

21

Capítulo

Inversor de Tensão Meia Ponte

Meta deste capítulo

Estudar os princípios de funcionamento dos inversores de tensão meia ponte.

objetivos

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

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo referente a modulação PWM senoidal.

Continuidade

O curso continuará com o estudo dos inversores de tensão em ponte completa.

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

1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram estudados os conversores cc-cc e no capítulo anterior a modulação PWM senoidal. Em específico, no capítulo referente a acionamento de motores de corrente contínua se introduziram aspectos relacionados aos conversores cc-ca, denominados também de inversores.

Este primeiro capítulo abordará alguns aspectos de cunho geral, aplicáveis a todos os conversores cc-ca e em seguida se estudará em detalhes o conversor cc-ca na configuração meia ponte. No próximo capítulo será estudado o conversor ponte completa.

Os inversores de tensão são largamente utilizados na área industrial, principalmente no acionamento de motores elétricos. Por outro lado, atualmente com o uso cada vez maior de energias alternativas, também se utilizam inversores na geração eólica, solar, carros elétricos, dentre outras várias aplicações.

A Figura 1 mostra um inversor de tensão de média tensão, para acionamento de motores de 2,3 kV até 6,9 kV, com potências de 400 até 24.000 kW. O uso de tensões elevadas se deve ao fato das altas potências envolvidas, buscando-se correntes menores para os condutores do motor. Estes motores são aplicados na indústria de transformação, por exemplo, em minas de cobre, ferro, fabricação de aço, etc.

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



Figura 1 – Inversor para acionamento de motores de média tensão (2,3 kV até 6,9 kV).

Fonte: <https://www.weg.net>. Acesso em: 05/06/2020.

2 Conversores CC-CA

2.1 Introdução

Os conversores cc-ca são um dos quatro grupos de conversores mostrados na Figura 2, sendo que já foram estudados neste curso os conversores ca-cc (retificadores) e cc-cc. Por sua vez, os conversores cc-ca são denominados de inversores. Na Figura 3 mostram-se alguns modelos de inverores comerciais, para aplicações de baixa e média potência e com diferentes faixas de preços, conforme o uso a que se destinam.

Assim, a seguir serão apresentados os principais conceitos envolvendo conversores cc-ca e o princípio de funcionamento dos mesmos.

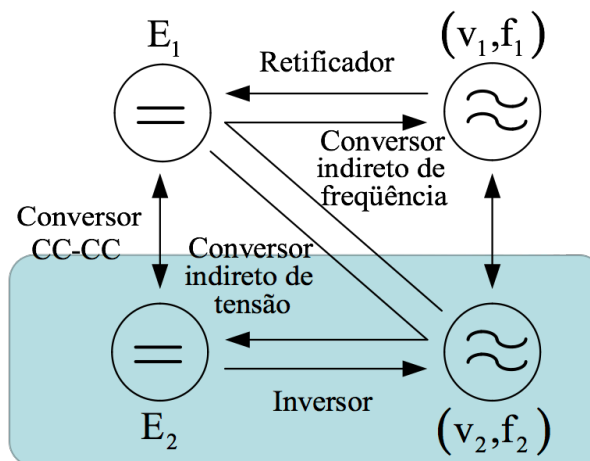


Figura 2 – Categorias de conversores estáticos.



Figura 3 – Exemplos de inversores comerciais.

Fonte: <https://www.amazon.com.br/> e <https://www.weg.net>. Acesso em: 05/06/2020.

2.2 Princípio Geral dos Conversores CC-CA

A Figura 4 mostra as formas de onda típicas de entrada e saída dos inversores de tensão, onde se pode notar que o objetivo principal é converter uma tensão contínua em uma tensão alternada, que poderá ser senoidal ou ter outro formato de onda.

É importante destacar que a tensão de saída apresenta níveis positivos e negativos, por isso é denominada de alternada, a partir de uma entrada contínua. Esta é a principal qualidade que identifica inversores de tensão.

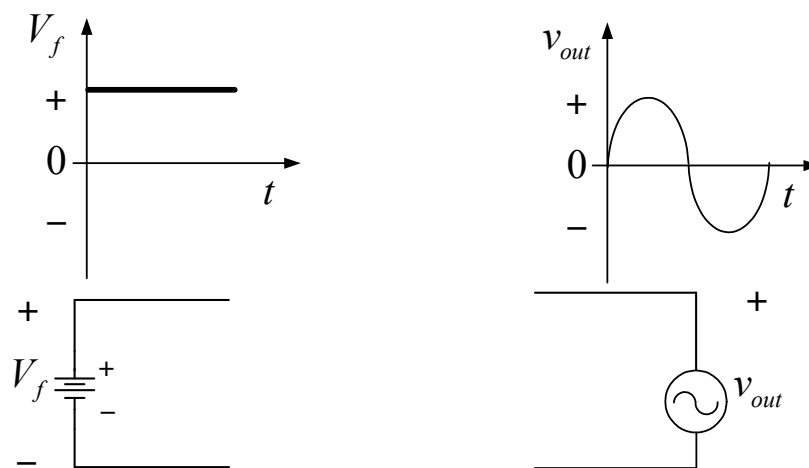


Figura 4 – Princípio geral dos conversores cc-ca.

2.3 Classificação de Conversores CC-CA

Uma classificação simples e sem intuito de aprofundar o assunto é apresentada a seguir, usando-se critérios mais gerais. Assim, os conversores cc-ca podem ser classificados por:

- Número de fases – em termos de número de fases, os inversores podem ser monofásicos (uma fase), bifásicos (duas fases), trifásicos (três fases) ou n-fásicos, isto é, com qualquer número de fases. Na Figura 5 é mostrado um conversor monofásico a partir de um conversor ponte completa, enquanto na Figura 6 mostra-se um conversor trifásico;
- Direcionalidade do fluxo de energia – os conversores podem ser unidirecionais ou bidirecionais em termos de fluxo de energia. Nos conversores unidirecionais a corrente irá fluir da fonte de entrada para a saída, então a fonte fornecerá energia e a carga consumirá energia, conforme mostrado na Figura 7. Por sua vez, em um conversor bidirecional, a energia pode fluir em ambas as direções, ou seja a corrente poderá circular da fonte para a carga ou da carga para a fonte; assim, ambos os lados podem atuar como fonte ou como carga, conforme mostrado na Figura 8. Aplicações típicas de conversores bidirecionais são acionamentos elétricos em carros, trens, por exemplo, em que se pode regenerar energia para a fonte durante as frenagens ou desacelerações;

- Frequência de comutação dos interruptores – os conversores podem operar em baixas frequências, com valor próximo ao da rede (60 Hz) ou alta frequência com modulação PWM senoidal, podendo chegar a dezena de kHz. Valores típicos de frequência de comutação de inversores para acionamento de motores são da ordem de 5 a 10 kHz. Esta frequência está na faixa audível, mas que em ambientes industriais é tolerada;
- Modulação empregada – a modulação utilizada nos inversores pode ser PWM senoidal ou vetorial, sendo esta preferida em acionamento de motores, por facilitar a implementação em microcontroladores ou microprocessadores. A Figura 9 mostra um exemplo de diagrama de vetores para a modulação vetorial;
- Isolamento – os inversores podem ser não-isolados ou isolados. Os exemplos das Figura 5 até Figura 8 são inversores não-isolados, enquanto o conversor da Figura 10 é um exemplo de inversor isolado;
- Número de níveis – os inversores podem apresentar em sua saída, a depender de sua topologia e modulação, dois níveis, três níveis, ou multiníveis (qualquer número de níveis). O conversor ponte completa da Figura 5 permite obter dois ou três níveis na tensão de saída. Por sua vez, o inversor mostrado na Figura 11 permite obter cinco níveis, como mostrado na forma de onda da Figura 12. O aumento do número de níveis é interessante pois em acionamento de motores elétricos, pode-se dispensar o filtro de saída (indutor e capacitor), visto em conversores multiníveis a forma de onda se aproximar de uma senóide sem necessidade de filtragem;
- Sistema de controle – o controle dos inversores de tensão em geral é pela tensão de saída, sendo comum também se medir a corrente da carga, tanto para controle como para proteção do conversor, como está mostrado na Figura 13;
- Comutação – os conversores podem operar com comutação convencional, denominada de dissipativa (*hard switching*) ou comutação suave (*soft switching*). Nesta última o conversor será projetado com elementos adicionais para que se reduzam as perdas na comutação do mesmo;
- Tensão ou corrente – os inversores podem ser com entrada em tensão e saída em corrente, como é o caso dos conversores mostrados até aqui, sendo estes os mais comuns no mercado; ou então terem corrente na entrada e tensão na saída, como mostrado na Figura 14. Note na Figura 14 que o interruptor bidirecional foi modificado, ficando com um diodo em série com o transistor. Em inversores de corrente não se pode deixar nunca todas as chaves abertas, pois não se teria caminho para a corrente da fonte de corrente, formada pelo indutor de entrada (L_i). Por sua vez, nos inversores de tensão, não se pode fechar todas as chaves simultaneamente, pois se teria curtos de braço, como está mostrado na Figura 15. A situação proibida é o fechamento simultâneo de S_1 e S_2 ou S_3 e S_4 .

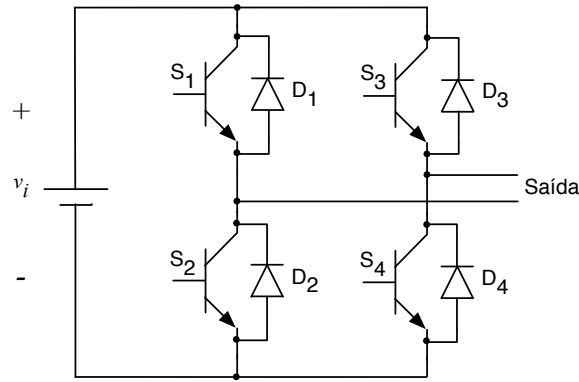


Figura 5 – Conversor monofásico.

