

REGULAÇÃO DE VELOCIDADE**EM MOTORES ASSÍNCRONOS DE CORRENTE ALTERNADA.****1. Introdução**

O motor assíncrono de indução é uma máquina essencialmente de velocidade constante, alimentado por uma fonte de energia elétrica de tensão e frequência constantes.

A velocidade de funcionamento em regime nominal é muito próxima da velocidade síncrona. Se o binário da carga aumenta, a velocidade do motor decresce ligeiramente. É, como tal, uma máquina orientada para aplicações que requerem velocidade constante. Entretanto, muitas aplicações necessitam de vários escalões ou ajuste contínuo de velocidade.

Tradicionalmente, estas tarefas que necessitavam de variação de velocidade eram efetuadas por motores de corrente contínua (motores DC).

Estes motores são dispendiosos, requerem manutenção frequente das escovas e coletor e são proibitivos em atmosferas perigosas.

Os motores de indução de rotor em gaiola-de-esquilo, por outro lado, são robustos, baratos, não tem escovas nem coletor e podem ser utilizados em aplicações que requerem elevadas velocidades.

Atualmente, existem conversores eletrónicos, muito mais complexos que os utilizados em motores DC, que permitem utilizar os motores de indução em sistemas que necessitam de variação de velocidade. A variação de velocidade destes motores baseia-se na relação entre a rotação síncrona, ou do campo girante, da rotação do rotor e do deslizamento:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

em que:

$$n_s = \frac{f}{p}$$

e assenta fundamentalmente nos seguintes métodos ($n=(1-s)n_s$):

- Variação do número pares de pólos (p);
- Variação do deslizamento (s);
- Variação da frequência da tensão de alimentação (f).

Neste artigo, são analisados estes métodos de controlo e regulação de velocidade do motor assíncrono de indução.



Figura 1. Motor assíncrono de indução

2. Variação do número pares de pólos

Como a velocidade de funcionamento da máquina é próxima da velocidade de sincronismo, pode-se variar a velocidade do motor de indução pela alteração do número de pólos da máquina:

$$n_s = \frac{f}{p}$$

Isto pode ser conseguido alterando as ligações da bobinagem do estator. Normalmente os pólos são alterados na razão de 2 para 1.

Este método permite obter duas velocidades de sincronismo. Se dois conjuntos independentes de bobinagem forem utilizados, poderá conseguir-se quatro velocidades síncronas para o motor de indução.

No motor de rotor em gaiola-de-esquilo este método é bastante utilizado, pois o rotor pode operar com qualquer número de pólos do estator.

Obviamente que este método apenas permite variar a velocidade em escalões e, dada a complexidade da bobinagem do estator, este será sempre um motor com custo mais elevado.

A figura seguinte apresenta a configuração da bobinagem de um motor *Dahlander*, que permite 2 escalões de rotação por alteração do número de pares de pólos.

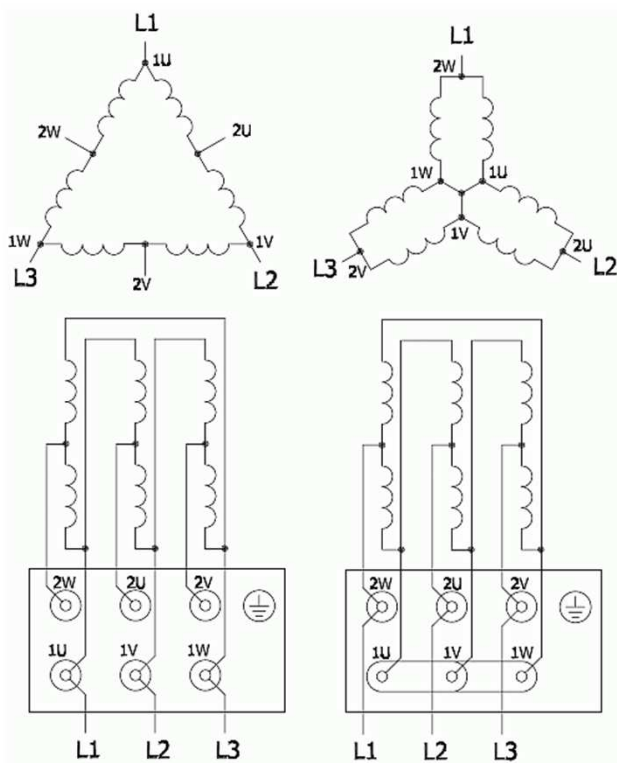


Figura 2. Motor assíncrono de indução *Dahlander*

Este motor terá sempre alguns inconvenientes, como má utilização do circuito magnético e a manifestação de componentes harmónicas, devido a uma distribuição espacial do campo magnético não sinusoidal.

3. Variação do deslizamento

3.1 Variação da tensão de alimentação

Sabemos que o binário desenvolvido pelo motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação.

Um conjunto de características T-n para várias tensões aos terminais é apresentado na figura 3.

Se o rotor acionar uma carga do tipo ventoinha, a velocidade pode variar entre s_1 e s_5 por variação da tensão de alimentação.

