

Máquinas Elétricas

Máquinas Elétricas

Luiz Carlos de Freitas Júnior
Rafael Schincariol da Silva

© 2018 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Éder Cicero Adão Simêncio

Renato Billia De Miranda

Marley Fagundes Tavares

Mauricio Marsarioli

Editorial

Camila Cardoso Rotella (Diretora)

Lidiane Cristina Vivaldini Olo (Gerente)

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Leticia Bento Pieroni (Coordenadora)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F849m Freitas Júnior, Luiz Carlos de
Máquinas elétricas / Luiz Carlos de Freitas Júnior, Rafael
Schincariol da Silva. – Londrina : Editora e Distribuidora
Educacional S.A., 2018.
224 p.

ISBN 978-85-522-1146-4

1. Máquinas elétricas. 2. Máquinas síncronas. 3.
Máquinas de indução. I. Freitas Júnior, Luiz Carlos de. II.
Silva, Rafael Schincariol da. III. Título.

CDD 621

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2018

Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza
CEP: 86041-100 – Londrina – PR
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Introdução às máquinas elétricas rotativas _____	7
Seção 1.1 - Conceitos elementares de máquinas CA e CC _____	9
Seção 1.2 - Campos magnéticos em máquinas rotativas _____	27
Seção 1.3 - Tensão induzida e conjugado em máquinas CC e CA _____	44
Unidade 2 Máquinas de corrente contínua _____	61
Seção 2.1 - Princípio de funcionamento das máquinas CC _____	63
Seção 2.2 - Gerador CC _____	79
Seção 2.3 - Motor CC _____	96
Unidade 3 Máquinas de indução _____	115
Seção 3.1 - Princípio de funcionamento das máquinas de indução _____	117
Seção 3.2 - Estudo de desempenho em regime permanente _____	133
Seção 3.3 - Fluxo de potência na máquina de indução _____	149
Unidade 4 Máquinas síncronas _____	167
Seção 4.1 - Princípio de funcionamento das máquinas síncronas _____	169
Seção 4.2 - Ângulo de carga em regime permanente _____	185
Seção 4.3 - Operação do gerador síncrono _____	198

Palavras do autor

Caro aluno, seja bem-vindo à disciplina Máquinas Elétricas. O conhecimento deste tema é extremamente importante para um profissional da sua área, pois tais equipamentos estão presentes em praticamente todos os segmentos de mercado nos quais você poderá atuar. Assim, este livro se concentra no estudo dos dois tipos principais de máquinas elétricas rotativas: as **máquinas de corrente contínua (CC)** e as **máquinas de corrente alternada (CA)**.

À medida que estudamos estas máquinas, conheceremos os conceitos fundamentais que regem as máquinas rotativas CC e CA e analisaremos os aspectos construtivos de cada tipo de máquina, a descrição das leis fundamentais que governam a operação de cada uma delas e, a partir das leis fundamentais, desenvolveremos as equações necessárias para cada tipo. Assim, conheceremos os princípios de funcionamento dos motores e geradores CC, dos motores de indução e dos motores e geradores síncronos.

Na Unidade 1, faremos uma introdução às máquinas rotativas de corrente contínua e de corrente alternada. Também estudaremos os conceitos elementares das máquinas elétricas rotativas, aprenderemos sobre o campo magnético nestas máquinas, assim como sobre o processo de produção de tensão e conjugado eletromagnético.

Na Unidade 2, daremos início ao estudo do primeiro tipo de máquina elétrica rotativa: as máquinas CC. Embora sua importância esteja diminuindo devido à concorrência com as máquinas de indução e síncronas, ainda possui aplicações significativas em razão das vantagens de facilidade de controle de velocidade e a capacidade de fornecer torque principalmente em baixas velocidades.

Na Unidade 3, estudaremos as máquinas de indução. Esta é a máquina elétrica mais utilizada na prática, principalmente na indústria, sendo também chamada de máquina assíncrona.

