

MÁQUINAS SÍNCRONAS: CARACTERÍSTICAS E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Claudio R. Pacheco¹ (PQ), John K. S. Carvalho¹ (EG), Nelson R. Silva¹ (EG)

¹Instituto Federal de Goiás, *Campus Itumbiara*.

Área do Conhecimento: Engenharias.

Resumo

Este trabalho dedica-se a explicar os princípios de funcionamento das máquinas síncronas, trazendo seus aspectos físicos, conceitos teóricos e usabilidade. A máquina síncrona pode operar como gerador, convertendo energia mecânica em elétrica, e também como um motor, convertendo energia elétrica em mecânica. Por razões construtivas e pelo elevado custo em relação às máquinas de indução, as máquinas síncronas são mais utilizadas como geradores. Características como o fator de potência regulável e a velocidade síncrona (gerada através da interação magnética entre rotor e estator) serão debatidas no decorrer do trabalho, além das vantagens e desvantagens dessa máquina em cada processo.

Palavras-chave: *Máquina Síncrona; Velocidade Síncrona; Rotor; Estator.*

Introdução

As máquinas síncronas são basicamente máquinas de corrente alternada onde a frequência da tensão induzida e a velocidade possuem uma relação constante. “Assim como as as máquinas de indução (assíncronas) e as máquinas de corrente contínua (CC), as máquinas síncronas podem operar tanto como motor quanto como gerador” (Nascimento, 2016). Os geradores síncronos são responsáveis por produzir grande parte da energia elétrica consumida no mundo, são utilizados na maior parte das Termoelétricas e Centrais Hidroelétricas (Llerena, 2011). Por outro lado, os motores síncronos são requisitados em alguns casos específicos, apesar do alto custo em relação aos motores de indução. Merece destaque o fato de que esses motores possuem um fator de potência regulável, podendo adiantar ou atrasar a corrente em relação à tensão. A quantidade de máquinas síncronas equipadas com ímãs permanentes de baixa e média potência cresce de forma notável, essencialmente quando são necessárias respostas rápidas e velocidade variável.

O termo “síncrono” é utilizado devido à igualdade entre a frequência elétrica e a frequência angular, pois o rotor gira na mesma velocidade do campo magnético rotativo criado pelo estator por meio da corrente alternada trifásica (CA) de alimentação, ou seja estão em sincronismo através de um acoplamento magnético.

Este trabalho busca aprofundar o conhecimento sobre o princípio de funcionamento das máquinas síncronas, formulando e esclarecendo os conceitos necessários para esse entendimento.

Resultados e Discussão

1. Conceitos teóricos e aspectos físicos das máquinas síncronas

1.1 Carcaça

A carcaça é basicamente um suporte mecânico para o estator que evita contato com os circuitos internos. O fluxo magnético que passa por ela geralmente é desprezível (NASCIMENTO, 2016).

1.2 Enrolamento do Induzido

Composto por condutores isolados, seus enrolamentos são idênticos aos enrolamentos do estator das máquinas assíncronas, geralmente distribuídos ao longo da sua circunferência. “Vale ressaltar que nas máquinas trifásicas, os três enrolamentos estão desfasados de um terço de período uns em relação aos outros, para que possam gerar o defasamento de 120° nas tensões e correntes, características de um sistema trifásico” (CAMARGO, 2007).

1.3 Núcleo do Induzido

Sua função é permitir uma forte indução magnética, ou seja, tem que ser constituído por um material que apresente pequenas perdas e ao mesmo tempo alta resistividade elétrica. Como consequência, deve ter uma pequena área do ciclo de histerese (MARQUES, 2001).