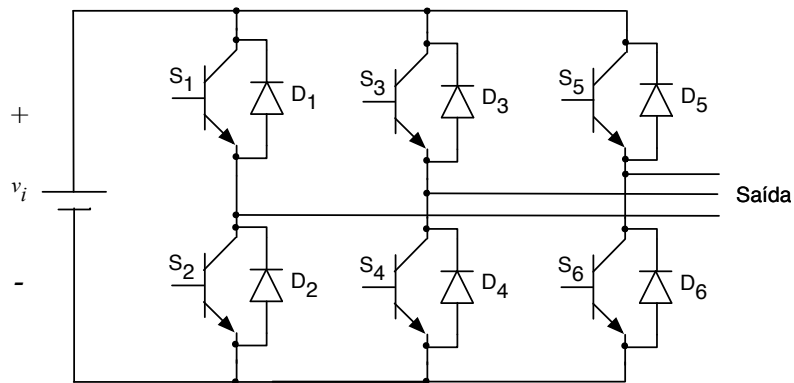


Figura 6 – Conversor trifásico.

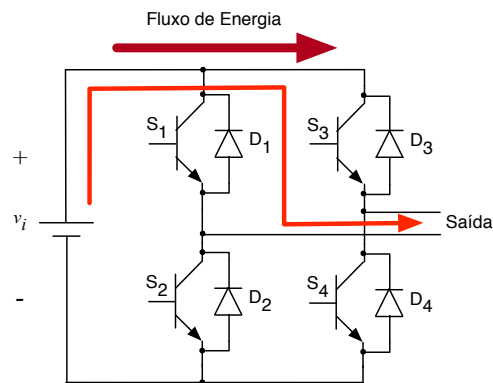


Figura 7 – Conversor unidirecional.

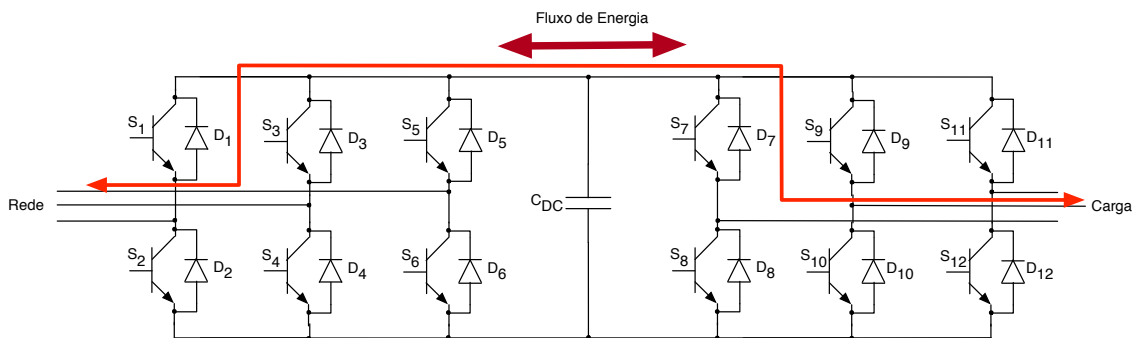


Figura 8 – Conversor bidirecional.

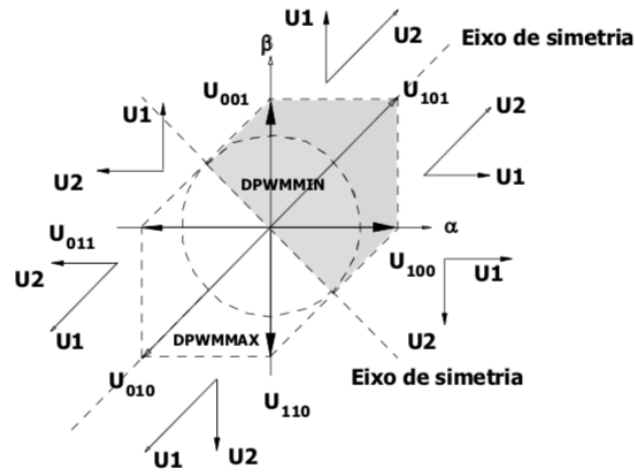


Figura 9 – Diagrama de vetores para modulação vetorial.

Fonte: (Tomaselli, 2004).

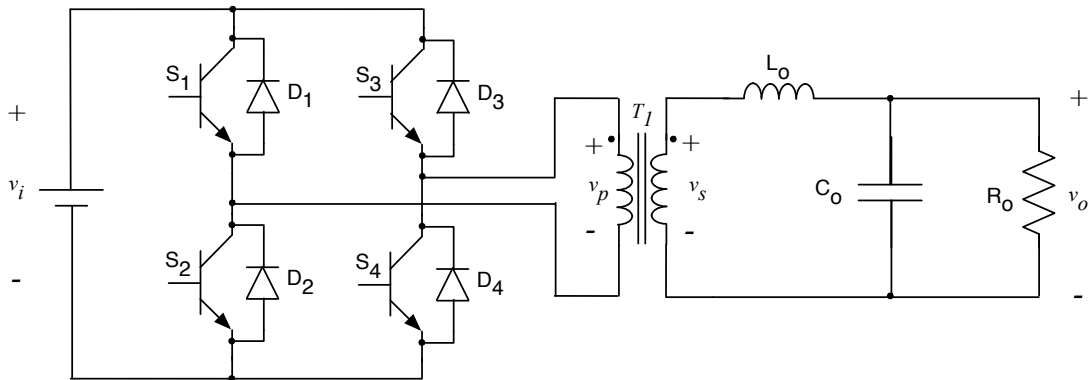


Figura 10 – Inversor isolado.

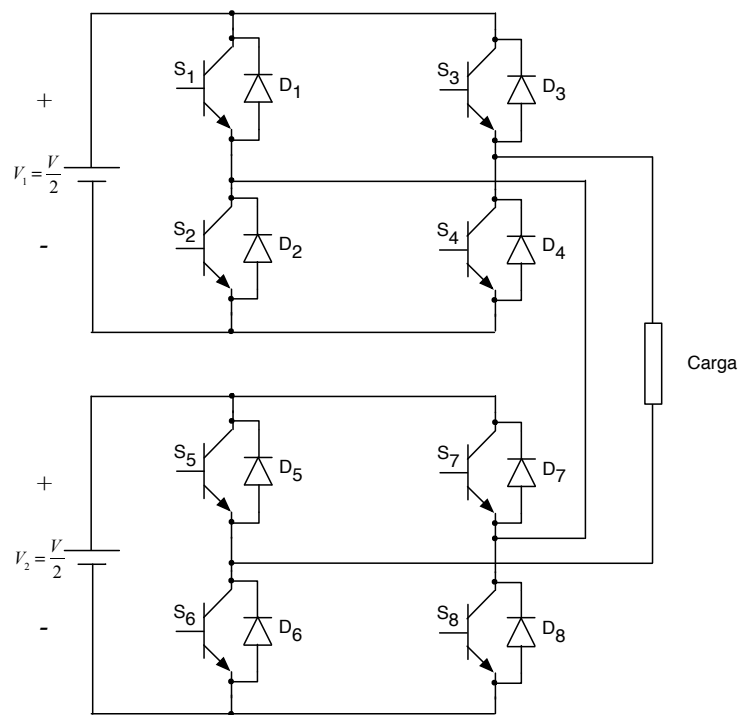


Figura 11 – Inversor multinível (5 níveis).

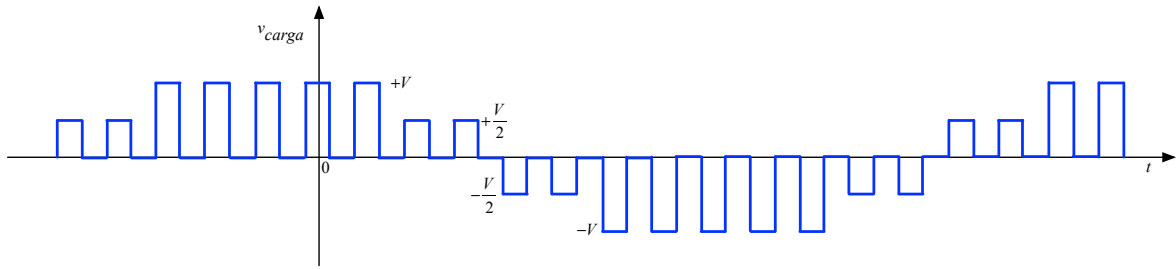


Figura 12 – Forma de onda da tensão de saída de um inversor multinível (5 níveis).

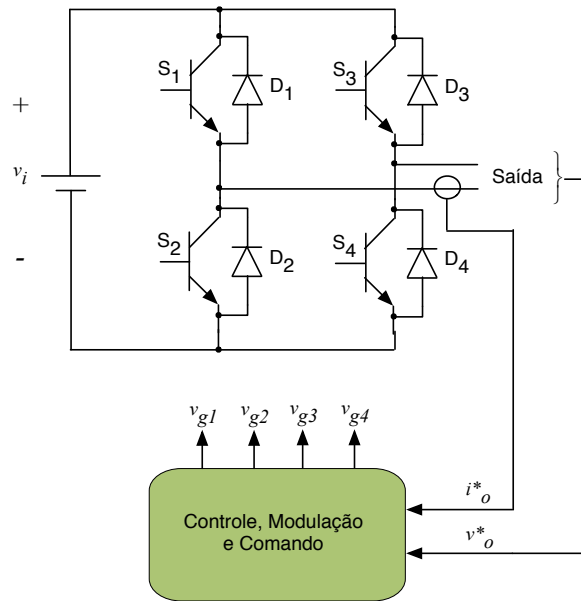


Figura 13 – Controle multimalhas de um inversor de tensão.

