

Atuadores

Aula 06 - Acionamento Eletr nico de Motores Elétricos

Apresentação

Nesta aula, aprenderemos de que maneira podemos controlar os motores por meio de dispositivos eletrônicos chamados choppers, que utilizam componentes eletrônicos e atuam como chaves. Também são apresentados os modos de controle de motores em malha fechada ou realimentação para que se garanta a estabilidade de velocidade.

Objetivos

- Conhecer os conversores usados no controle de velocidade de motores.
- Apresentar os modos de controle com realimentação.
- Descobrir os sensores de velocidade utilizados no controle de velocidade de motores.

Preâmbulo

As configurações das máquinas elétricas básicas (corrente contínua – cc, indução e síncrona) têm permanecidas inalteradas durante as últimas décadas passadas e, muito provavelmente, permanecerão por muitos anos no futuro. No entanto, as técnicas de controle dessas máquinas têm sofrido mudanças significativas. Por exemplo, os motores de cc série são usados para propulsão de trens de metrô e a velocidade desses veículos tem sido controlada durante muitos anos pela inserção de resistências em série com motores cc, conforme **Figura 1a**.

Recentemente, conversores tipo choppers que utilizam componentes de estado sólido (que podem converter uma voltagem contínua constante em uma voltagem variável) têm sido usados para esse propósito como mostra a **Figura 1b**. O controle por estado sólido provê controle suave e com alta eficiência. Outras máquinas elétricas também podem ser controladas através de conversores apropriados. Nesses conversores são usados dispositivos semicondutores de alta potência em função de chaves que ligam e desligam (*on-off*) em altas frequência.

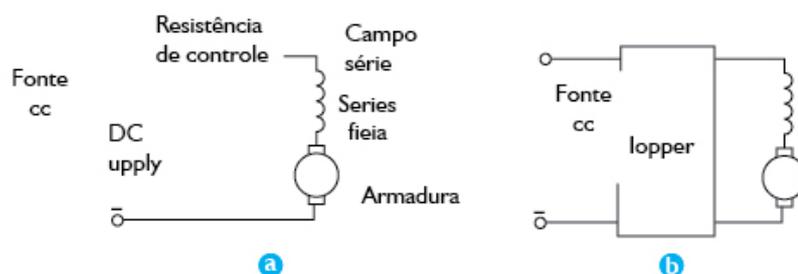


Figura 1 - Controle de velocidade de motores cc série. (a) Com resistência de controle. (b) controle via chopper.

Fonte: Rashid (1999).

Os vários tipos de conversores que são frequentemente usados para o controle de máquinas elétricas estão listados a seguir:

Controladores de voltagem alternada – ca (ca para ca) – converte uma voltagem constante ca em uma voltagem variável também ca. Podem ser usados para controlar a velocidade de um motor de indução (método de

controle por voltagem) e para partida suave (*soft-starter*) de motores de indução.

Retificador controlado (ca para cc) – converte uma voltagem ca constante em uma voltagem variável cc. É usado principalmente para controlar a velocidade de motores cc como os usados em laminadores.

Chopper (cc para cc) – converte uma voltagem cc constante em uma voltagem cc variável. É usado principalmente no controle de velocidade de motores cc.

Inversor (cc para ca) – converte uma voltagem cc constante (ou variável) em uma voltagem ca com frequência variável. Pode ser usado para controlar a velocidade de motores ca.

Cicloconversores (ca para ca) – converte uma voltagem ca constante e de frequência também constante em voltagem e frequência (menor) ca variáveis. Pode ser usado para controlar a velocidade de motores ca.

Noções Fundamentais sobre modulação por largura de pulsos – PWM

Os conversores de eletrônica de potência operam com dispositivos semicondutores nos estados de saturação ou bloqueio. Esses circuitos são propriamente chamados de circuitos chaveados e pela natureza da sua operação introduzem harmônicos na geração de sinais contínuos ou alternados.

Os inversores, necessários no acionamento de máquinas de corrente alternada, produzem sinais de amplitude e frequência variáveis a partir de fontes cc. Isto é possível com o emprego da chamada modulação por largura de pulsos PWM (*Pulse Width Modulation*). Para produzir uma tensão de saída senoidal com determinada amplitude e frequência, um sinal senoidal de controle (v_s) é comparado com uma onda triangular (v_t), conforme mostrado na **Figura 2(a)**. A frequência da onda triangular, chamada de onda portadora, determina a frequência de chaveamento.

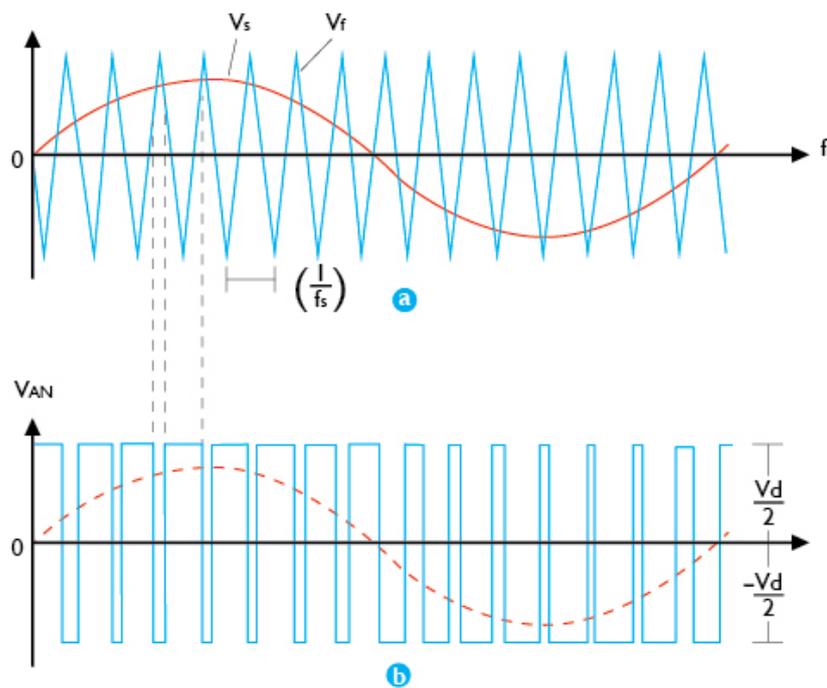


Figura 2 - Geração de um sinal PWM a partir de uma referência senoidal e de uma onda portadora triangular (PWM seno-triângulo).

