

Atuadores

Aula 04 - Máquinas Elétricas: Motores Especiais

Apresentação

Nesta quarta aula de máquinas elétricas, são apresentados os conceitos e fenômenos físicos básicos que caracterizam o funcionamento dos motores elétricos menos utilizados na indústria, mas que cada vez mais estão presentes devido ao avanço tecnológico. Dentre essas máquinas, podemos mencionar: o motor universal, o motor síncrono e o motor de passo.

Objetivos

- Distinguir outros tipos de motores que nos últimos anos tiveram grande desenvolvimento.
- Descrever o funcionamento deste tipo de motores.
- Definir os principais parâmetros elétricos e mecânicos que caracterizam estes tipos de equipamentos.

Motores Universais

Sempre houve necessidade de um motor que pudesse ser utilizado em aplicações portáteis e que pudesse funcionar em quaisquer frequências, a partir de fontes de energia diferentes, ou seja, níveis de tensão diferentes.

O motor universal é projetado para frequências comerciais variando de 0 até 60 Hz e para tensões de 1,5 a 250 V. A Figura 1 apresenta o esquema do motor, que tem o rotor em série com a bobina do estator, sendo a corrente conduzida ao rotor por meio de escovas, de modo que quando se inverte a polaridade da fonte, invertem-se também a polaridade do campo e o sentido das correntes na armadura (rotor), continuando a ser produzido torque no mesmo sentido como se vê nos itens (b) e (c) da Figura 1.

O motor universal é, por suas características de construção, um motor fabricado até a potência de 3/4 HP, pode a vazio apresentar uma velocidade elevada, necessitando de um sistema de engrenagens apropriado para que isto não ocorra. Pode ainda operar em qualquer frequência, em vários níveis de tensão, sendo usados em barbeadores elétricos, máquinas de costura, furadeiras, secadores de cabelo, aspiradores de pó etc.

Os motores universais possuem características de desempenho muito interessantes, o que determina o tipo de aplicação em que é usado. Essas características estão mostradas na Figura 2, a qual se apresenta as curvas de torque e de velocidade em função da corrente de armadura.

Observe que os motores universais possuem elevado torque em baixa rotação, para certo valor de corrente de armadura. Essa característica torna os motores universais adequados para acionamento, em corrente alternada, de vários eletrodomésticos, bem como acionamento de veículos elétricos de transporte de massa.

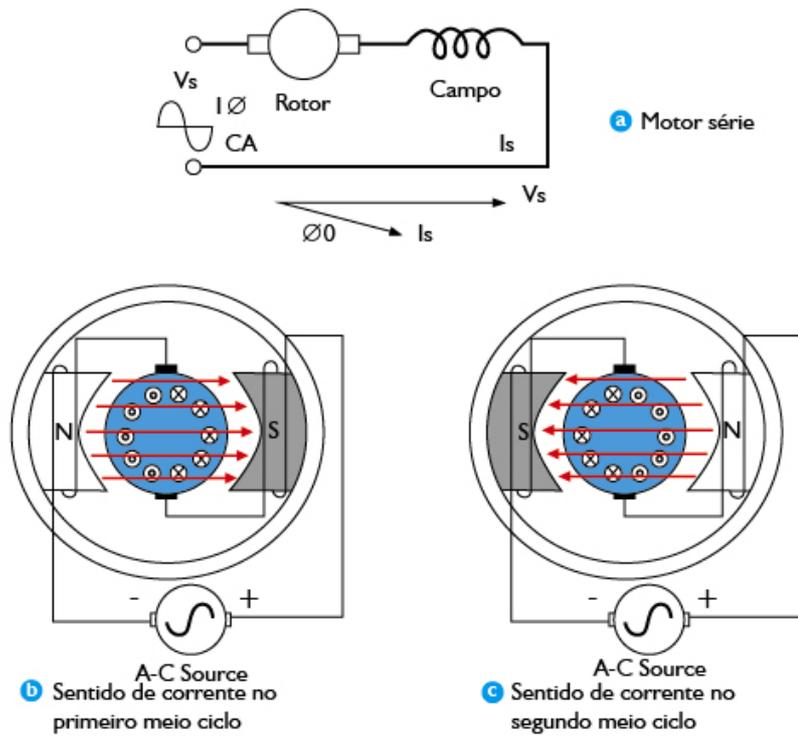


Figura 1 - Princípio de operação do motor universal série.
Fonte: Autoria Própria.

