

Máquinas Síncrona Monofásica a Relutância e a Histerese, a Imã Permanente e de Corrente Permanente, e Motor Monofásico Universal.

Hiago Batista (96704), Werikson Alves (96708), Celso Barcelos (93736), Anailson Raasch (86508),
Mateus Fonseca (93537), Pedro Sobral (93524), Vinicius Maciel (90290)
Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.
e-mails: hiago.batista@ufv.br, werikson.alves@ufv.br, celso.barcelos@ufv.br, anailson.raasch@ufv.br,
mateus.f.souza@ufv.br, pedro.sobral@ufv.br, vinicius.m.costa@ufv.br

Resumo—Este relatório apresenta um estudo e análise sobre máquinas síncronas monofásicas à relutância e a histerese, máquinas a Imã permanente, corrente permanente e motor monofásico universal. Além disto, também são apresentados alguns exemplos de aplicações, para os respectivos tipos de máquinas.

I. INTRODUÇÃO

Presentes em todos os lugares, as máquinas elétricas rotativas (motores/geradores) fazem parte de nossas vidas mesmo sem nem ao menos nos darmos conta. Quanto mais estudamos, mais descobrimos que temos muito a aprender sobre tal assunto. As máquinas elétricas rotativas são utilizadas basicamente como geradores, motores ou compensadores, convertendo formas de energia nas duas primeiras e auxiliando na estabilização da tensão na última. Apesar da listagem anterior conter apenas três itens, a variedade de tipos não se restringe ao mesmo número. Neste trabalho abordamos alguns tipos, mostrando os conceitos envolvidos e suas aplicações.

II. DESENVOLVIMENTO :

A. Máquina Síncrona Monofásica a Relutância:

O conceito de relutância e de torque de relutância pode ser explicado com auxílio da Figura 1. Na Figura, observa-se um material com anisotropia magnética, pois apresenta indutâncias de eixo d e eixo q diferentes. Quando este material é submetido a um campo magnético, o objeto terá uma tendência natural a se alinhar com o campo. Portanto o objeto irá rotacionar, fazendo com que o eixo de maior indutância (d), fique alinhado com o campo magnético. Logo, este fenômeno é conhecido como torque de relutância e é o princípio base para o funcionamento do motor síncrono de relutância (SynRM) [5].

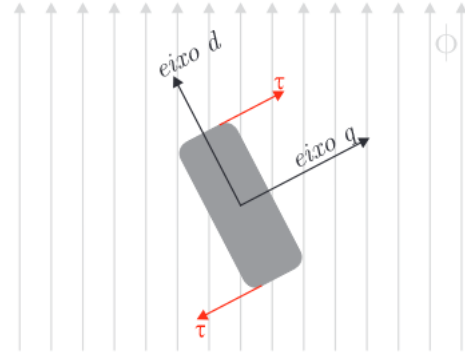


Figura 1. Exemplo de material com anisotropia de indutância submetido a campo magnético.

Do ponto de vista construtivo, o estator desta máquina é semelhante ao motor de indução (MIT), sendo que a principal diferença entre um MIT e um SynRM está no rotor. O SynRM apresenta no rotor uma estrutura composta por chapas de material ferro-magnético, portanto o SynRM não apresenta correntes rotóricas.

O rotor é a peça fundamental da SynRM, pois impacta diretamente no rendimento e no fator de potência. Um dos fatores mais importantes de se conhecer em máquinas síncronas de saliência é a taxa de saliência que é dada pela razão da indutância de eixo direto sobre a indutância em eixo em quadratura:

$$\xi = \frac{L_d}{L_q}$$

E o fator de potência interno máximo é dado pela seguinte equação:

$$FPI_{max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1}$$

Portanto, conforme maior o valor da taxa de saliência, maior é o fator de potência.

As aplicações deste tipo de máquinas se diversifica em bastante setores: Veículos elétricos, empilhadeiras, compressores de ar, bombas, maquinaria têxtil, acessórios

automotivos e eletrodomésticos. E as aplicações são empregados em sistemas que demandam: Velocidade variável, operação em alta velocidade, tração com alto conjugado, controle de posição, etc [1].