Fonte: Stephan (2013).

A geração de um sinal chaveado com predominância de uma componente de primeiro harmônico de frequência f_1 e amplitude V_1 pode ser obtida a partir de uma tensão contínua V_d aplicando a seguinte lógica de operação ao circuito da **Figura 3**:

$$v_s > v_t, T_A T + \text{fechada}, T_A - \text{aberta} \rightarrow V_{AN} = V_d/2$$

$$v_s < v_t, T_A T - \text{fechada}, T_A + \text{aberta} \rightarrow V_{AN} = -V_d/2$$

As chaves $T_A +$ e $T_A -$ são complementares e não podem estar simultaneamente fechadas, pois levariam a um curto circuito da fonte de alimentação.

O resultado dessa operação está indicado na **Figura 2(b)**. Em tracejado está indicada a componente fundamental ou de primeiro harmônico.

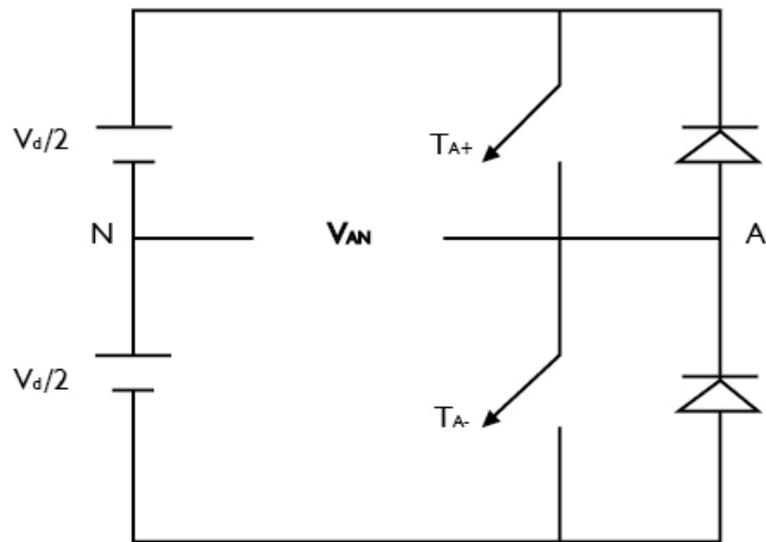


Figura 3 - Circuito de potência cc-ca.
Fonte: Autoria Própria.

Se f_t e V_t são a frequência e a amplitude da onda triangular portadora e se f_1 e V_1 são a frequência e a amplitude da onda de referência, define-se:

razão de modulação de amplitude, $m_a = V_1/V_t$;
 razão de modulação de frequência, $m_f = f_t/f_1$.

A amplitude da componente fundamental é proporcional à m_a , para $m_a < 1$ e com $m_f \gg 1$.

O PWM seno-triângulo apresentado é um dos mais empregados, no entanto, existem vários outros tipos de PWM.

Topologias de Conversores Eletrônicos para Acionamento de Motores Elétricos

Motores cc. A alimentação de motores cc com velocidade controlada é feita normalmente através de dois tipos de conversores eletrônicos:

- Retificador (conversor ca - cc) a tiristores.

- Chopper (conversor cc - cc), caso se disponha de uma fonte cc. Esta fonte cc pode ser, por exemplo, a saída de uma ponte retificadora a diodos ou uma bateria, como no caso dos carros elétricos.

Motores ca. Para a alimentação de motores ca, a gama de possibilidade é bem maior. Basicamente, os tipos disponíveis no mercado podem ser classificados em dois grandes grupos, que admitem várias subdivisões, como indicado a seguir:

a) Topologias com Malha Intermediária. Esta topologia é subdividida em:

a.1. VSI (*Voltage Source Inverter*) aqui a malha intermediária funciona como uma fonte de tensão. O sinal alternado oriundo da rede de alimentação (a 60Hz ou 50Hz) é retificado para se obter uma fonte de tensão cc, o que se consegue com o auxílio de um capacitor. Por sua vez, os inversores VSI podem ser classificados em PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) ou PWM (*Pulse Width Modulation*).

A **Figura 4** mostra alguns tipos de inversores.

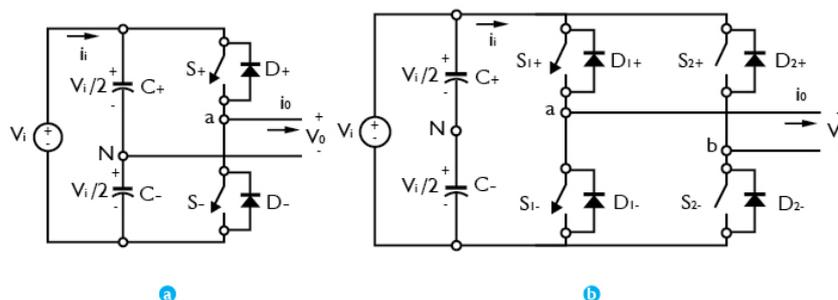


Figura 4 - Inversores monofásicos de (a) meia ponte e (b) ponte completa.
Fonte: Sem (1997).

a.1.1. Nos inversores VSI-PAM, o retificador de entrada é constituído normalmente de uma ponte de tiristores, como na **Figura 5**, que permite alterar a amplitude da tensão da malha intermediária. O inversor só é responsável pelo estabelecimento da frequência do sinal de saída.