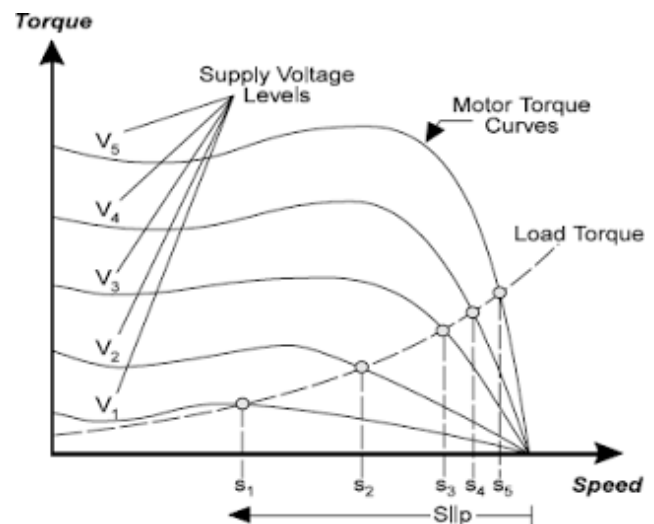


Figura 3. Características binário-velocidade do motor assíncrono de indução

A tensão aos terminais V_1 pode ser variada pela utilização de um auto transformador trifásico, ou por um conversor eletrónico de estado sólido, como se apresenta na figura 4.

O auto transformador permite obter uma tensão perfeitamente sinusoidal para alimentar o motor indução, enquanto no conversor de estado sólido a tensão aos terminais não é sinusoidal.

A variação de velocidade com conversor de estado sólido é muito comum em motores de gaiola-de-esquilo que acionam cargas centrífugas (ventoinhas).

Em aplicações de maior potência, torna-se necessário utilizar um filtro, para eliminar as elevadas componentes harmónicas de corrente injetadas nas linhas de alimentação.

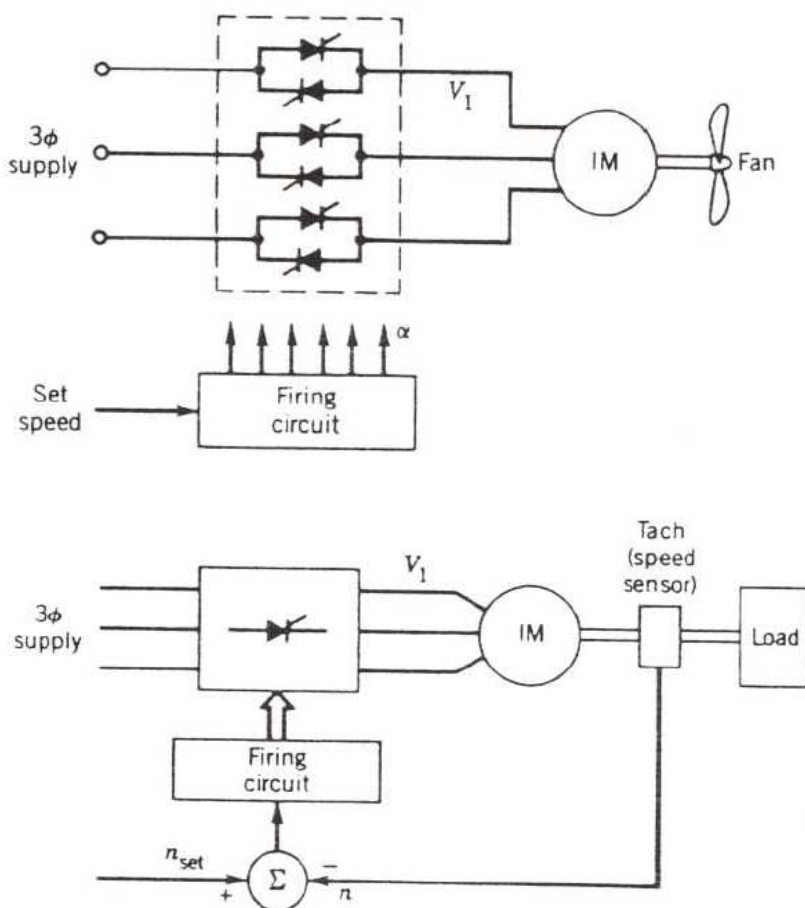
O conversor eletrónico de tensão a tirístores apresentado na figura 4 é simples de entender mas complicado de analisar.

Um sinal de comando para uma determinada velocidade dispara os tirístores, com um determinado ângulo de disparo (α), para providenciar uma determinada tensão aos terminais do motor. Se o sinal de comando de velocidade é alterado, o ângulo de disparo dos tirístores é também alterado, o qual resulta uma nova tensão aos terminais do motor e, como tal, uma nova velocidade de funcionamento.

O funcionamento em malha aberta não é satisfatório se, para determinada aplicação, for necessário um controlo preciso da velocidade. Na maioria dos casos é necessário o controlo em malha fechada.

A figura 4 apresenta um diagrama simples de um sistema eletrónico de funcionamento em malha fechada.

Se a velocidade do motor decresce devido a qualquer perturbação, como flutuação da tensão de alimentação, a diferença entre a velocidade especificada para o motor e a verdadeira velocidade deste é aumentada. Este facto altera o ângulo de disparo do tiristor de maneira a incrementar a tensão aos terminais, a qual por sua vez permitirá que o motor desenvolva um binário superior.



O incremento do binário tende a restabelecer a velocidade para o valor anterior à perturbação.

Reparar que neste método de controlo de velocidade, o deslizamento aumenta para as velocidades mais baixas (Figura 3), tornando a operação ineficiente. De qualquer maneira, para ventoinhas, ou de uma maneira geral cargas centrífugas, nas quais o binário varia aproximadamente com o quadrado da velocidade, a potência decresce significativamente com o decréscimo da velocidade.

