UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Docente: Rildo Afonso de Almeida

Eletrônica de Potência

O Conversor CC-CA e as Técnicas de Comando das Chaves

O Conversor CC-CA

O processo de conversão de energia contínua (CC) para alternada (CA) é chamado de inversáo e os conversores eletrônicos que realizam essa função são conhecidos como inversores.

Os inversores podem ser classificados como inversores de tensão ou de corrente. O inversor de tensão (VSI - “Voltage Source inverter’) é alimentado por uma fonte de tensâo e os semicondutores sáo bidirecionais em corrente e unidirecionais em tensão. O inversor de corrente (CSI - “Current Source Inverter”) é alimentado por uma fonte de corrente e os semicondutores são bidirecionais em tensão e unidirecionais em corrente.

O Conversor CC-CA

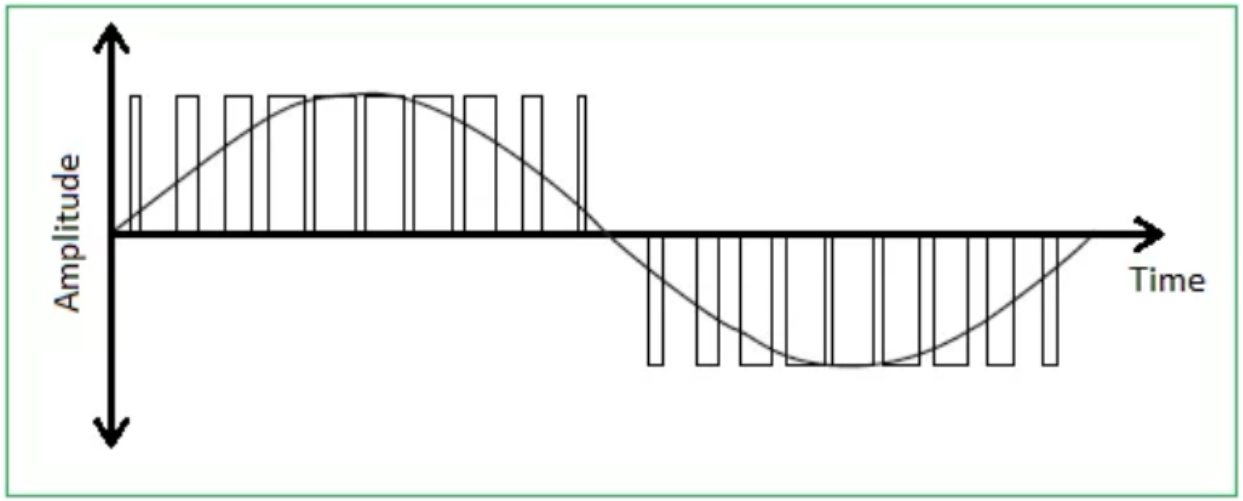
As fontes de tensão ou de corrente podem ser obtidas respectivamente, através do uso de retificadores com filtro capacitivo ou indutivo no barramento CC.

Os inversores de tensão são os mais utilizados devido ao baixo custo do filtro capacitivo com relação ao indutivo.

As técnicas de controle que compõem o inversor monofásico constituem uma etapa muito importante no projeto do conversor e consistem em gerar uma tensão de saída v para a carga, tão próxima quanto possível do sinal de referência.

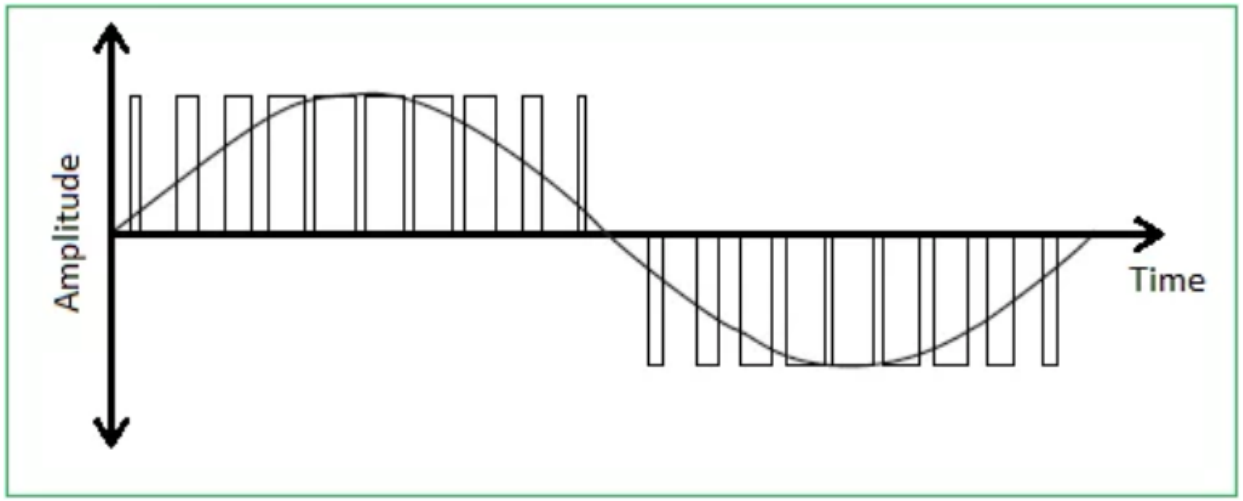
O Conversor CC-CA

A técnica de modulação por largura de pulsos (PWM - “Pulse-Width Modulation”) é uma parte importante destas técnicas de controle. Existem várias variantes dessa técnica de modulação, sendo que, para inversores, a técnica PWM senoidal é a mais utilizada e será discutida com maiores detalhes.



