

Acionamentos Eletrônicos

Aula 06 - Circuitos conversores: CC em CA – Inversores

Apresentação

Os conversores de tensão contínua (CC) em tensão alternada (CA) são extremamente necessários quando se deseja controlar motores elétricos. Eles são responsáveis por fornecer exatamente a tensão e frequência requisitadas pelo controle e acionamento do motor, nas mais distintas etapas do seu funcionamento. Os conversores CC – CA são comumente chamados de inversores de tensão e são a segunda etapa (o segundo módulo) da estrutura de acionamento de motores de corrente alternada, sendo a primeira etapa o conversor CA – CC (retificador).

Objetivos

- Descrever a necessidade dos inversores.
- Reconhecer os circuitos inversores.
- Saber definir a forma de operação dos inversores.

Conversores

Os circuitos conversores são responsáveis por fornecer aos motores elétricos as tensões e frequências adequadas ao seu funcionamento. O tipo de acionamento e, conseqüentemente, os tipos de conversores utilizados, dependem principalmente da natureza do sinal de alimentação do motor. Para os motores que são alimentados por corrente alternada, podemos ligar o motor diretamente na rede elétrica. No entanto, se fizermos isso, estamos impondo ao motor primeiramente uma variação brusca na tensão sobre ele que antes estava em zero e passa a tensão nominal repentinamente. Isso pode acarretar alguns problemas como sobredimensionamento de condutores e de dispositivos de proteção, afundamento na tensão da rede, desgaste prematuro de componentes mecânicos etc. E além dos problemas inerentes à partida direta de motores, existe ainda a impossibilidade de controlar o sinal de alimentação, inviabilizando o controle de velocidade, por exemplo.

Para solucionar esse problema, a maioria das aplicações práticas usam as etapas de retificação e inversão para alimentar e controlar motores elétricos de corrente alternada. A Figura 1 mostra a tensão fornecida pela rede elétrica sendo retificada e, depois, sendo transformada novamente em tensão alternada, porém controlada e aplicada ao motor.

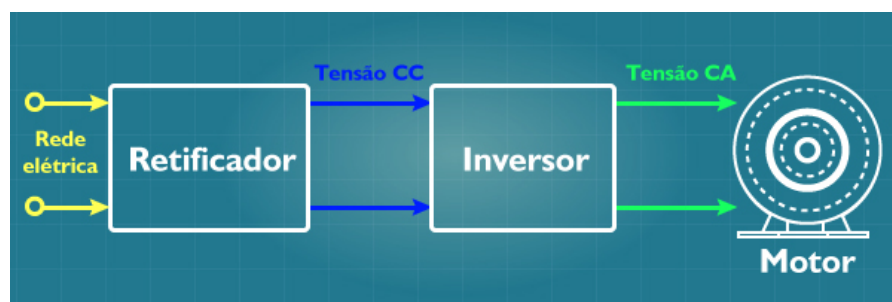


Figura 1 - Circuito de acionamento de motor com retificador e inversor.

Fonte: Autoria própria (2014).

Outra situação em que também é fácil perceber a necessidade de circuitos conversores CC – CA é na geração de fontes alternativas de energia, solar e eólica. Em linhas gerais, elas funcionam captando a energia do sol e dos ventos armazenando em baterias. No entanto, a

maioria das aplicações domésticas requer tensão alternada, como geladeira, fogão, liquidificador etc. Nesse ponto, entram em ação os inversores, que tratam de transformar a tensão contínua armazenada nas baterias em tensão alternada para ser utilizada por nós.

Atividade 01

1. Por que é necessário converter uma tensão alternada em tensão contínua e depois converter novamente em alternada?

Inversores de tensão

Um circuito inversor de tensão é um circuito que é capaz de converter tensão contínua CC em tensão alternada CA. Pode parecer estranho a primeira vista transformar uma tensão alternada em tensão contínua para depois transformá-la novamente em tensão alternada. No entanto, é muito pertinente essa conversão, pois a tensão fornecida pela rede elétrica é uma tensão que apresenta valor (amplitude) e frequência fixos, e para efetuar o controle de motores elétricos é necessário que essas quantias possam ser alteradas.

Os inversores de tensão são construídos também baseados em chaves, como é o caso dos retificadores, o que muda é a topologia do circuito e o controle dessas chaves. A escolha das chaves e da estratégia adequada para o controle de abertura e fechamento, assim como o sincronismo entre elas, é o que faz com que um inversor seja mais eficiente que outro. A chave pode ser qualquer uma que tenha um tempo de abertura e fechamento rápido, condizente com a aplicação desejada. A Figura 2 mostra um circuito básico de um inversor no qual podemos perceber o seu princípio de operação.