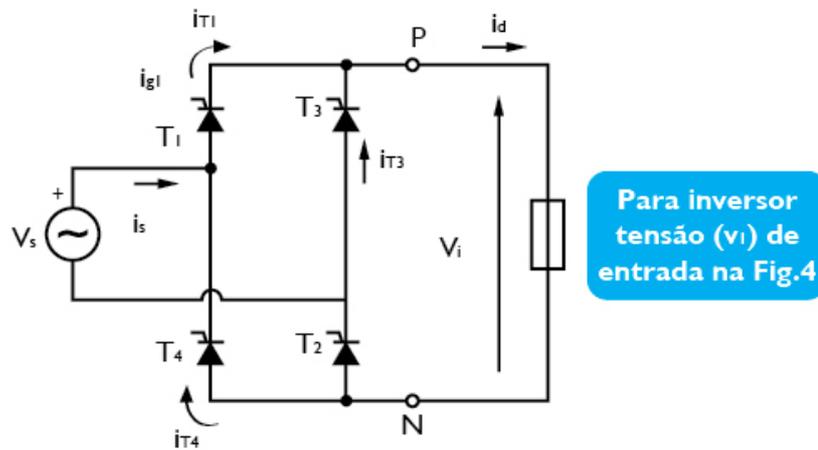


Figura 5 - Retificador em ponte de tiristores (controlado).
Fonte: Sem (1997).

a.1.2. Nos inversores VSI-PWM, o retificador de entrada é normalmente uma ponte a diodos, conforme **Figura 6**. Neste caso, o inversor fica responsável pelo controle da amplitude e da frequência do sinal alternado de saída. Isto é possível graças ao chaveamento tipo PWM.

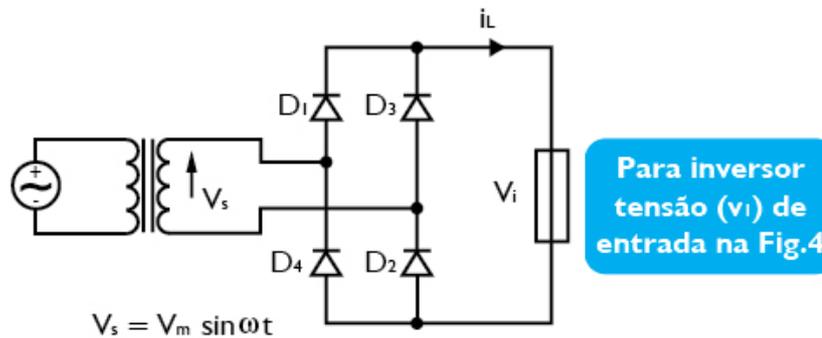


Figura 6 - Retificador em ponte a diodos (não-controlado).
Fonte: Sem (1997).

a.1.3. Os inversores CR-VSI-PWM são inversores VSI-PWM com uma malha de controle de corrente, como apresentado na Figura 7. Trata-se do conversor indicado para aplicações de elevado desempenho dinâmico, como no caso de servo-acionamentos, onde o controle preciso do torque revela-se da maior importância.

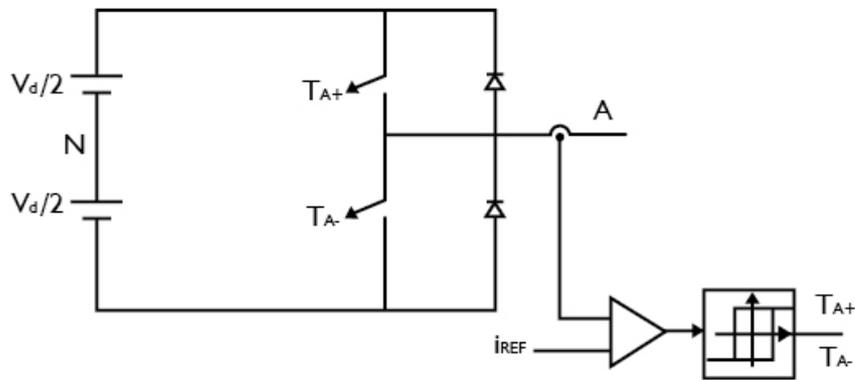


Figura 7 - Inversor CR-VSI-PWM.

Fonte: Autoria Própria.

Os dispositivos semicondutores usados nos inversores VSI apresentam comando das condições de condução e bloqueio como IGBT's, GTO's e MOSFET's.

a.2. CSI (Current Source Inverter) aqui a malha intermediária faz o papel de uma fonte de corrente. O sinal da rede elétrica (a 60Hz ou 50Hz) é retificado para se obter uma fonte de corrente com o auxílio de um indutor. Os inversores CSI operam normalmente com uma ponte retificadora a tiristores na entrada.

O inversor pode ser de comutação forçada, como no caso dos motores de indução, ou de comutação natural pelas características da carga (*LCI-Load Comutated Inverter*), como no caso das máquinas síncronas (funcionamento semelhante ao que ocorre nos inversores da transmissão cc de Itaipu).