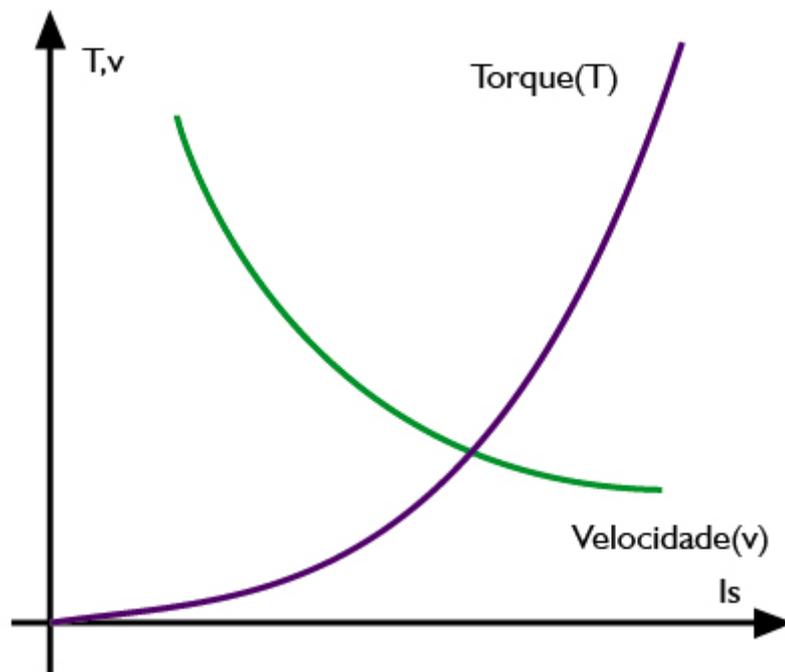


Figura 2 - Características de torque e velocidade em função da corrente de armadura.
Fonte: Autoria Própria.

Atividade 01

1. Descreva o funcionamento de motor universal.
2. Por que um motor universal gira sempre na mesma direção? Dê 3 exemplos de equipamentos que utilizam motor universal.
3. Dê 3 exemplos de equipamentos que utilizam motor universal.

Motor Síncrono

O termo SÍNCRONO tem sua origem no grego, no qual o prefixo SIN significa "com" e CRONOS é uma palavra que denota "tempo".

Um motor síncrono literalmente opera "em tempo com" ou "em sincronismo com" o sistema de alimentação. Os motores síncronos estão sendo utilizados com maior frequência pelas indústrias, devido ao fato de possuírem características especiais de funcionamento.

O alto rendimento e o fato de poderem trabalhar como compensador síncrono para corrigir o fator de potência da rede, destacam-se como os principais motivos que resultam na escolha dos MOTORES SÍNCRONOS para acionamento de diversos tipos de cargas.

Altos torques, velocidade constante nas variações de carga e baixo custo de manutenção também são características especiais de funcionamento que proporcionam inúmeras vantagens econômicas e operacionais ao usuário.

O motor síncrono é um motor de corrente alternada, tal como vimos no capítulo anterior, o motor assíncrono de indução. O estator do motor síncrono funciona da mesma forma como foi explicado na aula de Motores Assíncronos. A diferença principal neste tipo de motor está no rotor. A máquina síncrona pode classificar-se pelo tipo de rotor em:

- sem excitação;
- de ímãs permanentes;

- com enrolamentos excitados.

Como foi mencionado, o estator é idêntico ao motor de indução, que apresenta robustez, baixo custo, facilidade de fabricação (pelo menos para plantas nas quais já se fabricam motores de indução) e quase sem necessidade de manutenção.

Velocidade Síncrona

A velocidade síncrona do motor (rpm) é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pares de polos (p) do motor e da frequência (f) da rede.

Os enrolamentos do estator podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um “norte” e um “sul”) ao longo da periferia do núcleo magnético.

O campo girante percorre um par de polos (p) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem polos ou pares de polos, a velocidade do campo será:

$$rpm = \frac{60 \times f}{P}$$

O motor síncrono possui o rotor com número de polos correspondente ao número de polos do enrolamento do estator.

Durante a operação normal em regime, não há nenhum movimento relativo entre os polos do rotor e o fluxo magnético do estator, ou seja, estão em perfeito sincronismo e com isso não há indução de tensão elétrica no rotor pelo fluxo mútuo e, dessa forma, não há excitação proveniente da alimentação de corrente alternada (ca).

