

Conversores de Freqüencia



Introdução

Os conversores de frequência são equipamentos eletrônicos que fornecem total controle sobre a velocidade de motores elétricos de corrente alternada através da conversão das grandezas fixas, tensão e frequência da rede, em grandezas variáveis.

Apesar do princípio ser o mesmo, houveram grandes mudanças entre os primeiros conversores de frequência e os atuais, devidas principalmente a evolução dos componentes eletrônicos com destaque aos tiristores e aos microprocessadores digitais.

A grande maioria dos conversores de frequência usados pela indústria para controlar a velocidade de motores elétricos trifásicos de corrente alternada são desenvolvidos de acordo com dois princípios:

- Conversores desenvolvidos sem um circuito intermediário conhecidos com conversores diretos e;
- Conversores de frequência com um circuito intermediário variável ou fixo.

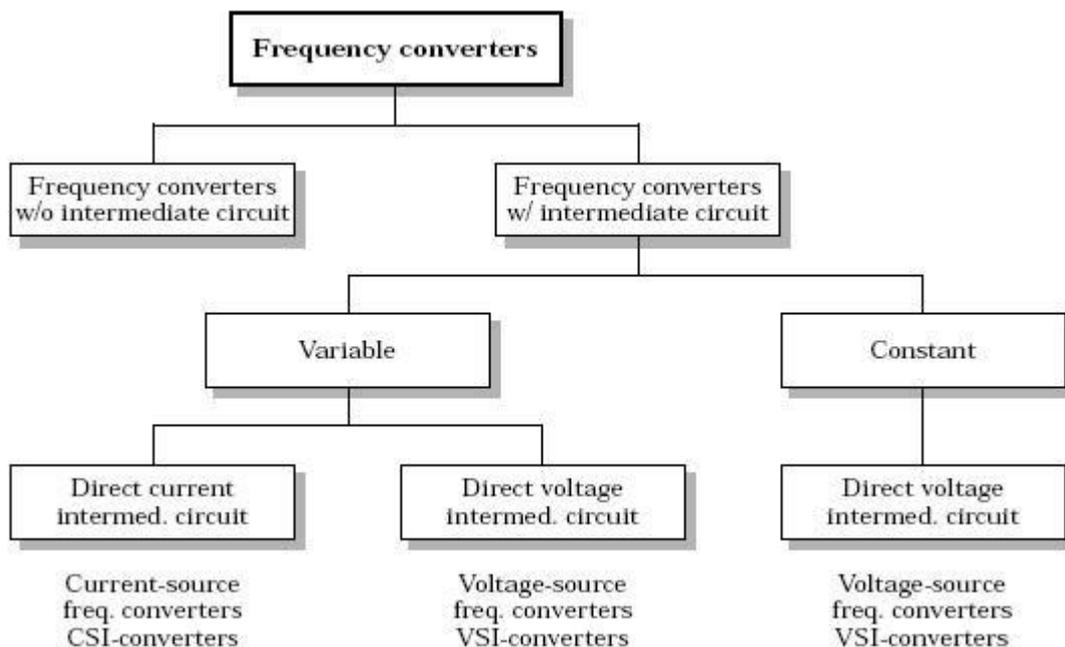


Figura 1 - Tipos de Conversores de Frequência.

Os circuitos intermediários podem ser tanto com corrente contínua como com tensão contínua e são conhecidos como conversores com fonte de corrente ou conversores com fonte de tensão.

Os conversores de frequência com circuitos intermediários oferecem inúmeras vantagens sobre os conversores sem circuito intermediário:

- Melhor controle sobre a potência reativa.
- Redução de harmônicas
- Não existem limitações com relação à frequência de saída (mas existe uma limitação nos sistemas de controle e nos componentes utilizados).

Conversores de frequência com altas frequências de saída são normalmente conversores com circuito intermediário.)

Conversores diretos são relativamente mais baratos do que conversores com circuitos intermediários, mas sofrem com a baixa redução de harmônicas.

Como a maioria dos conversores de frequência usa circuito intermediário com tensão contínua, nossa apostila irá focar nesses conversores.

Motores Elétricos

Para compreender o funcionamento de um Conversor de Frequência é de fundamental importância entender primeiro como funciona um motor de indução.

O primeiro motor elétrico foi, uma máquina de corrente contínua, construída em 1833. O controle de velocidade desse tipo de motor é relativamente simples e atende as necessidades da maioria das aplicações.

Em 1889, o primeiro motor de corrente alternada foi desenvolvido. Mais simples e robusto do que os de corrente contínua, a máquina trifásica de corrente alternada sofria com valores fixos de velocidade e características de torque, o que limitou por vários anos o uso desses motores em aplicações especiais.

Os motores trifásicos de corrente alternada são conversores eletromagnéticos de energia, convertendo energia elétrica em energia mecânica (operando como motor) e vice-versa (operando como gerador) através da indução eletromagnética.

O princípio da indução eletromagnética é que se um condutor é movimentado através de um campo magnético (B), uma tensão é induzida. Se o condutor é um circuito fechado, uma corrente (I) irá circular. Quando o condutor é movimentado, uma força (F), que é perpendicular ao campo magnético, irá agir sobre o condutor.

a) Princípio do gerador (indução através do movimento).

No princípio do gerador, movimentando um condutor através de um campo magnético gera uma tensão.

b) Princípio do motor.

No motor, o princípio da indução é reverso e um condutor conduzindo uma corrente é posicionado dentro de um campo magnético.

O condutor é então influenciado por uma força (F) que movimento o condutor para fora do campo magnético.

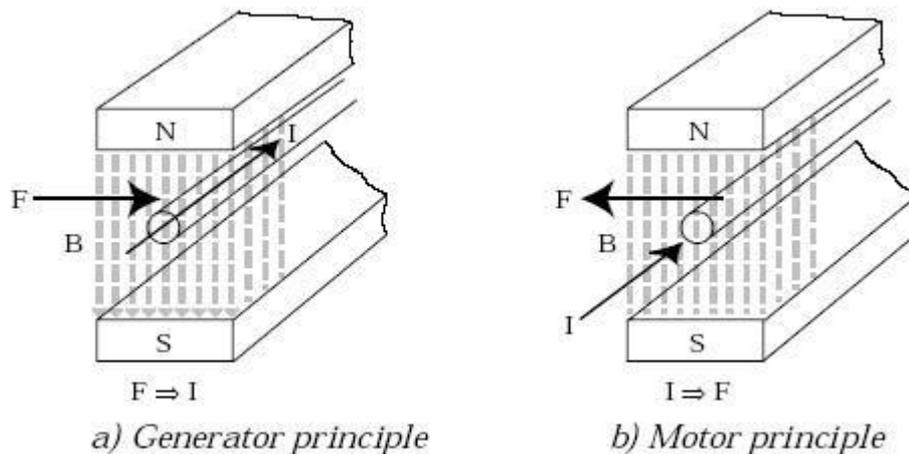


Figura 2 - Princípio da Indução Eletromagnética.

No princípio do motor, o campo magnético e o condutor com uma corrente circulando geram o movimento.

O campo magnético é gerado na parte estacionária (o estator) e os condutores, que são influenciados pelas forças eletromagnéticas, estão na parte girante (o rotor).

Motores de corrente alternada trifásicos podem ser divididos em dois grupos principais: assíncronos e síncronos.

O estator funciona basicamente da mesma maneira nos dois tipos de motores, mas o projeto e o movimento do rotor em relação ao campo magnético é diferente. Nos síncronos (que significa simultâneo ou o mesmo) a velocidade do rotor e do campo magnético são as mesmas e no assíncrono são diferentes.

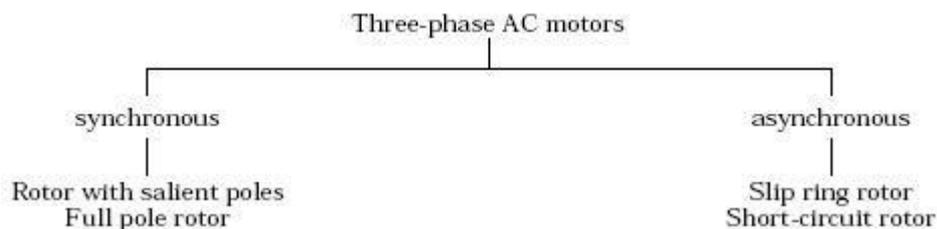


Figura 3 - Tipos de motor CA

Motores Assíncronos

Motores assíncronos são os mais utilizados e praticamente não requerem manutenção. Em termos mecânicos eles são virtualmente unidades padrão, de forma que fornecedores estão sempre disponíveis. Existem vários tipos de motor assíncrono, mas todos eles seguem o mesmo princípio básico.

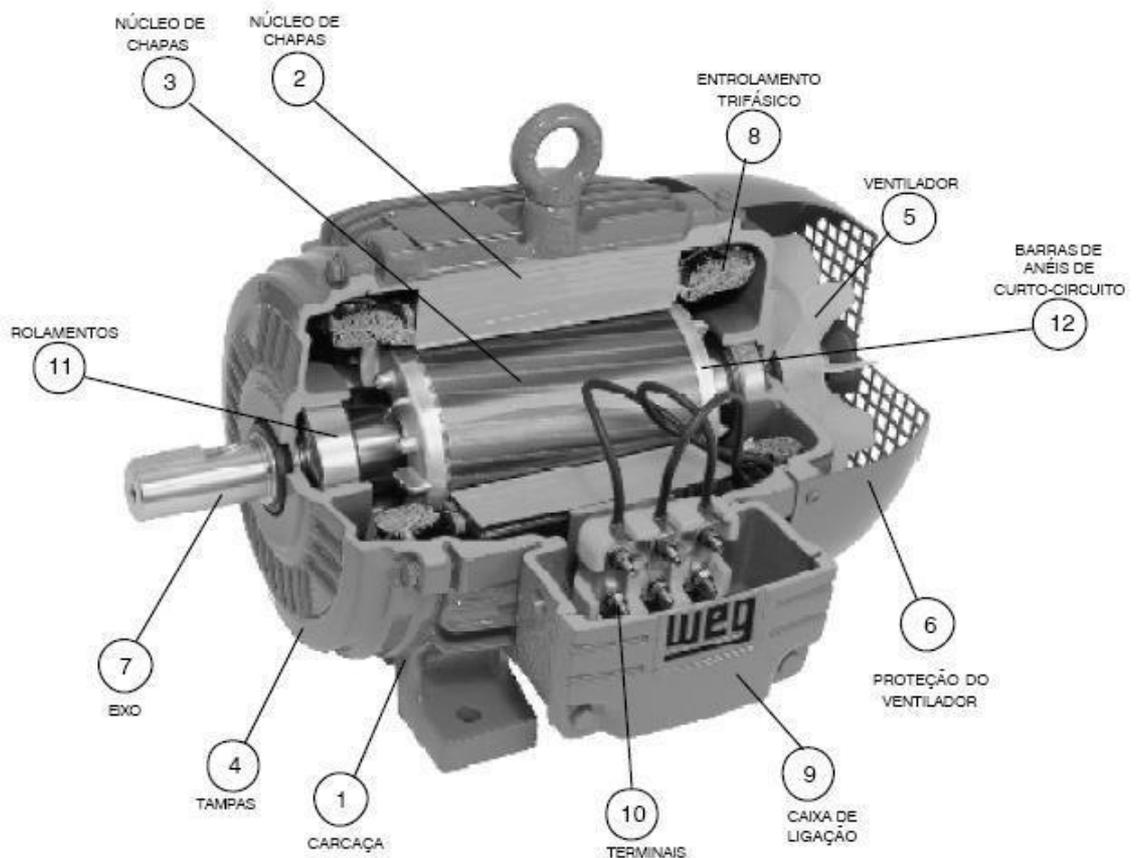


Figura 4-Construção de um motor assíncrono.