O Conversor CC-CA

Os pulsos de maior largura são gerados onde houver necessidade de maior amplitude. Se pegar todas as tensões médias de cada pulso, o sinal resultante será semelhante a uma senoide. Quanto maior a frequência do sinal PWM, maior a semelhança com a onda senoidal.



O Conversor CC-CA

Há outras técnicas de comando que podem ser também empregadas.

Dentre elas, podem-se citar :

- chaveamento em onda quadrada,
- chaveamento por eliminação programada de harmônicos,
- técnicas de controle por histerese da corrente

O Conversor CC-CA

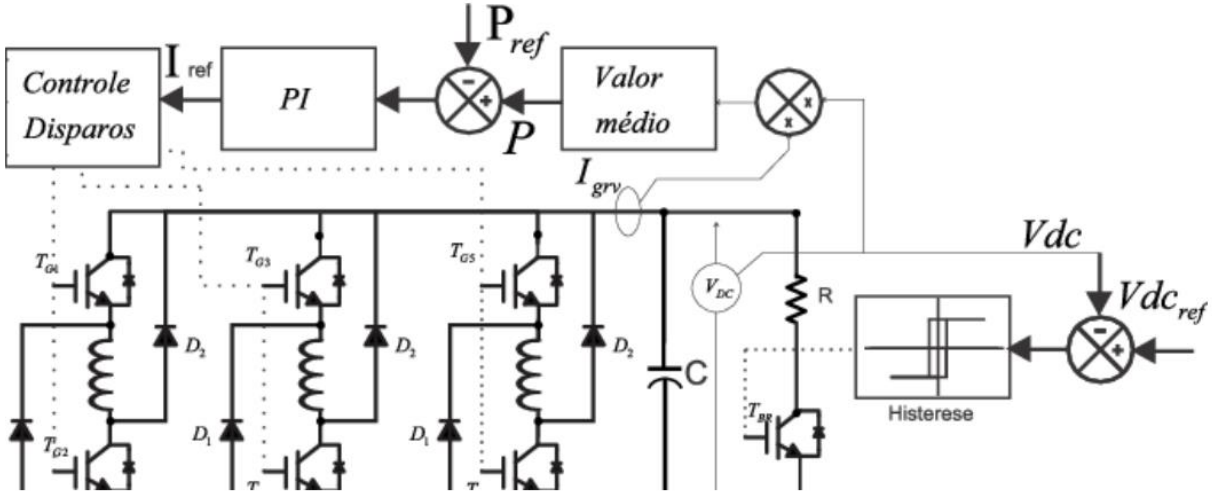
A técnica de comando por chaveamento em onda quadrada apresenta harmônicos de baixa ordem na tensáo de saída, penalizando o dimensionamento do filtro de saída. Esta técnica era muito empregada com inversores tiristorizados, e atualmente, com o advento de transistores IGBT e MOSFET capazes de comutar em freqüências mais elevadas, praticamente foi abandonada.

O Conversor CC-CA

A técnica de chaveamento por eliminaçâo programada de harmônicos, com o aparecimento de microcontroladores e processadores digitais de sinais (DSP's), foi também abandonada. Nesta técnica, os instantes de comutação dos semicondutores, após terem sido previamente calculados, são armazenados em memória (EPROM, por exemplo), em função do valor da tensáo de saída desejada.