B. Máquina Síncrona Monofásica a Histerese:

O rotor do motor de histerese é constituído por um cilindro sólido com uma superfície suave de material magnético sem dentes, protuberância ou enrolamentos. Normalmente, o núcleo, o qual pode ser não magnético, tem uma camada de material que possui histerese, Figura 2. Para um estator com tensão monofásica, é necessário um capacitor permanente para produzir um campo magnético suave. Esse campo magnetiza o rotor e induz pólos nele. Quando o campo magnético percorre a superfície do rotor, o fluxo do rotor não consegue acompanhar porque o metal do rotor tem perda por histerese, já o fluxo no entreferro é praticamente isento de harmônicas de dentadura e consequentemente o motor fica livre de binários parasitas. Como o campo do estator e do rotor estão em ângulos diferentes, um torque é formado, Figura 3. [3]

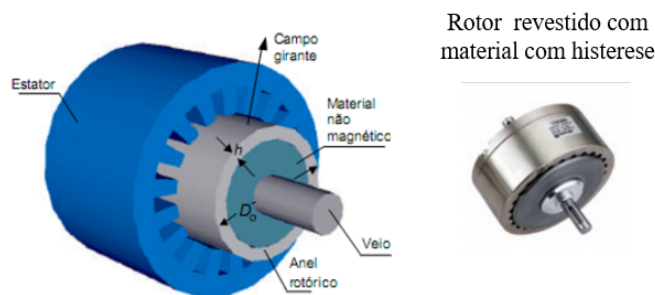


Figura 2. Partes construtivas

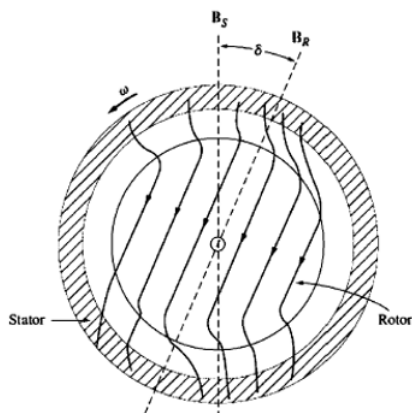


Figura 3. A construção de um motor de histerese. A componente principal de conjugado deste motor é proporcional ao ângulo entre os campos magnéticos do rotor e do estator.

Um motor de histerese pode ser construído com um estator de pólos sombreados, Figura 4, obtendo-se um motor síncrono de baixa potência. [3] Comparando com

outros tipos de máquinas elétricas o motor de histerese é a única máquina capaz de arrancar com cargas de momento de inércia apreciável a binário constante, sendo que o arranque é suave até o sincronismo. Embora existam atualmente materiais magnéticos de largo ciclo de histerese, verifica-se que o seu emprego na construção do rotor aumenta o binário motor, mas não eleva substancialmente o rendimento, inerentemente baixo neste tipo de motor. [4]

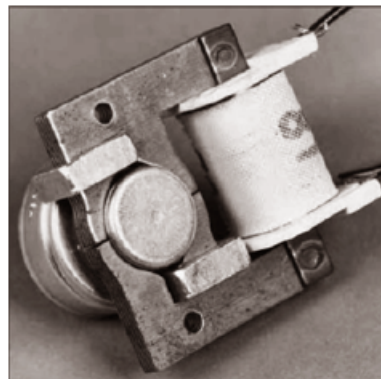


Figura 4. Um pequeno motor de histerese com um estator de polos sombreados, adequado para um relógio elétrico. Observe os polos sombreados do estator. (Stephen J. Chapman)

A Figura 5 demonstra o funcionamento básico de um motor de histerese. "Quando o motor está operando abaixo da velocidade síncrona, há duas fontes de conjugado dentro dele. A maior parte do conjugado é produzida pela histerese." [2]