Finalmente, na Unidade 4 estudaremos as máquinas síncronas. Devido à sua utilização em alguns tipos de produção energia elétrica, com destaque para usinas hidrelétricas e termoelétricas, o enfoque será dado na sua operação como gerador.

Esperamos que você aprecie a leitura e que este estudo possa lhe proporcionar bases sólidas para prosseguir no aprofundamento das máquinas elétricas, seja na vida profissional ou em um curso posterior.

Bons estudos!

Introdução às máquinas elétricas rotativas

Convite ao estudo

O estudo de máquinas elétricas envolve o conhecimento de diversas disciplinas que já foram estudadas até aqui: conceitos de análise de circuitos elétricos, eletromagnetismo, conversão eletromecânica de energia, física, cálculo, etc. No estudo desta primeira unidade, a aplicabilidade dos conceitos vistos nestas disciplinas posteriores ficarão evidentes, contudo poderemos recorrer a uma revisão dos conceitos de campos magnéticos e das principais leis do eletromagnetismo, que serão importantes para entender o funcionamento de uma máquina elétrica.

Para contextualizar nosso estudo, vamos imaginar que uma grande empresa do setor petroquímico está reestruturando suas operações no território nacional. Os objetivos desta reestruturação são adequar as máquinas e equipamentos para cada tipo de aplicação específica e capacitar os profissionais do setor. Neste contexto, a empresa desenvolveu um programa de estágio no setor máquinas e manutenção, em que o candidato passará por diversas áreas deste setor de forma a ser preparado para trabalhar com todos os tipos de máquinas elétricas existentes na planta industrial. Imagine que você acaba de ser contratado como estagiário no departamento de manutenção elétrica desta empresa. Logo no primeiro dia, seu supervisor explica a importância dos técnicos e engenheiros de manutenção para o bom funcionamento da empresa e a segurança de todos os colaboradores. Ele também deverá conduzi-lo para transitar por todas as instalações da empresa, apresentando os equipamentos e destacando os maiores problemas relacionados aos motores elétricos.

No seu cotidiano, você já teve contato com máquinas elétricas rotativas? Saberá descrever a diferença de funcionamento entre as máquinas elétricas e as máquinas de combustão utilizadas em veículos?

Nesta unidade, buscaremos reconhecer as características das máquinas de corrente alternada e contínua e aplicar as equações para determinar a tensão induzida e o conjugado das máquinas. Estes conhecimentos são importantes para construir uma base teórica de máquinas elétricas rotativas para, em seguida, analisar as particularidades de cada tipo de máquina. As máquinas elétricas estão presentes não só no nosso dia a dia, mas principalmente na vida de um profissional da indústria.

Seção 1.1

Conceitos elementares de máquinas CA e CC

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à primeira seção de estudo da unidade de introdução às máquinas elétricas rotativas. Nesta primeira unidade conheceremos os conceitos elementares das máquinas CC e CA, tais como o princípio de funcionamento, alguns aspectos construtivos relevantes e as considerações sobre como se comportam as ondas de densidade de fluxo e de tensão geradas nestas máquinas. Estes conceitos são importantes para início do nosso estudo, pois irão nortear um estudo mais detalhado de cada tipo de máquina separadamente.

Para que você consiga visualizar melhor os conceitos que estudaremos, vamos lembrar da situação que escolhemos para contextualizar o seu aprendizado. Lembre-se de que você está participando de um programa de estágio em uma empresa do segmento petroquímico e passará por diversos departamentos de forma a ser capacitado para trabalhar com todos os tipos de máquinas elétricas existentes nesta planta industrial.

Ao pensar em motores, você se lembra que existem diversos tipos de aplicações para os motores elétricos, tais como em geladeiras, aparelhos domésticos, ventiladores, etc., entretanto, existem outros tipos, como os motores de combustão interna utilizados nos automóveis. Considerando que em uma grande empresa do setor petroquímico, como a que você trabalha, pode-se encontrar tanto motores elétricos como de combustão interna (também conhecidos como de explosão), seu supervisor pediu que você elaborasse um relatório em que apresente as principais diferenças no princípio de funcionamento, vantagens e desvantagens de cada um dos tipos de máquinas. Levando em conta os motores elétricos que podem existir nesta planta industrial, como poderiam ser classificados com relação à corrente elétrica e como diferenciar cada um deles?