O Conversor CC-CA

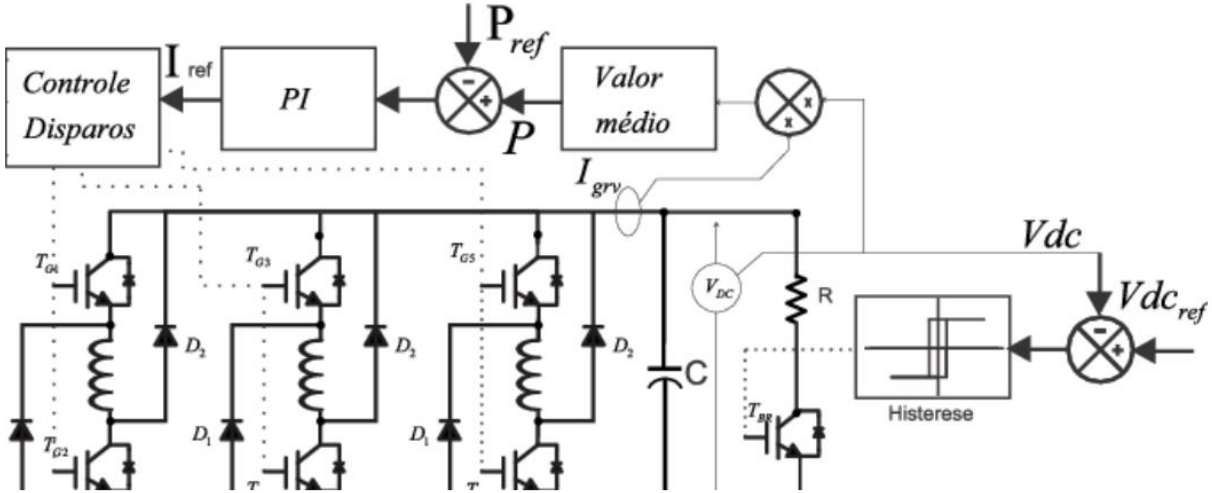
As técnicas de controle por histerese da corrente sáo utilizadas em aplicações onde se deseja controlar a corrente de saída, mesmo quando da utilização de inversores de tensão. É uma técnica difundida, simples e bastante empregada em conversores estáticos, mesmo porque a corrente a ser controlada pode regular a tensão de saída.



Estrutura de controle de corrente por histerese.

O Conversor CC-CA

Tem como vantagens a simplicidade e facilidade de implementação, alta estabilidade, maior robustez e facilidade de limitação de corrente. Ouando se trabalha com uma histerese fixa, a desvantagem reside no fato de que a freqüência de comutação das chaves não é constante.



Estrutura de controle de corrente por histerese.

O Conversor CC-CA

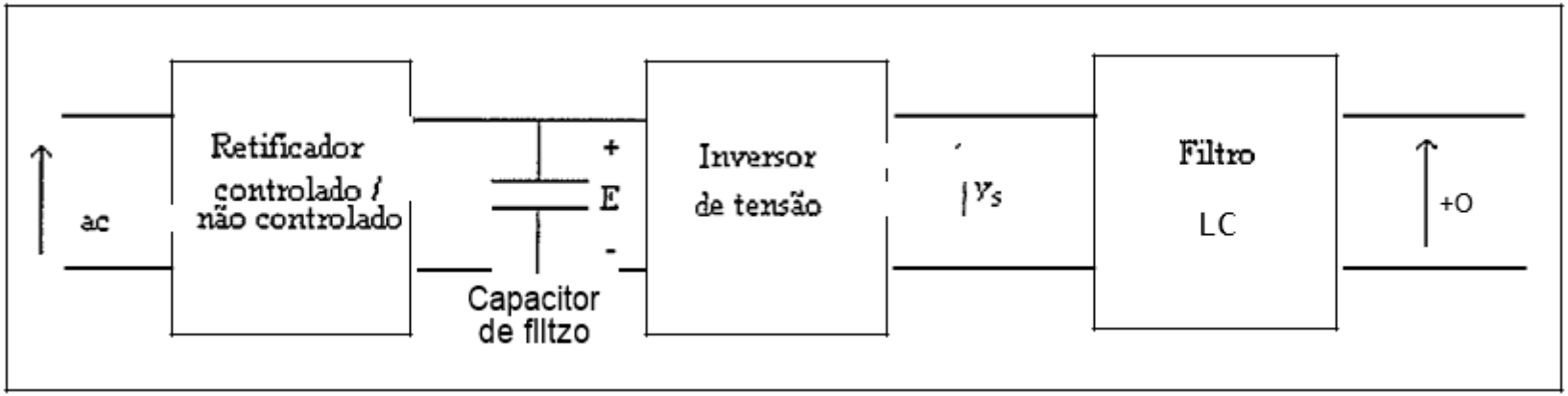
O Inversor Monofásico de Tensão

Inversores são conversores CC-CA usados principalmente em acionamentos elétricos e sistemas de energia ininterrupta com o objetivo de produzir uma saída de tensão alternada senoidal, cuja amplitude e freqüência possam ser controladas.

O Conversor CC-CA

O Inversor Monofásico de Tensão

A estrutura básica de um sistema de condicionamento de energia elétrica, baseado em inversores de tensão é representada pelo diagrama de blocos da figura abaixo.



O Conversor CC-CA

O Inversor Monofásico de Tensão

A tensão contínua de entrada E pode ser obtida através de um banco de baterias (dependendo do nível de potência requerida). No entanto, na maioria das vezes, essa tensáo é obtida retificando e filtrando a tensão da rede. A filtragem é feita com capacitor eletrolítico, geralmente de grande valor a fim de se obter um menor "ripple" na tensão de alimentação, sendo um componente de tamanho e de custo apreciável, além de apresentar uma limitação à máxima corrente eficaz admissível de "ripple".