Estator

O estator é a parte fixa do motor. Na carcaça do motor existe um núcleo de ferro formado por folhas finas de ferro (0,3 a 0,5mm). Essas folhas de ferro possuem ranhuras para o enrolamento trifásico.

Os enrolamentos de fase e o núcleo do estator geram o campo magnético. O número de par de pólos (ou pólos) determinam a velocidade que o campo magnético irá girar. Se o motor está ligado na sua frequência nominal, a velocidade do campo magnético é chamada de velocidade síncrona do motor (n_0).

Par de pólos (p)	1	2	3	4	6
Número de pólos (2p)	2	4	6	8	12
Velocidade Síncrona	3600	1800	1200	900	600

O Campo Magnético

O campo magnético gira no entreferro entre o estator e o rotor. Após a conexão de um enrolamento a uma fase de alimentação, um campo magnético é induzido.

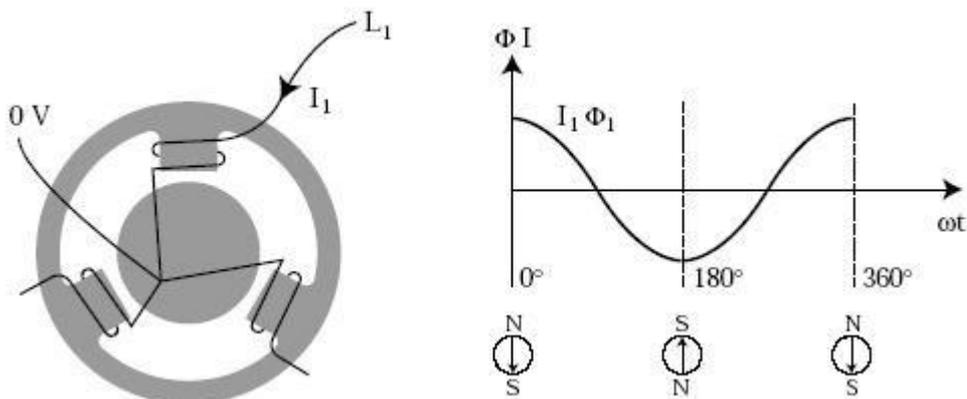


Figura 5 - Uma fase resulta em um campo alternado.

O sentido do campo magnético no estato é fixo, mas a direção muda. A velocidade dessa mudança é determinada pela frequência de alimentação. Numa frequência de 60Hz (padrão brasileiro) o campo alternaria de direção 60 vezes por segundo.

Se dois enrolamentos são conectados ao mesmo tempo, cada um em uma fase de alimentação, dois campos magnéticos seriam induzidos no núcleo do estator. Em um motor de dois pólos, existe um deslocamento de 120° entre os dois campos. O valor máximo dos campos também estão deslocados no tempo.

Isso resulta na criação de um campo magnético girante no estator. Entretanto, o campo é altamente assimétrico até que a terceira fase é conectada.

As três fases geram três campos magnéticos no estator que estão deslocados 120° entre si.

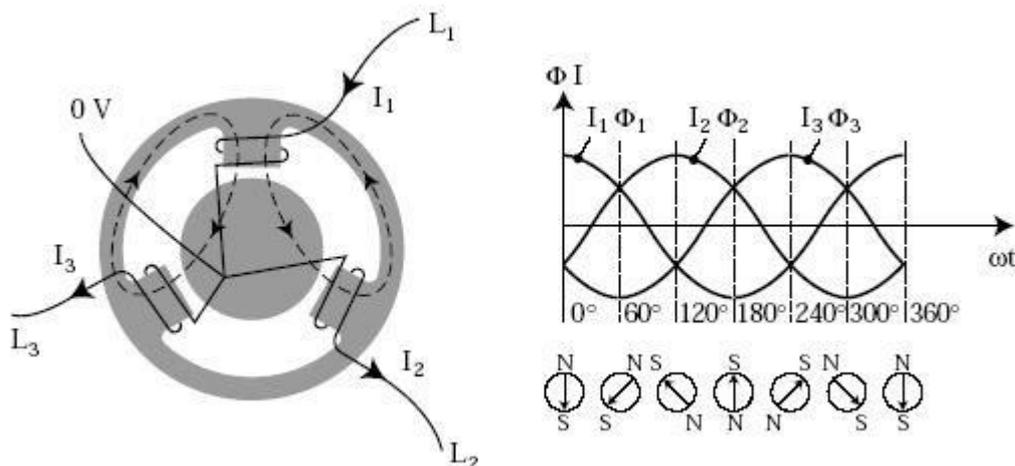


Figura 6 - Três fases resultam num campo magnético girante e simétrico.

O estator está, agora, conectado a uma fonte de tensão trifásica e os campos magnéticos de cada enrolamento constroem um campo magnético simétrico, girante chamado de campo girante do motor. A amplitude do campo girante é constante e igual a 1,5 vezes o valor máximo dos campos alternados. A velocidade de rotação é:

$$n = \frac{f \times 60}{p} \text{ [1/min]}$$

f = frequência

n_0 = velocidade síncrona

p = número de par de polos

A velocidade então depende do número de par de pólos (p) e da frequência (f) da fonte de alimentação.

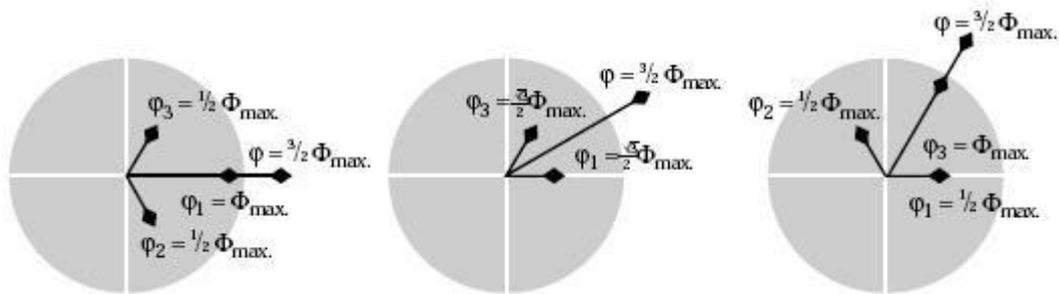


Figura 7 - Campo resultante em três momentos diferentes.

A visualização do campo magnético como um vetor e sua correspondente velocidade angular forma um círculo. Como uma função do tempo num sistema de coordenadas, o campo girante forma uma curva senoidal. O campo girante se torna elíptico se a amplitude variar durante a rotação.

Rotor

Assim como o estator o rotor é feito de folhas de ferro com abertura entre elas. Existem dois tipos principais de rotor: o rotor bobinado e o rotor curto-circuitado.

Rotores bobinados, assim como os estatores, possuem três enrolamentos, um para cada fase, que são conectados através de um anel coletor. Após o curto-circuito do anel coletor, o rotor irá funcionar como um rotor curto-circuitado.

Rotores curto-circuitados possuem barras de alumínio que passam através das ranhuras. Um anel de alumínio é colocado em cada extremidade do rotor para curto-circuitar as barras.

O rotor curto-circuitado é o mais usado dos dois. Visto que os dois rotores trabalham basicamente da mesma forma, apenas o rotor curto-circuitado será estudado.

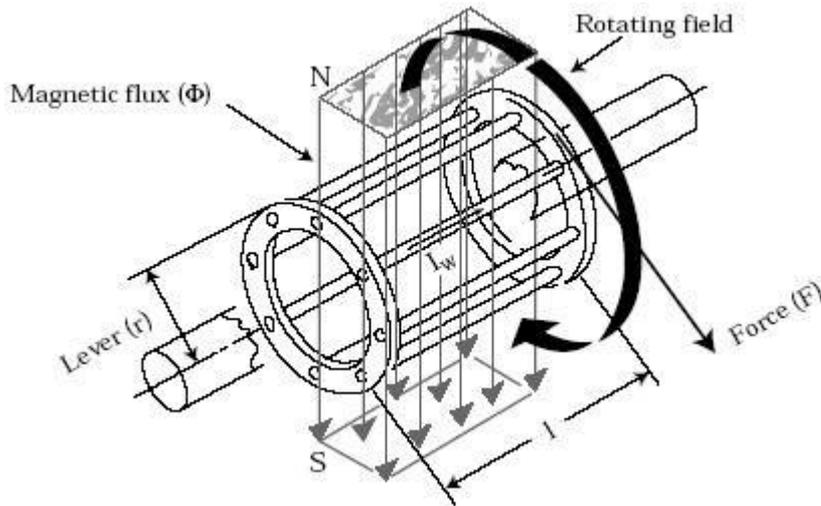


Figura 8 - Campo girante e o rotor curto-circuitado.

Quando uma barra do rotor é colocada num campo girante, um pólo magnético passa através da barra. O campo magnético do pólo induz uma corrente (I_w) no rotor que é afetada apenas pela força (F).

A força é determinada pela densidade de fluxo (B), a corrente induzida (I_w), o tamanho do rotor (l) e o ângulo (θ) entre a força e a densidade de fluxo.

$$F = B \times I_w \times l \times \sin(\theta)$$

Se assumirmos que (θ) vale 90° :

$$F = B \times I_w \times l \tag{Eq. 1}$$

O próximo pólo que irá passar pelo rotor tem a polaridade invertida. Isso induz uma corrente na direção contrária. Visto que a direção do campo magnético também mudou, a força age na mesma direção que antes.