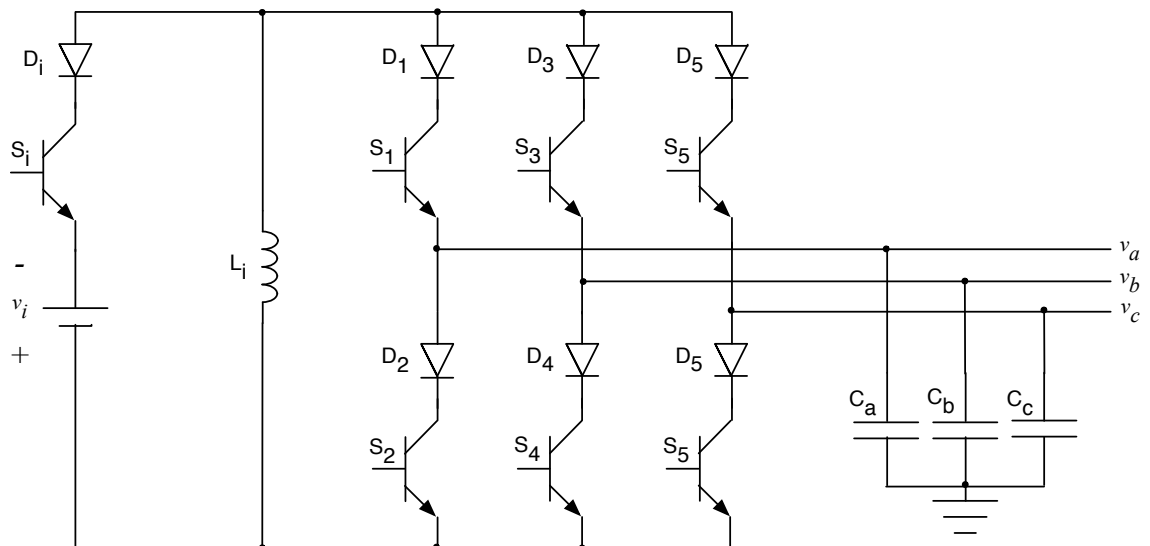


Figura 14 – Inversor de corrente.

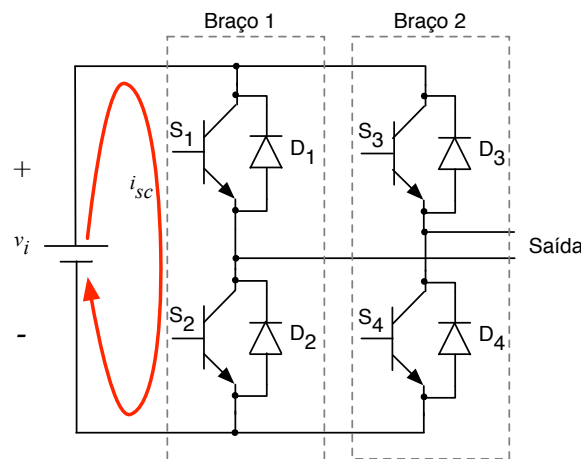


Figura 15 – Curto de braço em um inversor de tensão.

2.4 Aplicações dos Conversores CC-CA

Os conversores cc-ca tem inúmeras aplicações, sendo algumas delas:

- Acionamento de motores de corrente contínua;
- Acionamento de motores de corrente alternada;
- Energias alternativas;
- Isolamento em alta frequência;
- Filtros ativos;
- Estabilizadores de tensão;
- UPS (*uninterruptible power supply*, fonte de energia ininterrupta, igual a *nobreak*);
- Aplicações espaciais, aeronáuticas e veiculares
- Entre outras.

2.5 Topologias de Conversores CC-CA

Os inversores de tensão, por serem mais comuns nas aplicações industriais, serão abordados neste curso, ficando o estudo dos inversores de corrente nas referências disponíveis ao final do capítulo.

Assim, inversores de tensão são formados a partir de braços com transistores e diodos, conforme mostrado em destaque na Figura 15, onde se tem um conversor ponte completa com quatro interruptores bidirecionais dispostos em dois braços. O conjunto formado por um transistor com um diodo em antiparalelo tem por objetivo ser bidirecional em corrente, mas unidirecional em tensão. Assim, tomando como exemplo o conjunto S_1/D_1 da Figura 15, a tensão sobre os mesmos deverá ser sempre positiva, mas a corrente poderá fluir nos dois sentidos, isto é, pelo transistor ou pelo diodo. Caso sejam utilizados transistores MOSFETs, pode-se aproveitar o diodo intrínseco dos mesmos.

Assim, as topologias mais comuns de inversores de tensão apresentadas neste curso são:

- Conversor meia ponte – formado por um braço (dois transistores e dois diodos), mostrado na Figura 16;

- Conversor ponte completa – formado por dois braços (quatro transistores e quatro diodos), mostrado na Figura 5;
- Conversor trifásico – formado por três braços (seis transistores e seis diodos), mostrado na Figura 6;
- Conversor multinível – formado por quatro braços (oito transistores e oito diodos), mostrado na Figura 11 para cinco níveis;
- Conversor bidirecional trifásico – formado por seis braços (doze transistores e doze diodos), mostrado na Figura 8.

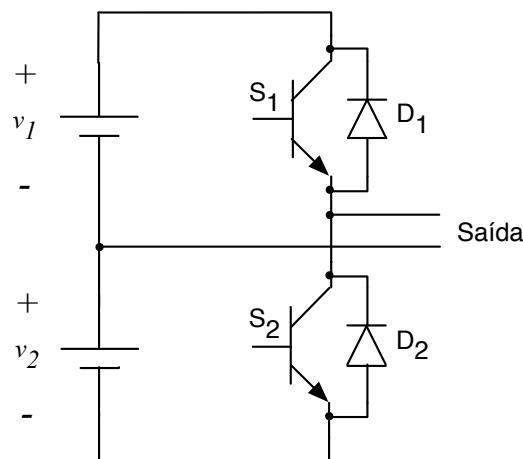


Figura 16 – Conversor meia ponte.

A seguir, após esta introdução geral aos conversores cc-ca, será estudado em detalhes o conversor meia ponte, por ser o inversor mais simples, sendo que no próximo capítulo se estudará o conversor ponte completa.

3 Inversor de Tensão Meia Ponte

3.1 Introdução

Os inversores de tensão na configuração meia ponte necessitam de duas fontes de tensão na entrada, como está mostrado na Figura 16. A necessidade de duas fontes é uma desvantagem desta estrutura, sendo comum se utilizar um divisor capacitivo, como mostrado na Figura 17.

A topologia mostrada na Figura 17 é mais simples, mas os capacitores devem ser de grande valor (alta capacitância) para que se tenha baixa ondulação (*ripple*) de tensão sobre os mesmos; além do que, pode aparecer desbalanço de tensão nestes capacitores, pois idealmente a tensão da fonte deveria se dividir ao meio, mas se os capacitores tiverem capacitâncias ligeiramente diferentes, se os tempos de comutação dos interruptores ou suas quedas de tensão forem diferentes, um dos capacitores assumirá um valor superior de tensão em relação ao outro, provocando desbalanço de

tensão entre os mesmos. Para evitar este fenômeno, faz-se necessário empregar uma malha de controle específica para monitorar e controlar o equilíbrio de tensão nestes capacitores, tornando a estrutura de controle mais complexa.

O inversor de tensão meia ponte completo, com filtro de saída, está mostrado na Figura 18, onde se identificam as polaridades das tensões e sentidos das correntes nos elementos do circuito. O circuito da Figura 18 será utilizado para o estudo das etapas de funcionamento do conversor, apresentadas a seguir.

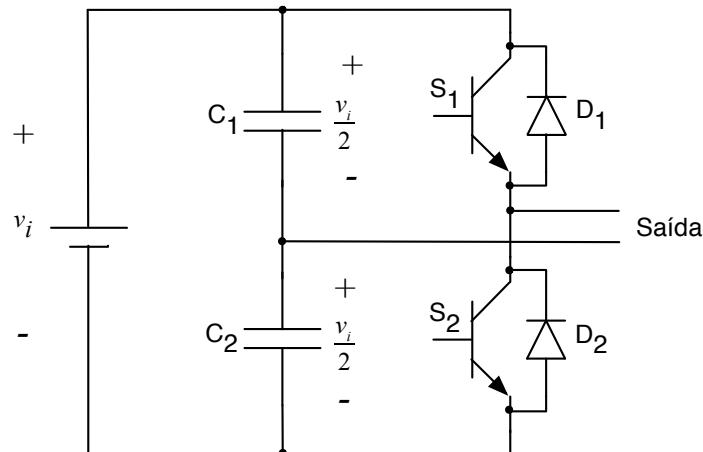


Figura 17 – Conversor meia ponte com divisor capacitivo.

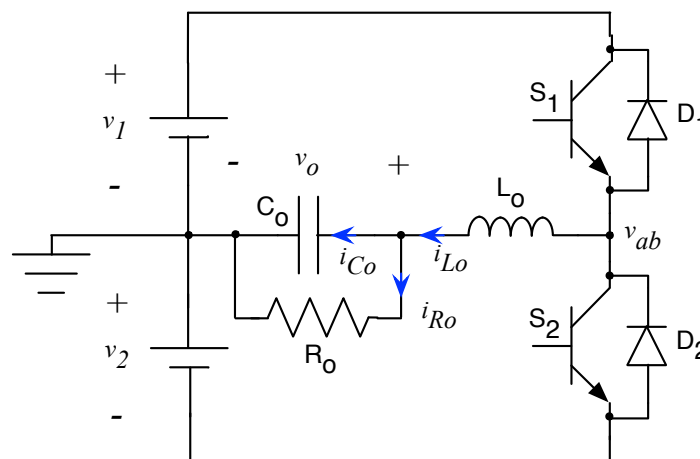


Figura 18 – Conversor meia ponte com filtro de saída.

3.2 Conversor CC-CA Meia Ponte Ideal (sem tempo morto)

O inversor de tensão meia ponte pode operar em condução contínua (CCM) ou descontínua (DCM), como foi estudado para os conversores Buck, Boost e Buck-Boost. Em específico aos conversores meia ponte e ponte completa, estes são em verdade conversores Buck, podendo-se utilizar os conhecimentos e técnicas de análise empregadas anteriormente para o estudo destes conversores.

Conforme comentado anteriormente e mostrado na Figura 15, não se pode curto-circuitar

a fonte de entrada pelo fechamento simultâneo dos dois transistores do inversor meia ponte. Assim, idealmente é possível ignorar o tempo de comutação necessário para que um interruptor feche e o outro abra. No entanto, na prática é sempre necessário um intervalo de tempo entre a abertura de uma chave e o fechamento de outra, denominado de tempo morto (*dead time*), que pode ser da ordem de 100 ns até 1 μ s, dependendo da tecnologia de semicondutores utilizada. Nesta primeira parte do estudo do conversor meia ponte será ignorado este tempo morto, se considerando que as chaves são ideais e comutam com tempo zero.