O Conversor CC-CA

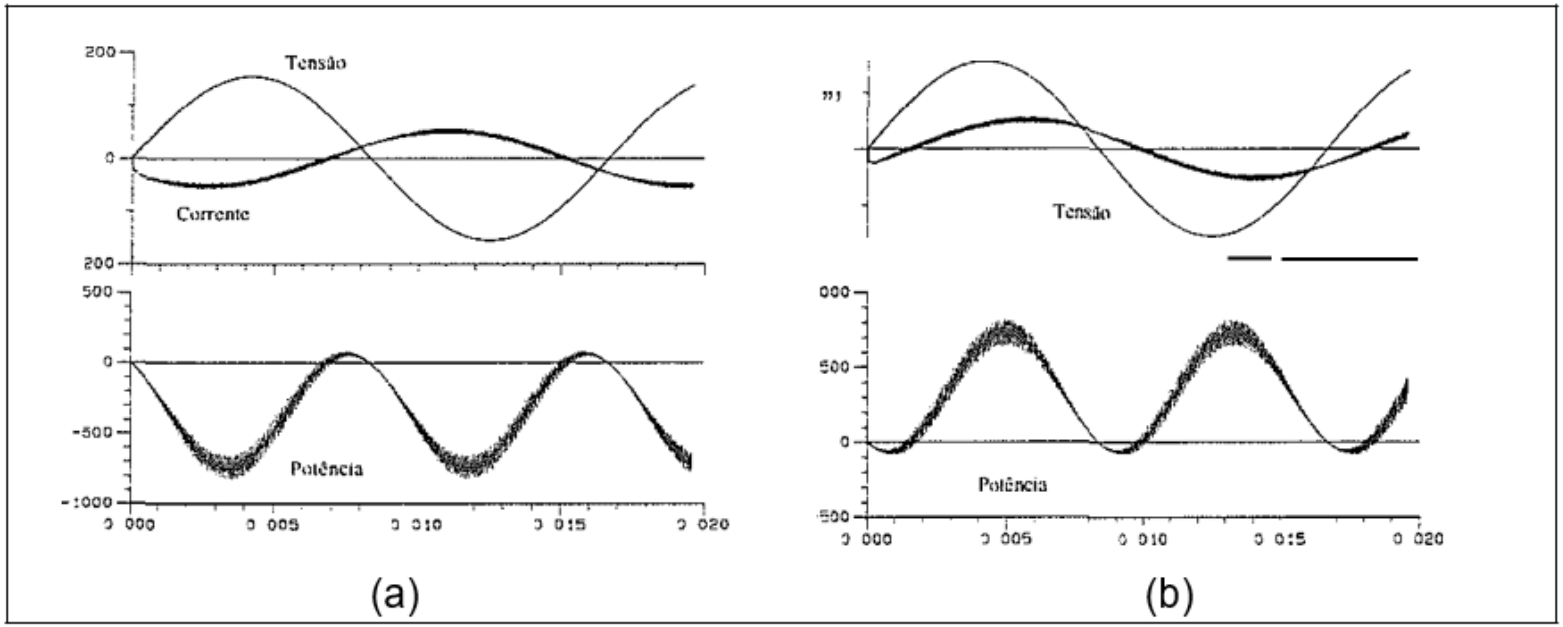
O Inversor Monofásico de Tensão

O inversor é um conversor reversível, ou seja, a energia pode fluir tanto do lado contínuo para o alternado, quanto no sentido contrário. Em um sistema de energia ininterrupta, pode-se utilizar o conversor para recarregar as baterias ou alimentar a carga dependendo da presença ou ausência da tensão da rede alternada.

O Conversor CC-CA

O Inversor Monofásico de Tensão

A figura (a) mostra uma situação na qual o defasamento entre a tensão e a corrente na rede são tais que flui energia do lado alternado para o lado contínuo enquanto que na figura (b) é mostrada a situação inversa.

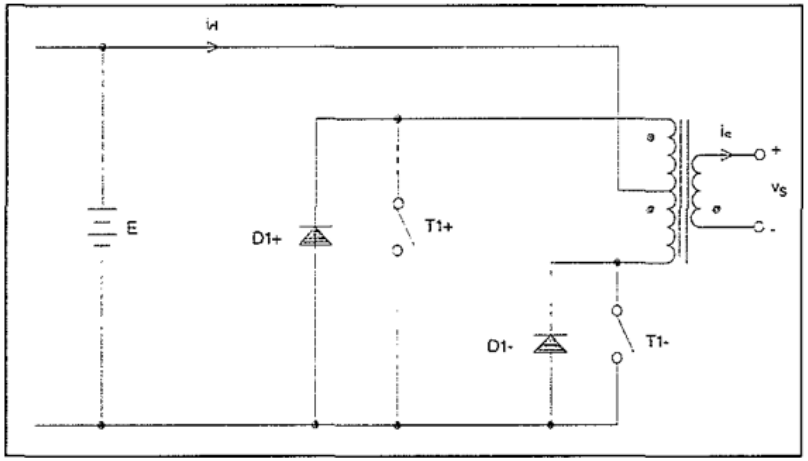


O Conversor CC-CA

Topologias de Inversores Comumente Empregadas

As estruturas tradicionalmente utilizadas em conversores CC-CA sáo o inversor “push-pull” e a ponte completa. O inversor em meia ponte somente é utilizado em aplicações de baixa potência, até 5OOW.