1.4 Estator (Armadura)

O estator, conhecido como circuito de armadura, é a parte fixa da máquina, onde seus enrolamentos são alimentados por um sistema de tensões alternadas trifásicas. Ele é montado em volta do rotor de forma que não exista contato físico entre eles, possibilitando que o rotor gire livremente no seu interior. É constituído por um pacote de lâminas de um material ferromagnético envolto num conjunto de enrolamentos distribuídos ao longo do seu perímetro e posicionados em “ranhuras”. Vale ressaltar que, operando como gerador, toda a energia elétrica gerada irá percorrer o estator. Outra curiosidade é que comparando as correntes e tensões que circulam pelo rotor e estator, percebe-se que as tensões e correntes no estator são bem mais elevadas se comparadas às do rotor, que tem como função apenas produzir um campo magnético para “excitar” a máquina, o que torna possível a indução de tensões nos terminais dos enrolamentos do estator (PINHEIRO, 2007).

1.5 Rotor (Campo)

É a parte girante da máquina, conhecida como circuito de campo, normalmente constituída por um pacote de lâminas de um material ferromagnético envolto num enrolamento composto por condutores de cobre, designado como enrolamento de campo. Pode ser de dois tipos: rotores de pólos salientes e rotores de pólos lisos (bobinados). Nas máquinas de pequena potência são usados rotores constituídos por ímãs permanentes no intuito de reduzir o custo. Algumas características podem ser listadas abaixo:

- Máquina síncrona de pólos salientes:
 - Em geral, grande número de pólos (48-96) e baixa rotação (75 - 150 RPM);
 - Uso com turbinas hidráulicas em potências elevadas;
 - Uso comum também como geradores de pequena ou média potência, acionados geralmente a partir de motores diesel ou pequenas turbinas a vapor, mas neste caso apresenta um número de pólos reduzidos.
- Máquina síncrona de pólos lisos:
 - Em geral, reduzido número de pólos (2 - 4), e apresenta uma elevada rotação (3600 - 1800 RPM);
 - Uso com turbinas a vapor ou gás (turbogeradores) em potências elevadas (até 2000 MW). (CHABU, 2016)
- Rotores compostos por ímãs permanentes
Geralmente se usa ímãs permanentes em máquinas de pequeno porte, pois a

possibilidade de controlar a corrente de campo é sacrificada para elevar a consistência e simplicidade do sistema. O verdadeiro ganho, porém, é que este método torna desnecessário o uso de sistemas de excitação, que aumentam drasticamente o preço desse tipo de máquina (NASCIMENTO, 2016).

1.6 Gaiola Cilíndrica ou Rotor Bobinado

Os motores síncronos não são autossuficientes na partida e para resolver este problema, a engenharia desenvolveu a Gaiola de Esquilo, uma gaiola cilíndrica montada sobre os pólos do rotor, que devido ao seu aspecto construtivo, quando exposta à variação de um campo magnético, faz com que apareça uma força conhecida como Força de Lorentz. A Força de Lorentz tem a mesma direção do campo girante, de modo a tirar o rotor da inércia e impulsionar a força de atração entre rotor e campo girante até alcançar a velocidade síncrona. Apesar disso, o assunto se complica quando se trata de uma partida com carga, pois apenas a Força de Lorentz não é suficiente. Nesse caso se torna mais eficiente a utilização de um rotor bobinado de motor de indução substituindo a gaiola cilíndrica, conhecido como enrolamento amortecedor tipo rotor bobinado. Este rotor utiliza cinco anéis coletores: três para o enrolamento bobinado do rotor e dois para o enrolamento do campo CC (CAMARGO, 2007).

1.7 Classes de isolamento

A potência de rotação do eixo é menor que a potência que o motor absorve da linha de alimentação, resultando em um rendimento inferior a 100%. A diferença entre as duas potências representa a quantidade de energia transformada em calor, o qual aquece o enrolamento e deve ser dissipado para fora do motor para evitar que a elevação da temperatura seja excessiva. Desconsiderando as peças que se desgastam pelo uso, a vida útil de uma máquina síncrona é determinada pelo seu material isolante. Apesar de fatores como umidade, poeira e vibrações serem relevantes, o de maior impacto na resistência elétrica do material é a temperatura. Se a máquina trabalhar a uma temperatura muito abaixo daquela a qual o material se queima, o material isolante tem uma longa duração, prolongando a vida útil da máquina. Se a operação da máquina for a uma temperatura de trabalho próxima à queima do material, ele perde suas propriedades gradualmente até que não consiga mais isolar, fechando um curto-circuito. A cada intervalo entre 8°C e 10°C de operação acima da temperatura nominal de classe, a vida útil do material isolante é reduzida pela metade (PINHEIRO, 2007).