As bobinas dos polos podem ser feitas com muitas espiras de fio de cobre isolado ou barras de cobre, dependendo do tipo de rotor utilizado (polos lisos ou polos salientes). Em relação à alimentação do campo (excitação), é feita em corrente contínua que, ao circular pelos enrolamentos de campo, os polos são magneticamente polarizados,

tornando-se alternadamente polos norte e sul. Por sua vez, a excitação em corrente contínua pode ser aplicada no campo através dos porta-escovas e anéis coletores ou por um sistema de excitação sem escova e com controle eletrônico (brushless).

Princípio de Funcionamento de uma Máquina Síncrona

O seu princípio de funcionamento está esquematizado na Figura 3 – um motor com 2 polos. Uma corrente (contínua) de campo I_F produz um campo magnético B_R no rotor. Um sistema trifásico de tensões é aplicado aos enrolamentos do estator produzindo um campo magnético girante B_S , com o campo B_R a tender a alinhar-se com o campo B_S . No entanto, esses dois campos magnéticos nunca ficam perfeitamente alinhados, pois, mesmo sem carga, o rotor possui uma determinada inércia e, portanto, haverá sempre um desfasamento entre os dois campos, embora rodando à mesma velocidade. Esse desfasamento é medido pelo ângulo δ , apelidado de ângulo de binário (torque), que é tanto maior, quanto maior for o torque resistente, mas constante enquanto o torque resistente for constante.

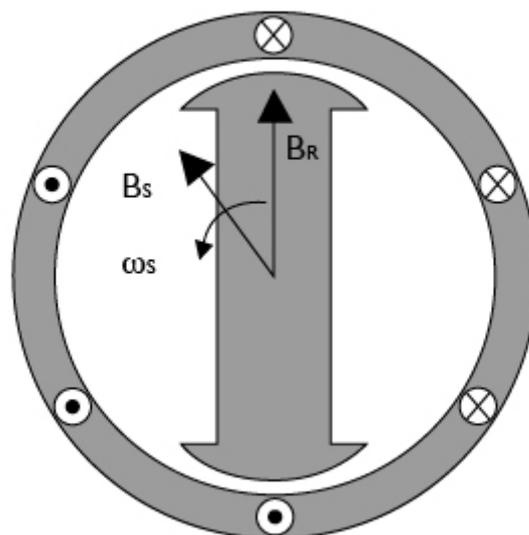


Figura 3 - magnéticos presentes em uma máquina síncrona de dois polos.

Fonte: Fitzgerald; Kingsley e Kusko (1984).

Se imaginarmos que o rotor é “puxado” pelo campo girante, como se fosse ligada a uma cola elástica, como é visto na Figura 4, quando se aumenta a carga sobre o veio, e para manter o sincronismo, o que sucede é que a cola se vai deformar (esticando-se), isto é, aumentando o ângulo de binário δ e mantendo a velocidade igual à do campo girante. O torque induzido é:

$$T_i = k B_i \times B_s$$

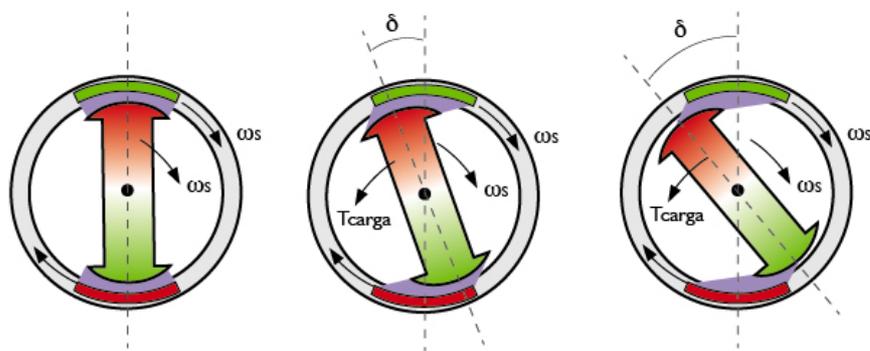


Figura 4 - O efeito de atração do campo girante do estator e polo mecânico do rotor.
Fonte: Fitzgerald; Kingsley e Kusko (1984).

Na Figura 5, pode-se ver melhor, como se cria o campo magnético no rotor – uma fonte de tensão contínua alimenta um enrolamento que cria um campo magnético permanente, como se o rotor fosse um ímã permanente.