Ao longo desta seção, estudaremos o princípio de funcionamento das máquinas CC e CA, assim como seus aspectos construtivos e o

comportamento da densidade de fluxo magnético nestas máquinas. Estes conhecimentos serão necessários para que você possa cumprir esta tarefa de modo eficiente. Para tanto, não deixe de realizar as atividades propostas e buscar expandir o seu conhecimento nos links de estudo.

Não pode faltar

Quando falamos em motores e máquinas, logo nos vêm à mente os motores utilizados em carros e como o desempenho do veículo está ligado ao tipo de motor utilizado. Na indústria em geral, motores são amplamente utilizados, mas os principais tipos têm um princípio de funcionamento diferente dos motores usados na maioria dos carros que conhecemos. Enquanto os motores dos carros são de combustão interna, os principais tipos de motores da indústria são elétricos, cujo princípio de funcionamento é a Lei de Faraday para a indução magnética.



Pesquise mais

O vídeo Entenda de vez como funciona o motor do carro! do canal Manual do Mundo mostra um pouco do princípio de funcionamento dos motores de combustão interna utilizados em carros. Para saber mais sobre esse assunto, acesse:

Entenda de vez como funciona o motor do carro! São Paulo: Manual do Mundo, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=U11XuiJE0Dw>>. Acesso em: 11 maio 2018.

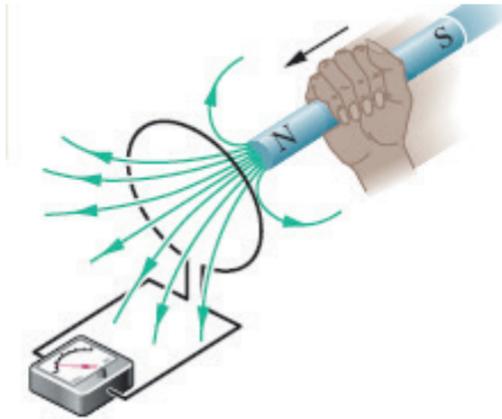
Em 1832, Faraday mostrou que uma força eletromotriz é gerada em uma bobina de N espiras quando esta é submetida a uma variação de fluxo magnético ($\Delta\phi$) em seu interior. A intensidade da força eletromotriz (FEM) gerada, denotada por e , é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético que atravessa a área da bobina. Esse fenômeno, conhecido como lei de Faraday da indução eletromagnética, pode ser demonstrado matematicamente pela seguinte expressão, em que $\lambda = N\phi$ corresponde ao fluxo concatenado na bobina:

$$e = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta\lambda}{\Delta t}$$



Uma maneira fácil de variar o fluxo magnético em uma bobina é mover um ímã para perto ou para longe dela. A Figura 1.1 ilustra esse conceito: movendo-se um ímã para a direita, mais linhas de campo magnético atravessam a espira, causando uma variação do fluxo magnético sobre ela. Caso o ímã fosse movimentado para a esquerda, ocorreria o inverso, ou seja, teríamos menos linhas de campo magnético atravessando a espira.