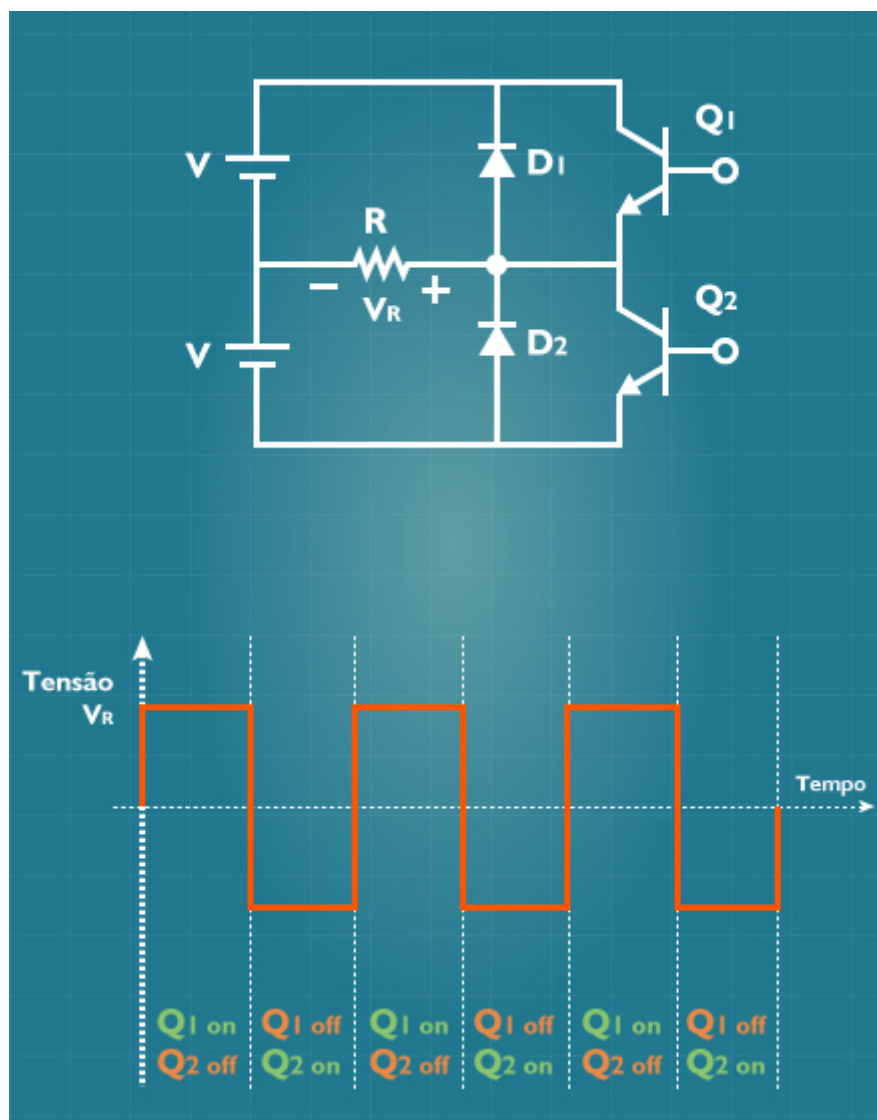


Figura 2 - Circuito inversor monofásico de meia ponte.

Fonte: Autoria própria (2014).

O circuito gera uma onda monofásica de tensão baseada na operação de duas chaves, Q_1 e Q_2 , que operam em oposição, ou seja, quando uma está aberta (off) a outra está fechada (on). Observando a forma de onda V_R , percebemos que a onda gerada não é exatamente uma onda senoidal, pois esse é um circuito muito simples. Porém, na prática, os inversores mais elaborados têm seu sinal de saída mais próximo de um sinal senoidal, mas não geram exatamente sinais senoidais, o que ocorre é que são utilizados filtros que transformam o sinal de saída dos inversores em sinais próximos a senoides.

Nos circuitos inversores é comum verificar os diodos em paralelo com as chaves, eles são colocados dessa forma para garantir um caminho para a corrente no caso de cargas com características indutivas. Esses diodos

são chamados de diodos de roda livre ou de circulação (do inglês – freewheeling diode).

A Figura 3 mostra o circuito inversor nas duas situações de operações: quando a chave Q1 está fechada (on) e a Q2 aberta (off) e a situação contrária, quando Q1 está aberta e Q2 fechada. A corrente em ambos os casos é mostrada na Figura 3. Note que na condução de Q1 uma corrente passa pela carga R da direita para a esquerda e na condução de Q2 o contrário, a mesma corrente passa da esquerda para a direita, isso garante a inversão da tensão mostrada no gráfico da Figura 2 e a simetria necessária.