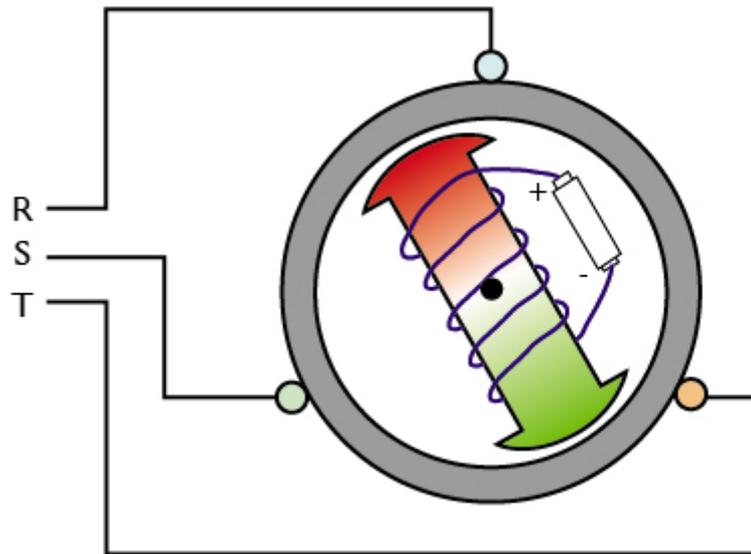


Figura 5 - Máquina síncrona com campo magnético no rotor.
Fonte: Fitzgerald; Kingsley e Kusko (1984).

Circuito Equivalente

O circuito elétrico equivalente, para uma máquina síncrona, está representado na Figura 6 apenas para uma (das três) fase do estator, nos quais os enrolamentos rotóricos com tensão contínua V_F , que cria o campo magnético no rotor - parte esquerda do esquema. Assim, para cada fase do estator, teremos a equação correspondente:

$$V_{fase} = V_A + jX_s I_A + R_A I_A$$

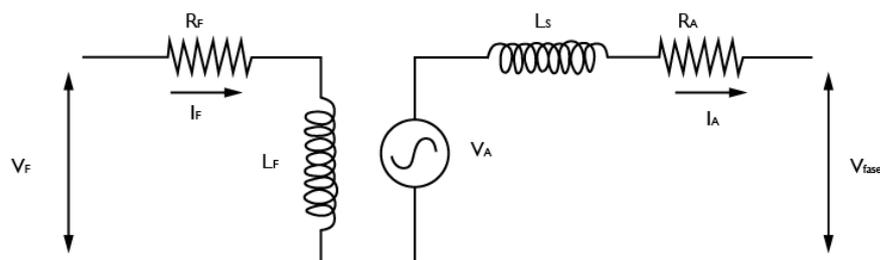


Figura 6 - Circuito equivalente para o motor síncrono considerando uma fase.
Fonte: Autoria Própria.

Curva de Torque

Os motores síncronos manobram cargas, basicamente com velocidade constante. Estão normalmente ligadas a sistemas de alimentação de potência muito superior à dos motores – rede com potência infinita – o que significa que a tensão e a frequência serão constantes qualquer que seja a potência absorvida pelo motor. A curva de torque resultante está apresentada na Figura 7, onde se pode observar que a velocidade, do motor, é constante desde a situação de vazio até à situação de carga máxima – T_{max}.

O torque em função dos campos é dado por:

$$T_i = k B_R B_{total} \sin \delta$$

Ou em função das tensões de fase e de campo é:

$$T_i = \frac{3 V_{fase} V_A \sin \delta}{\omega X_s}$$

Isto é, o torque máximo ocorre quando $\delta = 90^\circ$. No entanto, normalmente, o torque máximo corresponde a cerca de 3 vezes o torque máximo da máquina a ligar ao motor. Excedendo-se o valor do torque máximo, o rotor já não consegue permanecer ligado ao campo girante, começa a ter escorregamento, com um torque oscilante e fazendo vibrar severamente o motor síncrono – perda de sincronismo.