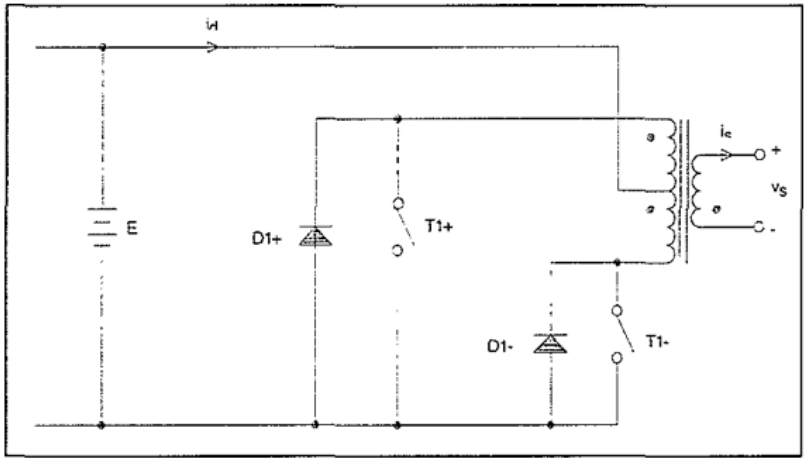
O conversor “Push-Pull” é apresentado na figura abaixo. A principal vantagem deste conversor é o isolamento elétrico proporcionado pelo transformador.



O Conversor CC-CA

Topologias de Inversores Comumente Empregadas

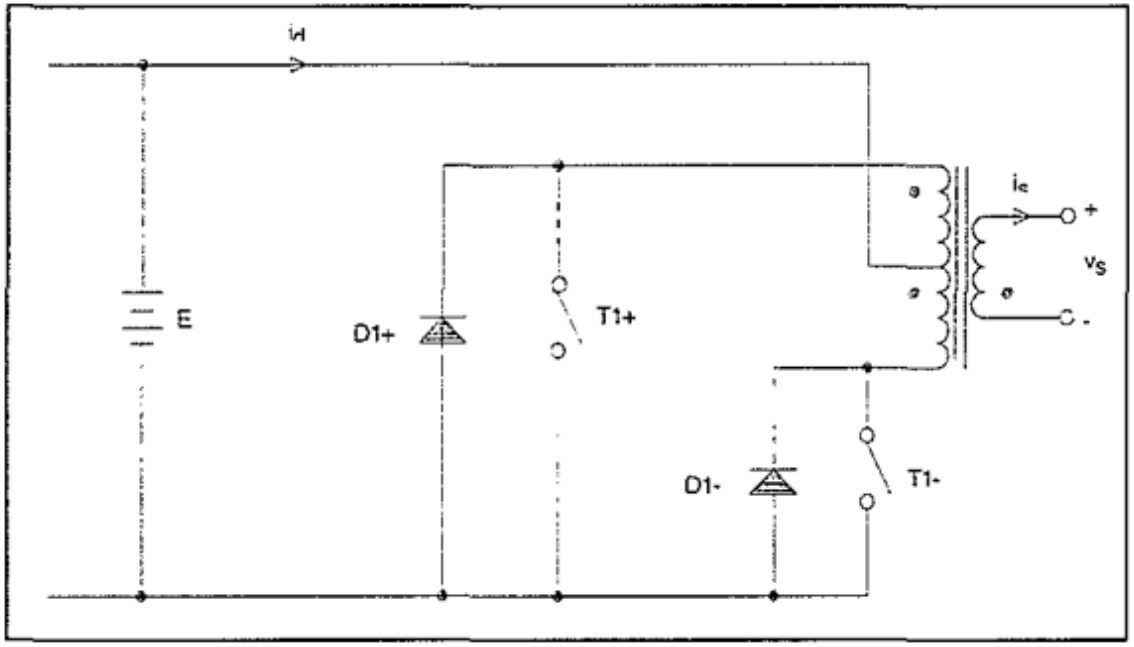
A tensão presente nos semicondutores durante o estado de bloqueio é o dobro da tensão de alimentação, E, motivo pelo qual o principal campo de aplicação desta estrutura são Sistemas de Energia Ininterrupta (UPS) de baixa potência, onde em geral a tensão das baterias é baixa, necessitando o uso de um transformador para adaptar a tensão de saída à carga.