Quando todo o rotor é colocado no campo girante. A velocidade do rotor não irá atingir a velocidade do campo girante, posto que na mesma velocidade, nenhuma corrente seria induzida no rotor.

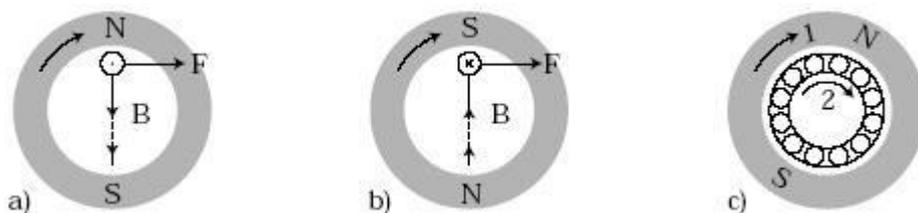


Figura 9-Indução nas barras do rotor.

Escorregamento, torque e velocidade.

Sobre circunstância normais, a velocidade do rotor, n_n , é menor do que a velocidade do campo girante, n_0 . O escorregamento, s , é a diferença entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor.

O escorregamento é normalmente expresso como uma porcentagem da velocidade síncrona e normalmente está entre 4 e 11% da velocidade nominal.

$$s = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \times 100[\%]$$

A densidade de fluxo (B) é definida como o fluxo (Φ) que atravessa a seção transversal (A). Da equação 1 a seguinte força pode ser calculada:

$$F = \frac{\Phi \times I_w \times l}{A} \quad \text{Eq.2}$$

$$F \sim \Phi \times I_w$$

Nas barras do rotor, uma tensão é induzida via um campo magnético. Essa tensão faz com que uma corrente (I_w) circule através das barras curto circuitadas. As forças de cada barra do rotor são combinadas para gerar um torque, T, no eixo do motor.

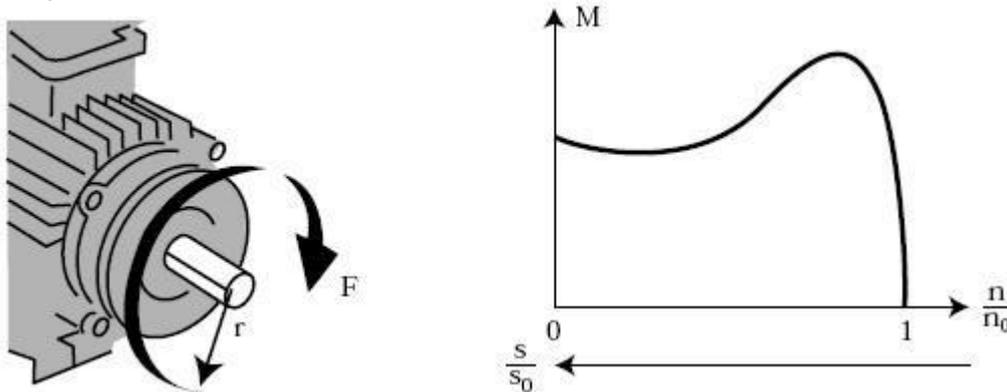


Figura 10 - O torque do motor: "força vezes o braço da alavanca".

A relação entre o torque do motor e a sua velocidade tem uma característica que varia com a construção do rotor. O torque do motor resulta numa força que faz girar o seu eixo.

A força aparece, por exemplo, no caso de um volante montado no eixo. Com a força (F) e o raio (r) do volante, o torque do motor pode ser calculado:

$$\tau = F \times r$$

O trabalho feito pelo motor pode ser expresso como: $W = F \times d$, onde d é a distância que o motor percorre para uma dada carga, n é o número de revoluções: $d = n \times 2 \times \pi \times r$.

O trabalho também pode ser expresso pela potência multiplicada pelo tempo pelo qual essa potência é solicitada: $W = P \times t$.

O Torque é então:

$$T = F \times r = \frac{W}{d} \times r = \frac{(P \times t \times r)}{n \times 2 \times \pi \times r}$$

$$T = \frac{P \times 9550}{n} \quad (t = 60s)$$

Essa fórmula mostra a relação entre a velocidade, n, o T [Nm] e a potência do motor P [kW].

A fórmula dá uma visão rápida quando observamos n, T e P em relação aos valores correspondentes num ponto de operação (n_r , T_r , P_r).

Existem alguns pontos importantes na região de trabalho do motor:

Cp é o torque de partida – aparece quando é aplicado aos terminais do motor tensão e frequência nominal quando o motor ainda está estacionário.

Cmáx é o torque máximo – é o maior torque que o motor é capaz de fornecer enquanto a tensão e a frequência nominal são aplicadas.

Cn é o torque nominal. Os valores nominais indicam o ponto de operação ótimo do motor para uma conexão direta à rede de alimentação. Eles podem ser lidos na placa do motor e são também conhecidos como dados de placa do motor.

Eficiência e Perdas

O motor toma potência elétrica da rede. Numa carga constante, a entrada de potência é maior que a potência mecânica de saída que o motor pode fornecer devido as perdas – ou ineficiência – do motor. A relação entre a potência de saída e a potência de entrada é dada por η .

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

A eficiência típica de um motor de indução está entre 0,7 e 0,9, dependendo do tamanho do motor e do número de pólos.

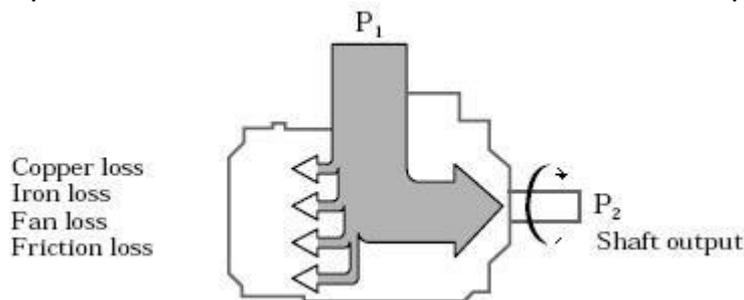


Figura 11 - Perdas num motor de indução.

Existem quatro principais causas de perdas no motor de indução:

1. perdas no enrolamento estatórico (perdas no cobre);
2. perdas magnéticas no núcleo (perdas no ferro);
3. perdas por atrito
4. perdas na ventilação;

As perdas no cobre ocorrem devido à resistência ôhmica dos enrolamentos do estator e do rotor.

As perdas no ferro são devidas às perdas por histerese e por correntes de Foucault.

Perdas por atrito são devidas aos rolamentos.

Perdas na ventilação são devidas à resistência do ar no ventilador do motor.

Campo Magnético

Os motores elétricos tem sido desenvolvidos para tensão e frequência de alimentação fixas e a magnetização do motor depende da relação entre a tensão e a frequência.

Se a relação tensão/freqüência aumenta, o motor é sobre magnetizado, se a relação diminui, o motor é sub magnetizado. O campo magnético de um motor sub magnetizado é enfraquecido e o torque que o motor é capaz de fornecer é reduzido, possivelmente levando a uma situação que o motor não consegue partir ou permanece estacionário. Ou então, o tempo de partida é estendido, levando a uma sobrecarga no motor.

Um motor sobre magnetizado é sobrecarregado durante a operação. A potência dessa magnetização extra é convertida em calor no motor e pode danificar a sua isolação. Entretanto, motores CA e - em particular – os assíncronos são muito robustos e o problema de magnetização só irá danificar o motor se ela ocorrer em operação contínua.

O “jeito” que o motor trabalha indica quando as condições de magnetização estão ruins – sinais a serem considerados são a diminuição de velocidade na variação de carga, instabilidade, vibração do motor, etc...

Circuito Equivalente

Basicamente, motores assíncronos consistem em seis bobinas: três no estator e três no rotor curto-circuitado (que magneticamente se comportam como se consistissem em três bobinas). Através do estudo do conjunto de bobinas é possível a construção de um diagrama elétrico, que retrata como o motor trabalha.

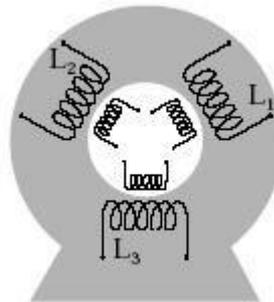


Figura 12- Layout das bobinas do estator e do rotor.

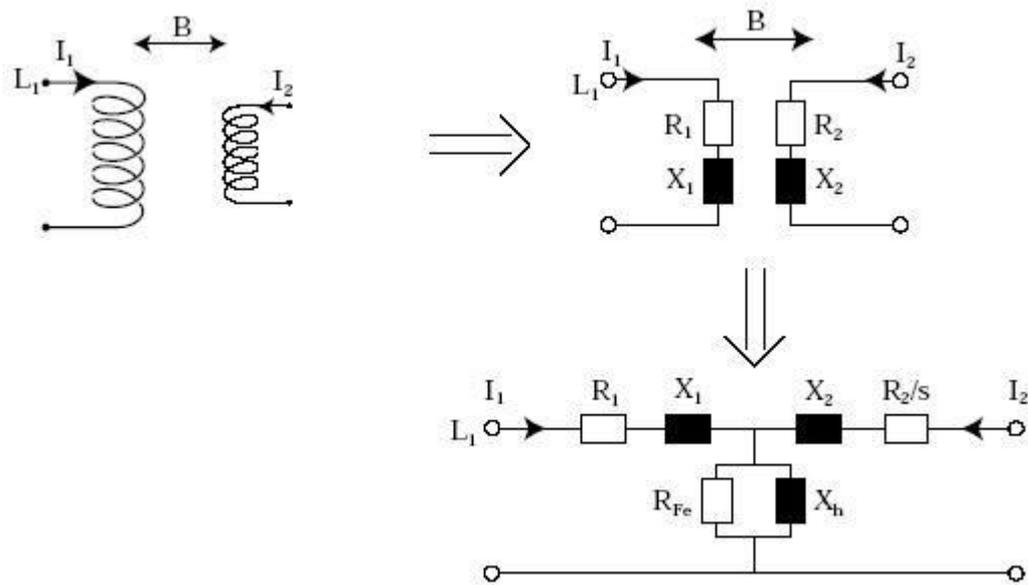


Figura 13 - Circuito elétrico equivalente do motor aplicado à fase 1.

A corrente da bobina do estator não é limitada apenas pela resistência ôhmica da bobina. Quando esta é ligada a uma fonte CA outra resistência aparece. Esta resistência é denominada reatância ($X_L = 2 \times \pi \times f \times L$) e é medida em ohms (Ω).

F é a freqüência e $2 \times \pi \times f$ é a freqüência angular ω medida em $\frac{1}{s}$.

L é a indutância da bobina e é medida em Henry (H).

A corrente efetiva é então limitada com dependência da freqüência.