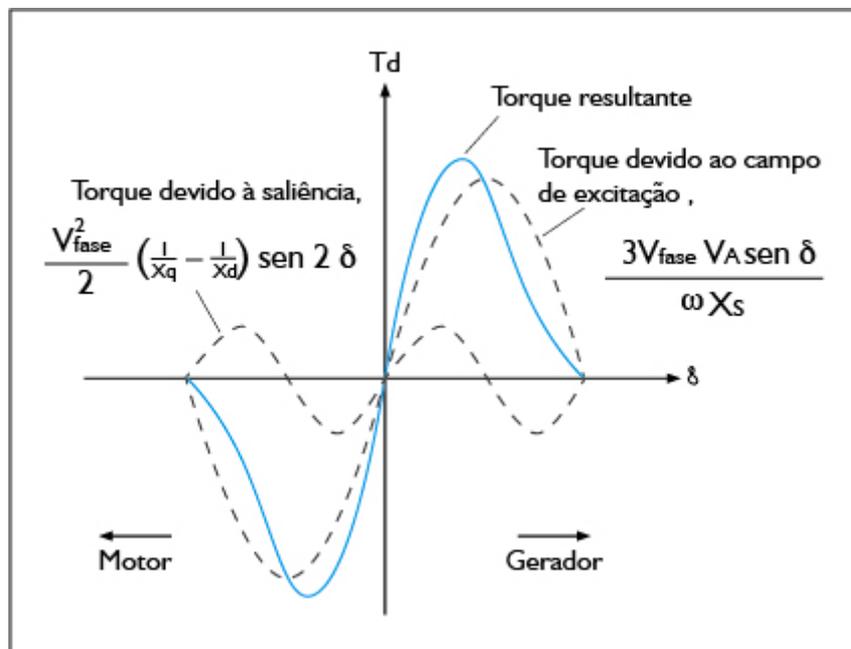


Figura 7 - Componentes do torque de um motor de relutância com excitação no rotor.

Fonte: Fitzgerald; Kingsley e Kusko (1984).

Aplicações

Devido à sua característica de velocidade constante, esses motores são adequados para aplicações que requeiram fluxo ou transporte constante e em processos automatizados de baixa velocidade, que necessitem sincronização precisa com outros motores ou operações temporizadas no sistema.

Também encontram aplicação em acionamentos multimotorizados, onde se quer, em cada eixo, velocidades rigorosamente iguais. Nesses casos, uma bateria de motores de relutância alimentados a partir de uma fonte única de tensão e frequência (fixa ou variável), possibilita um sincronismo de posição angular entre os eixos, independentemente da velocidade de operação e da divisão de carga entre os motores. Essa solução é mais simples, confiável e econômica que outras configurações, como as que utilizam motores de corrente contínua ou máquinas assíncronas de anéis. O emprego dos motores de relutância dispensa o uso de transdutores de posição ou velocidade e componentes auxiliares de sincronização. Além do sistema como um todo se tornar mais simples, os próprios motores de relutância são mais confiáveis e econômicos que os motores cc ou de anéis.

Uma aplicação típica usa os motores síncronos de relutância para acionar guindastes em elevadores marinhos. Cada guindaste operará na mesma velocidade e juntos eles podem dar aos navios uma elevação suave. Outras aplicações incluem acionamentos para bombas e transportadores.

Esses motores podem ser operados com variação de velocidade, através de um inversor de frequência, por exemplo. Algumas aplicações desse tipo são indústrias de plástico, pastas e papel, borracha, vidro e metais. Essas aplicações requerem um controle de velocidade preciso e ajustável.

Eles também são aplicados como acionamentos para impressão, máquinas ferramentas, empacotadoras, máquinas dobradeiras, posicionamento de hastes de controle em reatores nucleares e acionamentos para a indústria têxtil.

No seu rotor existem barreiras de fluxo, que são regiões sem material magnético, como ranhuras, com a função de dar preferência à passagem do fluxo em uma dada direção (chamada de eixo direto) e dificultar a sua passagem em outra direção (chamada de eixo em quadratura), criando o torque de relutância.

Atividade 02

1. Descreva o funcionamento de motor síncrono.
2. Por que um motor síncrono gira sempre à frequência de linha dividida pelo número de pares de polos?
3. Qual é a área de aplicação deste tipo de motores?

Motor de Passo

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor de passo é giro em

pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência nos terminais deste.

A rotação de tais motores é diretamente relacionada aos impulsos elétricos que são recebidos, bem como a sequência a qual tais pulsos são aplicados reflete diretamente na direção na qual o motor gira. A velocidade que o rotor gira é dada pela frequência de pulsos recebidos e o tamanho do ângulo giro é diretamente relacionado com o número de pulsos aplicados.

Um motor de passo pode ser uma boa escolha sempre que movimentos precisos são necessários. Eles podem ser usados em aplicações nos quais são necessários controlar vários fatores tais como: ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo. O ponto forte de um motor de passo não é a sua força (torque), tampouco sua capacidade de desenvolver altas velocidades (ao contrário da maioria dos outros motores elétricos), mas sim a possibilidade de controlar seus movimentos de forma precisa. Por conta disso este é amplamente usado em impressoras, scanners, robôs, câmeras de vídeo, brinquedos, automação industrial entre eletrônicos que requerem de precisão.