Os dispositivos semicondutores normalmente usados são tiristores e esses conversores ocupam faixas de potência elevadas. No caso de comutação forçada, pode-se empregar GTO's ou circuitos auxiliares para comutação forçada. O chamado *ASCI (Auto-Sequential-Commutated Inverter)* é um circuito que utilizando diodos e capacitores e aproveitando-se das características indutivas da carga permite uma comutação forçada por tiristores de forma bastante elegante.

b) Topologias de conversão direta (sem malha intermediária). Aqui o exemplo mais empregado industrialmente é o Cicloconversor, cuja estrutura é constituída de duas pontes retificadoras a tiristores em

antiparalelo como mostra a **Figura 8**. O sinal alternado de saída só pode ser de frequências bem baixas (< 20Hz). Ele é formado a partir da retificação sucessiva da tensão da rede de alimentação (a 60Hz ou 50Hz), variando-se convenientemente o ângulo de disparo das pontes retificadoras.

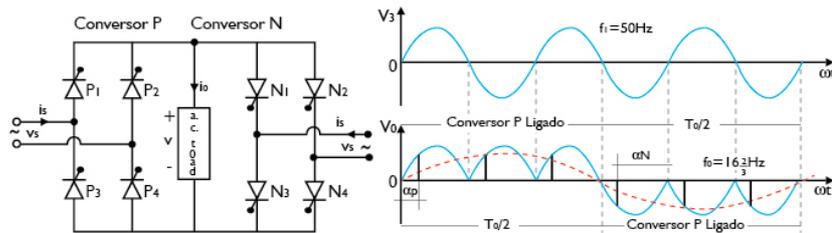


Figura 8 - (a) Cicloconversor e (b) formas de onda.
Fonte: Rashid (1999).

A **Figura 9** esquematiza essas topologias mencionadas. O seu emprego e faixa de utilização estão esquematizados no **Quadro 1**.

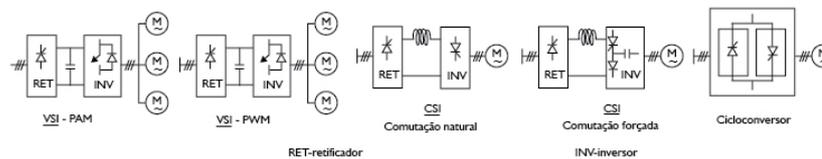


Figura 9 - Topologia de conversores para alimentação de motores CA.
Fonte: Stephan (2013).

| Conversor De frequência | VSI - PAM | VSI - PWM | CSI Comutação Natural | CSI Comutação Forçada | Cicloconversor |
|--|---|---|---|--|--|
| Motor | Síncrono - IP Indução | Síncrono - IP Indução | Síncrono - EI | Indução | Síncrono - EI Indução |
| Faixa típica de variação de Velocidade | 1: 10 | 1: 1000 | 1: 10 | 1: 10 | Baixas Velocidades |
| Faixa típica de potência | 10KVA a 300 KVA | 0,5 KVA a 3 MVA | 1 MVA a 20 MVA | 60 KVA a 3 MVA | 1 MVA a 20 MVA |
| Principais Aplicações | <input checked="" type="checkbox"/> Máquinas têxtil <input checked="" type="checkbox"/> Ventiladores | <input checked="" type="checkbox"/> CNC <input checked="" type="checkbox"/> Robótica <input checked="" type="checkbox"/> Extrusoras <input checked="" type="checkbox"/> Bombas | <input checked="" type="checkbox"/> Compressores <input checked="" type="checkbox"/> Ventiladores <input checked="" type="checkbox"/> Extrusoras <input checked="" type="checkbox"/> Esteiras rolantes | <input checked="" type="checkbox"/> Bombas <input checked="" type="checkbox"/> Ventiladores <input checked="" type="checkbox"/> Centrífugas <input checked="" type="checkbox"/> Esteiras rolantes | <input checked="" type="checkbox"/> Moinhos de Cimento e Minério <input checked="" type="checkbox"/> Siderurgia |

EI - Excitação Independente IP - Ímã permanente RET - Retificador INV - Inversor

Quadro 01 - Seleção de Acionamentos Eletrônicos.
Fonte: Adaptado de Stephan (2013).

Obs.: O conversor VSI-PWM com malha interna de controle de corrente (CR-VSI-PWM) é o indicado para servo-acionamentos. Nesse caso, utilizam-se MOSFET'S ou IGBT'S com frequência de chaveamento de 10kHz

ou mais e faixa de potência até 100kVA.

Atividade 01

1. Pesquise outras configurações de conversores cc-cc, os chamados choppers, bastante utilizados em eletrônica de potência.

Controles de Motor cc

O controle dos motores cc pode ser feito através das tensões de campo ou de armadura, pois, como foi visto em outras aulas, através dessas grandezas pode-se controlar o torque da máquina. Como as constantes de tempo do circuito de campo são bem maiores que as constantes de tempo do circuito de armadura, os controles eficientes devem ser feitos pela armadura, deixando o controle do campo apenas para estabelecer a situação de enfraquecimento de campo.

O esquema de controle de motores cc proposto por Ward-Leonard no final do século XIX tornou-se um padrão de referência e encontra-se ilustrado na **Figura 10** a seguir, na qual MI é o motor de indução, G.CC é o gerador cc e M.CC é o motor cc. O esquema pode ser empregado para o controle de torque, posição ou outra grandeza de um processo cuja dinâmica dependa do motor cc.