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.

O inversor de tensão meia ponte operando no modo de condução contínua e sem tempo morto apresenta duas etapas de operação, mostradas nas Figura 19 e Figura 20. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa ($0, DT_s$) – Chave S_1 conduzindo (*on*) e chave S_2 aberta (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte superior, isto é, $+v_1$. A corrente circula por L_o e pela saída. Nesta etapa a fonte (v_1) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o ;

2ª Etapa (DT_s, T_s) – Chave S_1 aberta (*off*) e chave S_2 conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte inferior, isto é, $-v_2$. A corrente circula por L_o e pela chave S_2 . 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 meia ponte são mostradas na Figura 21. Nesta figura tem-se os sinais de comando dos interruptores (S_1 e S_2), denominados de v_{g1} e v_{g2} , seguida pela 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).

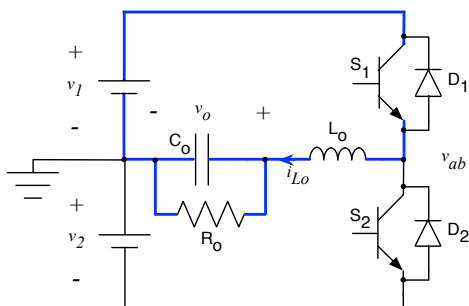


Figura 19 – Primeira etapa de operação do inversor de tensão meia ponte.

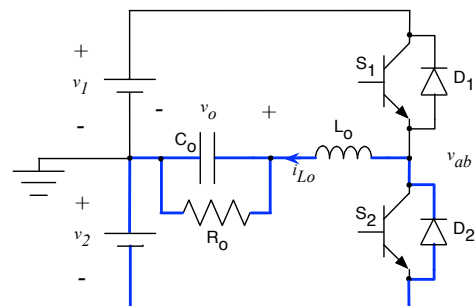


Figura 20 – Segunda etapa de operação do inversor meia ponte.

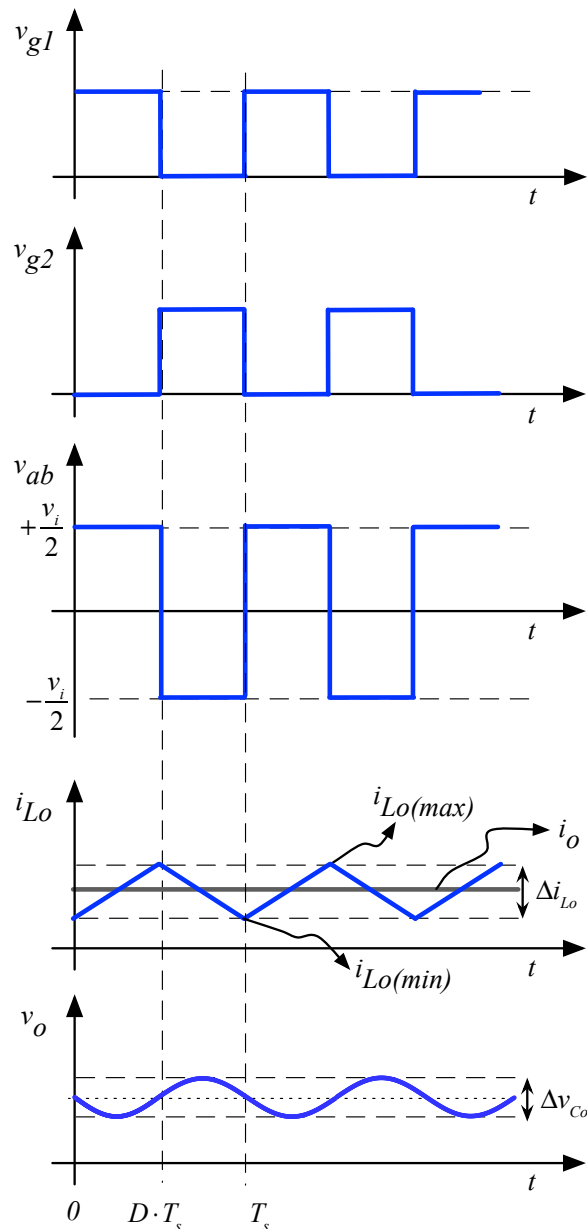


Figura 21 – Formas de onda do inversor de tensão meia ponte sem tempo morto.

3.3 Conversor CC-CA Meia Ponte Real (com tempo morto)

O inversor de tensão meia ponte operando no modo de condução contínua e com tempo morto apresenta três etapas de operação, mostradas nas Figura 19, Figura 20, Figura 22 e Figura 23. Estas etapas de operação são:

1ª Etapa (0, DT_s) – Chave S_1 conduzindo (*on*) e chave S_2 aberta (*off*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte superior, isto é, $+v_l$. A corrente circula por L_o e pela saída. Nesta etapa a fonte (v_l) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o . Nas Figura 24 e Figura 25 esta etapa é identificada por t_{onS1} ;

2ª Etapa (t_{dt}) – Chaves S_1 e S_2 abertas (*off*). A corrente do indutor irá circular pelo diodo D_1 ou diodo D_2 , conforme for positiva (Figura 24) ou negativa (Figura 25). A

tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte inferior, isto é, $-v_2$, caso a corrente no indutor for positiva, do contrário será igual a tensão da fonte superior, isto é, $+v_1$. Nesta etapa pode continuar ocorrendo a magnetização do indutor, se a corrente for negativa, ou a desmagnetização do indutor L_o . Nas Figura 24 e Figura 25 esta etapa é identificada por t_{dt} de tempo morto (*dead time*);

3ª Etapa (DT_s, T_s) – Chave S_1 aberta (*off*) e chave S_2 conduzindo (*on*). A tensão entre os pontos “a” e “b” será igual a tensão da fonte inferior, isto é, $-v_2$. A corrente circula por L_o e pela chave S_2 . Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor L_o .

Ao finalizar a terceira etapa retorna-se à primeira, indefinidamente. As formas de onda resultantes da operação do inversor de tensão meia ponte são mostradas nas Figura 24 e Figura 25. Nestas figuras tem-se os sinais de comando dos interruptores (S_1 e S_2), denominados de v_{g1} e v_{g2} , seguida pela tensão entre os pontos “a” e “b”, v_{ab} .

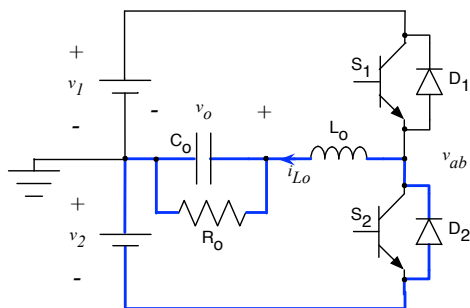


Figura 22 – Etapa de operação de tempo morto com corrente positiva na carga.

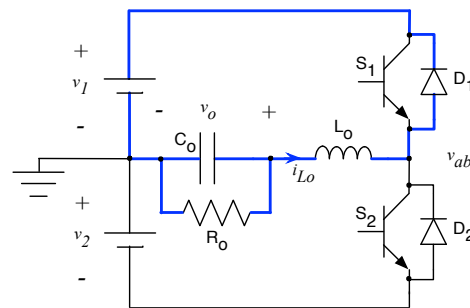


Figura 23 – Etapa de operação de tempo morto com corrente negativa na carga.

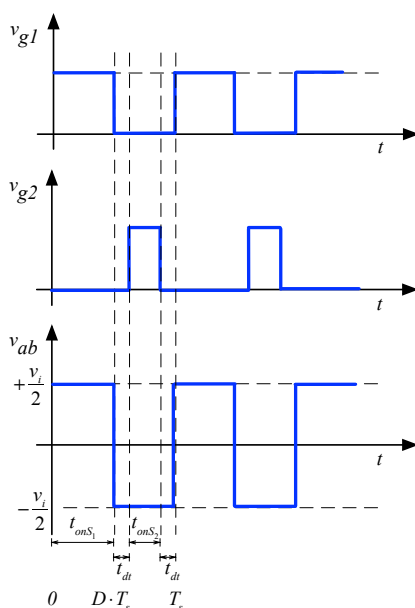


Figura 24 – Formas de onda do inversor de tensão meia ponte com tempo morto e corrente positiva no indutor.

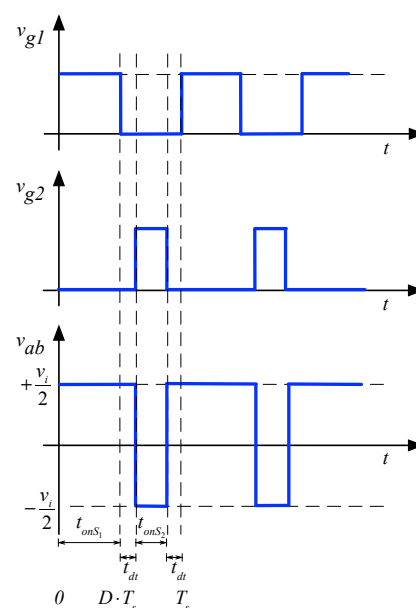


Figura 25 – Formas de onda do inversor de tensão meia ponte com tempo morto e corrente negativa no indutor.

3.4 Análise do Inversor de Tensão Meia Ponte

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.