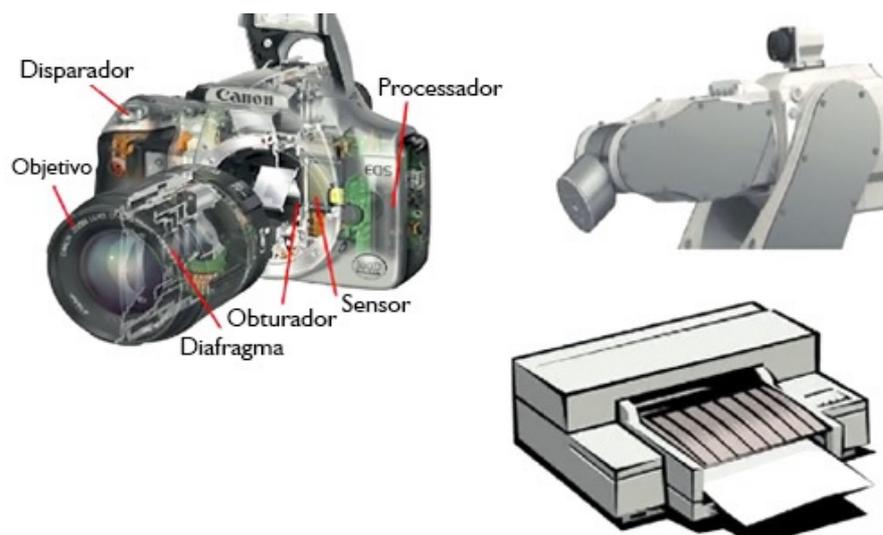


Figura 8 - Exemplos de aplicação de motor de passo.

Fonte: <https://www.google.com.br/search?q=motor+de+passo> Acesso em: 2 ago. 2013

Funcionamento de um Motor de Quatro Passos

O funcionamento básico do motor de passo é dado pelo uso de solenoides alinhados dois a dois que quando energizados atraem o rotor fazendo-o se alinhar com o eixo determinado pelos solenoides, causando assim uma pequena variação de ângulo que é chamada de passo.

Por sua vez, a velocidade e o sentido de movimento são determinados pela forma como cada solenoide é ativado (sua ordem e a velocidade entre cada ativação).

Determinação do número de passos

O número de passos é dado pelo número de alinhamentos possíveis entre o rotor e as bobinas. Para aumentar o número de passos de um motor usa-se um maior número de bobinas, maior número de polos no rotor, tal ideia é vista na estrutura da figura (para isso usa-se uma roda dentada).

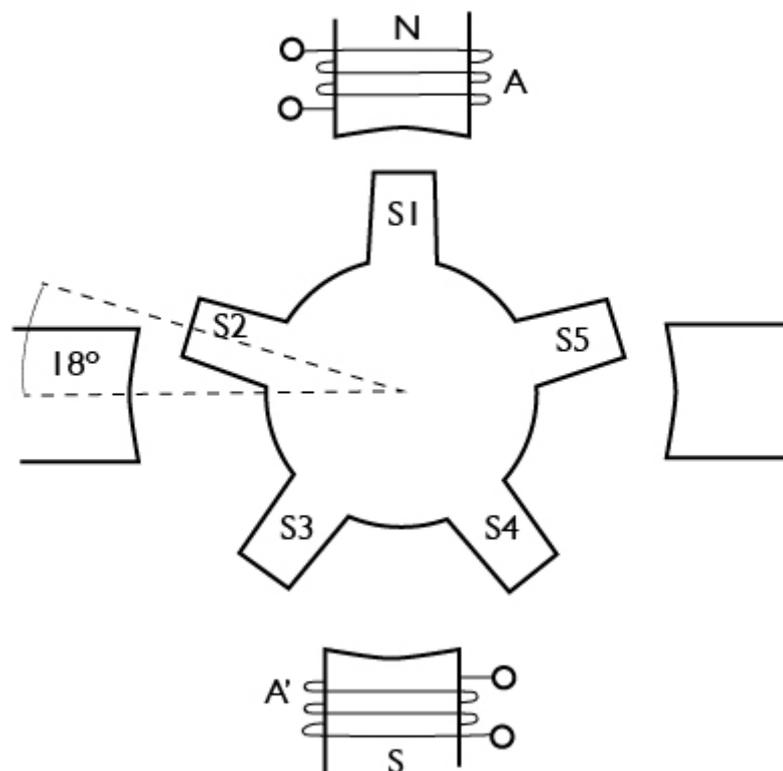


Figura 9 - Motor de passo de cinco passos.