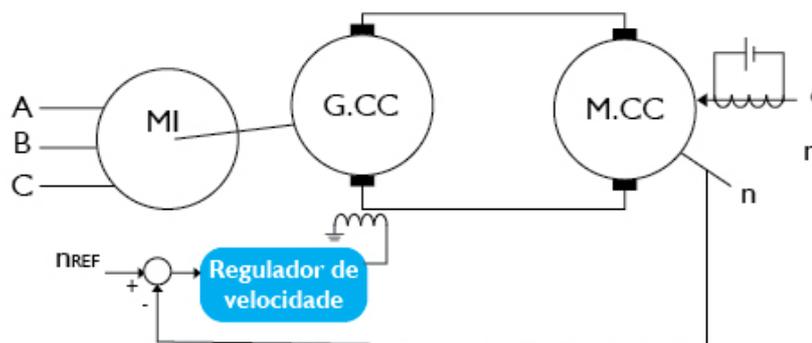


Figura 10 - Sistema de controle de velocidade com malha interna de corrente.
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Ward_Leonard_control Acesso em: 25 mar. 2013.

A versatilidade do controle fica aumentada se for empregada uma malha interna de controle de corrente, estabelecendo o controle em cascata sugerido na **Figura 11**.

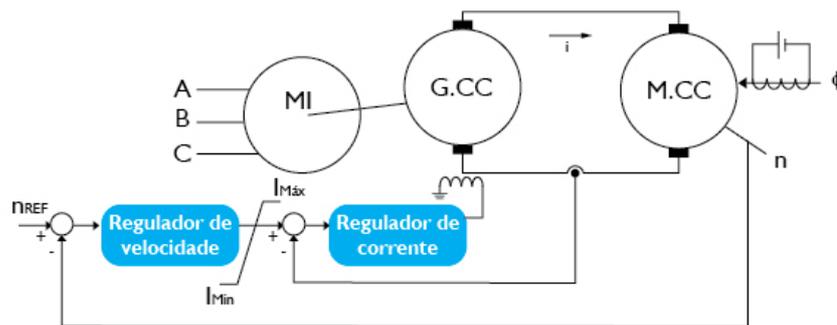


Figura 11 - Sistema de controle de velocidade com malha interna de corrente.
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Ward_Leonard_control Acesso em: 25 mar. 2013.

Com o advento da eletrônica de potência, tornou-se possível melhorar significativamente a qualidade do acionamento elétrico. O primeiro passo foi certamente a evolução do tradicional sistema Ward-Leonard para o sistema conhecido como Ward-Leonard estático, que permitiu substituir o grupo Motor de Indução – Gerador cc por uma parte retificadora a tiristores, como mostra a **Figura 12**. Com isto, ganha-se em rendimento, economia de material (ferro e cobre), espaço, velocidade de resposta e níveis de ruído acústico.

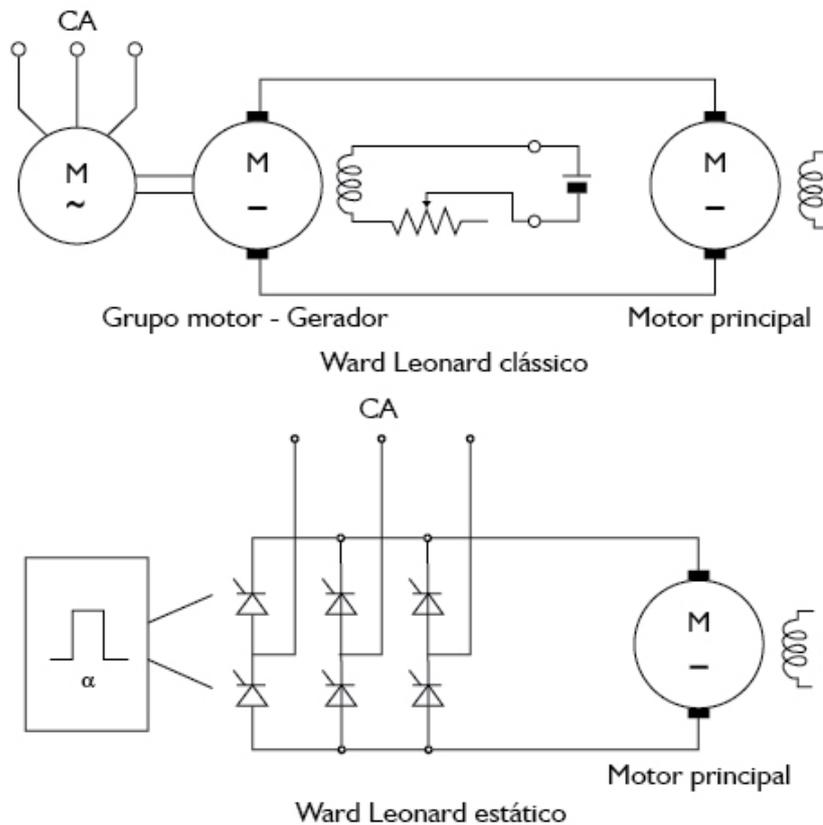


Figura 12 - Sistema Ward-Leonard clássico e estático.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Ward_Leonard_control Acesso em: 25 mar. 2013.

A tensão retificada é função do cosseno do ângulo de disparo " α " dos tiristores. Como o fator de potência do sistema retificador – motor depende também do ângulo α , valores baixos de tensão retificada, que impliquem em ângulo de disparo superior a 30° , corresponderão situações de baixo fator de potência.

O principal problema introduzido pelo sistema de acionamento eletrônico origina-se no fato de a corrente que circula pela ponte retificadora só ter um sentido de circulação. Para contornar isto, são necessárias duas pontes ligadas em oposição como sugere a **Figura 13**. O sistema de controle deve escolher convenientemente a ponte que recebe os pulsos de disparo.