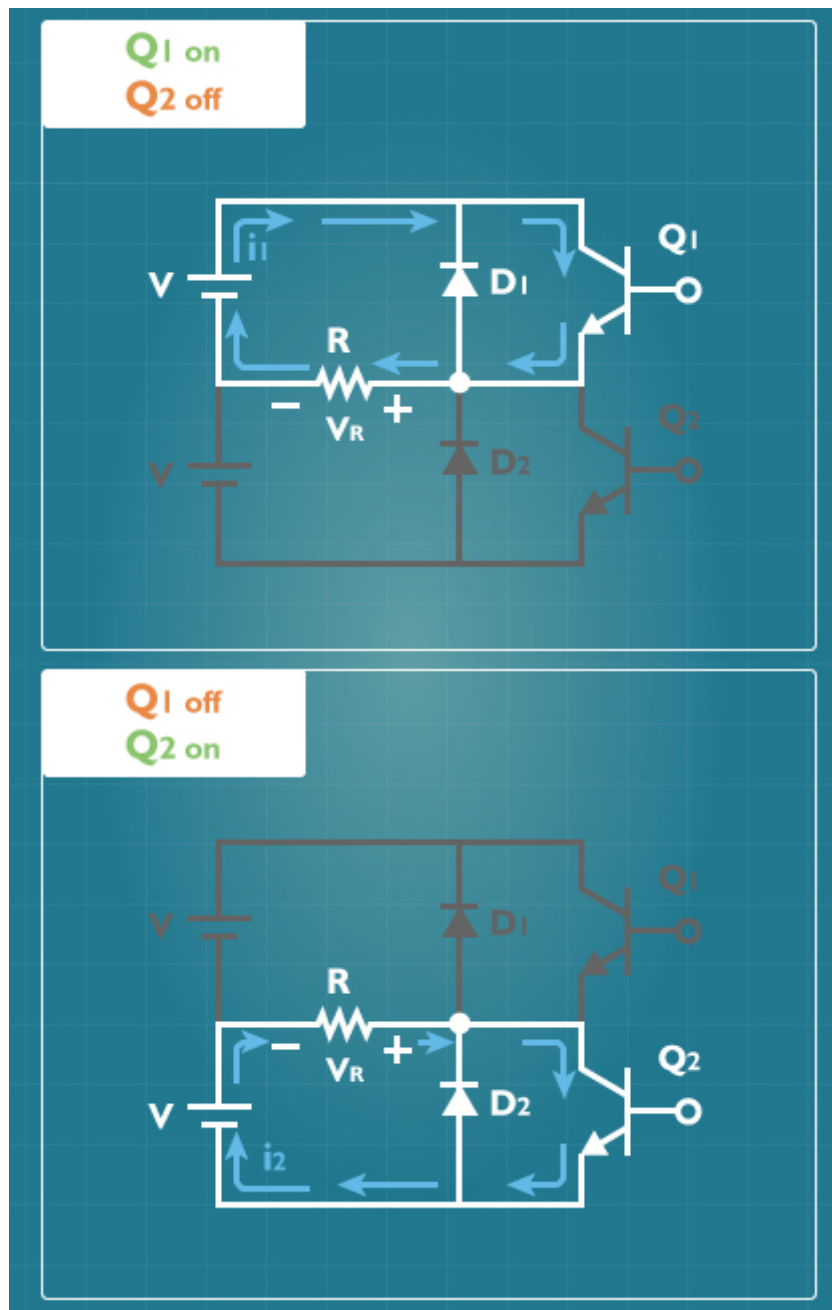


Figura 3 - Circuito inversor monofásico de meia ponte.

Fonte: Autoria própria (2014).

Um fato importante que se deve ter cuidado na operação dos inversores é o sincronismo das chaves. O funcionamento mostrado na Figura 3 leva em consideração que as chaves funcionem de forma bem definida, uma abra no momento em que a outra fecha, se isso não ocorrer, o funcionamento do inversor pode ficar comprometido. Mesmo tendo cuidado com a implementação do controle das chaves, sempre há dispositivos de segurança para impedir que os componentes sejam danificados caso sejam ligados ao mesmo tempo.

O uso de retificadores e de inversores juntos para acionamento e controles de motores elétricos de corrente alternada é tão comum que esses dois módulos normalmente são disponibilizados juntos e, quando isso acontece, o módulo é chamado de inversor de frequência, pois entra no módulo a tensão alternada da rede elétrica (com frequência em torno de 60 Hz no Brasil) e sai desse módulo a tensão com a frequência desejada. Nessa situação não há apenas a inversão de tensão, mas também a inversão de frequência.

Atividade 02

1. Como um circuito inversor é capaz de converter tensão contínua em tensão alternada?

Princípio de operação dos circuitos inversores

O objetivo dos inversores é converter uma tensão de entrada contínua em uma tensão de saída alternada simétrica com amplitude e frequência desejadas. Outra característica desejada do inversor é que o sinal de saída seja independente de variação na alimentação, ou seja, uma vez definidas as características do sinal de saída, este sinal deve ser invariável, mesmo havendo perturbações no sinal de entrada.

Um parâmetro importante do circuito inversor é o ganho. Ele mede a relação entre a tensão CA de saída e a tensão CC de entrada. Esse ganho é um parâmetro que pode ser controlado, basta que sejam feitos os devidos ajustes no controle de chaveamento do inversor.

A construção dos circuitos inversores leva em consideração quatro formas de operação em relação ao sinal de saída desejado, vejamos.

1. Tensão fixa e frequência fixa.
2. Tensão fixa e frequência variável.
3. Tensão variável e frequência fixa.
4. Tensão variável e frequência variável.

Tensão fixa: uma vez fixado o ganho do inversor e a tensão de entrada, não há alteração durante o funcionamento.

Tensão variável: para obter a tensão de saída variável, podemos variar a amplitude da tensão de entrada CC e mantendo o ganho do inversor constante ou então o contrário, quando não for possível variar a amplitude da tensão CC de entrada (for uma tensão fixa), então devemos fazer variar o ganho do inversor através do controle.

Frequência fixa: basta fixar o tempo de operação das chaves, deixar fixo o tempo que elas passam abertas e fechadas.