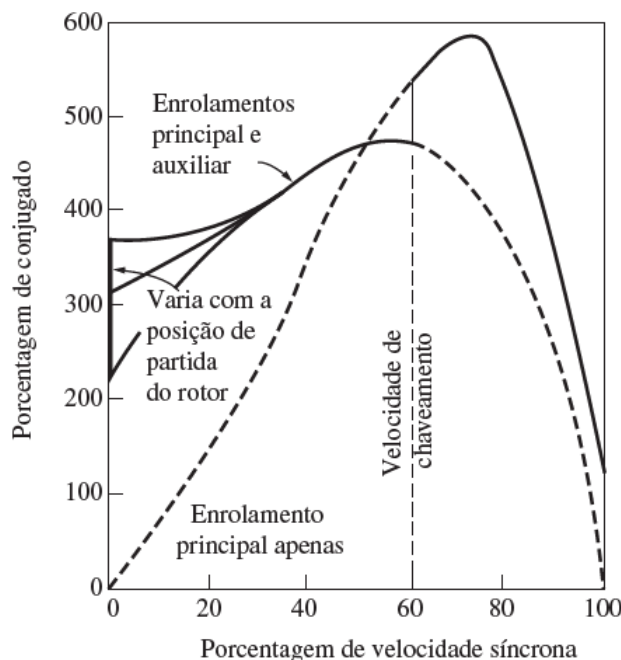


Figura 5. A característica de conjugado versus velocidade de um motor monofásico de relutância com partida própria.

No entanto, a utilização de materiais magnéticos com melhores características faz do motor síncrono de histerese uma máquina quase comparável, em termos de binário/volume, ao motor de indução de rotor em gaiola. Estas características tornam este dispositivo muito útil em certas aplicações, tais como no acionamento de girobússolas, de fitas magnéticas em gravadores, de discos rígidos em computadores, relógios e outros equipamentos de precisão. [4]

C. Motor monofásico Universal

O princípio de funcionamento do motor universal baseia-se na operação de uma máquina CC. Analisando a equação (1) do conjugado induzido de um motor CC é possível entender o motor universal.

$$\tau_{ind} = K * \phi * I_a \quad (1)$$

Pela equação, percebe-se que o torque induzido é uma função de duas grandezas vetoriais, fluxo e corrente, e uma constante que depende das características construtivas da máquina.

Caso a polaridade aplicada a um motor CC em derivação ou em série seja invertida, tanto o sentido do fluxo, quanto o da corrente se inverterão, como o torque depende do produto vetorial entre fluxo e corrente, no caso onde ambas sofrem a mesma deflexão de 180° o sentido do torque permanecerá o mesmo. Isso significa que caso a polaridade de um moto CC seja invertida ele continuará a girar no mesmo sentido do caso onde a polaridade não era invertida.

Na prática somente o motor CC série funciona como o que foi descrito, no caso em derivação a indutância elevada tende a retardar a inversão da corrente de campo, tornando inviável sua aplicação.

Analisando o caso do moto CC série, considere a Figura 6 abaixo:

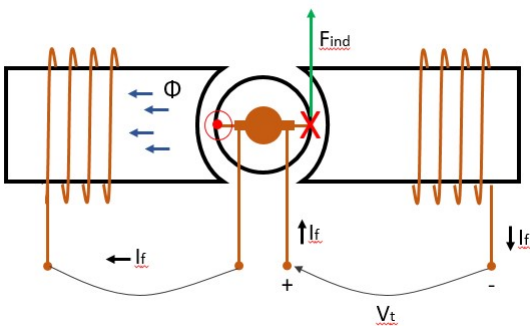


Figura 6. Motor CC série - caso 1.

Pela figura, temos o caso onde a corrente entra no eixo (representada pelo X), o fluxo está para a esquerda, aplicando-se a regra da mão direita, obtemos que o conjugado induzido está no sentido anti-horário.

Analisando-se a mesma figura, porém invertendo-se a polaridade da tensão temos:

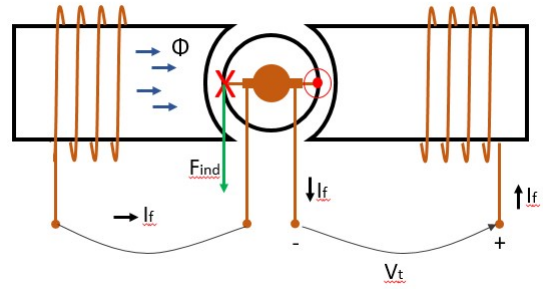


Figura 7. Motor CC série - caso 2.