O Conversor CC-CA

Topologias de Inversores Comumente Empregadas

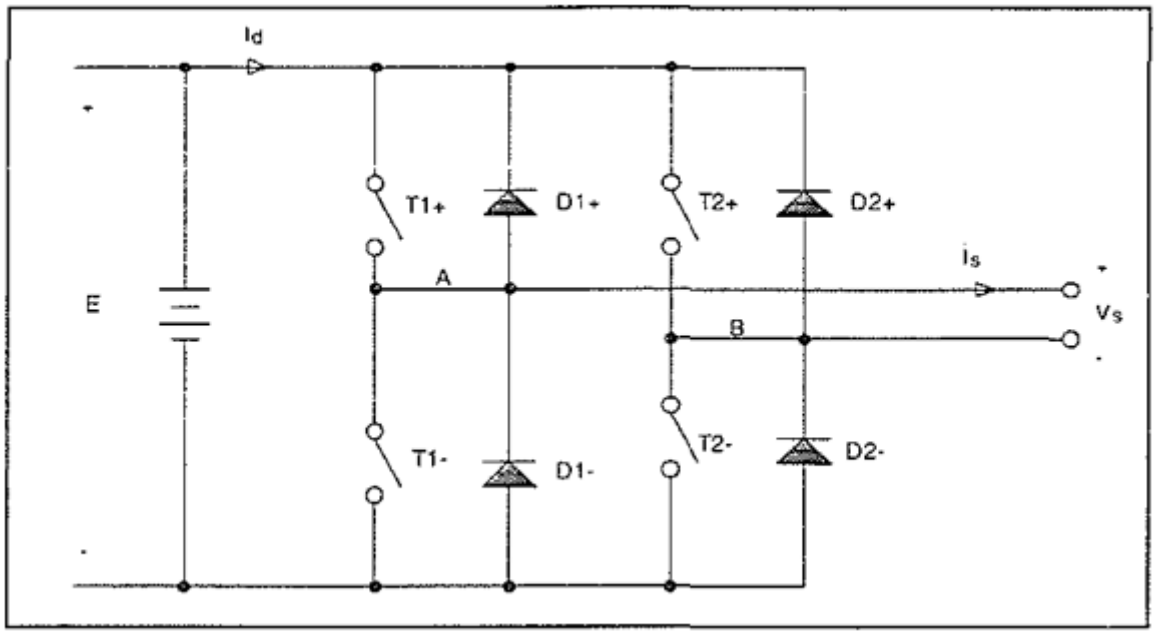
O indutor do filtro LC de saída pode ser o indutor de dispersão do transformador.



O Conversor CC-CA

Topologias de Inversores Comumente Empregadas

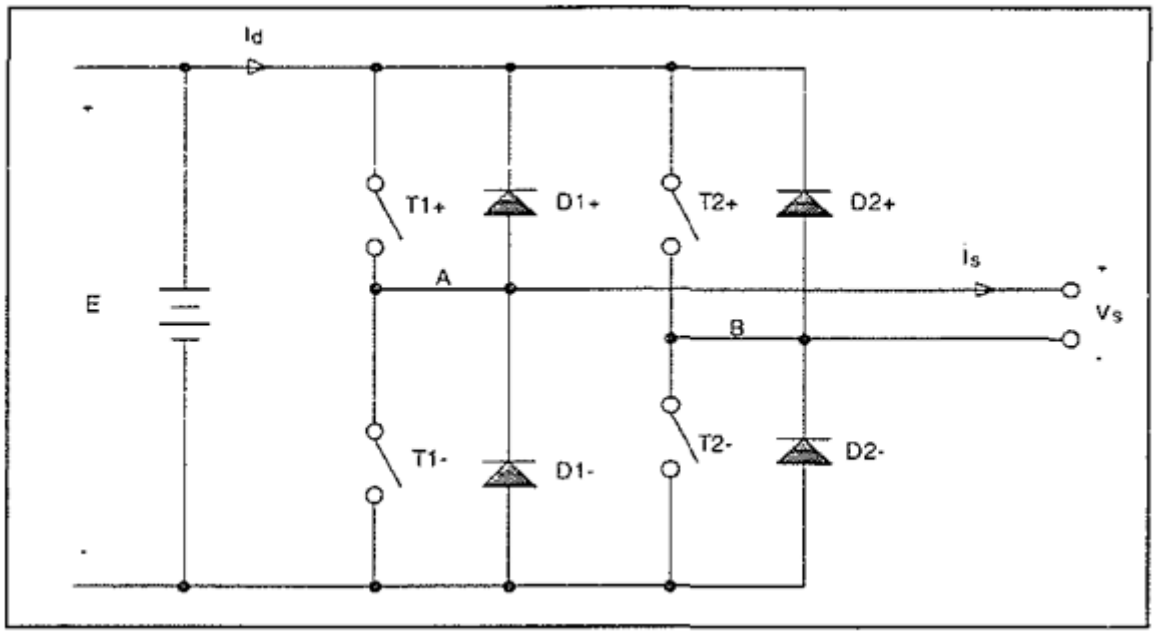
A topologia mais comumente empregada é a da ponte completa como apresentada na figura abaixo onde a tensão máxima sobre cada semicondutor é igual à tensão de entrada E.



