaz na carga se tem:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{5 \cdot \sqrt{2}}{20} = 0,35 = 35\%$$

Para os níveis de modulação utilizados na Figura 58 e conforme a Figura 63, se tem:

$$D = \frac{V_C}{V_M} \rightarrow IM = \frac{V_{C(ca)}}{V_M} \rightarrow V_{C(ca)} = IM \cdot V_M = 0,35 \cdot 1 = 0,35V$$

Para 3 V de tensão eficaz na carga se terá:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{20} = 0,21 = 21\%$$

$$V_{C(ca)} = IM \cdot V_M = 0,21 \cdot 1 = 0,21V$$

Para 7 V de tensão de pico na carga se terá:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{7}{20} = 0,35 = 35\%$$

$$V_{C(ca)} = IM \cdot V_M = 0,35 \cdot 1 = 0,35V$$

Exercícios Propostos

EP 01) Explique a diferença entre inversores de tensão meia ponte e ponte completa.

EP 02) Em relação ao filtro de saída, a modulação três níveis tem vantagens em relação à modulação dois níveis?

EP 03) Um inversor ponte completa utiliza quantos braços?

EP 04) Explique o que é curto de braço e como é evitado.

EP 05) Como ficaria a forma de onda da tensão de saída em um conversor ponte completa operando com modulação dois níveis, caso um dos braços fosse danificado (aberto)?

EP 06) Como ficaria a forma de onda da tensão de saída em um conversor ponte completa operando com modulação três níveis, caso um dos braços fosse danificado (aberto)?

EP 07) Considerando circuitos de inversores de tensão que utilizam transistores de tecnologia BJT e operando com modulação três níveis, o tempo morto poderia interferir no formato da tensão de saída?

EP 08) Explique o que significa índice de modulação e qual sua diferença no conversor dois níveis e três níveis.

EP 09) Simule o circuito da Figura 59 considerando a tensão de entrada de 50 V e modulação dois níveis.

EP 10) Repita o exercício anterior para modulação três níveis.

5 Laboratório

5.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o estudo de conversores cc-ca do tipo ponte completa operando com modulação PWM senoidal.

Em síntese, objetiva-se:

- Aplicar os princípios da modulação PWM senoidal;
- Simular um conversor cc-ca ponte completa operando em malha aberta;
- Entender os princípios básicos de conversores cc-ca;
- Realizar medições no circuito no circuito simulado;
- Observar as formas de onda sobre os elementos do circuito.

5.2 Conversor CC-CA Ponte Completa

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 68. A tensão de entrada (V_{in}) será de 20 V. O indutor será de 5 mH. Já o capacitor de saída será formado por uma associação de dois capacitores de 680 μ F em antissérie.

Conecte um resistor de carga de 270 Ω .

A frequência do sinal PWM será configurada para operar em 500 Hz.

Os dados do circuito integrado (Profet) devem ser buscados em sua folha de dados.

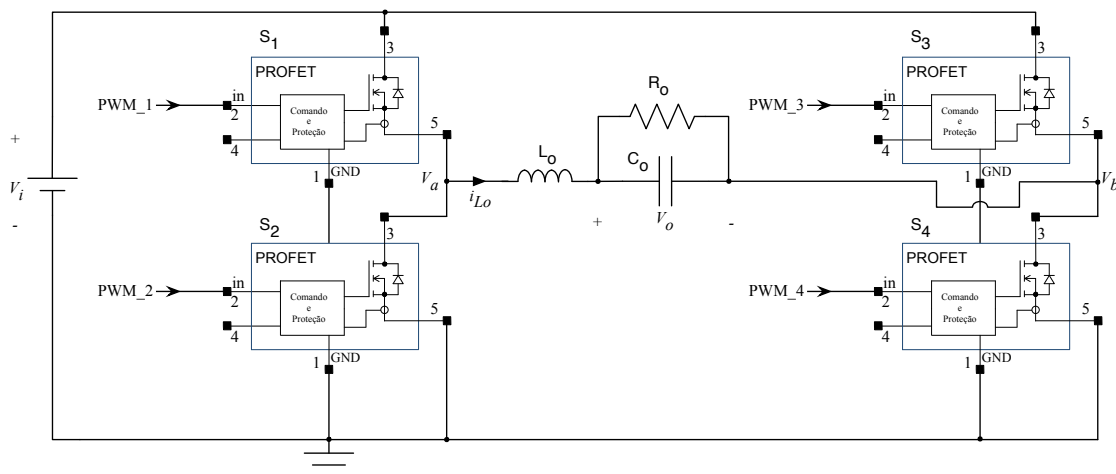


Figura 68 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa.

5.3 Modulação PWM Senoidal

Implemente no simulador o circuito para geração do sinal de comando com modulação por

largura de pulsos senoidal, conforme mostrado nas aulas de laboratório. A amplitude da forma de onda da portadora (dente-de-serra) deverá ser de 1 V. A frequência da tensão de saída do conversor deverá ser de 50 Hz.

A razão cíclica gerada pela modulante será dada por:

- a. $k = \text{seno}(\theta)$
- b. $d = 0,5 + 0,5 \cdot k$

Os sinais de comando dos interruptores S_3 e S_4 serão idênticos aos interruptores S_1 e S_2 , da seguinte maneira:

- $S_1 = S_4$ > PWM_1 = PWM_4;
- $S_2 = S_3$ > PWM_2 = PWM_3.

5.4 Resultados do Circuito Simulado

Simule o circuito mostrado na Figura 68 e meça a amplitude (valor de pico e eficaz) e a frequência da tensão de saída.

$$V_{o(pk)} = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$V_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$F_o = \underline{\hspace{2cm}}.$$

Ajuste o índice de modulação, ou seja, a variável “ k ” na expressão da razão cíclica, determinando a tensão eficaz na saída do conversor:

$$V_{o(ef)} = \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{para} \quad d = \underline{\hspace{2cm}}.$$

5.5 Questões – Comente suas respostas.

- 1) O circuito operou corretamente, ou seja, conforme o esperado?
- 2) Quais foram as dificuldades encontradas nesta aula de laboratório?
- 3) Alterando-se o índice de modulação, a tensão de saída foi alterada?
- 4) Como poderia ser alterada a frequência da tensão de saída do inversor?

6 Referências

[1] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

-
- [2] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [3] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.
- [4] GERENT, Fernando H. Metodologia de Projeto de Inversores Monofásicos de Tensão para Cargas Não-Lineares. Florianópolis, SC – Brasil, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. Florianópolis, SC - Brasil – Edição dos Autores, 2000.
- [6] POTTKER, Fabiana. Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos. Florianópolis, SC – Brasil, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [7] PETRY, Clóvis A. Estabilizador de Tensão Alternada para Cargas Não-Lineares. Florianópolis, SC – Brasil, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [8] TOMASELLI, Luis C. Estudo de Acionamentos à Velocidade Variável para Motores de Indução Monofásicos com Capacitor Permanente para Aplicações em Ventiladores. Florianópolis, SC – Brasil, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [9] PETRY, Clóvis A. Estabilizadores de tensão alternada para alimentação de cargas não-lineares estudo de variações topológicas e métodos de controle. Florianópolis, SC – Brasil, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.