Pelas mesmas considerações feitas no primeiro caso e aplicando-se a regra da mão direita, temos que o conjugado induzido permanece no sentido anti-horário.

Sendo assim, caso uma fonte de tensão alternada seja conectada aos terminais de um motor CC série ele funcionará perfeitamente, visto que a polaridade em seus terminais não interfere em seu sentido de rotação. Por esse motivo esta configuração é denominada de motor monofásico universal, pois pode ser conectada tanto à uma fonte CC quanto a uma CA.

D. Máquina Síncrona Monofásica a Imã Permanente:

A máquina síncrona a imã permanente, utiliza imãs em seu rotor para produzir excitação, logo não se faz necessário o uso de enrolamento de campo e consequentemente uma fonte para gerar a corrente de campo da máquina.

Dentre as possíveis configurações da máquina podemos citar a situação em que o Imã se encontra na superfície do rotor ou embutido no rotor. As configurações podem ser observadas nas figuras 8 e 9

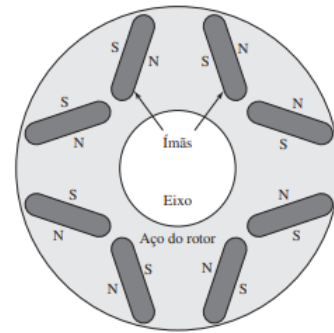


Figura 8. Imã permanente interno. [6]

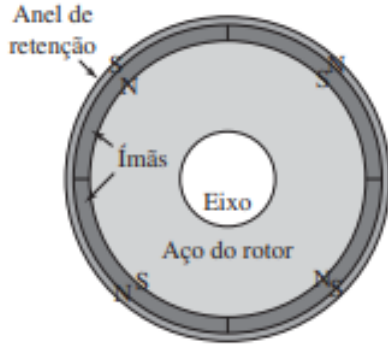


Figura 9. Imã permanente superficial. [6]

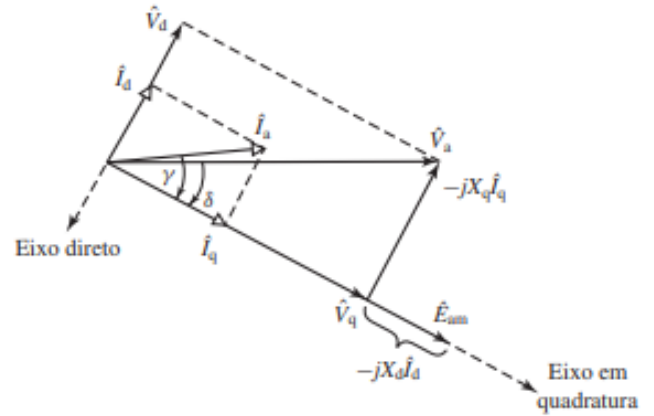


Figura 10. Diagrama. [6]

A desvantagem desta máquina se encontra no fato dela possuir reduzida eficiência em altas velocidades, devido ao enfraquecimento do campo, além disso, o controle de tensão e velocidade desta máquina exige maiores estratégias de controle para partida e saídas desejadas, em contrapartida estas máquinas podem ser construídas com reduzido tamanho devido a substituição do enrolamento do rotor pelo ímã.

A máquina síncrona com ímã, apresenta alta qualidade quando aplicada a servomecanismos. Além disso, dependendo da configuração a máquina se caracteriza como uma máquina saliente, consequentemente possui indutâncias diferentes no eixo direto e quadratura, logo esta diferença de indutância permite um torque total maior devido à presença do torque de relutância.

A análise de uma máquina síncrona com ímã permanente pode ser feita de maneira análoga à máquina síncrona com enrolamento de campo saliente, porém, nas máquinas síncronas de polos salientes e rotor com enrolamento, a indutância de eixo direto é maior do que a de eixo em quadratura.

Logo, com ímã permanente temos que o rotor apresenta uma relutância maior ao fluxo de eixo direto do que ao fluxo de eixo em quadratura e, consequentemente, a indutância de eixo em quadratura é maior do que a de eixo direto. [6]

Portanto, para o caso de um motor síncrono com ímãs permanentes interiores, podemos visualizar seu diagrama na figura 10.