O Conversor CC-CA

Topologias de Inversores Comumente Empregadas

A topologia mais comumente empregada é a da ponte completa como apresentada na figura abaixo onde a tensão máxima sobre cada semicondutor é igual à tensão de entrada E.



O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

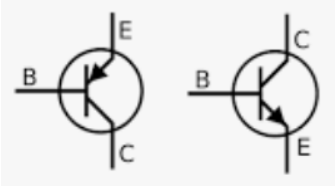
Até meados da década de 80, os tiristores eram os dispositivos mais comumente empregados, sobretudo quando se tratava de altos níveis de potência. No entanto, os tiristores apresentavam como inconvenientes o fato de que o bloqueio necessitava de circuitos de comutação forçada e a baixa freqüência de comutação admissível pelo tiristor (em torno de 1kHz), fatores estes que elevavam o custo do conversor. No entanto, es tiristores apresentam uma importante vantagem que é a capacidade de suportar substanciais correntes de falta por um breve período, até a atuação da proteção (em geral um fusível).

O Conversor CC-CA

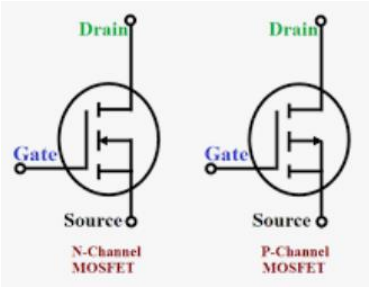
Dispositivos Empregados como Chaves

Com o avanço da Eletrônica de Potência, diversos outros dispositivos substituíram os tiristores em conversores do tipo inversor. São eles :

- Transistor de Juncâo Bipolar (BJT - Bipolar Junction Transistor)



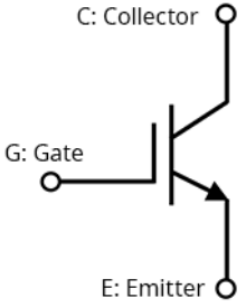
- Transistor MOS de Efeito de Campo (MOSFET-MOS Field Efect Transistor)



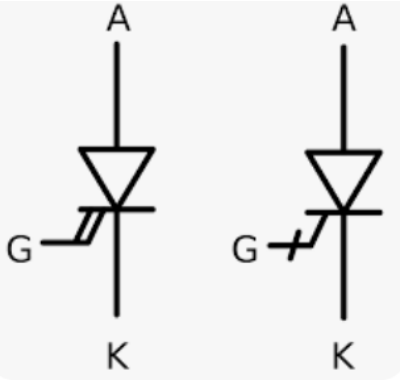
O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

- Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)



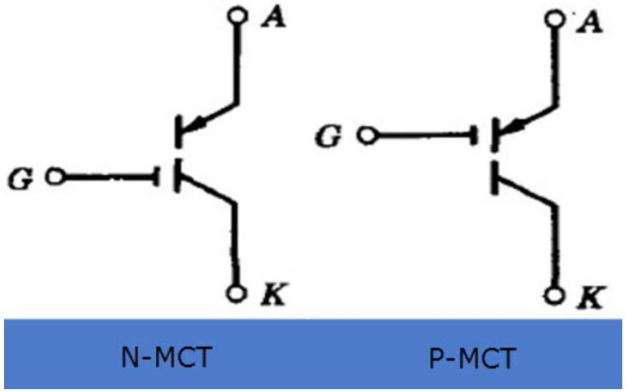
- Gate Turn-Off Thyristor (GTO)



O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

- MOS Controlled Thysristor (MCT)



O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

Os transistores bipolares foram a opção natural para os conversores, a partir de meados dos anos 80, tendo praticamente substitu ido os tiristores em conversores CC-CA. Atualmente os transistores bipolares sáo disponíveis em níveis de tensão de até 1000V e várias centenas de amperes e podem comutar em freqüências da ordem de poucos kHz.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

As desvantagens do transistor bipolar são a corrente de base elevada para garantir o seu estado de condução, o que torna o circuito de comando de base complexo e de elevado custo; a freqüência de chaveamento relativamente baixa (entre 1 e 5 kHz); a limitação da área de segurança do dispositivo, devido ao efeito de segunda avalanche. A principal vantagem deste dispositivo reside no fato de que a queda de tensão VcE(sat) nos seus terminais, quando o mesmo se encontra em condução, é de usualmente 1 a 2V, o que faz com que as perdas de condução sejam relativamente pequenas.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

Os MOSFET's são dispositivos capazes de comutar em freqüências da ordem de centenas de kHz. A condução da corrente nestes componentes se faz por um canal onde a resistência passante (resistência do canal em condução), RDS_{on} é Controlada pela tensão entre os terminais porta (gate) e fonte (source), V_{GS} e é uma função da tensáo máxima (V_{DS}) admissível que o dispositivo pode suportar. Ouanto maior for a tensão V_{GS}, maior será a resistência passante do canal, aumentando as perdas em condução.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