Figura 1.1 | Variação do fluxo magnético em uma espira



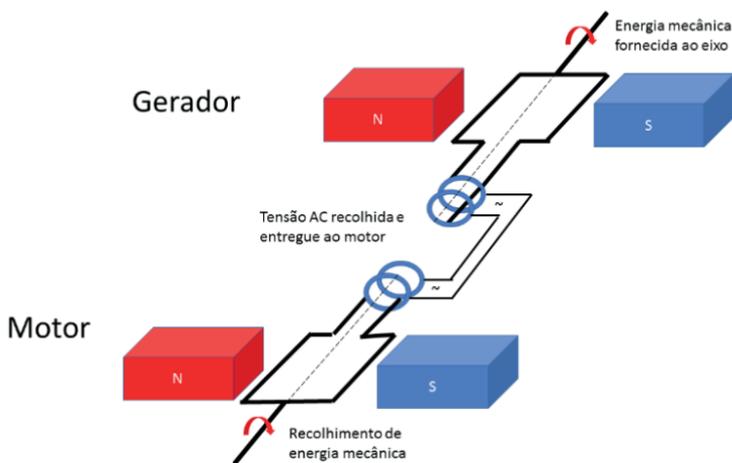
Fonte: Halliday (2016, p. 259).

Mas por que estamos lembrando destes conceitos que já foram vistos em outras disciplinas? Porque a Lei de Faraday em máquinas rotativas é fundamental para entender o princípio de funcionamento delas, uma vez que a conversão eletromagnética de energia se dá quando surgem variações de fluxo pela rotação das partes móveis da máquina. Isso pode ser visualizado melhor na Figura 1.2 que mostra o princípio de funcionamento de um gerador e de um motor através da rotação de uma espira, em meio a um campo magnético formado por ímãs permanentes.

Quando a rotação desta espira é viabilizada através da entrega de uma energia mecânica no eixo de rotação da espira, este aparato opera como gerador, pois uma FEM é induzida através da rotação mecânica em meio a um campo magnético existente, surgindo

então uma tensão alternada nos terminais da espira. A tensão alternada é recolhida nos terminais da espira e entregue à uma segunda espira que também está alocada em meio a um campo magnético fixo. Neste caso, a espira é percorrida por uma corrente alternada, e surgirá uma força que impulsiona os condutores ativos, criando um movimento de rotação. Desta forma, uma energia mecânica é retirada do eixo de rotação e o aparato funciona como um motor elétrico.

Figura 1.2 | Princípio de funcionamento de um gerador e de um motor



Fonte: elaborada pelo autor.

Antes de introduzirmos os modelos reduzidos dos principais tipos de máquinas, precisamos definir alguns termos relacionados aos aspectos construtivos e aos enrolamentos das máquinas elétricas rotativas em geral: os conceitos de rotor e estator, assim como os conceitos de enrolamento de campo e armadura.



Assimile

Em termos construtivos, as principais partes das máquinas rotativas são:

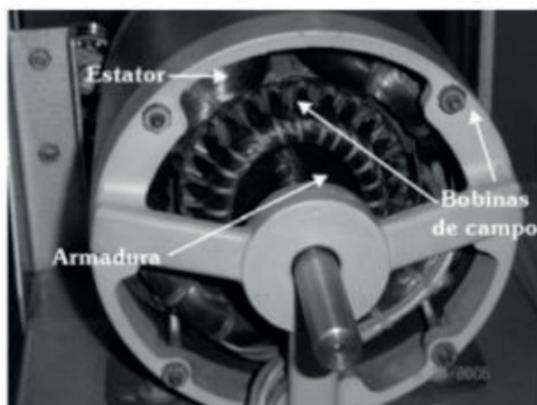
- Rotor: corresponde à parte rotativa da máquina, fixada em um eixo.
- Estator: corresponde à parte estática da máquina, normalmente envolvendo o rotor.

Em termos dos enrolamentos temos:

- Enrolamento de armadura: usado para se referir a um enrolamento ou grupo de enrolamentos que conduzam corrente alternada, mesmo quando o motor é alimentado em corrente contínua.
- Enrolamento de campo: é alimentado de forma a criar uma fonte primária de fluxo. Veremos que este enrolamento só terá sentido nas máquinas CC e nas máquinas CA síncronas. Em máquinas assíncronas, o campo é induzido no enrolamento, não existindo assim a necessidade de uma fonte primária de fluxo. Em máquinas pequenas, o enrolamento de campo é substituído por ímãs permanentes.