As bobinas se influenciam mutuamente através do campo magnético (B). A bobina do rotor gera uma corrente na bobina do estator e vice versa. Essa influencia mútua indica que os dois circuitos elétricos podem ser conectados através de uma ligação comum formada por R_{Fe} e X_h – a contra resistência e a contra reatância. A corrente que o motor drena para magnetização do estator e do rotor fluem através deles. A queda de tensão no “ramo comum” é chamada de tensão induzida.

Condições de operação do motor

Se o motor trabalha na sua faixa de operação normal, a freqüência do rotor é menor que a freqüência do campo girante e X_2 é reduzido por um fator s (slip ou escorregamento).

No circuito equivalente, o efeito é descrito através da mudança da resistência rotórica R_2 por um fator $\frac{1}{s}$.

$\frac{R_2}{s}$ pode ser escrito como $R + R \times \frac{1-s}{s}$ onde $R \times \frac{1-s}{s}$ é a carga mecânica sobre o motor.

Os valores R_2 e X_2 representam o rotor. R_2 é a causa das perdas por temperatura do rotor quando o motor está sob regime.

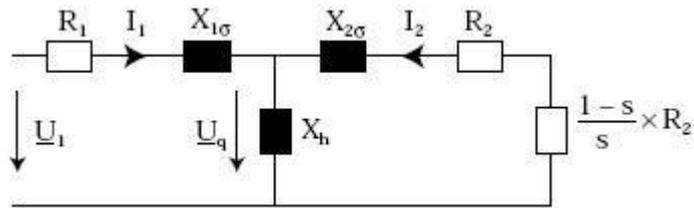


Figura 14 - Circuito elétrico equivalente do motor.

O escorregamento, s , tende a zero quando o motor está a vazio.

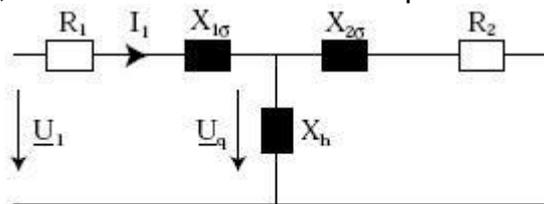
Isso significa que $R \times \frac{1-s}{s}$ aumenta.

Conseqüentemente, virtualmente nenhuma corrente iria passar pelo rotor. Idealmente, essa é a situação em que a resistência (representado a carga mecânica) é removida do circuito elétrico equivalente.

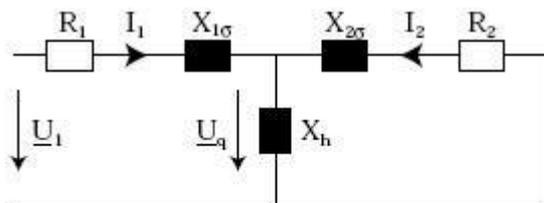
Quando colocamos carga no motor, o escorregamento aumenta,

reduzindo $R \times \frac{1-s}{s}$.

A corrente, I_2 , no rotor também aumenta quando a carga é aumentada.



a) $s \rightarrow 0 : \frac{1-s}{s} \times R_2 \rightarrow \infty$



b) $s \rightarrow 1 : \frac{1-s}{s} \times R_2 \rightarrow 0$

Figura 15 - Diagramas equivalentes do motor a vazio e do motor com rotor bloqueado.

O circuito equivalente pode então ser usado para descrever as condições de trabalho de um motor elétrico.

Existe o perigo de erroneamente tomarmos a tensão de magnetização (U_q) como sendo a tensão dos terminais (U_1). Isso acontece porque o diagrama elétrico equivalente é simplificado para nos dar uma melhor noção das diferentes condições de trabalho do motor. Entretanto, devemos lembrar que a tensão induzida tem seu valor próximo ao da tensão terminal apenas quando o motor está a vazio.

Se a carga aumenta, I_2 e I_1 , também aumentam e a queda de tensão deve então ser levada em consideração. Isso é importante, particularmente, quando o motor é controlado por um conversor de frequência.

Mudanças de velocidade

A velocidade, n , do motor é dependente da velocidade do campo girante e pode ser expressa como:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \text{ na qual } n = \frac{(1-s) \times f}{p}$$

A velocidade do motor pode então ser alterada através da mudança:

- do número de par de pólos (por exemplo motores de dois enrolamentos);
- do escorregamento do motor (por exemplo motor com rotor bobinado);
- da frequência, f , da alimentação do motor.

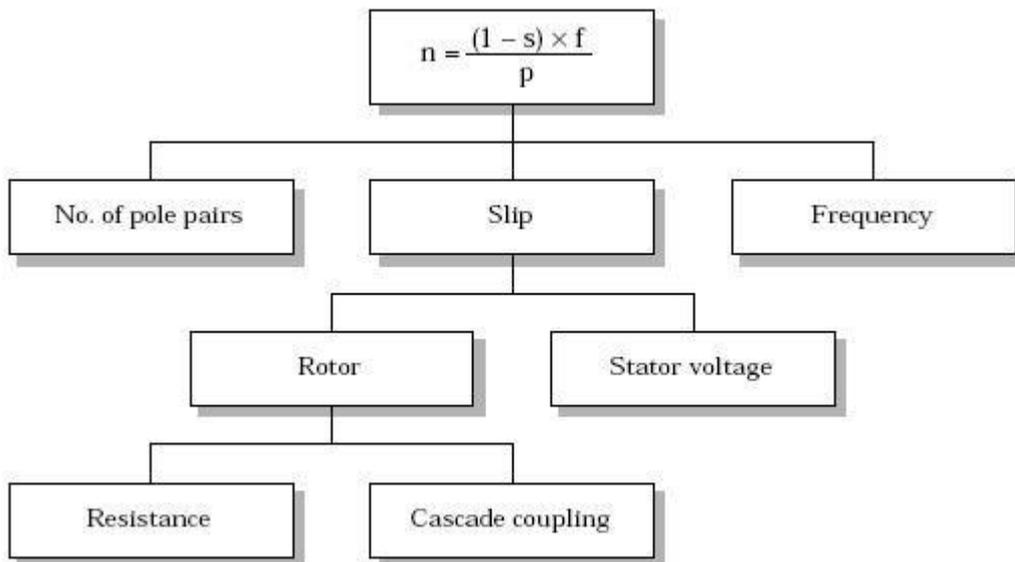


Figura 16 - Possibilidade de mudança de velocidade do motor.

Regulação por frequência

Com uma fonte de alimentação com frequência variável é possível controlar a velocidade do motor sem maiores perdas. A velocidade de giro do campo magnético muda com a frequência.

A velocidade do rotor muda de velocidade proporcionalmente ao campo girante. Para manter o torque do motor a tensão deve também variar com a frequência.

Para uma carga dada a seguinte fórmula se aplica:

$$T = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{\eta \times \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \times 9550}{f \times \frac{60}{p}} = k \times \frac{U}{f} \times I$$

$$T \sim \frac{U}{f} \times I$$

Para uma relação constante entre a frequência e a tensão de alimentação do motor, a magnetização na faixa de operação do motor também é constante.

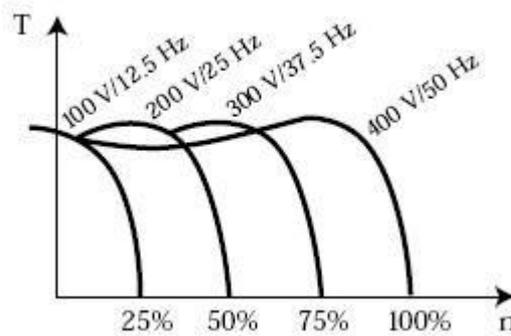


Figura 17 - Característica de torque para um controle tensão / frequência.

Em dois casos, porém, a magnetização não é ideal: na partida e em frequências muito baixas, onde uma magnetização extra é necessária, e quando operando com variação de carga, onde a variação da magnetização juntamente com a variação da carga é necessária.

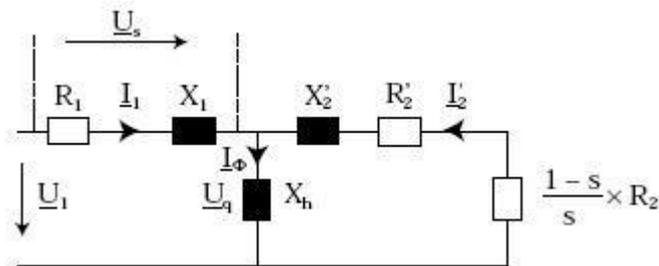


Figura 18 - Circuito equivalente do motor

Magnetização adicional na partida.

É importante observar a queda de tensão U_s em relação a tensão induzida U_q .

Tensão nos terminais: $U_1 = U_s = U_q = U_{R1} + U_{X1} + U_q$

Reatância do estator: $X_1 = 2\pi \times f \times L$

O motor foi projetado para seus valores nominais. Por exemplo a tensão de magnetização pode ser 350V quando a tensão de alimentação é de 380V e a frequência de 60Hz. Este seria o melhor ponto de magnetização.

A relação tensão frequência vale: $\frac{380}{60} = 6,333\dots$

Se a frequência é reduzida para 2,5Hz, a tensão nos terminais será 15,8V. Por causa da frequência baixa o valor da reatância, X_1 – e conseqüentemente X_h -, também é menor, e não tem nenhuma influência na queda de tensão total no estator. A queda de tensão será determinada apenas por R_1 , que corresponde aproximadamente ao valor de 15,8V.

A tensão nos terminais agora corresponde a queda de tensão através da resistência do estator, R_1 . Não existe tensão para magnetização do motor e o motor não tem condições de fornecer torque em frequências baixas se a relação tensão frequência se manter constante em toda faixa. Conseqüentemente, é importante compensar a queda de tensão durante a partida e operando com frequências baixas.

Magnetização devido a variação da carga.

Após a adaptação do motor para funcionamento com frequências baixas e durante a partida, ocorrerá uma sobre magnetização se o motor girar com pequenas cargas. Nessa situação a corrente I_1 irá diminuir e a tensão induzida irá aumentar.

O motor irá drenar uma corrente de magnetização maior e ficará desnecessariamente quente. A magnetização, então, depende da tensão aplicada ao motor, mudando automaticamente em resposta as cargas do motor.

Para uma magnetização ótima, a frequência e a variação de carga devem ser levadas em conta.

Tipos de Carga

Quando o toque do eixo do motor é igual ao torque exigido pela carga, o motor está estacionário. Nesses casos o torque e a velocidade são constantes.

As características para o motor e a máquina são dimensionadas como a relação entre velocidade e torque ou saída. As características de torque já foram discutidas. As características da máquina podem ser divididas em quatro grupos.