1.8 Níveis de tensão

A tensão interna da máquina síncrona é função do fluxo e da frequência. Como a frequência é constante, é necessário fazer o controle do fluxo. O fluxo é produzido pela corrente de campo, sendo assim, é por meio dela que se faz o controle dos níveis de tensão. Para obtenção do valor da tensão em função da corrente é realizado o ensaio em vazio do gerador. Quando a corrente de excitação (ou campo) for zero, o valor da tensão induzida será obtida pelo valor residual do fluxo. Com o aumento da corrente de excitação, o fluxo aumenta até o momento de saturação do circuito magnético da máquina. Como o aumento de corrente neste momento não resultará no aumento de fluxo, a tensão induzida sofre o mesmo efeito (CAMARGO, 2007).

1.9 Velocidade síncrona

A velocidade síncrona ocorre pois o rotor gira em sincronismo com o campo girante produzido pelo estator. A definição de velocidade síncrona é: $N_s = \frac{120f}{P} (rpm)$. Esta equação mostra que a velocidade síncrona depende da frequência de entrada, então se a frequência de entrada é controlada, a precisão em termos de velocidade é garantida (CAMARGO, 2007).

1.10 Força de Lorentz

A definição do princípio por trás da gaiola de esquilo, a Força de Lorentz, é resultado da superposição da força elétrica oriunda de um campo elétrico com a força magnética, devido a um campo magnético atuando sobre uma partícula eletricamente carregada que se move no espaço (RIBEIRO, 2008).

2. Princípio de Funcionamento (Motor equipado com a gaiola cilíndrica)

O motor síncrono trabalhando dentro de sua capacidade é capaz de operar em velocidade constante. Ele é uma máquina eficiente geralmente utilizada onde se requer alta precisão. Esta característica da velocidade surge da interação entre um campo magnético constante, gerado pelo rotor, e um rotativo, produzido no estator. As bobinas do estator são alimentadas com uma corrente alternada (CA), gerando o campo rotativo que gira em velocidade variável conforme a frequência de entrada. O rotor é alimentado por uma fonte de tensão contínua (DC), por isso atua como ímã permanente.

No início, as bobinas do rotor estão desconectadas da rede elétrica, então o campo rotativo gerado pelo estator irá induzir uma tensão reversa nas hastes da gaiola, que por sua vez irá gerar a Força de Lorentz. Inicialmente o rotor irá funcionar como um mecanismo assíncrono pois sua velocidade inicial é baixa devido a sua massa, mas a força de Lorentz consequentemente impulsiona a interação entre os pólos opostos do campo rotativo e do rotor, atraindo um ao outro, o que ocasiona o encaixe magnético entre eles. Com isso, o rotor irá atingir sua velocidade máxima e girar em sincronismo com o campo rotativo, em seguida as bobinas do rotor serão energizadas. Desde que o rotor gire em velocidade síncrona, a velocidade relativa entre a gaiola e o campo rotativo é zero, isso significa que não há tensão reversa e, portanto, nenhuma força de Lorentz na gaiola. Sendo assim, a gaiola não afeta a velocidade síncrona do rotor, apenas ajuda na arrancada do mesmo. O motor síncrono também pode ser usado como gerador, deixando, porém, de alimentar o estator com corrente alternada trifásica, e passando a excitar o eixo do rotor de forma a induzir tensões nos enrolamentos do estator. Existem alguns fatores que podem fazer com que o rotor perca o sincronismo, alguns deles são: sobrecarga, tensão muito baixa do rotor, e tensão muito baixa do excitador (CAMARGO, 2007).