Assim, embora as perdas no circuito rotórico (=sPag) possam ser uma parte significativa da potência do entreferro, a potência no entreferro é ela própria reduzida e, como tal, o rotor não entrará em sobreaquecimento.

Figura 4. Variação de velocidade do motor por variação de tensão de alimentação

Os dispositivos reguladores de tensão são simples e, embora ineficientes, são orientados para aplicações como ventoinhas, bombas e, de uma maneira geral para cargas centrífugas.

3.2 Variação da resistência rotórica

As características binário-velocidade para este caso são apresentadas na figura 5.

A característica T-n da carga é apresentada em tracejado.

Variando a resistência exterior entre $0 < R_{ex} < R_{ex4}$, a velocidade da carga pode ser controlada na gama $n_1 < n < n_5$.

Reparar que um ajustamento apropriado da resistência exterior ($R_{ex} = R_{ex2}$), pode proporcionar o máximo binário no período de arranque.

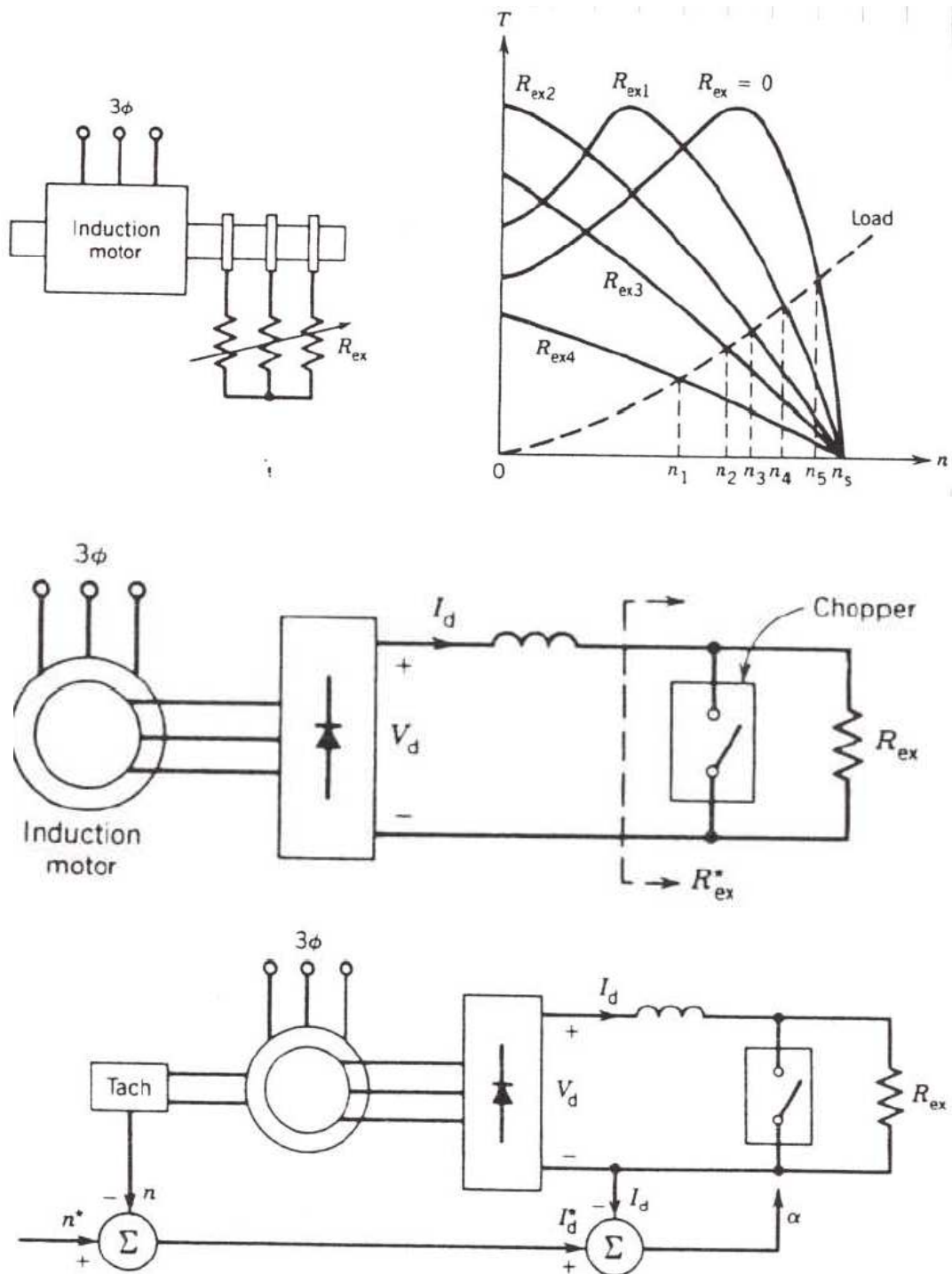


Figura 5. Variação de velocidade do motor por variação da resistência rotórica

O esquema da figura 5 requer um banco de resistências trifásico, de maneira que para um modo de funcionamento equilibrado, as três resistências apresentem o mesmo valor em qualquer posição.

O ajuste manual das resistências não é satisfatório em algumas aplicações, particularmente em sistemas de controlo em malha fechada.