Frequência variável: para variar a frequência, basta variar a frequência com que as chaves abrem e fecham. Se elas operam mais rápido, o tempo para completar o ciclo de tensão será menor, então a frequência é maior. O contrário também, fazendo com que as chaves operem mais lentamente, então a frequência diminui.

Cada uma dessas aplicações requer um circuito e uma estratégia de controle que propiciem o sinal desejado na saída. Na bibliografia existem diversas estratégias conhecidas de controle das chaves, bem como de topologias para a disposição dos componentes.

Tipos de circuitos inversores

Quanto à topologia, os inversores se dividem basicamente em dois tipos, os de meia ponte e os de ponte completa. O que difere os dois estruturalmente é apenas o número de chaves que é utilizado, o inversor monofásico meia ponte apresenta duas chaves enquanto que os monofásicos uma ponte completa, ou seja, quatro. A Figura 4 mostra as duas topologias.

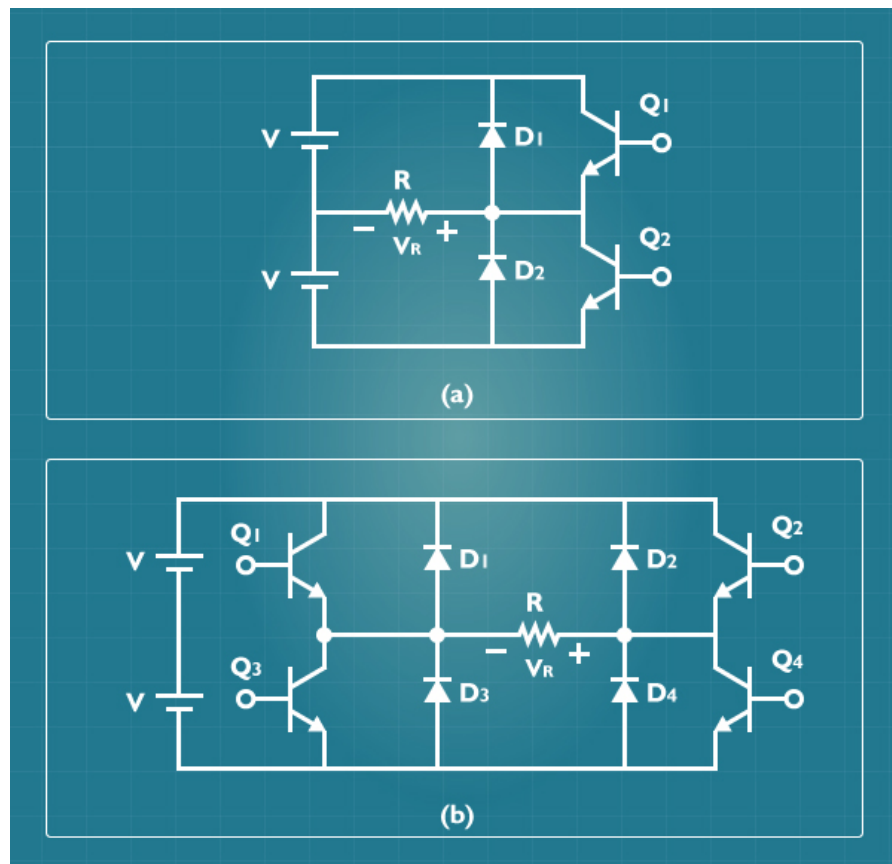


Figura 4 - Inversores monofásicos de meia ponte (a) e ponte completa (b).

Fonte: Autoria Própria (2014).

Uma diferenciação entre os circuitos inversores está no tipo de onda que é gerado na saída; ela pode ser quadrada, quase quadrada e inversor com modulação por largura de pulso.

Inversor com saída de onda quadrada

Um circuito inversor monofásico com saída de onda quadrada (como a mostrada na Figura 2) pode ser qualquer um dos dois mostrados na Figura 4, monofásico meia ponte ou ponte completa.

Para o inversor ponte completa da Figura 4b, a forma de onda quadrada oriunda dos inversores é a mais simples possível. Quando Q2 e Q3 estão conduzindo a corrente e Q1 e Q4 estão abertas, uma tensão positiva é aplicada sobre a carga. Quando ocorre o contrário, Q1 e Q4 estão conduzindo e Q2 e Q3 são cortadas, a tensão negativa é aplicada sobre a carga. Aqui também os diodos são utilizados, garantindo um caminho que leva à corrente para quando a carga tiver características indutivas.

Inversor com saída de onda quase quadrada

Na verdade, o que define se a saída será uma onda quadrada ou semi-quadrada é a operação das chaves, ou seja, o controle que é imposto a elas.

O problema da saída com onda quadrada são os harmônicos que a compõem, eles trazem interferências ao sistema, para eliminá-los, normalmente, são utilizados filtros. Uma alternativa ao inversor com saída quadrada é o de saída quase quadrada, que é obtido com a mesma topologia mostrada na Figura 4, porém o que é modificado é o controle das chaves. O circuito e a sua respectiva forma de onda são mostrados na Figura 5.