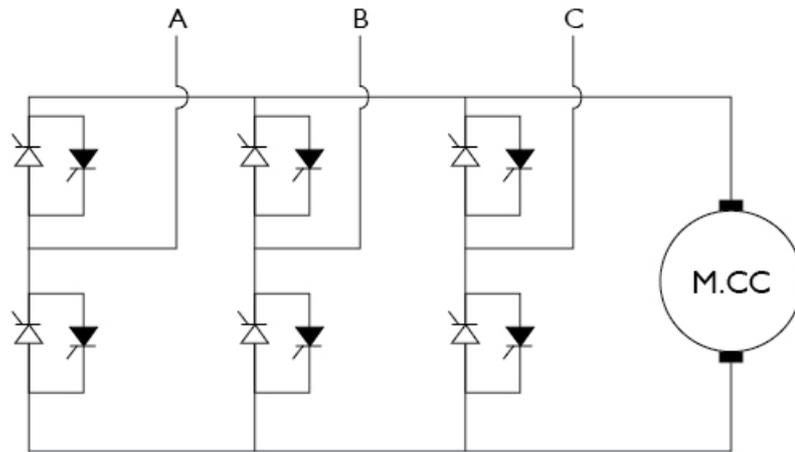


Figura 13 - Pontes retificadoras em antiparalelo.

Fonte: Autoria própria.

Outra dificuldade oriunda da ponte retificadora a tiristores encontra-se no chamado modo de condução descontínuo de corrente. Esta forma de condução de corrente é uma consequência direta do fato da corrente nos tiristores só poder circular em um sentido. Assim, quando a solicitação de torque for baixa e, conseqüentemente, o nível médio da corrente também for baixo, a corrente assume a forma pulsante apresentada na **Figura 14**, pois não pode ser negativa.

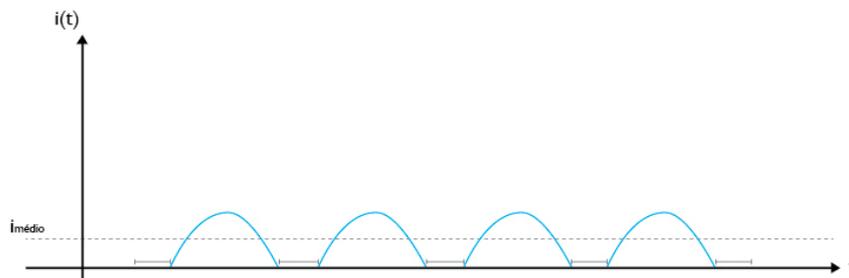


Figura 14 - Corrente de armadura no modo descontínuo.

Fonte: Adaptado de Erickson e Macksinmovic (2004).

O modo de condução descontínua pode levar o sistema de controle de velocidade à instabilidade. Em 1970, Buxbaum propôs um controle adaptativo de corrente que solucionou elegantemente este problema.

O acionamento dos motores cc pode ainda ser efetuado através de choppers, empregando chaves semicondutoras com capacidade de condução e bloqueio, como ilustrado nas **Figuras 15 e 16**. Uma vantagem

deste tipo de acionamento encontra-se no fato do chaveamento se dar em frequências superiores a 1 kHz, condição que praticamente elimina o modo de condução descontínuo de corrente.

Por outro lado, o retificador a diodos, que faz a interface deste conversor com a rede, garante um fator de potência superior ao do retificador a tiristores.

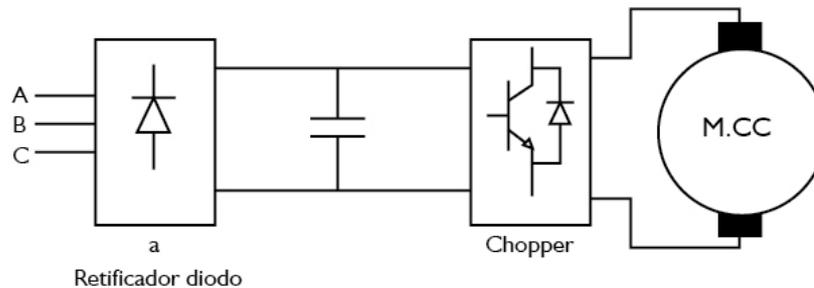


Figura 15 - Esquema de um acionamento de motor cc com chopper.
Fonte: Autoria Própria

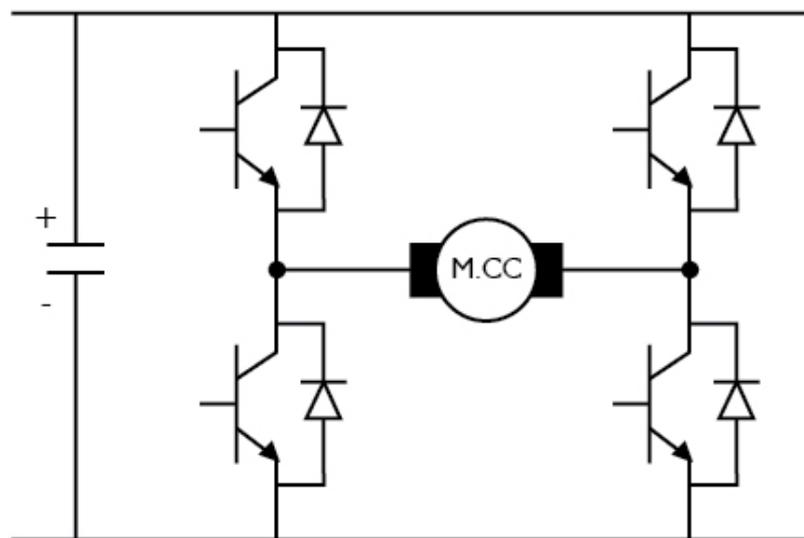


Figura 16 - Chopper de 4 quadrantes.
Fonte: Autoria Própria

Controles de Motor de Indução Gaiola

Com as chaves semicondutoras da chamada 2ª geração, foi possível construir inversores eletrônicos comercialmente atraentes. A partir daí, os motores ca, que eram vistos como de difícil controle, passaram a ser

usados em acionamentos de velocidade controlada ocupando o espaço dos motores cc. Na verdade, o grande problema sempre residiu nas limitações da fonte de alimentação e não nos motores ca. A variação da tensão e da frequência de alimentação do motor permite hoje o controle de velocidade sem perda da capacidade de torque.