Um controlo eletrónico da resistência externa pode melhorar a operação. Um diagrama de blocos de um sistema de controlo deste tipo é apresentado na figura 5.

A potência do rotor trifásico é retificada na ponte de díodos. O efetivo valor R^{*ex} da resistência externa R_{ex} , pode ser alterado por variação do “tempo-on” (também chamado razão de comutação $\alpha = T_{on}/T$) do *chopper* conectado aos terminais de R_{ex} . Prova-se que $R_{ex} = (1 - \alpha)R_{ex}$.

Quando $\alpha = 0$, isto é, o *chopper* fora de serviço, $R^{*ex} = R_{ex}$. Quando $\alpha = 1$, isto é, o *chopper* sempre em “on”, R_{ex} é curto-circuitada pelo *chopper* e como tal $R^{*ex} = 0$. Neste caso, a resistência do circuito rotórico é apenas a resistência da própria bobinagem. Assim, por variação de α na gama de $1 > \alpha > 0$, a resistência efetiva é variada na gama $0 < R^{*ex} < R_{ex}$, e as características binário-velocidade obtidas serão idênticas às da figura 5.

A tensão retificada V_d depende da velocidade e do deslizamento da máquina. Com o rotor travado, a f.e.m. induzida na bobinagem do rotor será E_2 . A tensão média à saída do conversor trifásico (retificador com seis díodos) é:

$$V_0 = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{\max}$$

então, a tensão retificada V para o deslizamento s é:

$$V_d = s \cdot |V_d|_{s=1} = s \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot E_2$$

A potência elétrica no circuito rotórico é:

$$P_2 = s \cdot P_{ag}$$

Se a potência de perdas na bobinagem do rotor for desprezada, a potência P_2 será a potência DC à saída do retificador. Assim:

$$s \cdot P_{ag} \approx V_d \cdot I_d$$

Pelas equações anteriores obtém-se:

$$s \cdot T \cdot \omega_{syn} = s \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot E_2 \cdot I_d$$

$$T \propto I_d$$

Esta relação linear entre a potência desenvolvida e a corrente retificada, é uma vantagem sob o ponto de vista do controlo de velocidade de sistemas em malha fechada.

Um diagrama de blocos deste modo de controlo em malha fechada é apresentado na figura 5.

A velocidade atual n é comparada com a velocidade desejada n^* , e o sinal de erro representa o comando do binário, ou a corrente de referência I_d^* . Esta corrente I_d^* é comparada com a corrente atual I_d , e o sinal de erro altera a razão de comutação do *chopper* α , de maneira que a corrente I_d se aproxime do valor I_d^* .

A maior desvantagem deste método de controlo pela resistência rotórica é o baixo rendimento às menores velocidades devido aos elevados deslizamentos.

Mesmo assim, este método de controlo é bastante utilizado devido à sua simplicidade. Em aplicações onde o funcionamento a baixa velocidade é apenas uma pequena parte do trabalho da máquina, o baixo rendimento neste caso é aceitável.

Este método será orientado para controlo de velocidade de motores que atuam cargas centrífugas, numa gama de velocidades próxima do seu máximo valor.

3.3 Recuperação de energia de deslizamento do rotor

No método apresentado, se for possível recuperar para a fonte AC a energia de deslizamento dissipada na resistência, o rendimento global do sistema será bastante melhor.

Um método para recuperar a energia de deslizamento é apresentado na figura 6.

A potência do rotor é retificada na ponte de diodos. O *ripple* da corrente retificada é atenuado na indutância. A saída DC do retificador é ligada aos terminais do inversor, o qual inverte a potência DC em AC e realimenta-a para a fonte AC. O inversor é um conversor retificador controlado, que funciona no modo ondulator (ou inversor).

Em vazio o binário necessário é reduzido, então $I_d \sim 0$. Pela figura 6, $V_d = V_i$. Se o deslizamento em vazio é s_0 , então a tensão média na saída dos conversores trifásicos controlados,

$$V_0 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{\max} \cdot \cos \alpha$$

vem:

$$s_0 \cdot \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot E_2 = -\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_1 \cdot \cos \alpha$$