3.4.1 Tensão de Saída

A tensão de entrada (v_i) está representada na Figura 21 pelo seu valor instantâneo (v_o). 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:

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

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

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

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

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 26.

$$V_{ab(med)} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_s} v_1 \cdot dt + \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D) \cdot T_s} -v_2 \cdot dt ;$$

$$V_{ab(med)} = (V_1 + V_2) \cdot D - V_2$$

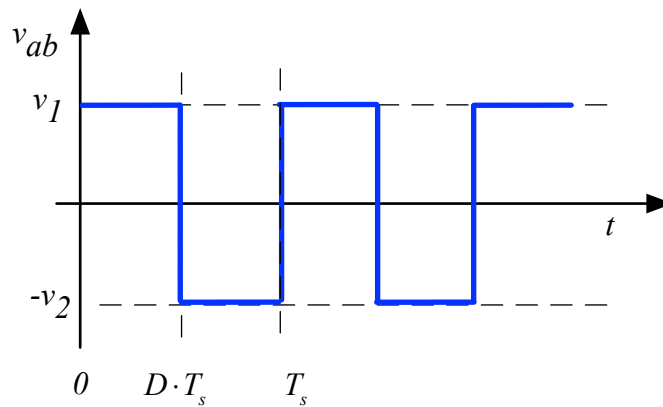


Figura 26 – Forma de onda da tensão entre os pontos “a” e “b” do inversor meia ponte.

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 27.

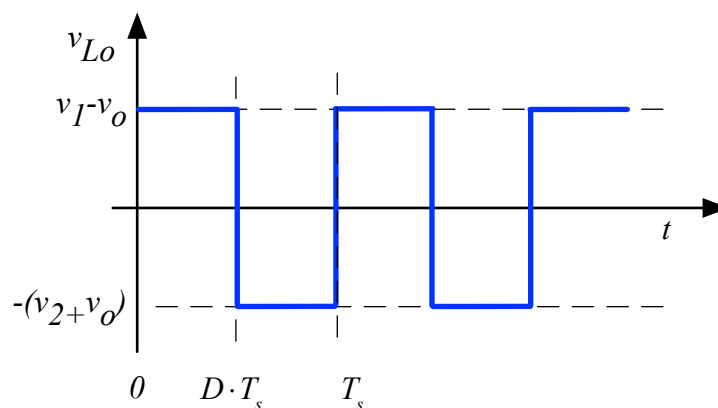


Figura 27 – Forma de onda da tensão sobre o indutor.

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

$$V_{Lo} = 0 .$$

Portanto, a tensão média na saída é obtida por:

$$V_o = V_{ab(med)} = (V_1 + V_2) \cdot D - V_2 .$$

As tensões v_1 e v_2 devem ser iguais, para se ter equilíbrio no conversor meia ponte, assim:

$$V_1 = V_2 = V_i .$$

Portanto:

$$V_o = (V_i + V_i) \cdot D - V_i,$$

$$V_o = (2 \cdot D - 1) \cdot V_i.$$

3.4.2 Ganho Estático do Inversor de Tensão Meia Ponte

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 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 28. Nota-se pela Figura 28 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 28 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).

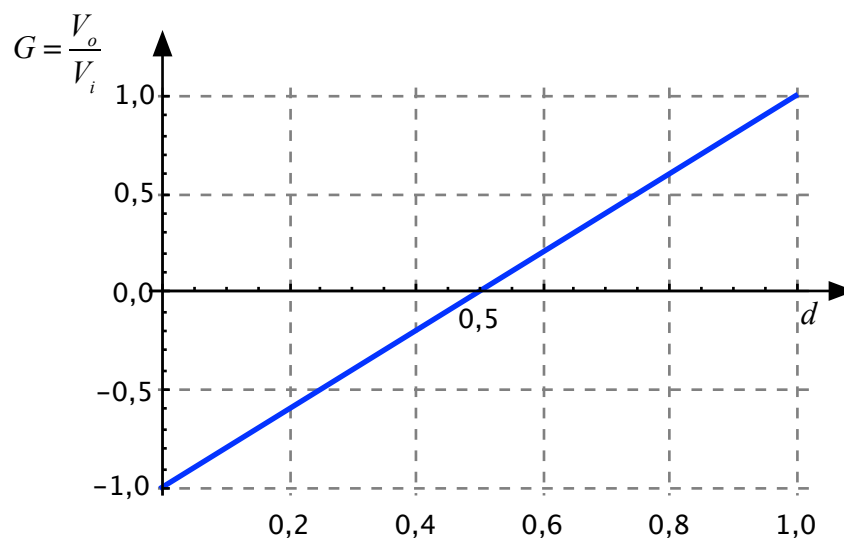


Figura 28 – Ganho estático do inversor de tensão meia ponte.

3.4.3 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:

$$I_{L_o} = I_o \rightarrow I_{C_o} = 0 .$$

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:

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

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

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

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

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 29. Este gráfico foi elaborado considerando-se a ondulação de corrente parametrizada em função de V_i , L_o e F_s . Assim, pela Figura 29 pode-se determinar a máxima ondulação de corrente no indutor, que ocorre para $D = 0,5$, como sendo:

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

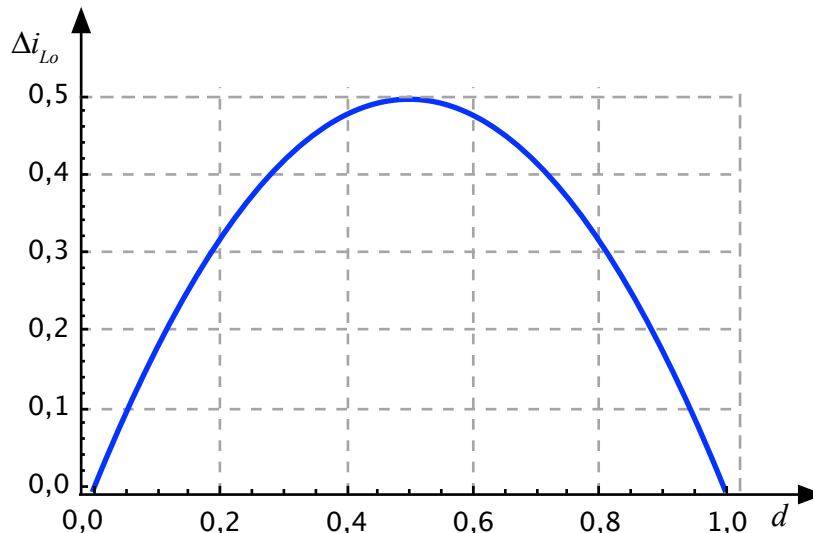


Figura 29 – Comportamento da ondulação de corrente em função da razão cíclica.

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 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 21 e valem para o período de comutação (alta frequência).

3.4.4 Rendimento do Conversor

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

$$P_o = V_o \cdot I_o .$$

$$P_i = V_i \cdot I_i .$$

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

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

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

3.4.5 Esforços de Corrente e Tensão nos Semicondutores

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

$$V_{S1} = V_{S2} = 2 \cdot V_{i(pk)} = 2 \cdot V_i$$

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

$$I_{S1} = I_{S2} = I_{D1} = I_{D2} = I_{o(pk)}$$

3.4.6 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 21 e Figura 30. 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:

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

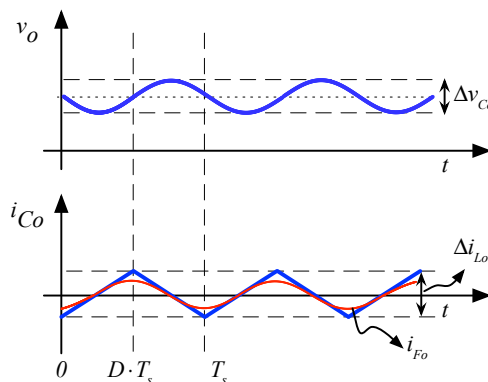


Figura 30 – Formas de onda da tensão e corrente no capacitor de filtro.

3.4.7 Índice de Modulação

A modulação de um inversor meia ponte é realizada conforme estudado no capítulo anterior e mostrado na Figura 31.

Lembrando que o ganho estático do conversor meia ponte é dado por:

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

Ainda conforme a Figura 31 e de acordo com o capítulo anterior, 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:

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

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

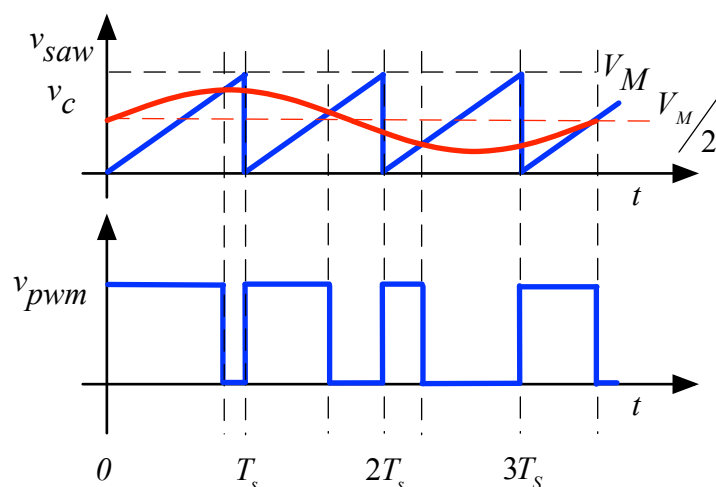


Figura 31 – Formas de onda da modulação do inversor meia ponte.

4 Simulação dos Circuitos Estudados

A simulação do inversor meia ponte operando com modulação PWM senoidal é realizada para fins de entendimento do princípio de funcionamento dos inversores de tensão, operando com duas fontes de tensão ou divisor capacitivo. Os valores utilizados são semelhantes aqueles que se utilizarão em laboratório, sendo com tensões baixas e correntes pequenas, para se utilizar a fonte da bancada, 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.

4.1 Simulação do Inversor Meia Ponte com Duas Fontes de Tensão

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 32, 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. As fontes são 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 1000 Hz. Os elementos ON1 e ON2 são utilizados pelo Psim para comandar interruptores, equivalentes a *drivers* de acionamento dos interruptores.

O modulador implementado no Psim é mostrado na Figura 33, sendo que a tensão modulante é de 0,5 V e a portadora é uma dente-de-serra com amplitude de 1 V, como está mostrado na Figura 34.

A forma de onda para operação com índice de modulação de 20% é mostrada na Figura 34 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 35 mostra as mesmas formas de onda para o conversor operando com índice de modulação de 50%. Por sua vez, a Figura 36 mostra as mesmas formas de onda, mas destacando a tensão de saída do inversor antes da filtragem (v_{ab}), onde se nota a presença dos dois níveis ($+V_i$ e $-V_i$) e a modulação PWM senoidal. A tensão e a corrente na carga também são mostradas, notando-se o formato senoidal das mesmas.