No caso específico dos motores de indução, as curvas de torque x velocidade para variações da tensão e frequência já foram apresentadas em aulas anteriores.

Nota-se que, para velocidades de escorregamento inferiores ao valor da velocidade de escorregamento de máximo torque, o leque de curvas obtido é semelhante ao das máquinas de corrente contínua. Isto sugere um esquema de controle como o indicado na **Figura 17**.

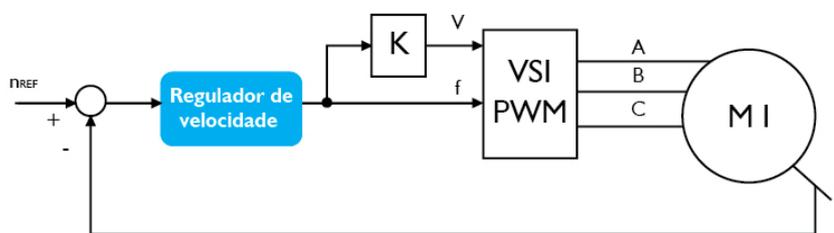


Figura 17 - Esquema intuitivo de controle de motor de indução.
Fonte: Adaptado de Erickson e Macksinmovic (2004).

Controles de Motor Síncrono

As máquinas síncronas só produzem torque na chamada velocidade síncrona. Com o advento da eletrônica de potência, tornou-se possível empregar um conversor eletrônico que produz sinais ca de frequência ajustável para alimentar o motor.

O esquema da **Figura 18** adiante ilustra as diferentes possibilidades de acionamento eletrônico de máquinas síncronas. Os sistemas de controle estão relacionados a estes acionamentos.

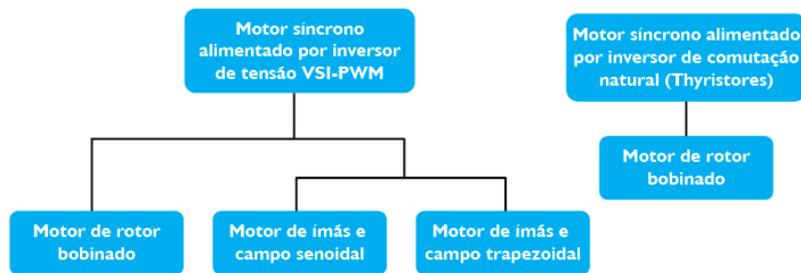


Figura 18 - Acionamento eletrônico de máquinas síncronas.
Fonte: Stephan (2013).

Do mesmo modo que no caso do motor de indução, a relação V/f deve ser mantida para não haver perda na capacidade de torque. Como essas máquinas operam sem escorregamento, o controle, a princípio, é mais simples.

O controle dos motores síncronos alimentados por inversores de comutação natural a tiristores fica restrito a aplicações de alta-potência. A topologia dessa configuração é idêntica à da transmissão em corrente contínua ilustrada na **Figura 19**.

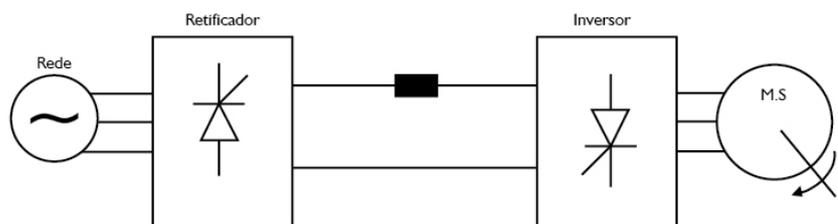


Figura 19 - Motor síncrono alimentado por inversor de comutação natural.
Fonte: Autoria própria.

A ponte retificadora opera com ângulos de disparo inferiores a 90° e a ponte inversora com ângulos de disparo entre 90° e 180° . Como a operação da ponte inversora necessita que já exista uma tensão nos terminais de tensão alternada e isto só ocorre a partir da movimentação do rotor, a partida deste sistema bem como todo o seu controle vem acompanhado de uma gama de peculiaridades que não serão tratadas neste trabalho.

Sensores de Posição e Velocidade

Os esquemas de controle necessitam de informações de posição ou velocidade. Essas informações podem ser estimadas ou medidas. Nas aplicações de maior precisão, impõe-se o emprego de medição por meio de sensores. Os principais tipos serão descritos a seguir:

Encoders

Os chamados "encoders" podem ser de dois tipos: incrementais ou absolutos. A Figura 20 ilustra estas duas possibilidades.

No "encoder" absoluto, cada posição do disco corresponderá a uma combinação de sinais ("bits"), em geral fornecidos por sensores óticos ou magnéticos que percebem a passagem pelas marcas do disco. É preferível empregar uma codificação tal que só ocorra a mudança de um "bit" a cada alteração de posicionamento, como o código Gray. Isto evita ambiguidades, facilitando a detecção de erros.

O "encoder" incremental apresenta construção mais simples. São gerados pulsos oriundos de duas marcações radiais, igualmente espaçadas, que permitem a detecção da posição, pela contagem dos pulsos, e do sentido de rotação. Uma marca de zero, localizada em uma terceira marcação radial, fornece a indicação do término de uma volta e do início da contagem.