ou

$$s_0 = -\frac{V_1}{E_2} \cdot \cos \alpha$$

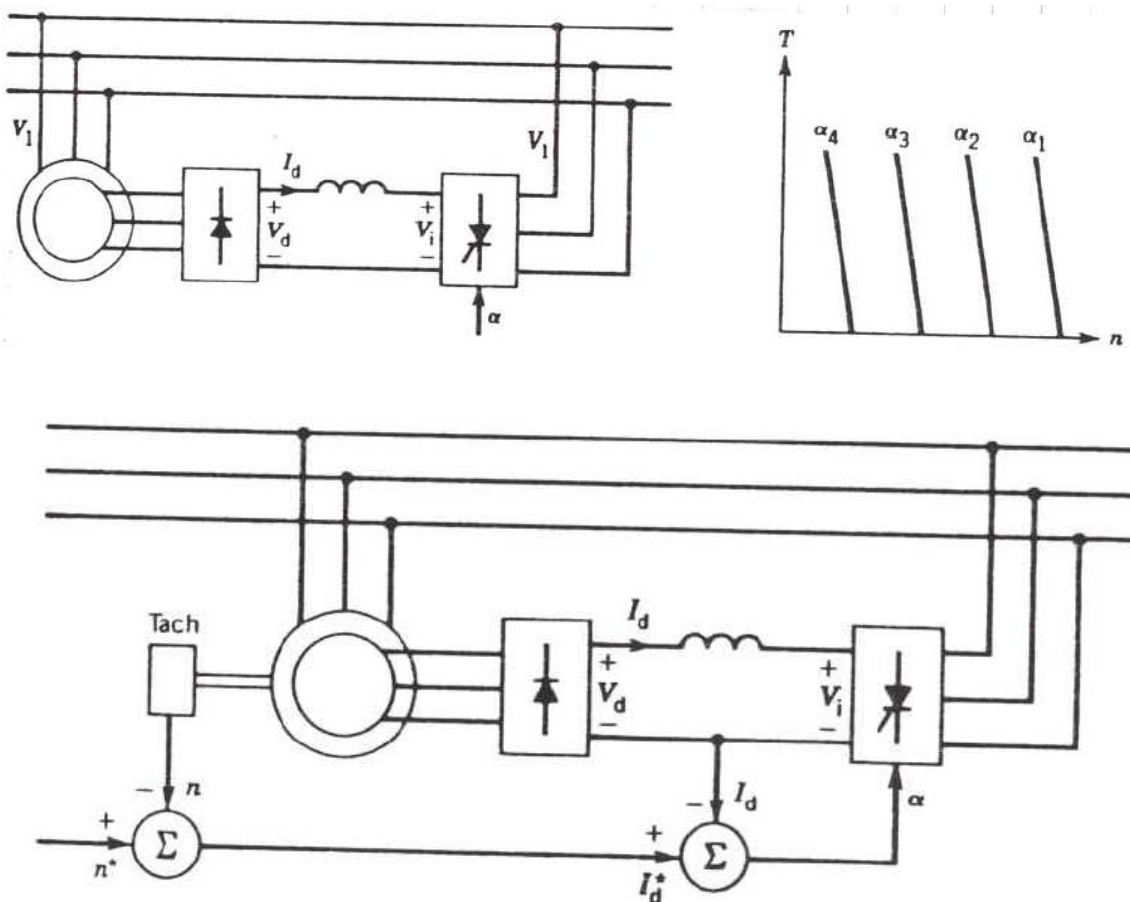


Figura 6. Variação de velocidade do motor por variação da resistência rotórica

O ângulo de disparo α do inversor deve ser ajustado para a velocidade em vazio. Se for aplicada carga, a velocidade decresce.

As características binário-velocidade para diferentes ângulos de disparo são apresentadas na figura 6. Estas características são idênticas á do motor DC de excitação separada, para várias tensões aplicadas na armadura. O binário desenvolvido pela máquina é proporcional à corrente DC I_d .

Um sistema de controlo em malha fechada, utilizando a técnica da recuperação da energia de deslizamento é apresentado na figura 6.

Este método de controlo de velocidade é largamente utilizado em aplicações de potência, onde a variação numa larga gama de velocidades envolve elevadas energias de deslizamento.

4. Variação da frequência da tensão de alimentação

A velocidade síncrona e, como tal, a velocidade do motor, pode ser variada pela alteração da frequência da tensão de alimentação. A aplicação deste método de controlo de velocidade requer um variador de frequência.

A figura 7 apresenta em diagrama de blocos um sistema de controlo de velocidade em malha aberta, no qual se pode alterar a frequência da tensão de alimentação do motor.

O fluxo por pólo do motor de indução é:

$$\Phi_p \propto \frac{E}{f}$$

Se a queda de tensão na impedância estatórica (R_1 e X_1) for reduzida, comparativamente com a tensão aos terminais V_1 , uma vez que $V_1 \sim E_1$, então:

$$\Phi_p \propto \frac{V}{f}$$

Para evitar uma elevada saturação do circuito magnético, a tensão aos terminais do motor deve ser variada proporcionalmente com a frequência.

Este tipo de controlo de velocidade é conhecido como Volts por Hertz Constante (Tensão por Frequência constante).

Ás baixas frequências, a queda de tensão na impedância estatórica é comparável à tensão aos terminais V_1 e, como tal, a equação apresentada deixa de ser válida. Para manter a mesma densidade de fluxo no entreferro, a razão V/f deve ser incrementada para as mais baixas frequências.