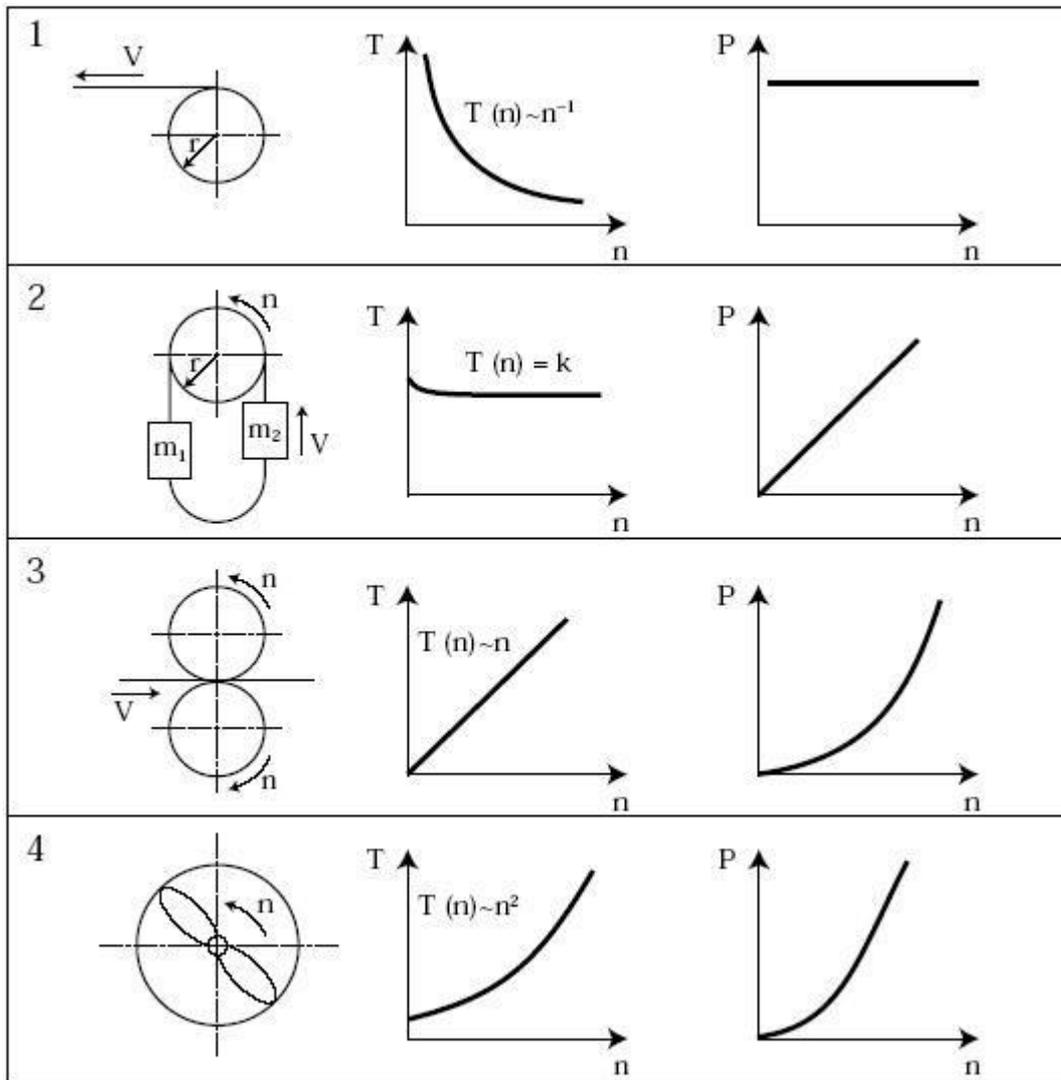


Figura 19 - Características típicas das máquinas.

O primeiro grupo (1) consiste em máquinas para girar materiais sobre tensão. Este grupo inclui, por exemplo, cortadoras de chapa e máquinas ferramenta.

O grupo (2) consiste em correias transportadoras, guindastes, bombas de deslocamento positivo, assim como máquinas ferramentas.

O grupo (3) consiste em máquinas cilíndricas, máquinas para aplainamento e outras máquinas de processamento.

O grupo (4) compreende máquinas operando por forças centrífugas, como centrífugas, bombas centrífugas e ventiladores.

O estado estacionário ocorre quando o torque do motor e da máquina são idênticos.

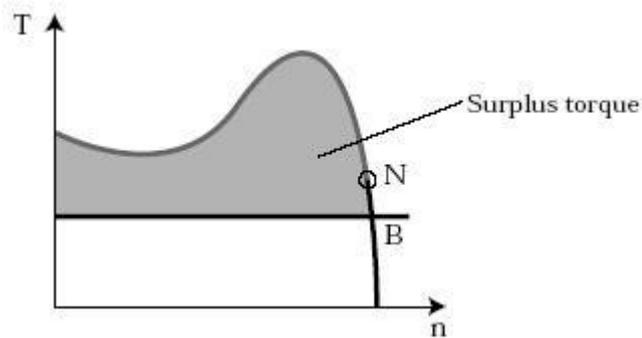


Figura 20 - O motor precisa de um torque extra para acelerar.

Quando um motor é dimensionado para uma dada máquina, o ponto de intersecção deveria ser o mais próximo possível do ponto N para os valores nominais do motor.

Um torque excedente deve estar disponível dentro da faixa (parado ao ponto de intersecção). Se esse não é o caso, a operação se tornará instável e o estado estacionário pode mudar se a velocidade é muito baixa. Uma das razões disso é que o torque excedente é necessário para aceleração.

Em particular para as máquinas dos grupos 1 e 2, é necessário levar em conta essa condição de partida. Estes tipos de carga podem ter um torque inicial que é o mesmo torque de partida do motor. Quando o torque inicial da carga é maior que o torque de partida do motor, o motor não conseguirá partir.

Conversores de Freqüência

Desde de meados da década de 60, os conversores de freqüência tem passado por várias e rápidas mudanças, principalmente pelo desenvolvimento da tecnologia dos microprocessadores e semi-condutores e a redução dos seus preços. Entretanto, os princípios básicos dos conversores de freqüência continuam o mesmo.

Os conversores de freqüência podem ser divididos em quatro componentes principais:

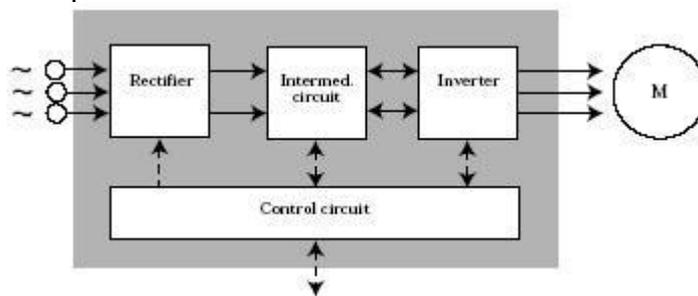


Figura 21- Conversor de freqüência simplificado.

1. O retificador que é conectada a uma fonte de alimentação externa alternada mono ou trifásica e gera uma tensão contínua pulsante. Existem basicamente dois tipos de retificadores – controlados e não controlados.
2. O circuito intermediário. Existem três tipos:

- a. Um que converte a tensão do retificador em corrente contínua.
 - b. Um que estabiliza ou alisa a tensão contínua e coloca-a a disposição do inversor.
 - c. Um que converte a tensão contínua do retificador em uma tensão alternada variável.
3. O Inversor que gera a tensão e a freqüência para o motor. Alternativamente, existem inversores que convertem a tensão contínua numa tensão alternada variável.
 4. O circuito de controle, que transmite e recebe sinais do retificador, do circuito intermediário e do inversor. As partes que são controladas em detalhes dependem do projeto individual de cada conversor de freqüência.

O que todos os conversores de freqüência tem em comum é que o circuito de controle usa sinais para chavear o inversor. Conversores de freqüência são divididos de acordo com o padrão de chaveamento que controla a tensão de saída para o motor.

Conversores diretos também devem ser mencionados para conhecimento. Esses conversores são usados em potências da ordem de MW para gerar freqüências baixas diretamente da alimentação e sua saída máxima está em torno de 30Hz.

O Retificador

A tensão de alimentação é do tipo tensão alternada trifásica ou monofásica com freqüência fixa (ex 3 x 380V/60Hz ou 1 x 220V/60Hz) e suas características podem ser ilustradas abaixo:

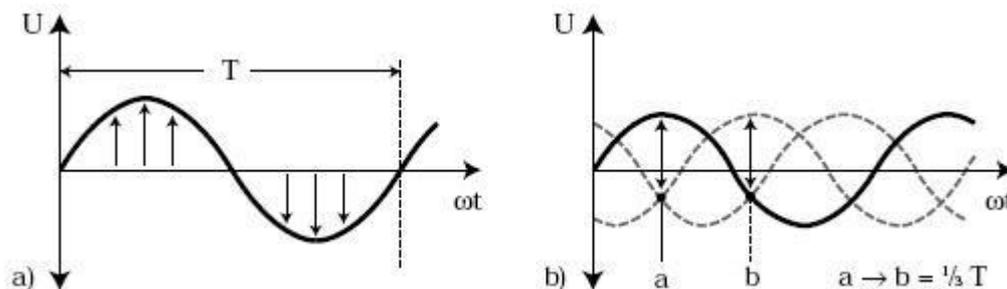


Figura 22 - Tensões monofásica e trifásica.

Na figura 22, as três fases estão deslocadas no tempo, o valor da tensão constantemente muda de direção, e a freqüência indica o número de períodos por segundo. Uma freqüência de 60Hz significa que são 60 períodos por segundo ($50 \times T$), cada período dura 16,67ms.

O retificador de um conversor de freqüência consiste tanto de diodos quanto de tiristores ou uma combinação deles. O retificador feito apenas com diodos é um retificador não controlado e o composto por tiristores é controlado, se ambos são utilizados, então o retificador é semi-controlado.

Retificadores não controlados

Os diodos são componentes semi-condutores que permitem a passagem da corrente em apenas uma direção: do anodo (A) para o catodo (K). Não é possível - como é o caso de outros componentes semi condutores - controlar a intensidade da corrente. Uma tensão alternada sobre um diodo é convertida em uma tensão CC pulsante. Se uma fonte trifásica é utilizada junto com um retificador não controlado, a tensão CC continuará a ser pulsante.