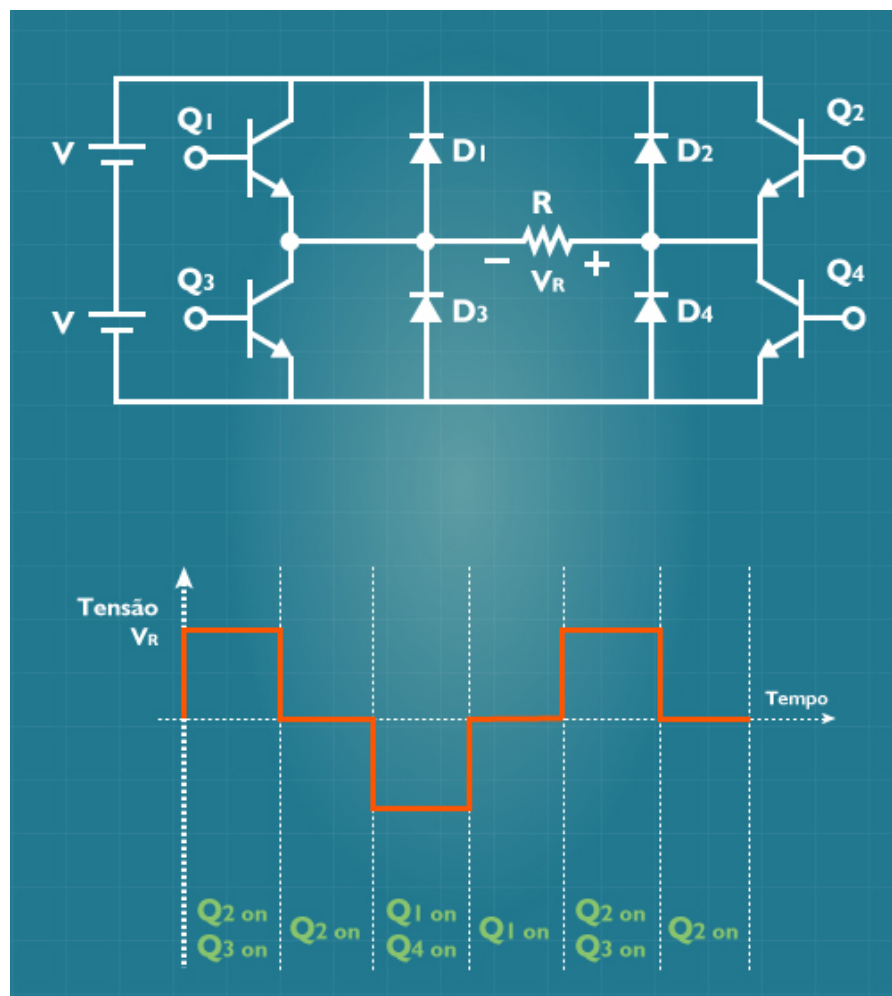


Figura 5 - Circuito inversor com saída quase quadrada.

Fonte: Autoria Própria (2014).

Existem algumas estratégias para manter a corrente na carga em zero, uma delas é como está mostrado na Figura 5. O funcionamento das chaves para os períodos de tensão positiva e negativa na carga é o mesmo do inversor com saída quadrada, a diferença é que para se ter zero de tensão na carga mantém-se a chave Q2 ligada e todas as outras desligadas entre o ciclo positivo e negativo e a chave Q1 ligada e todas as outras desligadas entre o ciclo negativo e positivo. Dessa forma, obtemos um chaveamento um pouco mais suave, ou seja, desligamos e ligamos menos chaves sem prejudicar os componentes devido às possíveis características indutivas da carga.

Atividade 03

1. Qual a diferença para a carga de ser submetida a uma onda quadrada ou semiquadrada? Qual a melhor? Por quê?

Inversor com modulação por largura de pulso

O inversor modulado por largura de pulso é o tipo mais comum utilizado no mercado, pois ele apresenta uma saída mais aproximada de um sinal senoidal.

Essa modulação será estudada mais adiante quando estudarmos o acionamento PWM (do inglês – *Pulse Width Modulation* que em português quer dizer – Modulação por Largura de Pulso), mas para tentarmos entender o princípio de operação de inversor, veremos alguns conceitos básicos. Imagine que a forma de onda “sinal a”, mostrada na Figura 6, é aplicada sobre uma carga:

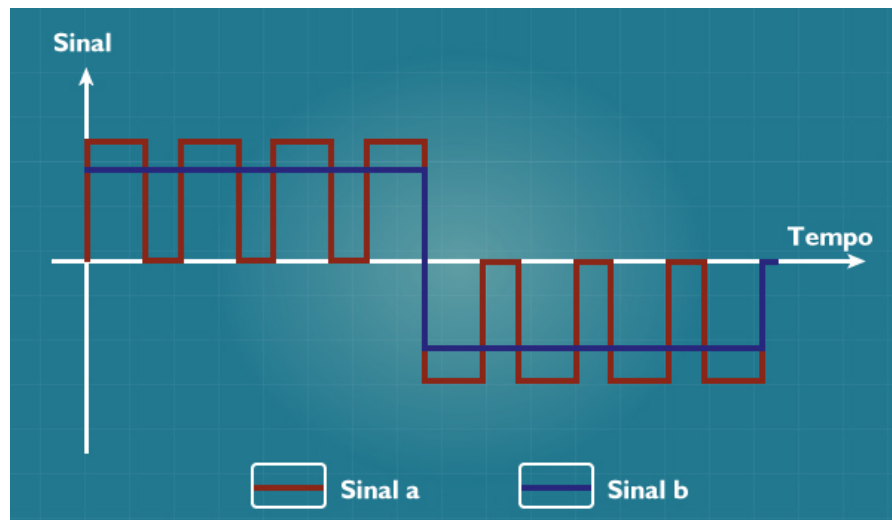


Figura 6 - Formas de onda quadrada.
Fonte: Autoria Própria (2014).