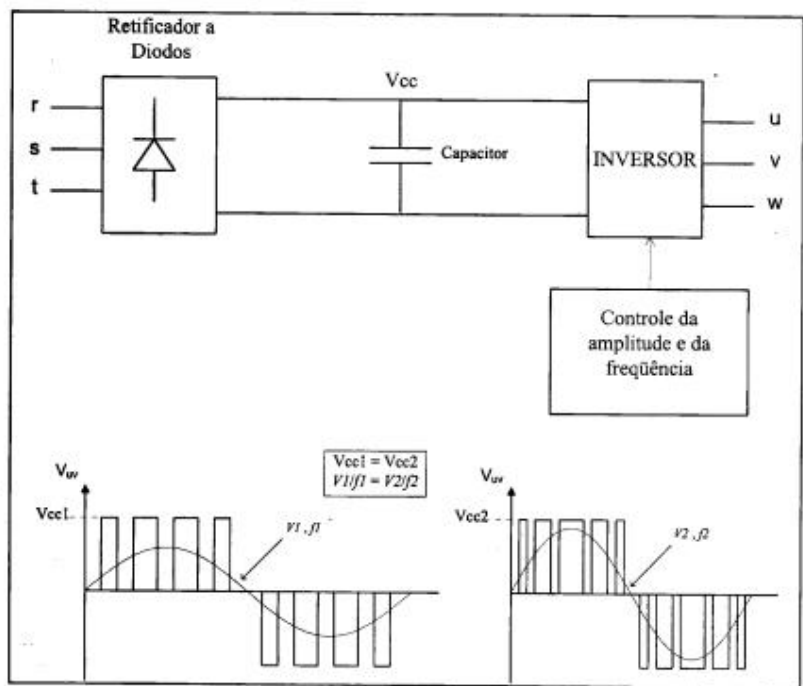


Figura 7. Variação da frequência da tensão de alimentação

A necessária variação *tensão - frequência* é apresentada na figura 8b.

Na figura 9, a tensão aos terminais da máquina irá variar se a tensão aos terminais do inversor for alterada; Esta tensão pode ser alterada pela variação do ângulo de disparo dos semicondutores do retificador controlado.

Se a tensão à saída do inversor puder ser variada no próprio inversor (inversores de Modulação Largura de Impulso), o retificador deixará de ser controlado e constituído apenas por díodos, tornando V_i constante, como se pode ver na figura 9.

As características binário-velocidade para este sistema de variação de velocidade são apresentadas na figura 8.

Até à frequência base f_{base} a tensão aos terminais da máquina pode ser obtida a partir do inversor. Abaixo desta frequência, o fluxo no entreferro é mantido constante por variação da tensão com a frequência; por esta razão, o binário é mantido constante e no seu valor máximo. Acima de f_{base} , a tensão não pode voltar a ser incrementada com a frequência, neste caso o fluxo no entreferro decresce assim como o binário máximo disponível.

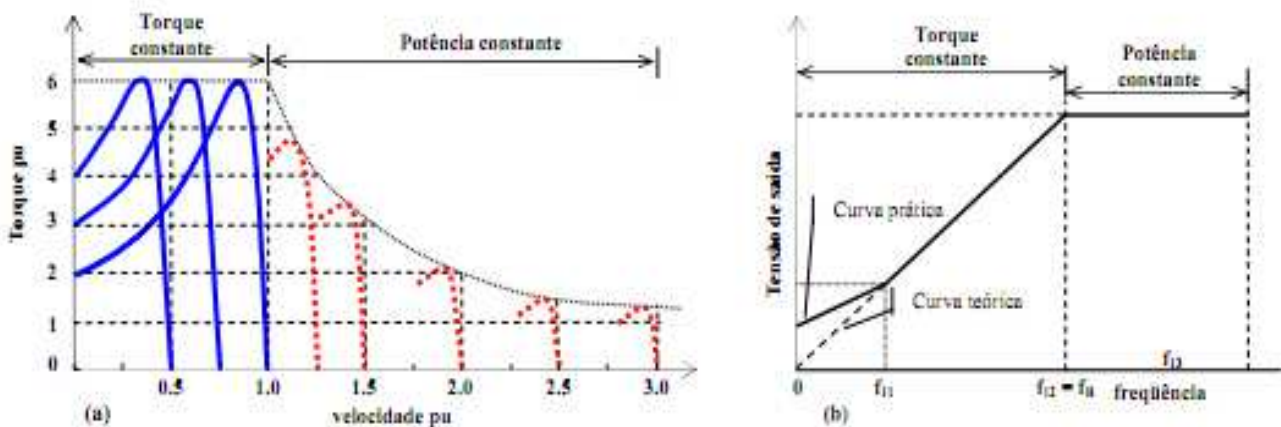


Figura 8. Variação da frequência da tensão de alimentação

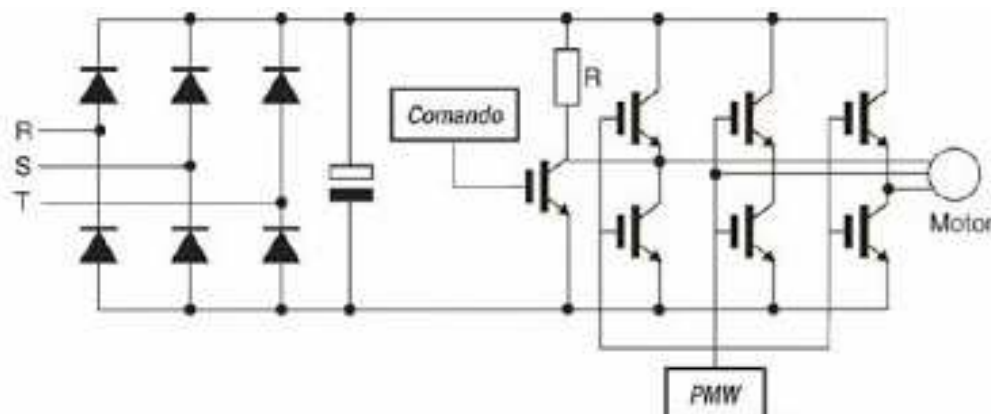


Figura 9. Controlo de velocidade por variação da frequência da tensão de alimentação

4.1 Controlo em malha fechada

Em aplicações onde se requer um rigoroso controlo da velocidade, torna-se necessário utilizar sistemas de controlo realimentados em malha fechada.

A Figura 10 apresenta um diagrama de blocos que utiliza a regulação pela frequência de deslizamento e funciona no modo Volt/Hertz constante.