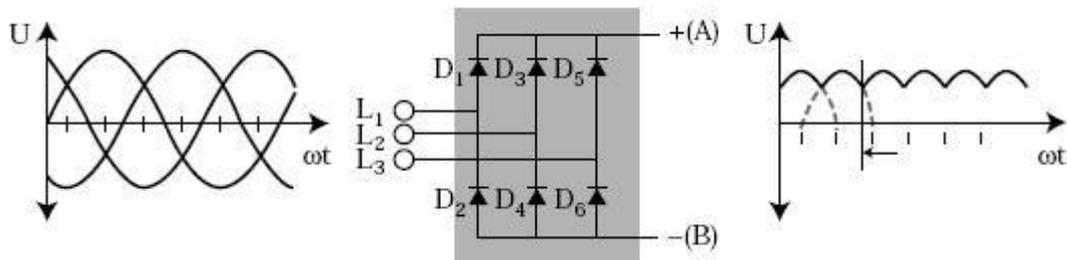


Figura 23 - Retificador não controlado

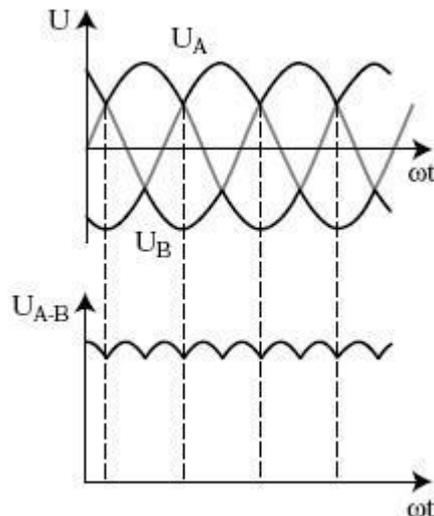


Figura 24 - Saída de um retificador não controlado.

Retificadores controlados

Nos retificadores controlados os diodos são trocados pelos tiristores. Assim como os diodos, o tiristor permite a passagem da corrente em apenas uma direção. Entretanto, a diferença entre esses dois componentes é que o tiristor tem um terceiro terminal o gate ou porta (G). Essa porta deve ser comandada por um sinal antes do tiristor conduzir. Quando uma corrente passa pelo tiristor, o tiristor irá conduzi-la até que ela atinja o valor nulo.

A corrente não pode ser interrompida por um sinal na porta (G). Tiristores são utilizados tanto nos retificadores quanto nos inversores.

O sinal para a porta é o sinal de controle α do tiristor, que é um atraso de tempo, expresso em graus. O valor em graus representa o atraso entre a passagem da tensão por zero e o instante em que o tiristor inicia sua condução.

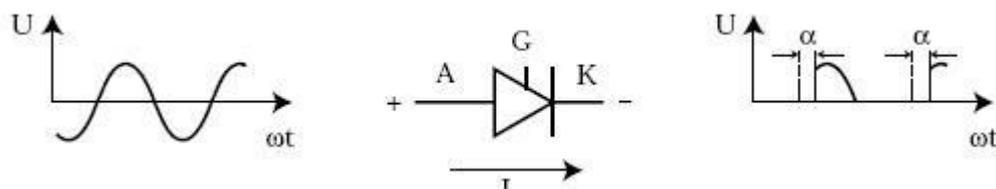


Figura 25 - Condução do tiristor.

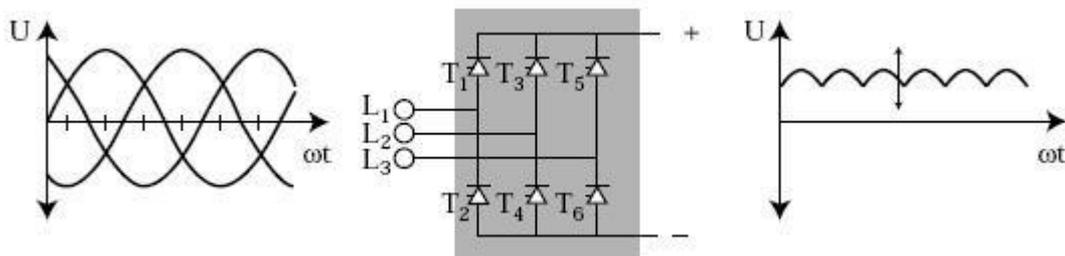


Figura 26 - Retificador controlado trifásico.

O retificador controlado tem basicamente a mesma configuração do retificador não controlado com exceção de que os tiristores são controlados por α e começam a conduzir a partir do ponto que um diodo normal inicia até 30° de atraso em relação a passagem da tensão por zero.

A regulação de α permite a variação do valor da tensão contínua na saída do retificador. Um retificador controlado fornece uma tensão CC com um valor médio de $1,35 \times \text{tensão de alimentação} \times \cos \alpha$.

Comparado com o retificador não controlado, o controlado causa maiores perdas e distúrbios na rede de alimentação, porque o retificador drena uma corrente reativa maior se o tiristor conduzir por um curto período de tempo.

Entretanto, a vantagem dos retificadores controlados é que a energia poder ser devolvida para rede.

O circuito intermediário

O circuito intermediário pode ser visto como um reservatório do qual o motor pode drenar energia através do inversor. Ele pode ser construído de acordo com três princípios diferentes dependendo do tipo de retificador e inversor.

Inversores fonte de corrente (I-converters).



Figura 27 - I-converters

Em inversores fonte de corrente o circuito intermediário consiste de um grande indutor e é combinado apenas com um retificador controlado. O indutor

transforma a tensão variável do retificador em uma corrente contínua variável. A carga determina a amplitude da tensão do motor.

Inversores fonte de tensão (U-converters)

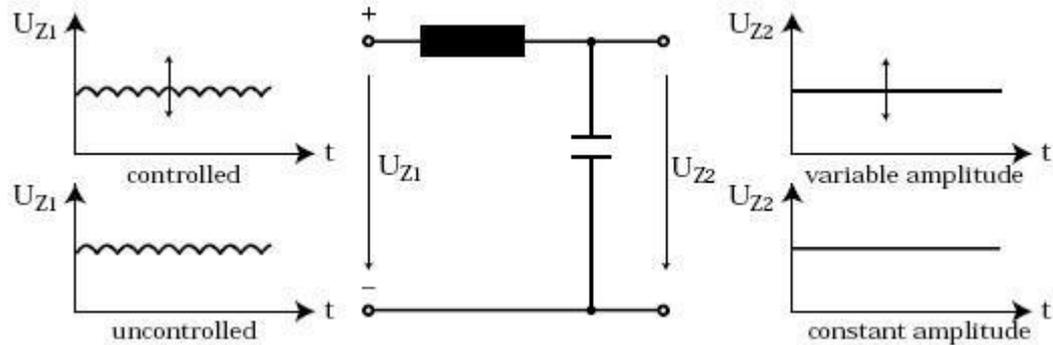


Figura 28 - U-converters

Em conversores fonte de tensão o circuito intermediário consiste em um filtro capacitivo e pode ser combinado com os dois tipos de retificador. O filtro alisa a tensão pulsante do retificador.

Num retificador controlado, a tensão é constante numa dada frequência, e fornecida ao inversores como uma tensão contínua pura com amplitude variável.

Com retificadores não controlados, a tensão na entrada do conversor é uma tensão CC com amplitude constante.

Circuito intermediário com tensão CC variável

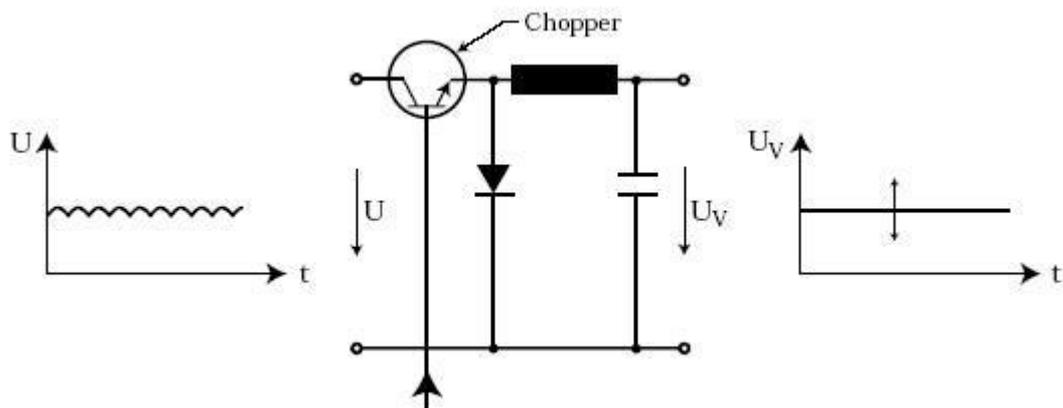


Figura 29 - Circuito intermediário com tensão variável.

Finalmente, num circuito intermediário com tensão variável um chopper pode ser inserido na frente do filtro, como visto na figura 29.

O chopper tem um transistor que funciona como uma chave para ligar ou desligar a tensão do retificador. O circuito de controle regula o chopper através da comparação da tensão variável depois do filtro com um sinal de entrada. Se existe diferença, a relação é regulada pelo tempo que o transistor conduz e o tempo que ele é bloqueado. Isso varia o valor efetivo e o tamanho da tensão contínua pode ser expresso como:

$$U_V = U \times \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} .$$

Quando o transistor do chopper interrompe a corrente, a bobina do filtro faz com que a tensão através do transistor seja muito grande. Para impedir que isso aconteça, o chopper é protegido por um diodo de roda-livre.

O filtro do circuito intermediário alisa a tensão quadrada que é fornecida pelo chopper. O filtro capacitivo e indutivo mantém a tensão constante para uma dada frequência.

O circuito intermediário também pode fornecer inúmeras funções adicionais dependendo do seu projeto, como:

- Desacoplamento entre o retificador e o inversor.
- Redução de harmônicas.
- Reserva de energia para suportar variações bruscas de carga.

O Inversor

O inversor é a última conexão do inversor de frequência antes do motor e o ponto final onde a adaptação da tensão de saída ocorre.

Do circuito intermediário o conversor pode receber tanto:

- Uma corrente contínua variável
- Uma tensão contínua variável
- Uma tensão contínua constante.

Em todos os casos o inversor assegura que a saída para o motor se torna variável. Em outras palavras, a frequência para o motor é gerada no inversor. Se a corrente ou tensão são variáveis, o inversor gera apenas a frequência. Se a tensão é constante o inversor gera a tensão e a frequência.

Mesmo que os inversores trabalhem de formas diferentes, sua estrutura básica é sempre a mesma. Os componentes principais são semi condutores controláveis, colocados em par em três ramos.

Atualmente os tiristores tem sido largamente substituídos pelos transistores que podem ser chaveados de forma mais rápida. Apesar de depender do tipo de semicondutor utilizado, a frequência de chaveamento esta tipicamente entre 300Hz e 20kHz.