Assim, esta primeira simulação tem por objetivo mostrar o funcionamento do inversor com fontes de tensão simétricas na entrada, conforme foi estudado teoricamente nos itens anteriores.

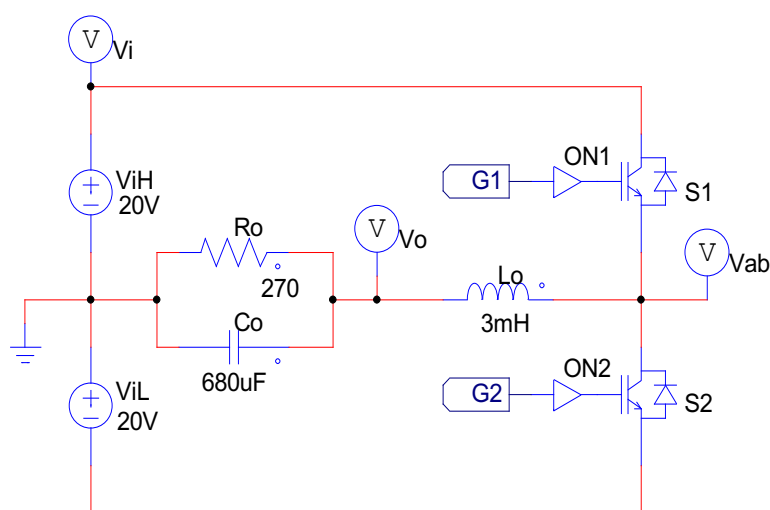


Figura 32 – Circuito simulado no Psim.

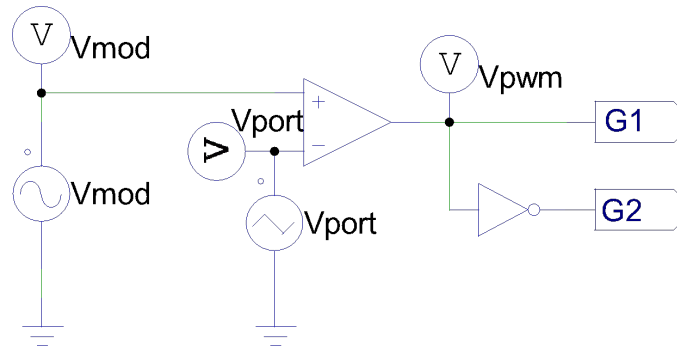


Figura 33 – Circuito da modulação PWM convencional.

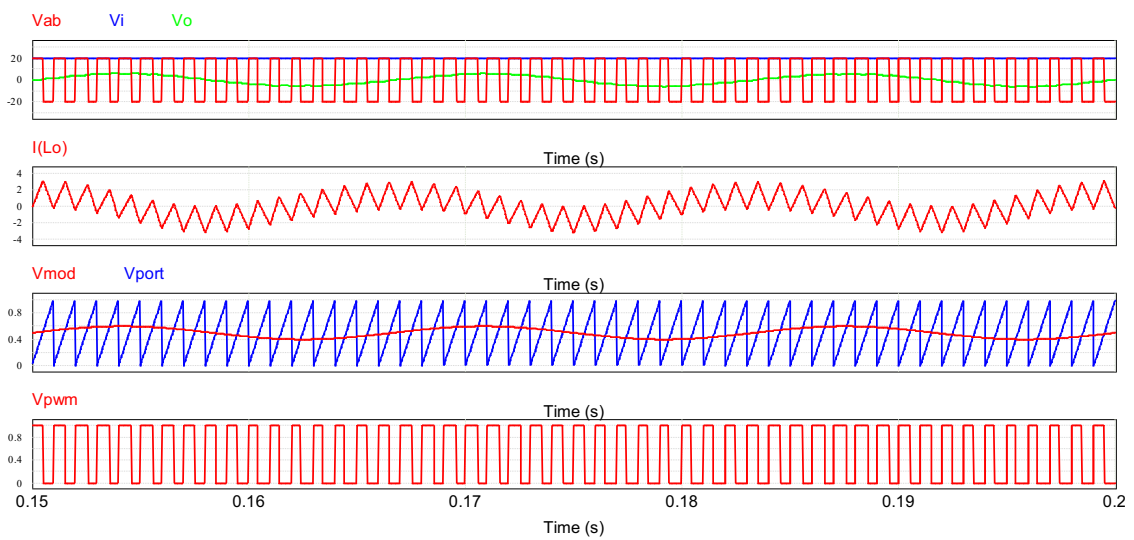


Figura 34 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 20%

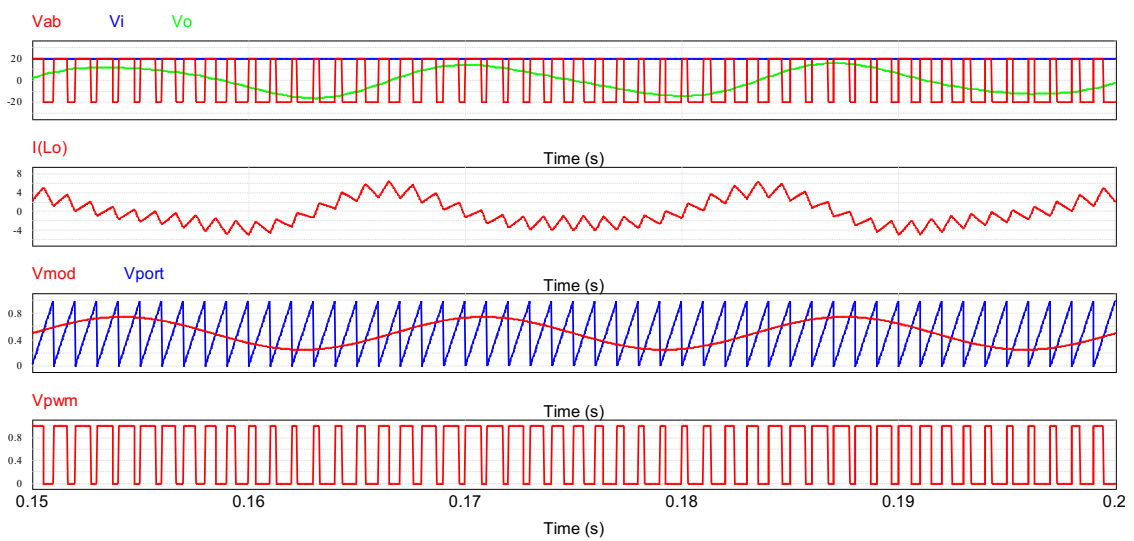


Figura 35 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 50%.

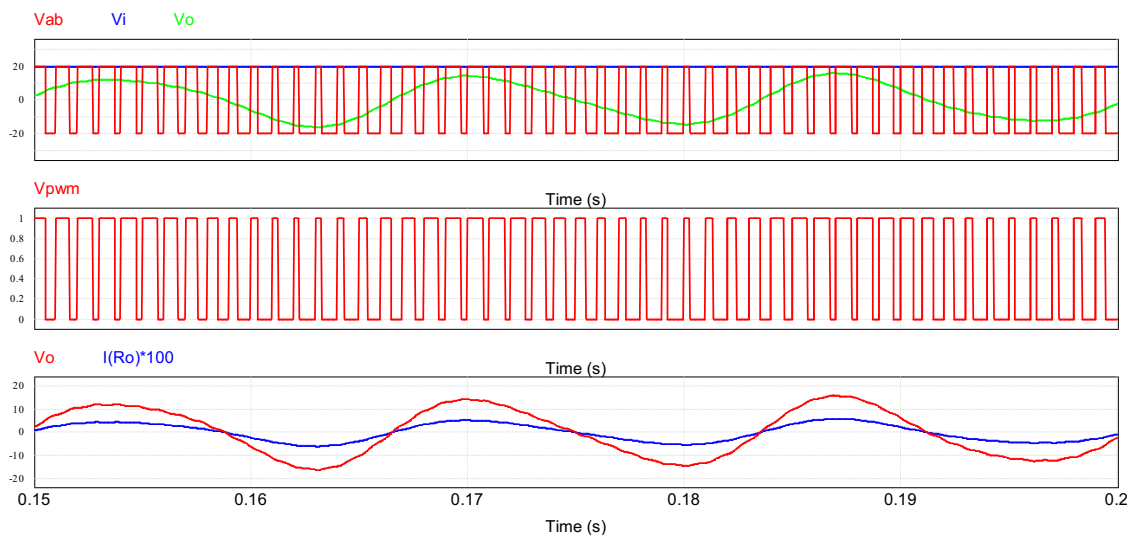


Figura 36 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 50% com detalhe da tensão de saída do inversor.

4.2 Simulação do Inversor Meia Ponte com Divisor Capacitivo

O inversor de tensão anteriormente simulado foi novamente utilizado, mas agora com um divisor capacitivo, conforme mostrado na Figura 37. Neste caso as tensões de entrada são obtidas a partir de uma fonte apenas, situação convencional, usando um divisor capacitivo, formado pelos capacitores C_1 e C_2 .

As Figura 38 e Figura 39 mostram os resultados de simulação para índices de modulação de 20% e 50%, respectivamente. É interessante notar nas formas de onda que agora a tensão entrada possui ondulação em baixa frequência, visto ocorrer a carga e descarga dos capacitores C_1 e C_2 na frequência da tensão na carga (60 Hz).

A Figura 40 mostra as formas de onda do inversor meia ponte operando com desequilíbrio nos interruptores, sendo que o interruptor S_1 tem uma queda de tensão de $V_{CEsat1} = 3$ V, enquanto o interruptor S_2 tem uma queda de tensão de $V_{CEsat2} = 1$ V. Neste caso se nota a diferença na amplitude positiva e negativa da tensão e corrente na carga, sendo que a mesma passou a ter um valor médio de 100 mA; já para a tensão dos capacitores, C_1 tem 10,4 V e C_2 de 9,6 V.