No primeiro ponto de soma, obtém-se a diferença entre a velocidade pretendida n^* e a velocidade atual n , que corresponde à velocidade de deslizamento n_{sl} ou seja, à frequência de deslizamento. Se a frequência de deslizamento se aproxima da frequência de corte, este valor é limitado, restringindo a operação apenas para valores abaixo da frequência de corte (limite máximo para a frequência).

No segundo ponto de soma, a frequência de deslizamento é somada à frequência f_n (que representa a velocidade do motor), para assim gerar a frequência do estator f_1 .

Um gerador de funções providencia um sinal para controlo do retificador, de maneira que a operação da máquina se efetue a Tensão - Frequência constante (Volt/Hertz - constante).

Um sistema simplificado de controlo de velocidade utilizando um inversor de corrente, é apresentado na figura 11.

A frequência de deslizamento é mantida constante e a velocidade é controlada pela regulação da corrente contínua I_d e como tal, pela amplitude da corrente da máquina. Em aplicações de tração elétrica, como os metropolitanos e outros veículos de trânsito, o binário é diretamente controlado.

Um sistema típico de controlo de um veículo de trânsito é apresentado na figura 12.

Como a tensão disponível nos sistemas de trânsito é contínua e constante, é utilizado um inversor de tensão controlado por Modulação de Largura de Impulso (PWM), de maneira a que se possa variar a tensão AC na saída.

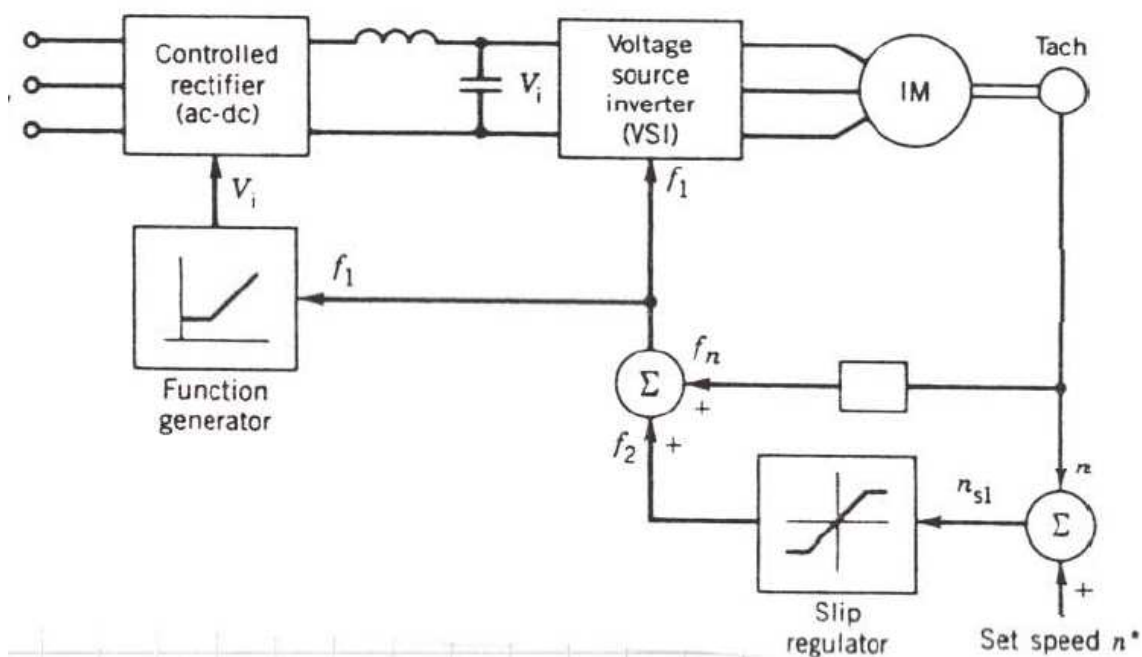


Figura 10. Sistema de controlo em malha fechada, com operação a V/f constante

Se a frequência de deslizamento se mantiver constante, o binário varia com o quadrado da corrente do estator.

O comando do binário é obtido através de uma função geradora de raiz quadrada, que gera a corrente de referência I^* . O sinal que representa a diferença entre I^* e a atual corrente I_1 , irá alterar a tensão na saída do inversor PWM de maneira que I_1 se aproxime o mais possível do valor desejado I^* , que representa o comando do binário.

Na frenagem regenerativa com recuperação de energia dos veículos de trânsito, o sinal da frequência de deslizamento f_2 é negativo. Neste caso, o motor de indução vai funcionar no modo gerador ($f_n > f_1$), e realimentará para a fonte DC a energia cinética armazenada no sistema.