O sinal a é aplicado sobre a carga, mas a carga enxerga o valor médio do sinal, mostrado pelo sinal b devido às suas características. Imagine agora que o “sinal a” mostrado na Figura 7 é aplicado a uma carga:

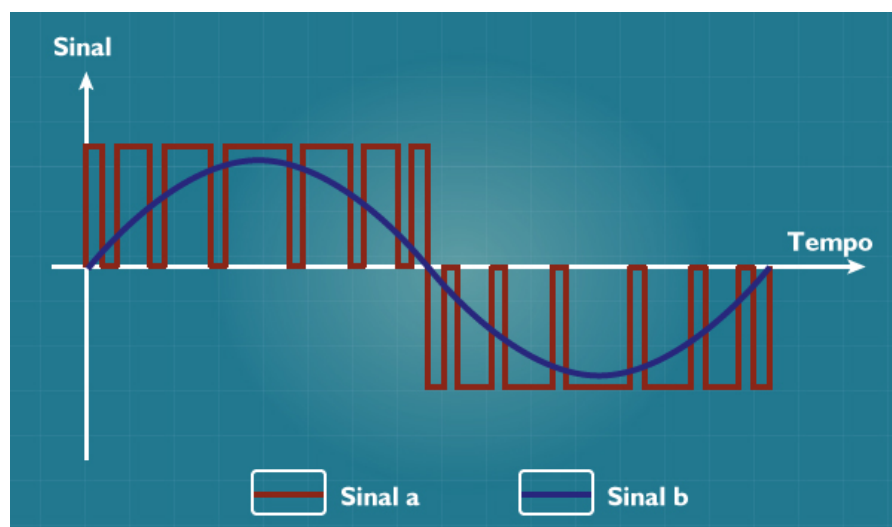


Figura 7 - Forma de onda modulada.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Como na Figura 6, a carga vê o valor médio ao longo do tempo, logo, se fizermos variar as larguras dos pulsos, faremos com que o valor médio sobre a carga também varie. Dependendo de como for essa variação, o sinal visto pela carga pode se aproximar, e muito, de um sinal senoidal. A compreensão desse princípio básico ajudará a entender o acionamento PWM que será visto mais adiante.

Atividade 04

1. Na modulação PWM, como a variação da largura do pulso vai transformar o sinal de saída de tensão do inversor em um sinal melhor para a carga? Por quê?

Inversores trifásicos

Os inversores trifásicos normalmente são utilizados em aplicações com potências mais elevadas. Existem duas formas básicas de montar um inversor trifásico, podemos usar três inversores monofásicos e controlar os três de tal forma que operem defasados de 120° ou usar uma topologia trifásica. É interessante usar os módulos monofásicos se estes já estiverem prontos ou disponíveis, mas, se for necessário montar um novo, é preferível a topologia trifásica, pois neles são usadas menos chaves, como pode ser observado comparando as Figuras 8 e 9.

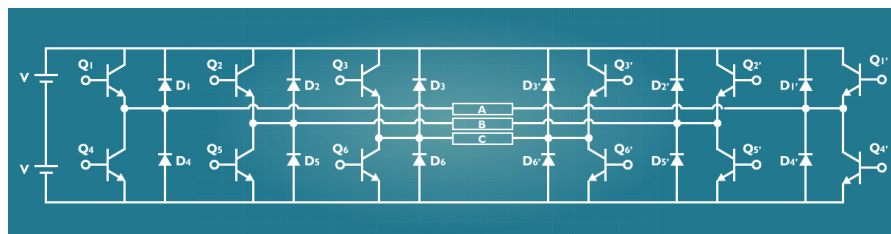


Figura 8 - Inversor trifásico composto de inversores monofásicos.
Fonte: Autoria Própria (2014).

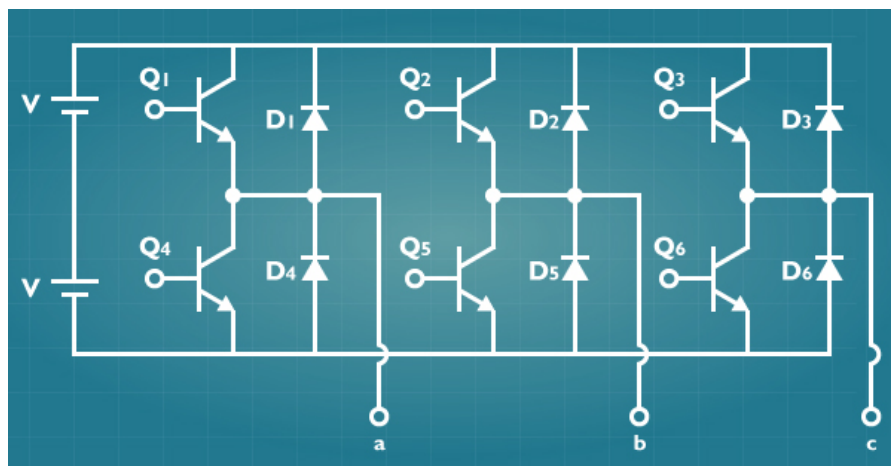


Figura 9 - Inversor trifásico.
Fonte: Autoria Própria (2014).