Os semi condutores no inversor são ligados e desligados por sinais gerados no circuito de controle. Os sinais podem ser controlados de diversas formas.

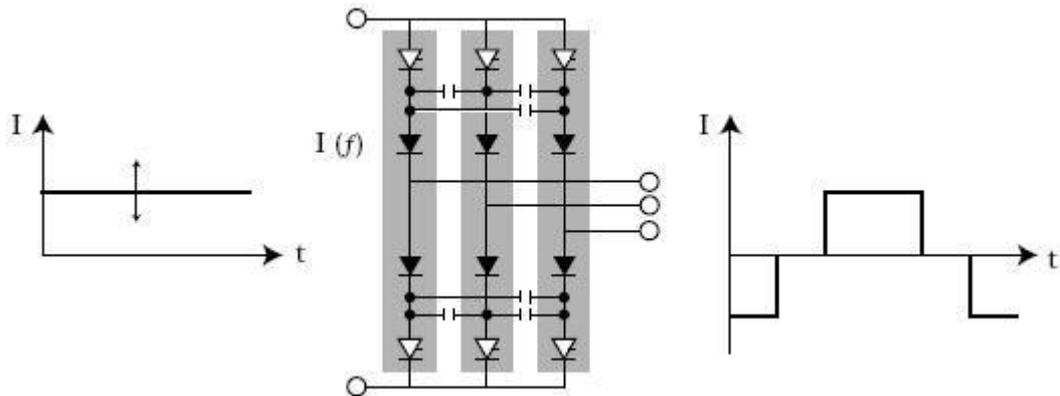


Figura 30 - Inversor Tradicional.

Inversores tradicionais, trabalhando principalmente com circuitos intermediários de tensão variável, consistem de seis diodos, seis tiristores e seis capacitores.

Os capacitores habilitam os tiristores a chavear, de forma que a corrente esteja defasada 120° elétricos nas bobinas do motor e devem ser adaptadas ao tamanho do motor. Um campo girante intermitente com a frequência desejada é produzido quando os terminais do motor são excitados com corrente U-V, V-W, W-U, U-V... Mesmo que isso faça a corrente do motor quase quadrada, a tensão do motor é quase senoidal. Entretanto, sempre existem picos de tensão quando a corrente é chaveada.

Os diodos isolam os capacitores da corrente de carga do motor.

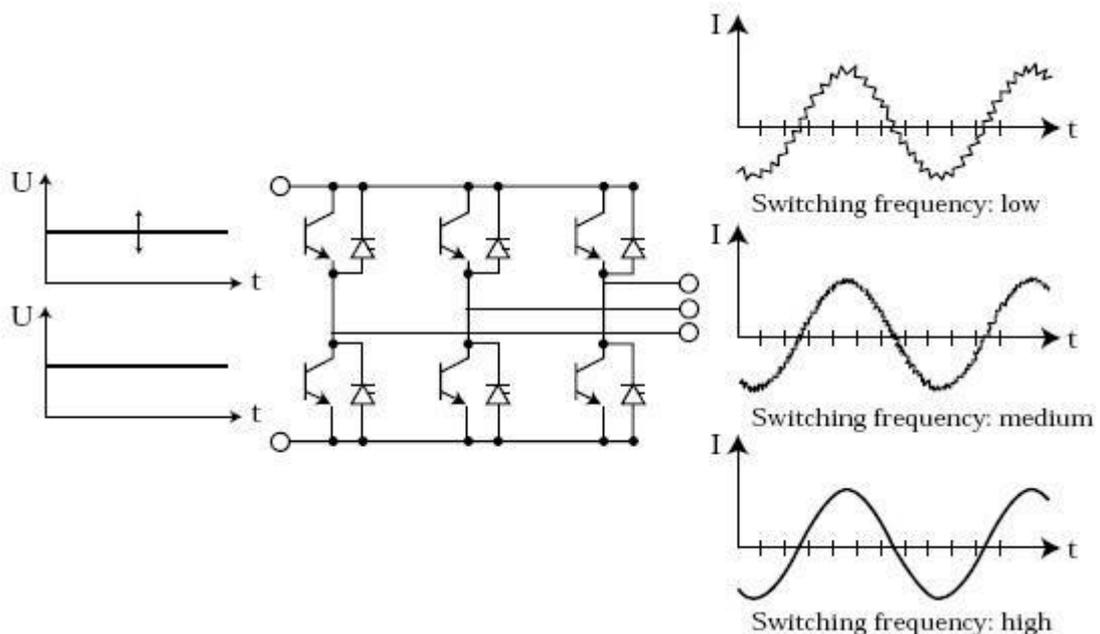


Figura 31 - Inversor para tensão constante ou variável e a saída que depende da frequência de chaveamento dos transistores.

Em inversores com circuitos intermediários de tensão constante ou variável existem seis componentes chaveadores e independentemente do tipo de semicondutor utilizado, a função é basicamente a mesma. O circuito de controle chaveia os semicondutores utilizando-se das mais diversas técnicas de modulação, mudando, dessa forma, a frequência de saída do inversor.

A primeira técnica trabalha com tensão ou corrente variável no circuito intermediário.

Os intervalos em que os semicondutores individualmente são conduzidos são colocadas numa seqüência que é usada para se obter as freqüências de saída desejada.

Essa seqüência de chaveamento é controlada pela amplitude da tensão ou corrente do circuito intermediário. Utilizando-se um oscilador controlado por tensão, a freqüência sempre obedece a amplitude da tensão. Esse tipo de inversor é chamado de PAM (Pulse Amplitude Modulation ou Modulação por amplitude de pulso).

A outra principal técnica usa um circuito intermediário de tensão constante. A tensão no motor é conseguida aplicando-se a tensão do circuito intermediário por períodos mais longos ou mais curtos.

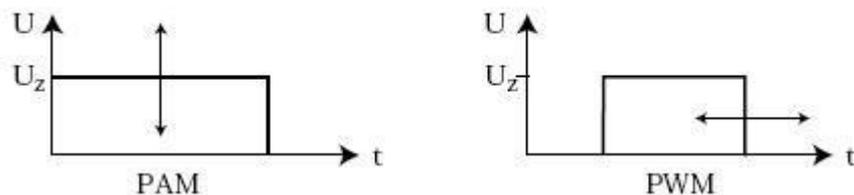


Figura 32 - Modulação por amplitude e por largura de pulso.

A freqüência é mudada através da variação dos pulsos de tensão ao longo do eixo do tempo – positivamente para meio período e negativamente por o outro meio.

Como a técnica muda a largura dos pulsos de tensão, ela é chamada de PWM (Pulse Width Modulation ou Modulação por Largura de Pulso). PWM (e técnicas relacionadas com ela como PWM controlada pelo seno) é a técnica mais utilizada no controle dos inversores.

Nas técnicas PWM o circuito de controle determina os tempos de chaveamento dos semicondutores através da intersecção entre um tensão triangular e uma tensão senoidal superposta (PWM controlada pelo seno).

O Circuito de Controle

O circuito de controle ou placa de controle é a quarta peça do conversor de freqüência e tem quatro tarefas essenciais:

- Controlar os semicondutores do conversor de freqüência.
- Troca de dados entre o conversor de freqüência e os periféricos.
- Verificar e reportar mensagens de falha.
- Cuidar das funções de proteção do conversor de freqüência e do motor.

Os micro-processadores tem aumentado sua capacidade de processamento e velocidade, aumentando significativamente o número de aplicações possíveis aos conversores de frequência e reduzindo o número de cálculos necessários a sua aplicação.

Com os micro-processadores o processamento é integrado dentro do conversor de freqüência e este está apto a determinar o melhor padrão de chaveamento para cada estado de operação.

Conversores de Freqüência e Motores

Características de torque do motor.

Se um inversor de freqüência fosse capaz de fornecer uma corrente muitas vezes maior que a corrente nominal do motor, a sua característica de torque seria como visto na figura 10.

Mas correntes dessa magnitude podem danificar tanto o motor como o conversor de freqüência. Conseqüentemente o conversor de freqüência indiretamente limita os valores de corrente através da redução da tensão e da freqüência. O limite de corrente é variável e garante que o motor não ficará excedendo por muito tempo sua corrente nominal. Visto que o conversor de freqüência controla a velocidade do motor independentemente da carga, é possível parametrizar diferentes limites dentro da faixa de trabalho do motor.

As características de torque do motor estão dentro dos valores nominais para alguns tipos conversores de freqüência. Entretanto, seria uma vantagem se o conversor permitisse que o torque atingisse 160% do torque nominal por exemplo. É também normal que o inversor opere o motor numa velocidade acima da velocidade síncrona como por exemplo 200% da velocidade nominal.

O conversor de freqüência não consegue fornecer uma tensão maior que a tensão de alimentação o que leva a um declínio da relação tensão - freqüência se a velocidade nominal for excedida. O campo magnético enfraquece e o torque gerado pelo motor cai na razão de $1/n$.

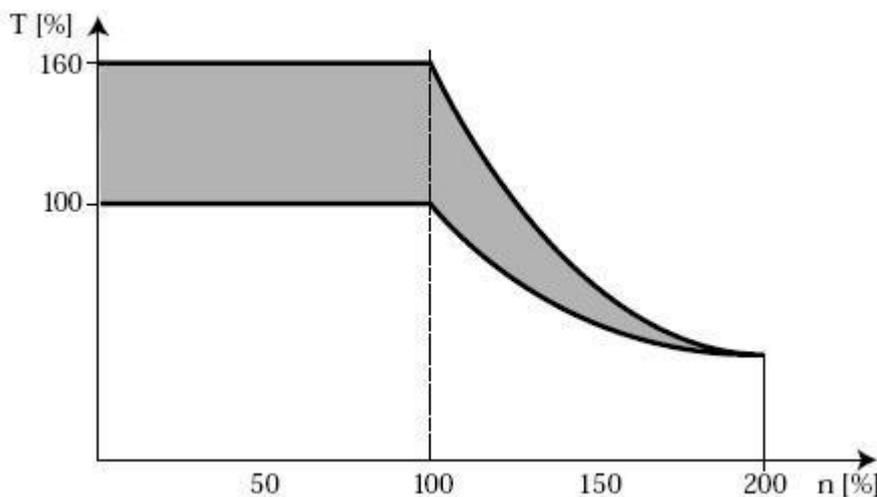


Figura 34 - Torque e sobre-torque do motor

A corrente máxima de saída do conversor se mantém constante. Isso leva a uma potência constante de saída mesmo com velocidades acima de 200%.