Por fim, a Figura 41 mostra um circuito para geração de tempo morto para o comando dos interruptores de um inversor meia ponte. Neste caso são utilizados dois elementos para gerar um atraso de 100 μ s no sinal de comando dos interruptores, e após a combinação lógica necessária, se obtêm os sinais de comando de S_1 e S_2 , conforme mostrado na Figura 42.

O valor de 100 μ s foi utilizado para que nas formas de onda ficasse perceptível o efeito do tempo morto (*dead time*). Pode-se verificar na Figura 43 que a tensão de saída do inversor antes e depois da filtragem, e a corrente na carga, permanecem semelhantes aquelas obtidas sem o uso de tempo morto no comando dos interruptores.

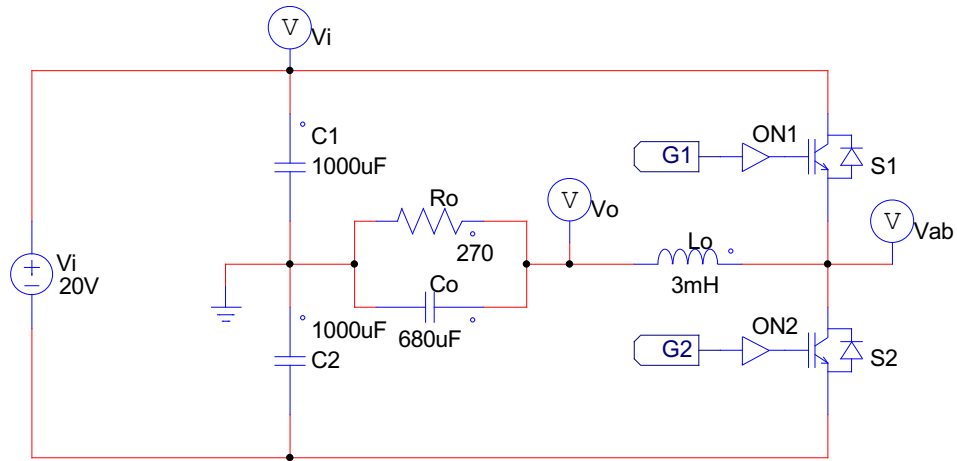


Figura 37 – Circuito do inversor de tensão meia ponte com divisor capacitivo.

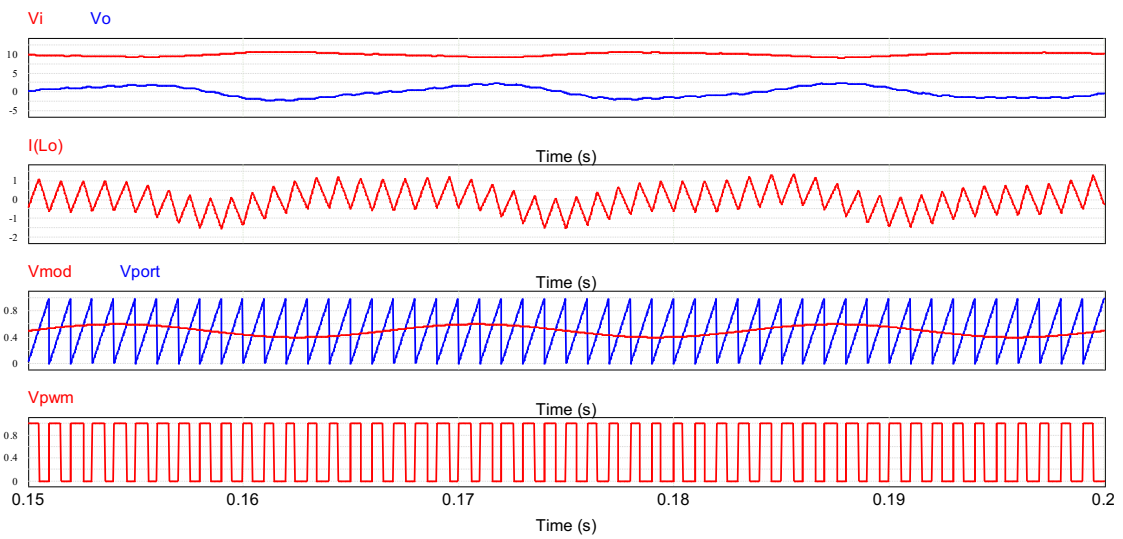


Figura 38 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 20%.

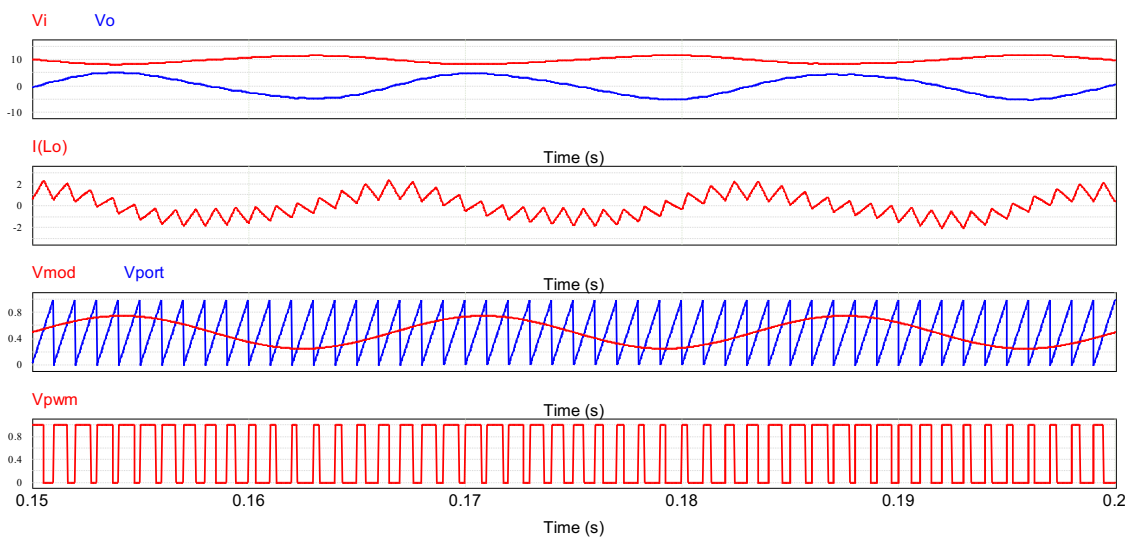


Figura 39 – Principais formas de onda do conversor com índice de modulação de 50%.

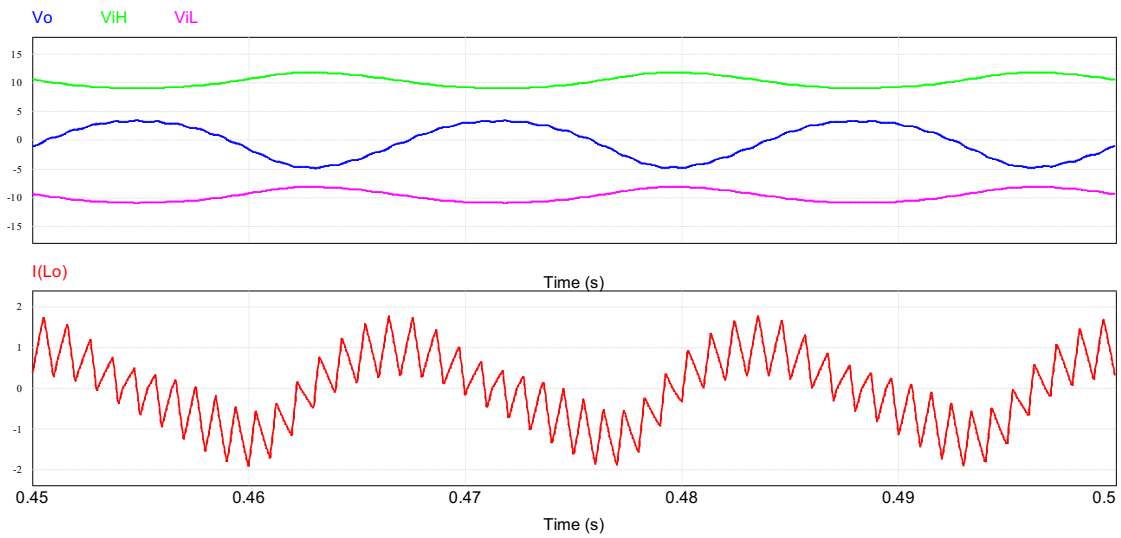


Figura 40 – Principais formas de onda com desequilíbrio no inversor meia ponte.

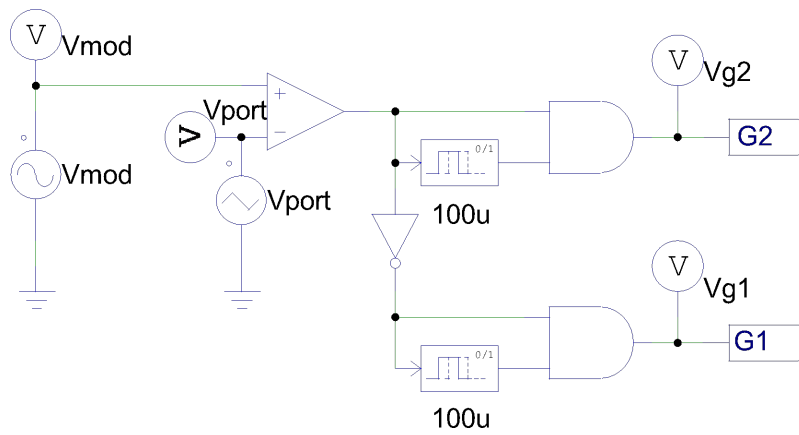


Figura 41 – Circuito para geração de tempo morto no inversor meia ponte.