Tradicionalmente, as máquinas síncronas CA possuem os enrolamentos de armadura localizados no estator, enquanto que as máquinas CC possuem a armadura no rotor. Isso porque, nas máquinas síncronas CA, os enrolamentos do estator são alimentados em corrente alternada, enquanto os enrolamentos do rotor das máquinas CC, mesmo alimentadas em corrente contínua, possuem internamente uma corrente alternada devido à ação do comutador. A Figura 1.3 mostra a localização destes enrolamentos para uma máquina CC, onde as bobinas de campo estão montadas no estator, parte dela estando atrás da carcaça. Já a armadura se encontra no rotor.

Figura 1.3 | Localização dos enrolamentos em uma máquina CC



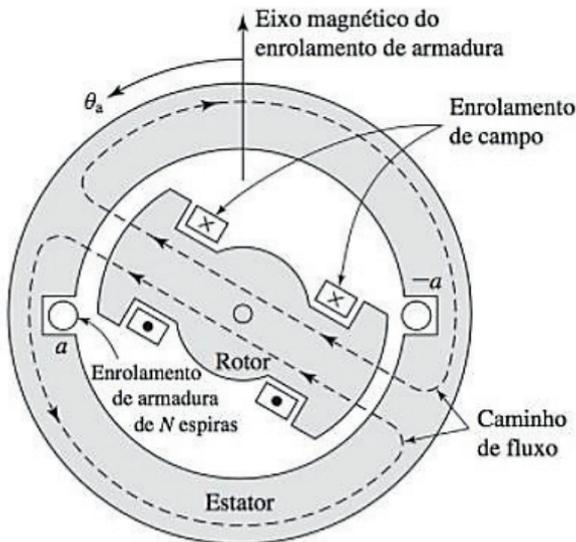
Fonte: Carvalho (2013, p. 89).

Máquinas Síncronas elementares

Iniciando pelas máquinas CA, analisaremos as máquinas síncronas elementares para entender os princípios de funcionamento delas. Nas máquinas síncronas o campo está localizado no rotor, e a armadura está localizada no estator, conforme mostra a Figura 1.4. Esta figura ilustra uma máquina síncrona elementar de 2 polos, onde pode se verificar o enrolamento do estator construído em pequenas ranhuras e disposto diametralmente com relação ao eixo do rotor. Dizemos que os enrolamentos são de passo pleno, pois as extremidades da bobina estão equidistantes de 180° .

O enrolamento de campo está localizado no rotor. Este enrolamento possui anéis coletores através dos quais é possível alimentar a máquina com corrente contínua em baixa potência por meio de escovas de carvão apoiadas nestes anéis. A ação dos anéis coletores e das escovas será explorada com maiores detalhes na Unidade que trata de Máquinas Síncronas. Quando a máquina funciona como gerador, o rotor é acionado por uma fonte externa de energia mecânica acoplada ao seu eixo em uma velocidade constante.

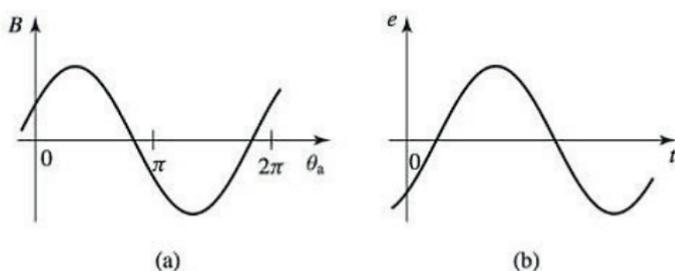
Figura 1.4 | Máquina Síncrona elementar de dois polos



Fonte: Umans (2014, p. 193).

Internamente na máquina, o comportamento da distribuição radial da indução magnética de entreferro é tal que uma forma de onda alternada aparece, conforme mostra a Figura 1.5 (a) e, por conta disso, uma tensão gerada alternada aparece na armadura, conforme mostra a Figura 1.5 (b). Note que a distribuição da indução magnética é mostrada espacialmente, enquanto o gráfico da tensão induzida é mostrado em função do tempo. Isso porque, quando o rotor gira, a intensidade de campo se altera na bobina do estator, criando a tensão senoidal.