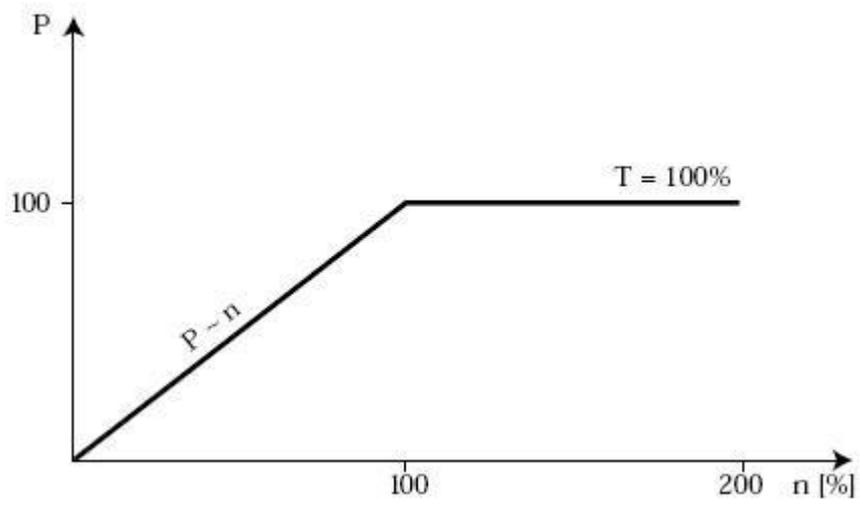


Figura 35 - Performance do motor

SOFT – STARTERS

Soft-Starters são equipamentos eletrônicos destinados ao controle da partida de motores elétricos de corrente alternada.

Quando partimos um motor através da conexão direta da fonte de alimentação com valores nominais, inicialmente ele drena a corrente de rotor bloqueado (I_{RB}) e produz um torque de rotor bloqueado (T_{RB}). Assim que o motor acelera a corrente cai e o torque aumenta antes de cair para seus valores nominais na velocidade nominal. Ambos, a magnitude e o formato das curvas de torque e corrente dependem do projeto do motor.

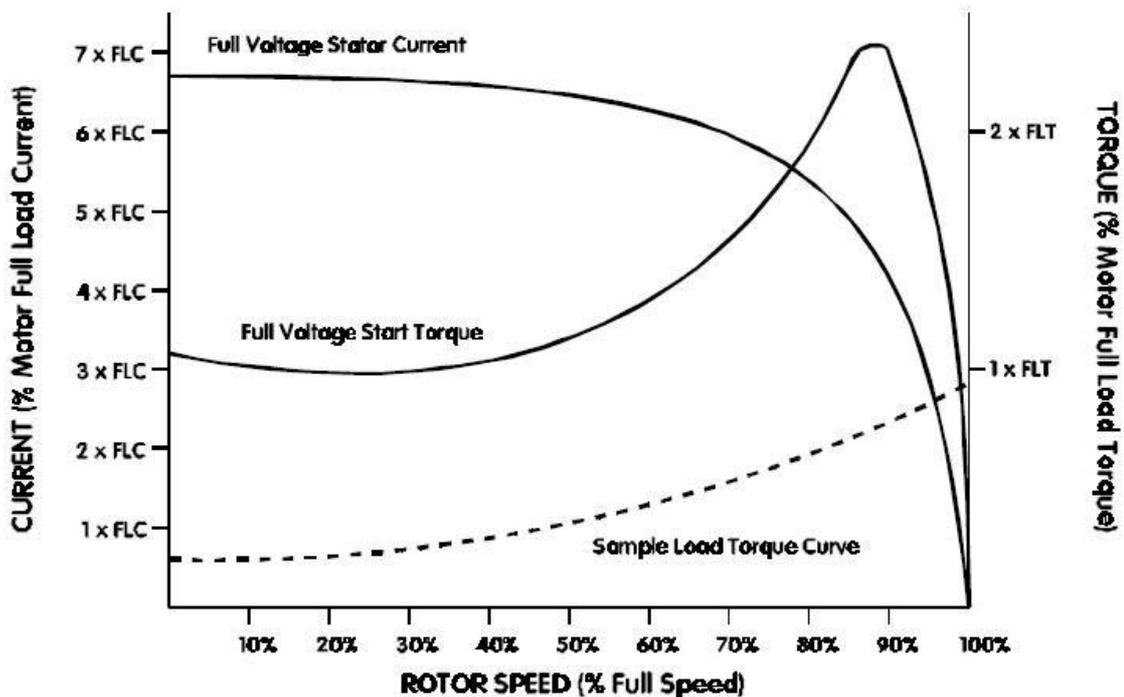


Figura 36 - Características de torque de um motor.

Motores com características de velocidade máxima quase idênticas podem ter diferenças grandes na capacidade de partida. As correntes de partida variam de 5 a 9 vezes a corrente nominal. Torques de rotor bloqueado variam desde 0,7 a 2,3 do torque nominal. As características de tensão, corrente e torques máximos formam o conjunto de limites que um partida com tensão reduzida pode administrar.

Quando um tensão reduzida de partida é utilizada, o torque de partida do motor é reduzido de acordo com a seguinte fórmula.

$$T_P = T_{RB} \times \frac{I_P^2}{I_{RB}^2}$$

A corrente de partida pode ser reduzida até o ponto onde o torque de partida continue excedendo o torque resistente (carga). Abaixo desse ponto o

motor cessará a aceleração e o motor / carga não atingirá a velocidade nominal.

Os tipos mais comuns para redução da tensão de partida são:

1. Partidas estrela / triângulo
2. Partidas com auto transformador
3. Partidas com resistência primária.
4. Soft Starters.

A partida estrela triângulo é a mais barata das formas de partida com tensão reduzida, entretanto sua performance é limitada. As duas limitações mais importantes são:

1. Não existe controle sobre a limitação do torque e da corrente de partida que são fixos em 1/3 do nominal.
2. Existem normalmente grandes transientes de corrente e torque quando há mudança da estrela para o triângulo. Isso causa estresse mecânico e elétrico.

O auto transformador oferece melhor controle da partida, entretanto a tensão continua sendo aplicada em passos. Algumas limitações do auto trafo são:

1. Transientes de torque causados pelos passos de tensão.
2. Número limitado de tapes restringe a possibilidade de selecionar a corrente ideal de partida.
3. Altos custos para partidas freqüentes ou pesadas.
4. Não consegue fornecer uma solução efetiva para partidas com características variáveis. Por exemplo, uma correia transportadora pode ser partida vazia ou com carga. O auto transformador só pode ser otimizado para uma situação.

Partida com resistência primária (rotor bobinado) também oferece grandes vantagens sobre a partida estrela triangulo. Porém, eles possuem algumas características que reduzem sua efetividade, quais sejam:

1. Dificuldade para otimizar a partida no comissionamento pois a resistência deve ser calculada quando a partida é fabricada e não é facilmente alterada depois.
2. Baixa performance com partidas freqüentes pois a resistência muda seus valores com o aquecimento. Um período longo de resfriamento é necessário entre as partidas.
3. Baixa performance em partidas longas e pesadas pois a resistência muda seus valores com o aquecimento.
4. Não consegue fornecer uma solução efetiva para partidas com características variáveis.

As soft starters são os equipamentos mais avançados para redução de tensão na partida. Elas oferecem melhor controle sobre a corrente e o torque assim como podem incorporar funções avançadas para proteção do motor e ferramentas de interface.

1. Controle simples e flexível sobre a corrente e o torque de partida.
2. Controle suave da tensão e da corrente, livre de passos ou transientes.
3. Capaz de partidas freqüentes.
4. Capaz de gerenciar partidas com características variáveis.

5. Controle Soft stop (parada suave) para aumentar o tempo de parada dos motores.
6. Controles para freio para reduzir o tempo de parada dos motores.

Tipos de controle de soft Starters

O termo soft starter é aplicado a uma gama de tecnologias. Essas tecnologias estão todas relacionadas com a partida suave de motores, mas existem diferenças significativas entre os métodos e os benefícios que os acompanham. Os soft starters podem ser divididos em da seguinte maneira:

- Controladores de torque
- Controladores de tensão em malha aberta.
- Controladores de tensão em malha fechada.
- Controladores de corrente em malha fechada.

Controladores de torque promovem apenas a redução do torque de partida. Dependendo do tipo, eles podem controlar apenas uma ou duas fases. Como consequência não existe controle sobre a corrente de partida como é conseguido com os tipos mais modernos de soft-starter.

Controladores de torque com apenas uma fase devem ser utilizados com contator e rele de sobrecarga. Eles são apropriados para aplicações pequenas. O controle trifásico deve ser usado para partidas freqüentes ou com cargas de alta inércia pois os controladores monofásicos causam um aquecimento extra na partida. Isso acontece pois a tensão nas bobinas que não são controladas ficam sob a tensão nominal. Essa corrente circula por um período maior do que durante uma partida direta resultando num sobre aquecimento do motor.

Controladores com duas fases devem ser usados com um rele de sobrecarga mas podem parar e partir o motor sem um contator, entretanto a tensão continua presente no motor mesmo que ele não esteja rodando. Se instalado dessa maneira é importante assegurar medidas de segurança.

Controladores de tensão em malha aberta controlam todas as três fases e tem todos os benefícios fornecidos pelos soft-starters. Esses sistemas controlam a tensão aplicada no motor de maneira pré configurada e não tem nenhuma realimentação de corrente. A performance da partida é conseguida configurando-se parâmetros como tensão inicial, tempo de rampa e tempo de rampa duplo. A parada suave também está disponível.

Controladores de tensão em malha aberta também devem ser usados com reles de sobre carga e com contadores se requerido. Dessa forma são componentes que devem estar agregados a outros componentes para formar um sistema de partida do motor.

Controladores de tensão em malha fechada são uma variante do sistema de malha aberta. Eles recebem realimentação da corrente de partida do motor e usam essa informação para cessar a rampa de partida do motor quando a corrente de limite configurada pelo usuário é atingida. O usuário tem as mesmas configurações do sistema de malha aberta com a adição do limite de corrente.

A informação da corrente do motor também é normalmente utilizada para fornecer um variedade de proteções baseadas na corrente. Essas funções incluem, sobre carga, desbalanceamento de fases, sub corrente, etc. Esses

são sistemas completos de partida fornecendo ambos, controle sobre a partida / parada e proteções para o motor.

Controladores de corrente em malha fechada é o mais avançado de todos. Diferentemente do sistema de tensão em malha fechada eles usam a corrente como referência principal. As vantagens dessa aproximação são controle preciso da corrente de partida e fácil ajuste. Muitos ajustes do usuário podem ser feitos automaticamente por sistemas baseados em corrente.

Correção do fator de potência.

Se for necessária a correção estática do fator de potência, os capacitores devem ser instalados do lado da alimentação do soft-starter.