Ao contrário do BJT, o comando do transistor MOSFET se faz pela aplicação de uma tensão entre o gate-source (V_{GS}) e a corrente demandada é mínima, o que reduz o custo do circuito de comando. Os transistores MOSFET's possuem um diodo intrínseco entre os terminais dreno (drain) e fonte (source), mas este diodo apresenta características de tempos de recuperação reversa muito elevados e incompatíveis com as freqüências de comutação de um transistor MOSFET. Ao contrário dos transistores bipolares, os MOSFET's não sofrem o risco da segunda avalanche.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

Os transistores IGBT’s combinam as melhores características dos BJT’s e dos MOSFET's em um único dispositivo (o circuito equivalente do IGBT consiste de um transistor PNP drenado por um MOSFET de baixa tensão em uma configuraçáo pseudo-Darlington). O IGBT é comandado do mesmo modo que o MOSFET e se faz pela aplicacão de uma tensáo entre os terminais porta(gate) e emissor (VGE), reduzindo o custo do circuito de comando. Os IGBT’s possuem uma queda de tensáo no estado condutor menor que a dos transistores MOSFET, mas maior que a dos transistores bipolares.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

Como os transistores MOSFET's, eles não apresentam problemas de segunda avalanche. Atualmente é possível encontrar no mercado IGBT's de 1700V/600A. A principal desvantagem é que no bloqueio apresentam uma cauda de corrente ("tail"). Durante o bloqueio, a corrente de coletor decresce bruscamente, e depois mais lentamente devido a elevada densidade de portadores minoritários injetados na região N- do transistor. O único modo de eliminar estes portadores excedentes é através da recombinaçáo dentro do IGBT, que é um processo lento acarretando um maior tempo de bloqueio e consequentemente maiores perdas de comutação.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

Para os mesmos níveis de tensão e corrente, os IGBT's usam menos silício que os demais: 5 vezes menos que os BJT’s e 10 vezes menos que os MOSFET’s. Em função disto, prevê-se que o uso do IGBT será largamente difundido em conversores de média potência e média freqüência em detrimento dos transistores bipolares.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

Os GTO's sáo dispositivos que combinam características dos transistores bipolares e dos tiristores. Como os tiristores, são capazes de suportar tensões e correntes elevadas, atualmente da ordem de 5kV/3kA e podem ser protegidos contra sobrecorrente ou curto circuito por fusível. Como os transistores bipolares é necessário a aplicação de uma corrente direta no gatilho para mantê-lo em condução e uma corrente reversa para bloqueá-lo, tornando o circuito de comando mais complexo e caro. A freqüência de comutação é baixa, da ordem de 1kHz. Os GTO’s são dispositivos mais adequados para conversores de média e alta tensáo e potência elevada.

O Conversor CC-CA

Dispositivos Empregados como Chaves

O MCT é' um dispositivo novo e com futuro promissor. Apresenta uma queda de tensão em condução menor do que a de um IGBT e deverá no futuro suplantar o IGBT.

O Conversor CC-CA

Comparação dos Dispositivos Controláveis

Somente algumas poucas considerações definitivas podem ser feitas na comparação dos dispositivos citados, uma vez que um número de características dos mesmos devem ser consideradas simultaneamente e porque a evolução destes dispositivos se dá em um ritmo elevado. No entanto, algumas considerações qualitativas podem ser destacadas na tabela abaixo.

Dispositivo	*Capacidade de Potência*	*Velocidade de Chaveamento*
BJT	*média*	*média*
MOSFET	*baixa*	a/fa
GDO *e Tiristor*	*alta*	*baixa*
IGBT	*média*	*média*

Bibliografia Básica

1 - LANDER, C. W. Eletrônica Industrial – Teoria e Aplicações. São Paulo: McGraw Hill,1988.
2 - RASHID, M. H. Eletrônica de Potência – Circuitos, dispositivos e aplicações. Makron Books, 1999.
3 - RASHID, M. H. Eletrônica de Potência. Pearson, 1999.

Bibliografia Complementar

1 - BARBI, I. Eletrônica de Potência. 2. ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Série Didática, 2000.
2 - AHMED, A. Eletrônica de Potência. Pearson, 2000.
3 - GIMENEZ, S. P.; ARRABAÇA, D. A. Eletrônica de Potência. Conversores de Energia CA/CC. Teoria, Prática e Simulação. Érica/ Saraiva, 2015.
4 - HART, D. W. Eletrônica de Potência - Análise e Projetos de Circuitos. Mc Graw Hill. Amgh Editora.
5 - ERICSON, R. W.; MAKSIMOVIC, Dragan. Fundamentals of Power Electronics. 2nd Edition, eBook
6 - BARBI, I. Eletrônica de Potência. 2. ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Série Didática, 2000.