Fonte: Autoria Própria.

Passos Completos e meio-passos

A energização de uma e somente uma bobina de cada vez produz um pequeno deslocamento no rotor. Esse deslocamento ocorre simplesmente pelo fato de o rotor ser magneticamente ativo e a energização das bobinas criar um campo magnético intenso que atua no sentido de se alinhar com os dentes do rotor. Assim, polarizando de forma adequada as bobinas, podemos movimentar o rotor entre as bobinas (meio passo ou “half-step”) ou alinhadas com as mesmas (passo completo ou “full-step”). Adiante, seguem os movimentos executados. Esse efeito pode ser apreciado na Figura 10 para uma motor de passo acionado a passo completo e meio passo.

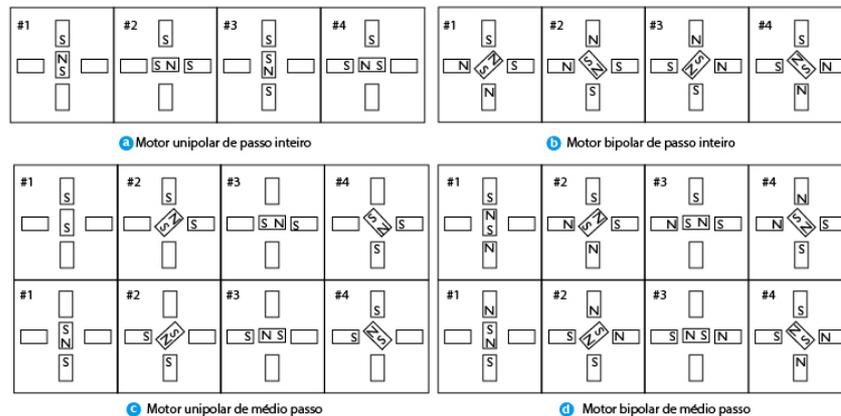


Figura 10 - Funcionamento do motor de passo a passo inteiro médio passo.
Fonte: http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/motor/ Acesso em: 29 out. 2013.

Tipos de Motores de Passos

Os motores de passo podem ser classificados de acordo com o projeto do rotor: motor de passos de ímã permanente (se for construído de ímã permanente) e motor de passos de relutância.

Motor de Passos de Imã Permanente

A presença do ímã permanente equivale a uma excitação cc constante. A ação do ímã permanente é magnetizar cada um dos polos (ou ranhuras) em uma extremidade do rotor com uma polaridade de polo norte e cada polo na outra extremidade com polaridade de polo sul, conforme Figura 11.

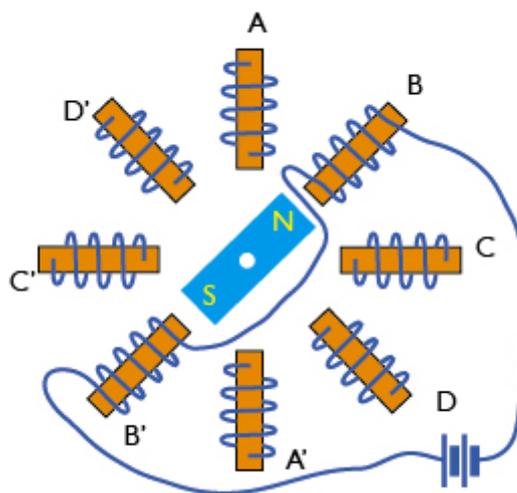


Figura 11 - Motor de passo de rotor relutância variável.

Fonte: <http://www.mspc.eng.br/info/topDiv110.shtml> Acesso em: 29 out. 2013.

O ponto de partida está representado na Figura 11 com a bobina energizada "B", devido à corrente cc produzida. O torque produzido pela ação das distribuições de campo do polo do estator e do polo do rotor, produzida pelo ímã, e dependente da polarização da bobina seguinte A ou C, será produzido um giro no sentido anti-horário ou horário.

Motor de Passos de Relutância

O motor de passos de relutância é equipado com um rotor construído a partir de ferro doce. Desenvolve um torque indexado em resposta à excitação em sequência em cc das bobinas do estator, em virtude da grande diferença na relutância magnética que existe entre o percurso de eixo direto e o percurso de eixo de quadratura mostrado na Figura 12.