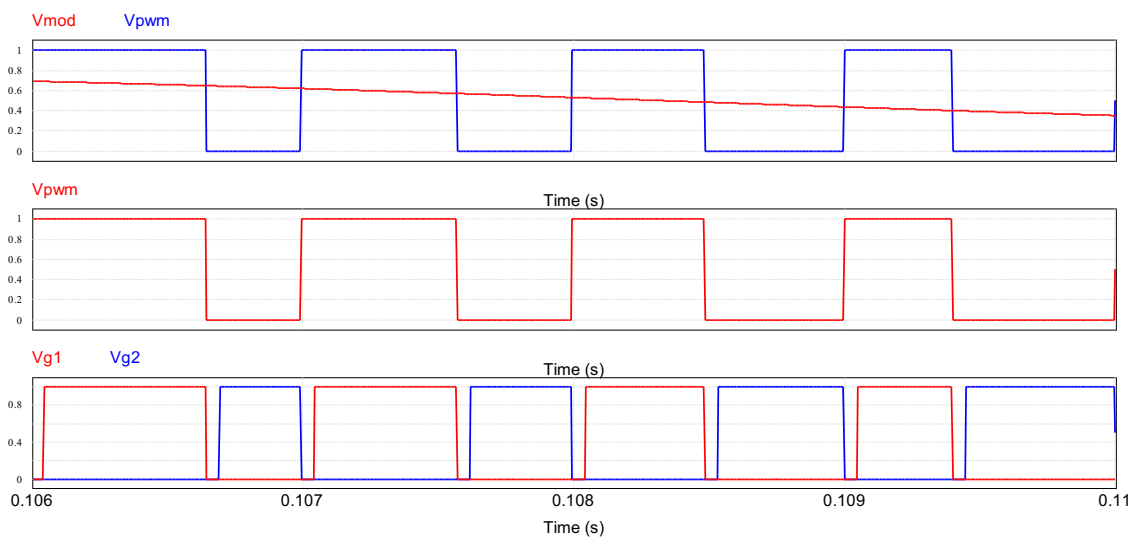


Figura 42 – Formas de onda dos sinais de comando dos interruptores com tempo morto.

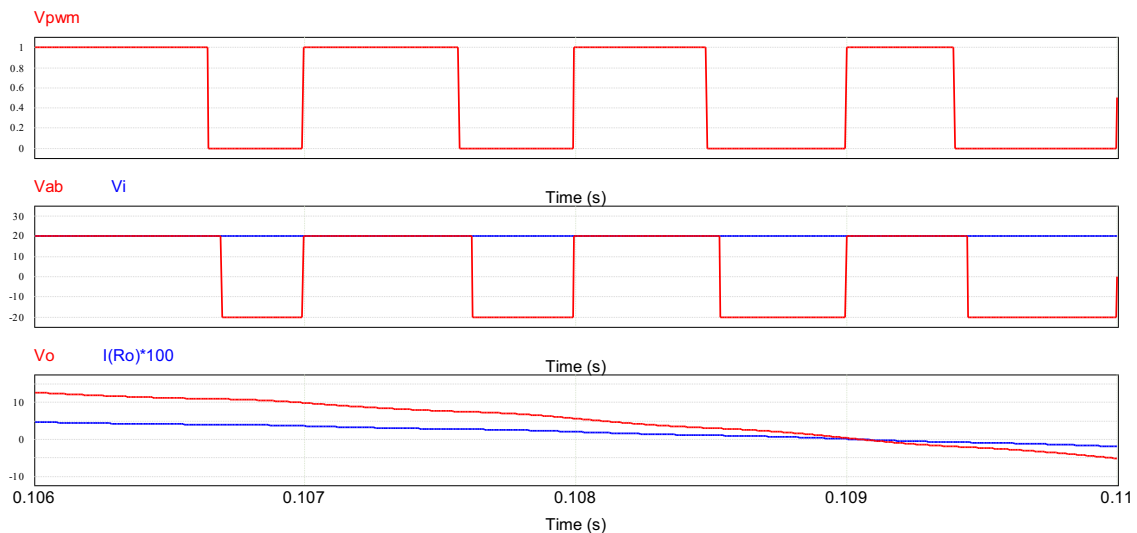


Figura 43 – Formas de onda do estágio de potência com tempo morto.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 37, 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 a metade da tensão da fonte, pois se está utilizando um divisor capacitivo. Assim:

$$V_{i(inv)} = \frac{V_i}{2} = \frac{20}{2} = 10V$$

A tensão de pico na saída, considerando que os componentes são ideais, será igual a tensão de entrada do inversor, ou seja, 10 V.

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

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{ab(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{i(in)}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{10}{270} = 37 \text{ mA}$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{7,07}{270} = 26,2 \text{ mA}$$

ER 02) Considerando a Figura 31, a Figura 37 e a Figura 38, 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 37, a tensão de entrada do inversor ($V_{i(inv)}$) é de 10 V, então para obter 5 V de tensão eficaz na carga se tem:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{5 \cdot \sqrt{2}}{10} = 0,71 = 71\%$$

Para os níveis de modulação utilizados na Figura 31 e conforme a Figura 38, se tem:

$$D = \frac{V_C}{V_M} \rightarrow IM = \frac{V_{C(ca)}}{V_M/2} \rightarrow V_{C(ca)} = IM \cdot \frac{V_M}{2} = 0,71 \cdot \frac{1}{2} = 0,355V$$

Para 3 V de tensão eficaz na carga se terá:

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{10} = 0,42 = 42\%$$

$$V_{C(ca)} = IM \cdot \frac{V_M}{2} = 0,42 \cdot \frac{1}{2} = 0,21V$$

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

$$IM = \frac{V_{o(pk)}}{V_i} = \frac{7}{10} = 0,7 = 70\%$$

$$V_{C(ca)} = IM \cdot \frac{V_M}{2} = 0,7 \cdot \frac{1}{2} = 0,35V$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 32, 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.

EP 02) Considerando a Figura 31, a Figura 32 e a Figura 34, 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.

EP 03) Explique a diferença entre conversores unidirecionais e conversores bidirecionais.

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

EP 05) Considerando circuitos de inversores de tensão que utilizam transistores de tecnologia MOSFET, qual deve ser a ordem de grandeza do tempo morto?

EP 06) Considerando circuitos de inversores de tensão que utilizam transistores de tecnologia IGBT, qual deve ser a ordem de grandeza do tempo morto?

EP 07) Considerando circuitos de inversores de tensão que utilizam transistores de tecnologia BJT, qual deve ser a ordem de grandeza do tempo morto?

EP 08) Explique o que significa índice de modulação e o que seria sobremodulação.

EP 09) Simule o circuito da Figura 37 considerando a tensão de entrada de 50 V.

EP 10) Simule o circuito da Figura 37 considerando a tensão de entrada de 50 V e o valor dos capacitores C_1 e C_2 de 100 μF . O que aconteceu com a ondulação de tensão nestes capacitores?

EP 11) O que significa desequilíbrio nos inversores de tensão meia ponte com divisor capacitivo? Como pode ser evitado?

EP 12) A grosso modo, qual seria o limite superior para a frequência da tensão de saída para o inversor meia ponte simulado neste capítulo, que operou com frequência de comutação de 1000 Hz?

EP 13) Qual a tensão de entrada necessária em um inversor de tensão meia ponte com divisor capacitivo para se acionar um motor de indução monofásico de 220 V?

EP 14) Qual a tensão de entrada necessária em um inversor de tensão meia ponte com divisor capacitivo para se acionar um motor de indução monofásico de 110 V?

6 Laboratório

6.1 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 meia ponte operando com modulação PWM senoidal.

Em síntese, objetiva-se:

- Aplicar os princípios da modulação PWM senoidal;
- Simular um conversor cc-ca meia ponte 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.

6.2 Conversor CC-CA Meia Ponte

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 44. 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.

Os capacitores do divisor de tensão serão de 1.000 μ F e os resistores em paralelo serão de 10 k Ω .

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.

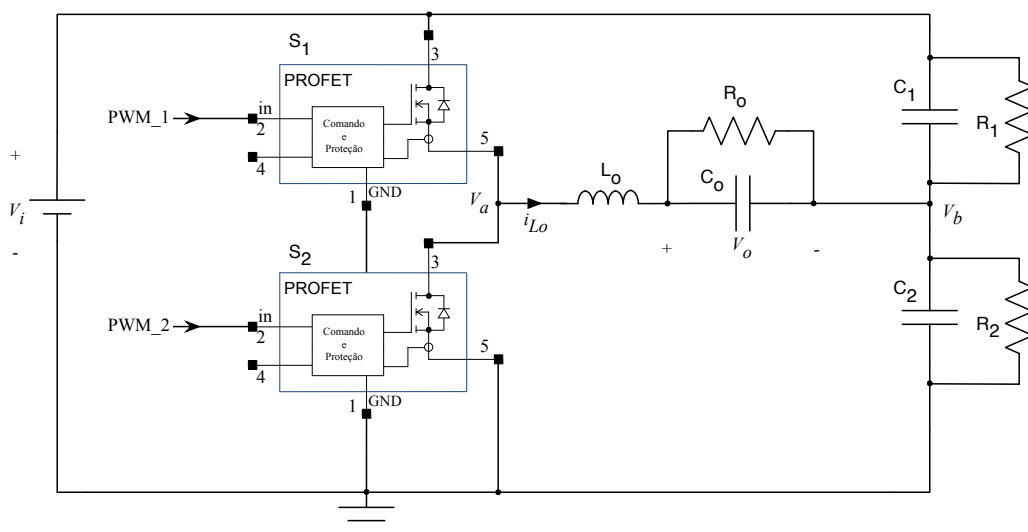


Figura 44 – Circuito do conversor cc-ca meia ponte.

6.3 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. $d = 0,5 + 0,5 \cdot k$

A razão cíclica gerada pelo circuito, conforme descrito acima será aplicada ao interruptor superior (S_1). Já para o interruptor inferior (S_2), o sinal deverá ser invertido, ou seja, ter um defasamento de 180° . Idealmente deveria haver um tempo pequeno (por volta de $1 \mu\text{s}$) entre o instante que o sinal de gatilho do interruptor S_1 desce e o sinal do interruptor S_2 sobe. Esse tempo é denominado de tempo morto. Isso é feito para evitar que os dois interruptores fechem simultaneamente e provoquem um curto na fonte de alimentação, denominado de curto de braço. No simulador de circuitos, considerando componentes ideais, este tempo morto pode ser desconsiderado.

6.4 Resultados do Circuito Simulado

Simule o circuito mostrado na Figura 44 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:

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

6.5 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?

7 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.