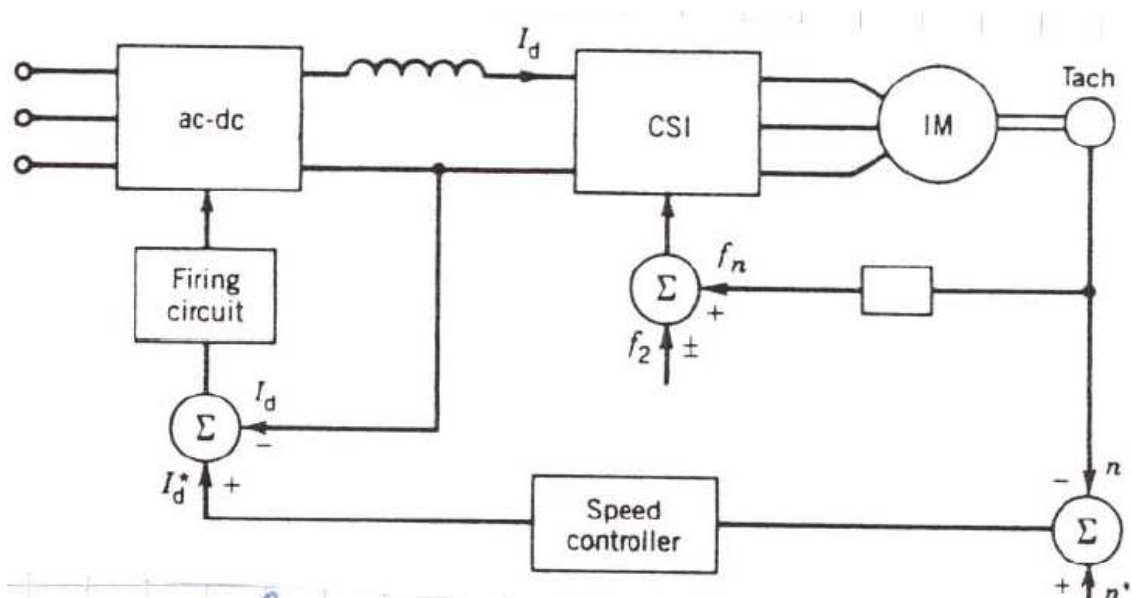


Figura 11: Sistema de controle em malha fechada, utilizando um inversor de corrente

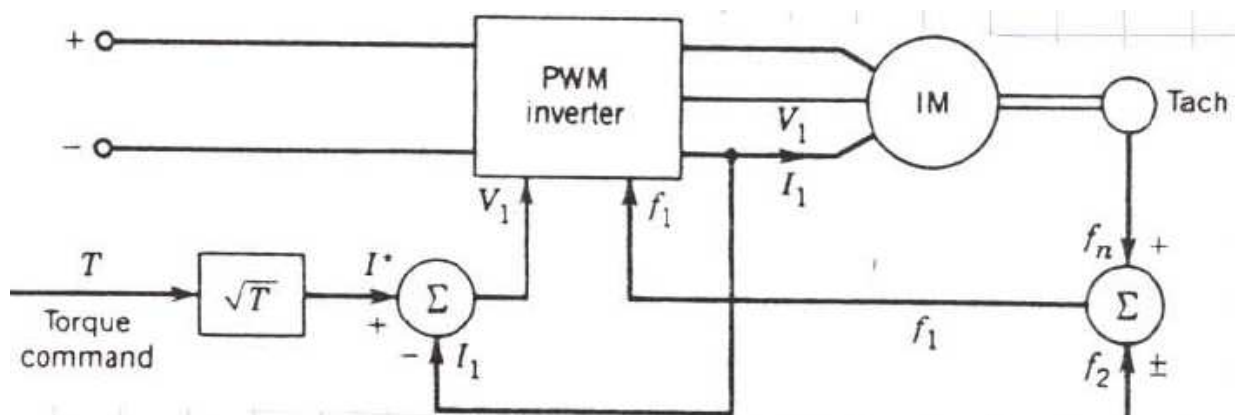


Figura 12. Sistema típico de controle de velocidade em veículos de trânsito

5. Conclusão

Os motores assíncronos de indução, especialmente os de rotor em gaiola-de-esquilo, são robustos, baratos, não tem escovas nem coletor e podem ser utilizados em aplicações que requerem elevadas velocidades.

A variação de velocidade destes motores assenta fundamentalmente na variação do número de pares de pólos (motor *Dahlander*), na variação do deslizamento através da variação da tensão aplicada ao estator, ou variação da resistência rotórica, no caso dos motores de rotor bobinado, e na variação da frequência da tensão aplicada ao motor.

Atualmente, existem conversores eletrónicos, muito mais complexos que os utilizados em motores DC, que permitem utilizar os motores de indução em sistemas que necessitam de variação de velocidade. Os conversores eletrónicos são fundamentalmente utilizados na variação de velocidade por variação do deslizamento da máquina e na variação da frequência da tensão de alimentação.

Em termos técnicos, as soluções mais evoluídas correspondem à variação de velocidade por controlo escalar tensão/frequência constante, ou, uma solução ainda mais evoluída, por controlo vetorial da corrente estatórica.

Estes métodos de variação de velocidade permitem em qualquer regime adaptar a resposta do motor às necessidades da carga, originando funcionamentos do motor com deslizamentos reduzidos e, como tal, com eficiência muito elevada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beza Carvalho, J. A., Máquinas Assíncronas de Indução. Apontamentos da disciplina de Máquinas Elétricas II. ISEP, Porto, março de 2014.
- WEG, Motores de Corrente Alternada. www.weg.net. Catálogo WEG 2012.
- Sen, P.C., Principles of Electric Machines and Power Electronics. Editor: John Wiley & Sons.
- Fitzgerald, A.E., Charles Kingsley. Electric Machinery. Editor: McGraw Hill.
- ABB, Low Voltage Industrial Performance Motors. Catálogo ABB 2009.



WEG Equipamentos Elétricos S.A.
<http://www.weg.net/>