3. Onde são utilizados

3.1 Geradores síncronos

São utilizados na grande maioria das Centrais Hidroelétricas, contendo muitos pólos salientes em razão da baixa velocidade de operação. Já nas Termoelétricas são utilizadas as máquinas de rotores cilíndricos com 2 ou 4 pólos, em razão da alta rotação desse tipo de geração.

3.2 Motores Síncronos

Esses motores são bastante utilizados na correção do fator de potência, pois seu fator de potência é maleável, portanto, o motor síncrono consegue fornecer ou absorver reativo de acordo com a necessidade, o que lhe difere dos bancos de capacitores ou indutores normais que tem valores pré definidos. Algumas qualidades gerais do motor síncrono são velocidade constante e variável, altos torques e um alto rendimento. Vale ressaltar que para fornecer reativo surge a necessidade de uma fonte de corrente contínua ou retificada para sua excitação, além de um complexo equipamento de controle. Como o campo magnético do rotor é fornecido por uma fonte externa, a máquina síncrona pode operar com fator de potência indutivo, capacitivo ou unitário (sub/sobre-excitada). Em excitação normal a corrente se encontrará em fase com a tensão proporcionando um fator de potência unitário, já no caso sub-excitado, a corrente no estator estará

atrasada em relação à tensão da fonte, caracterizando um circuito indutivo com o fator de potência atrasado. Para o motor sobre-excitado, a corrente estará adiantada em relação à tensão da fonte, ou seja, com fator de potência adiantado, capacitivo.

Conclusões

A partir dos conhecimentos discorridos, é possível perceber a que velocidade síncrona tem sincronia com a quantidade de polos e a frequência da rede.

Nessas máquinas a velocidade síncrona é mantida, desde que a carga alimentada esteja dentro da sua capacidade. Isso assegura vantagens como velocidade constante para o motor, e garante que no gerador a frequência da corrente alternada permaneça fixa.

Além disso, é possível concluir que devido às suas peculiaridades, a máquina síncrona pode ser usada para suprir a necessidade de bancos de capacitores ou indutores, fornecendo ou absorvendo reativo de acordo com a demanda.

Vale ressaltar que para tornar viável a utilização de máquinas síncronas de pequeno porte, tem-se utilizado rotores equipados com ímãs permanentes, para diminuir seu preço. Este processo apesar de sacrificar o controle da corrente de campo o torna viável.

Referências Bibliográficas

CAMARGO, Ivan. **Máquinas Síncronas**. GSEP, 2007. Disponível em: <http://www.gsep.ene.unb.br/osem/ivan/maquina/M%C1QUINAS%20S%CDNCRONAS.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019.

CHABU, Ivan Eduardo. **Parte 2 - Máquinas síncronas**. [S. l.], 2016. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1264958/mod_resource/content/1/PEA%202400%20Notas%20de%20aula_4_revB.pdf. Acesso em: 13 set. 2019.

LLERENA, Maria Teresa Mendoza. **Identificação de parâmetros de geradores síncronos usando métodos de ajuste de curvas e ensaio em frequência**. Campinas, 2011. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260740/1/MendozaLlerena_MariaTeresa_D.pdf. Acesso em: 9 set. 2019.

MARQUES, Gil. **Cap. 2 Máquinas Síncronas**. [S. l.], 2001. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasco/CEE-CAP%202.pdf>. Acesso em: 9 set. 2019.

NASCIMENTO, Bruno do; CARVALO, Edwin Kevin; TEDESCO, Paula Aline; SOARES, Wendell Murillo. **Princípio de funcionamento de gerador síncrono**. Sinop - MT: [s. n.], 2016. Disponível em: http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_13701pyincipio_pdf_PRINCIPIO.pdf. Acesso em: 10 set. 2019.

PINHEIRO, Hélio. **Máquinas e Acionamentos Elétricos - Geradores de Corrente Alternada**. IFRN, 2007. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc>. Acesso em: 12 set. 2019.

RIBEIRO, José Edmar Arantes. **Sobre a força de Lorentz, os conceitos de campo e a essência do eletromagnetismo clássico**. São Paulo, 2008.