Na Figura 9, os terminais a, b e c são conectados à carga, que pode ser ligada em estrela ou triângulo. Uma proposta de funcionamento do inversor trifásico de 180° é mostrado na Figura 10, a forma de onda trifásica na saída está representada pelos sinais fase a, fase b e fase c.

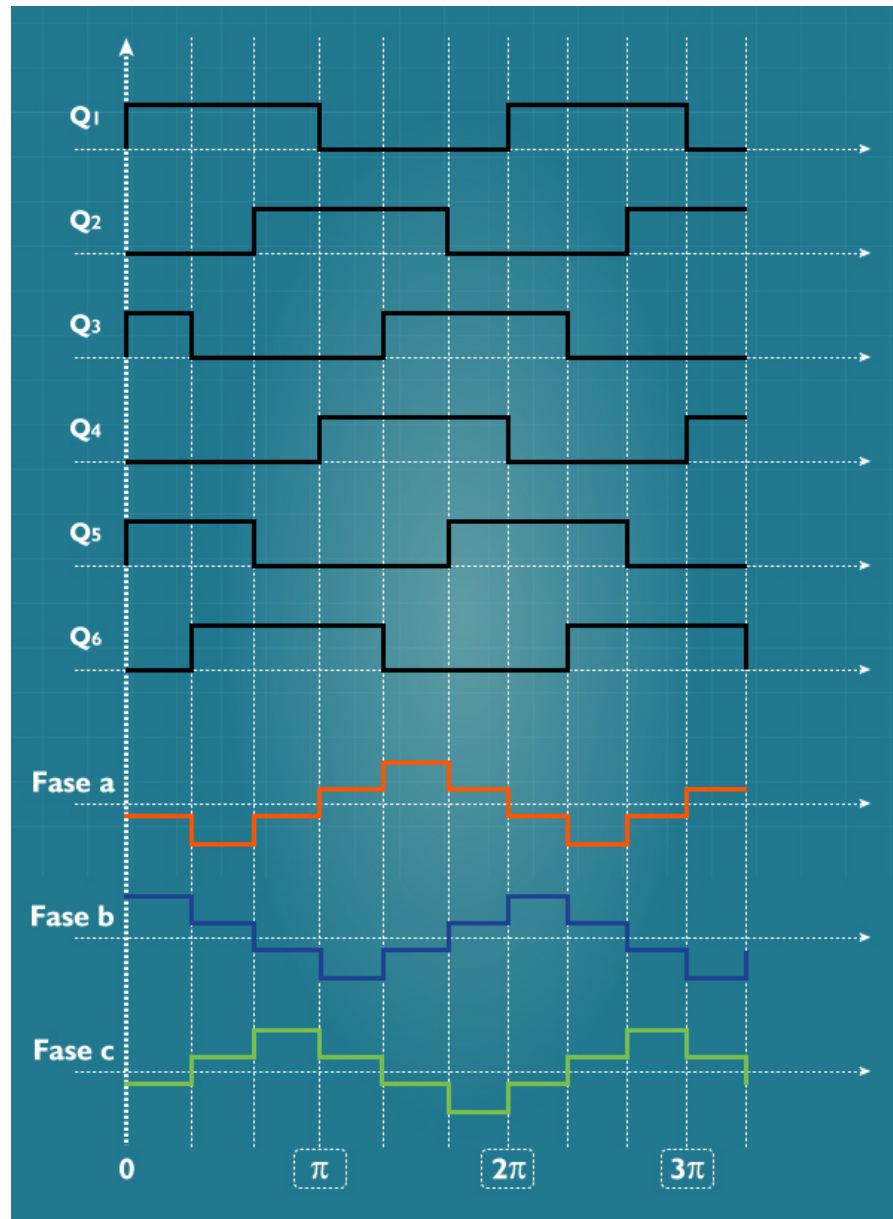


Figura 10 - Formas de onda do inversor trifásico.

Fonte: Autoria Própria (2014).

Os sinais indicados por Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 e Q_6 indicam os instantes em que as respectivas chaves estão fechadas (nível alto) e abertas (nível baixo). A composição das tensões sobre as chaves resulta em uma forma de onda nas fases a, b e c como mostrado na Figura 10. Note que o sinal se aproxima de um sinal senoidal. Normalmente, na saída do inversor existem filtros que melhoram ainda mais a qualidade do sinal de saída.

Existem diversas estratégias para sincronizar as chaves no intuito de obter o sinal senoidal trifásico na saída, essa indica a condução de cada chave por 180°, mas isso pode variar dependendo da estratégia e aplicação, o importante é que as chaves operem de forma sincronizada e dentro do projetado.

Leitura Complementar

POMÍLIO, J. A. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade Estadual de Campinas. 2013. Disponível em:
<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/introdu%e7%e3o.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2014.