Por ocasião de uma perda de energia ou desligamento, o sensor incremental necessita da passagem pela marca de zero para reiniciar sua contagem após o religamento. Já o sensor absoluto pode disponibilizar a informação da posição logo que energizado. Há dispositivos comercializados que chegam a ter resolução superior a 10 "bits". A informação da velocidade pode facilmente ser obtida a partir da derivada da informação da posição, programada digitalmente.

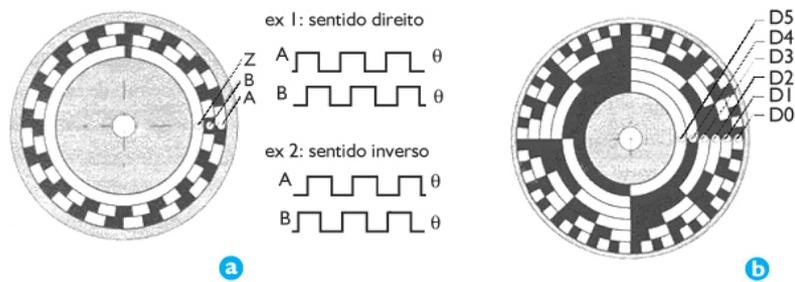


Figura 20 - (a) Encoder incremental (b) Encoder absoluto.
Fonte: Stephan (2013).

Tacogeradores

Os tacogeradores são geradores cc de ímã permanente ou geradores síncronos ca, também de campo produzido por ímãs, conhecidos como alternadores. Os tacogeradores cc apresentam uma tensão proporcional à velocidade, positiva ou negativa, dependendo do sentido de rotação e, como toda máquina cc, trabalham com escovas. Os alternadores não necessitam de escovas, o que representa uma vantagem. Em geral, a tensão de saída é retificada por uma ponte de diodos, o que faz com que a tensão retificada tenha sempre o mesmo sinal, independentemente do sentido de rotação.

Resolvers

Os "resolvers" são transformadores de alta frequência conforme sugere a **Figura 21**. O primário está situado no rotor e existem dois secundários em quadratura no estator. As amplitudes e fases das tensões induzidas nos secundários são função da posição do rotor. Um circuito condicionador processa as tensões induzidas nos secundários fornecendo uma tensão proporcional à posição. Os sincro-transformadores, empregados em tradicionais malhas de controle, podem ser vistos como "resolvers" alimentados em 60Hz.

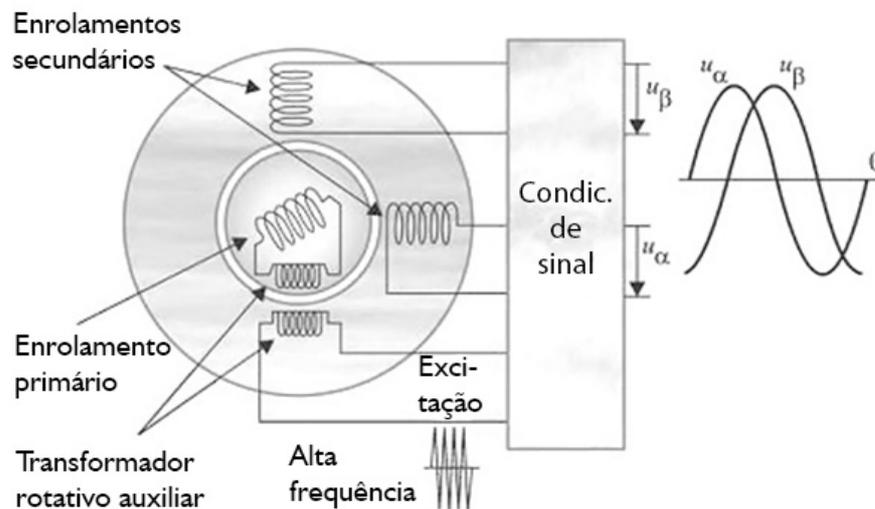


Figura 21 - Resolver

Fonte: http://www.mecatronicaatual.com.br/files/image/servo_figura_01_3_.jpg

Acesso em: 22 mar. 2013

Leitura Complementar

Você poderá assistir alguns vídeos interessantes pela Internet como nos links: <<http://wn.com/cycloconverter>>, <<http://www.youtube.com/watch?v=J8LdyJ5wLK8>> e <<http://www.youtube.com/watch?v=ZjeQG48clyM>>.

Resumo

Nesta aula, estudamos as topologias dos conversores utilizados no controle de tensão aplicada a motores elétricos, seja ela contínua ou alternada. Também estudamos alguns modos de controle em malha fechada que melhore a estabilidade da velocidade desses motores.

Autoavaliação

1. Qual a necessidade de se utilizar um conjunto retificador-inversor para controle de velocidade de um motor de indução?
2. Como é possível se obter uma tensão alternada com um cicloconversor?

3. De que maneira a realimentação é usada nos controles em malha fechada atual e qual a sua necessidade?
4. Explique o princípio de funcionamento do encoder.

Referências

ERICKSON, R. W.; MACKSINMOVIC, D. **Fundamentals of power electronics**. 2. ed. London: Editora Kluwer Academic Publishers, 2004.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**: circuitos dispositivos e aplicações. São Paulo: Makron Books, 1999.

SEM, P. C. **Principles of electric machines and Power electronics**. 2. ed. Editora New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

STEPHAN, Richard M. **Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2013.

UNIVERSIDADE DO PORTO. Faculdade de Engenharia. **Controlo de motores de corrente contínua**. Disponível em: <http://www.fe.up.pt/~ajm/www_sam/mcc_sam.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2013.

WIKIPÉDIA. **Ward Leonard control**. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ward_Leonard_control>. Acesso em: 25 mar. 2013.