Figura 1.5 | Forma de onda da indução magnética do entreferro (a) e da tensão gerada (b) na máquina de 2 polos



Fonte: Umans (2014, p. 194).

Na máquina com dois polos, um giro completo do rotor corresponde a um ciclo de tensão completo. Desta forma, um período mecânico corresponde a um período elétrico. Como a frequência é o inverso do período, teremos que a frequência mecânica será igual à elétrica. Isso significa que o rotor gira na mesma velocidade que a frequência da tensão gerada.



Exemplificando

Sendo uma máquina síncrona elementar de dois polos, para conseguir uma tensão de 60Hz, a qual velocidade por minuto o rotor deve girar em rotações?

Resolução:

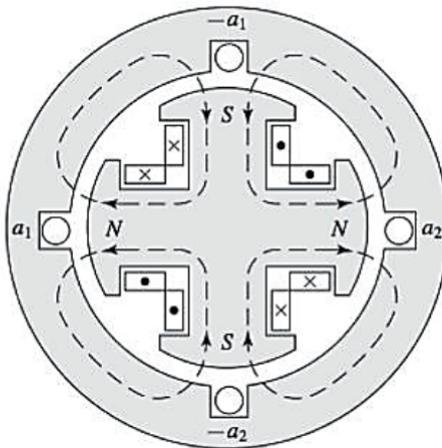
Neste caso, precisamos converter a frequência em Hertz:

$$60\text{Hz} = \frac{60 \text{ ciclos}}{1 \text{ segundo}} = \frac{60 \text{ ciclos}}{1/60 \text{ minuto}} = 3600 \text{ ciclos}/\text{minuto}$$

Ou seja, precisamos de um rotor girando à velocidade de 3600 rpm.

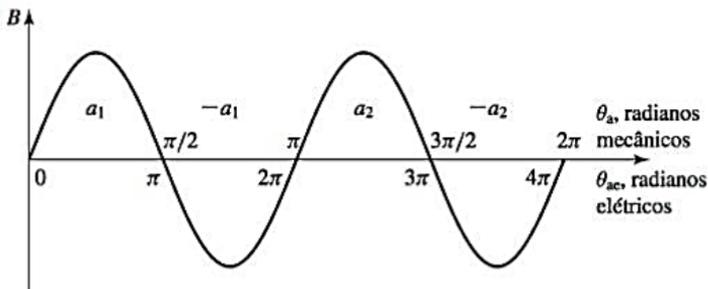
Para uma máquina de 4 polos, a estrutura construtiva e a disposição dos enrolamentos de campo e de armadura são mostradas na Figura 1.6, com as bobinas de campo ligadas de forma que os polos se alternam nas posições norte e sul. Neste caso, teremos a distribuição de fluxo do entreferro, conforme mostra a Figura 1.7.

Figura 1.6 | Máquina síncrona elementar de 4 polos



Fonte: Umans (2014, p. 195).

Figura 1.7 | Distribuição de fluxo do entreferro para a máquina de 4 polos



Fonte: Umans (2014, p. 195).

Assim, em uma máquina de 4 polos, em cada ciclo completo do rotor (2π radianos mecânicos) a distribuição de fluxo apresenta dois ciclos completos (4π radianos elétricos) e, conseqüentemente, a tensão gerada na armadura apresenta o mesmo comportamento. Desta forma, para uma máquina de 4 polos, a velocidade de giro do rotor, para se obter uma tensão de 60Hz, não será a mesma que a frequência elétrica, pois são necessários 1800 rpm. Podemos generalizar esta ideia para uma máquina de P polos e, então, teremos a frequência da tensão gerada (f), dada pela equação a seguir:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \quad (\text{Hz})$$