Nessa leitura complementar, você vai ter acesso a mais informação sobre o funcionamento dos inversores. Verá uma descrição um pouco mais detalhada dos tipos de inversores e seu funcionamento, assim como das topologias e formas de onda.

VEÍCULOS Elétricos - Os Carros Verdes - Emissão "Zero" de Carbono - Tecnologias e Empreendimentos: blog. Freio Regenerativo (Sistema de Recuperação de Energia Cinética). 31 mar. 2013. Disponível em:
<<http://automoveiseletricos.blogspot.com.br/2013/03/freio-regenerativo-sistema-de.html>>. Acesso em: 26 jun. 2014.

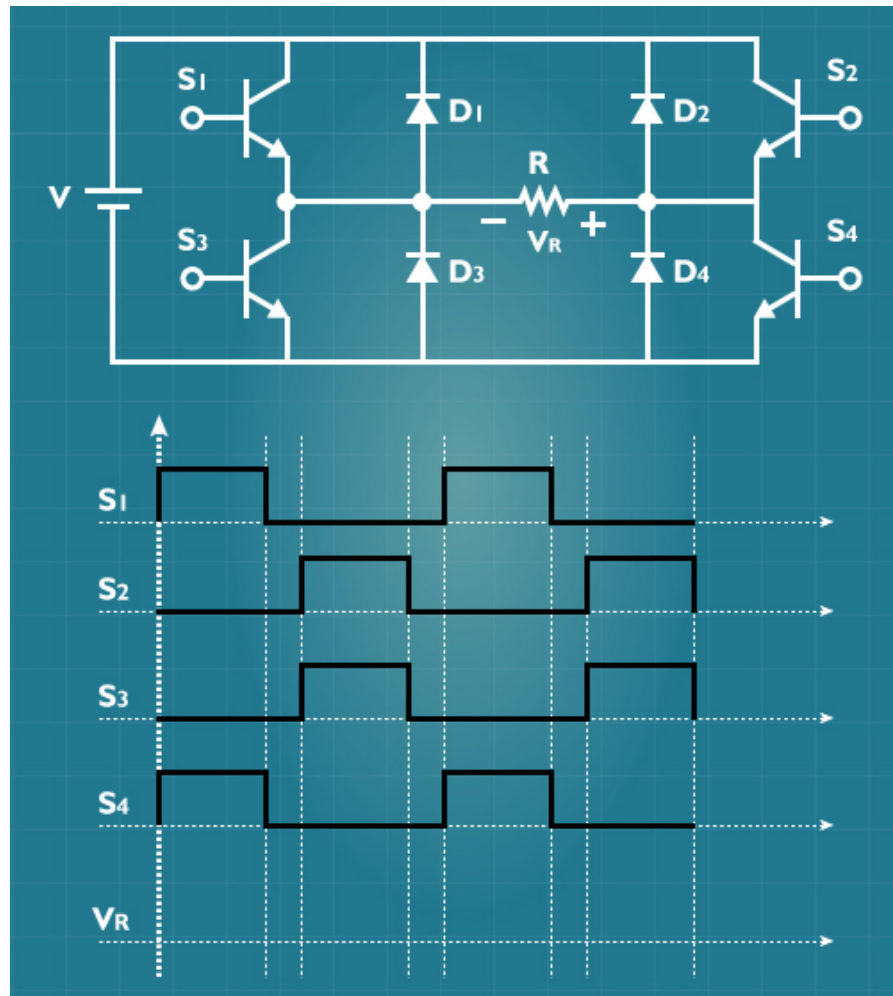
Essa outra sugestão de leitura complementar mostra uma aplicação prática do inversor e retificador, os circuitos são aplicados em um carro elétrico. O texto traz informação sobre um sistema de freio regenerativo que não precisa ser analisado para se entender a aplicação do inversor.

Resumo

Nesta aula, você teve a oportunidade de entender o porquê de se transformar tensão alternada em tensão contínua e então transformá-la novamente em tensão alternada, como também o papel do inversor dentro do processo de acionamento de motores elétricos. Viu ainda o princípio de funcionamento básico tanto do inversor monofásico como do trifásico, assim como os tipos de formas de onda resultantes.

Autoavaliação

1. O que é inversor de tensão?
2. Qual a diferença entre um inversor de tensão e um inversor de frequência?
3. O que determina se a saída de um circuito inversor é uma onda quadrada ou quase quadrada?
4. O sinal esperado na saída do circuito inversor para acionamento e controle de motores elétricos é um sinal senoidal, no entanto, o chaveamento pode apresentar alguns ruídos deixando o sinal “meio quadrado”. O que deve ser feito para “limpar” o sinal e deixar mais próximo a uma senoide?
5. Observando o circuito inversor e o tempo que cada chave permanece aberta ou fechada, mostrados na figura a seguir, mostre como é a forma de onda VR sobre o resistor R.
6. Por que o Ripple no retificador monofásico é diferente no trifásico quando consideramos tensões senoidais de mesma amplitude e frequência?



S_1 , S_2 , S_3 e S_4 são chaves que estão abertas quando representadas por um nível alto no gráfico e desligadas quando em nível baixo.

Referências

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência**. São Paulo: Makron, 1999.