E. Máquina Síncrona de Corrente Permanente:

Ainda em relação às máquinas síncronas, devido ao fato de não haver em regime permanente variações de fluxo em relação ao rotor, este pode também ser construído de um material sólido, ao invés de lâminas. Assim, em algumas máquinas todo ou parte do rotor é construído de material sólido, a fim de aumentar a rigidez mecânica. Neste caso, a própria superfície do rotor funciona como enrolamento amortecedor, sendo desnecessário um enrolamento amortecido inserido por meio de ranhuras. Pode se acrescentar que no caso da máquina síncrona em regime permanente a corrente de excitação não varia e a amplitude do fluxo também permanece constante. Desta forma, em regime permanente, a tensão induzida é dada por :

$$fem = N\phi\omega sen(\omega t) \quad (2)$$

Além do enrolamento de campo, o rotor pode conter também um enrolamento semelhante ao do rotor da máquina de indução em gaiola. Este enrolamento é chamado de enrolamento amortecedor e é alojado em ranhuras semi-abertas e de formato redondo sobre a superfície do rotor. Conforme o nome sugere, ele serve para amortecer oscilações que ocorrem em condições transitórias, como por exemplo uma retirada brusca de carga, alterações súbitas de tensão, variações de velocidade, etc.... Ele confere, assim, uma maior estabilidade à máquina. Neste enrolamento só é induzida tensão quando ocorrem fenômenos transitórios na máquina, em condições normais e em regime permanente não há nem tensão nem corrente induzida neste enrolamento; as suas dimensões são portanto reduzidas em relação ao enrolamento do estator e do rotor. No caso de motores síncronos ele pode também funcionar como dispositivo arranque, funcionando da mesma forma que o enrolamento em gaiola de esquilo dos motores de indução. O enrolamento neste caso se chama enrolamento de partida e a partida do motor é chamada de partida assíncrona; neste caso o motor não possui, via de regra, carga no eixo durante a partida.

III. CONCLUSÕES

As diferentes topologias de máquinas apresentadas, representam soluções clássicas de engenharia para diferentes desafios encontrados pela humanidade. A máquina síncrona monofásica a relutância que é aplicada em setores industriais, visando principalmente operação em altas velocidades e controle de posição; a máquina síncrona monofásica a histerese que é aplicada em área que demandam maior precisão; o motor universal que é amplamente utilizado no nosso dia-a-dia; a máquina síncrona monofásica a imã permanente que pode-se citar a importância em aerogeradores; por fim a máquina síncrona de corrente permanente que podem ser aplicados em situações que demandam maior estabilidade na máquina.

Em suma, além de apresentar essas topologias, esse trabalho expõe o quanto fundamental é a necessidade de realizar um estudo de caso, baseando-se na aplicação e efetuar a devida análise para a escolha de qual máquina apresentará a melhor solução.

REFERÊNCIAS

- [1] Celso Ferreira Carvalho and Mauro Henrique Alves Signorelli. Princípio de funcionamento e acionamento do motor a relutância variável. *Universidade Federal de Uberlândia*, 2005.
- [2] Stephen J Chapman. *Fundamentos de máquinas elétricas*. AMGH editora, 2013.
- [3] Prof. Elmer. *Máquinas Elétricas: Motores Monofásicos e de propósitos especiais*. USP - Escola de Engenharia de São Carlos.
- [4] Lucas S. Monte-Mor Athos P. Garcia Marcos F. S. Rabelo, Augusto C. F. Ferreira. *SEMINÁRIO SOBRE MÁQUINAS ESPECIAIS: MOTOR SÍNCRONO A RELUTÂNCIA, A HISTERESE E MOTOR UNIVERSAL*. UFV - CCE - DEL - MÁQUINAS ELÉTRICAS II.
- [5] Filipe Pinarello Scalcon et al. Contribuições ao acionamento e controle dos motores de relutância variável e síncrono de relutância. 2019.
- [6] Stephen D Umans. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. AMGH Editora, 2014.