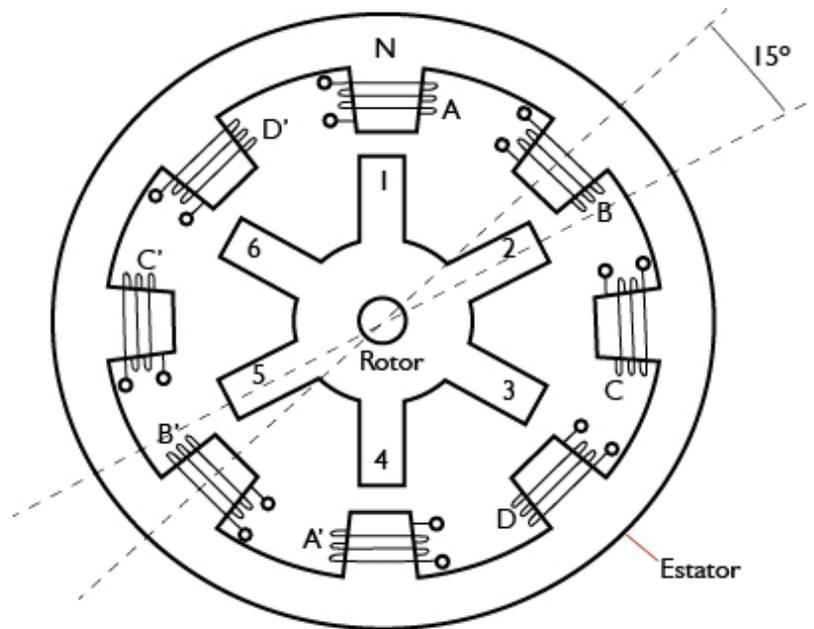


Figura 12 - Motor de relutância.

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAfwSMAF/fundamentos-eletromecanica>. Acesso em: 29 out. 2013.

Motor de Passos Híbrido

Mais comumente encontrado, é uma mistura dos dois tipos anteriores. O rotor possui ranhuras e ímãs permanentes.

Principais Parâmetros do Motor de Passos

Existem alguns parâmetros que devem ser considerados para projetar o melhor motor de passo, tais como:

- **Passo angular:** rotação do eixo durante um passo;
- **Momento (torque):** efeito rotativo de uma força, medindo a partir do produto da mesma pela distância perpendicular até o ponto em que ela atua partindo de sua linha de ação;
- **Momento de inércia:** medida da resistência mecânica oferecida por um corpo à aceleração angular.

Atividade 03

1. Descreva o funcionamento de motor de passo.
2. Qual a diferença entre motor de passo e médio passo?
3. Qual é a área de aplicação deste tipo de motor?

Resumo

Nesta aula, fechamos a abordagem dos motores elétricos, iniciando com conceitos básicos que dão origem ao funcionamento dos motores universal, síncrono e motor de passo. Foi mostrado o princípio de funcionamento desses motores elétricos e mostrado os principais parâmetros de aplicação típica na indústria.

Referências

CONTROLADORES lógicos programáveis: princípios básicos. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/info/topDiv110.shtml>>. Acesso em: 7 nov. 2013.

ESTUDO do motor de passo e seu controle digital. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/motor/>. Acesso em: 7 nov. 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., C.; KUSKO, A. **Máquinas elétricas**. [S.l.]: McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1975.

_____. **Teoria e análise das máquinas elétricas**. [S.l.]: Hispano Europa, 1984.

FUNDAMENTOS eletromecânica. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFwSMAF/fundamentos-eletromecanica>>. Acesso em: 7 nov. 2013.

GIERAS, J. F.; WING, M. **Permanent magnet motor technology**. [S.l.]: Marcel Dekker Inc., 1997.

LIPO, T. A. Synchronous reluctance machines – a viable alternative for AC drives?. **Electric Machines and Power Systems**, v. 19, p. 659-670, 1991.

MATSUO, T.; LIPO, T. A. Rotor design optimization of synchronous reluctance machine. **IEEE transactions on Energy Conversion**, v. 9, n. 2, p. 359-365, 1994.

NASAR, S. A.; BOLDEA, I.; UNNEWEHR, L. E. **Permanent magnet, reluctance and self-synchronous motors**. [S.l.]: CRC Press, 1993.