A relação entre os ângulos elétricos e mecânicos e entre a velocidade angular elétrica e mecânica será conforme a seguir:

$$\theta_{el} = \frac{P}{2} \theta_{mec}$$
$$\omega = \frac{P}{2} \omega_{mec}$$

Quando a máquina síncrona opera como motor, temos a corrente alternada alimentando a armadura, com a frequência dada pela frequência da onda de tensão, e uma excitação CC no enrolamento de campo. A velocidade de rotação do motor síncrono será dada manipulando a equação para a frequência dada para o gerador síncrono, ou seja:

$$n = 120 \frac{f}{P} \quad (\text{rpm})$$

É importante destacar que o conjugado eletromecânico no motor tem o sentido da rotação e contrabalança o conjugado oposto necessário para movimentar a carga mecânica. Na máquina síncrona operando como motor, as correntes de armadura produzem um fluxo que gira à frente do que foi produzido pelo enrolamento de campo do rotor. Este fluxo realiza um trabalho quando arrasta enrolamento de campo, fazendo o rotor girar. O oposto ocorre quando a máquina funciona como gerador onde o campo faz o trabalho quando seu fluxo arrasta o da armadura. Tanto em geradores como em motores, além de um conjugado eletromecânico, é induzida

uma tensão de velocidade (FEM) na armadura pelo enrolamento de campo girante (UMANS, 2014).



Exemplificando

Considerando um motor síncrono de 6 polos, qual a diferença de velocidade de rotação que este motor teria se fosse levado do Brasil para a Europa?

Resolução:

Na Europa, a frequência da rede é de 50Hz, enquanto no Brasil a frequência é de 60Hz. Sendo assim, em cada uma das regiões o motor teria as seguintes velocidades em rpm:

$$\text{No Brasil: } n_1 = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

$$\text{Na Europa: } n_2 = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

A diferença de velocidade será de:

$$\Delta n = n_1 - n_2 = 1200 - 1000 = 200 \text{ rpm}$$

Máquinas de Indução elementares

As máquinas de indução são também chamadas de assíncronas e, assim como as síncronas, são máquinas de corrente alternada. Construtivamente, as características dos enrolamentos no estator são as mesmas nas máquinas síncronas e assíncronas. Já no rotor, as máquinas assíncronas podem apresentar algumas diferenças. Primeiramente porque o enrolamento do rotor não é alimentado, na verdade os terminais são curto-circuitados para viabilizar a indução magnética de corrente, conforme vimos na Lei de Faraday para máquinas rotativas. Alguns tipos de rotores desta máquina têm uma construção no formato de barras conectadas a anéis, formando os rotores em gaiola de esquilo. Logo, operando como motor de indução, o enrolamento do rotor é eletricamente fechado sobre si mesmo, não apresentando terminais externos na maioria das vezes. O campo é excitado com corrente alternada e, por indução magnética, um campo é gerado no enrolamento do rotor. A máquina

de indução ou assíncrona é considerada como um transformador generalizado devido à característica de indução magnética de corrente no rotor e, conseqüentemente, transformação de potência elétrica entre estator e rotor, com mudança de frequência e fluxo de potência mecânica na máquina. A velocidade de giro dos motores de indução é menor que a velocidade das máquinas síncronas e, neste caso, o fluxo de armadura do motor de indução está à frente do fluxo do rotor, produzindo um torque. Assim, embora esta velocidade seja menor, existe um sincronismo entre as ondas de fluxo que são produzidas pelas correntes, sendo induzidas no rotor com as ondas de fluxo do estator.



Refleta

Você pode perceber que as máquinas síncronas e as máquinas assíncronas apresentam estruturas construtivas similares, mas existe um aspecto que as diferencia, e que está relacionado à sua denominação (síncrona e assíncrona). Qual fator seria esse?

As máquinas de indução são mais comumente empregadas como motores, pois as características de desempenho na aplicação como gerador não são satisfatórias. No entanto, atualmente pode-se encontrar as máquinas de indução sendo aplicadas como geradores com o auxílio de outros equipamentos, por exemplo, em parques eólicos.

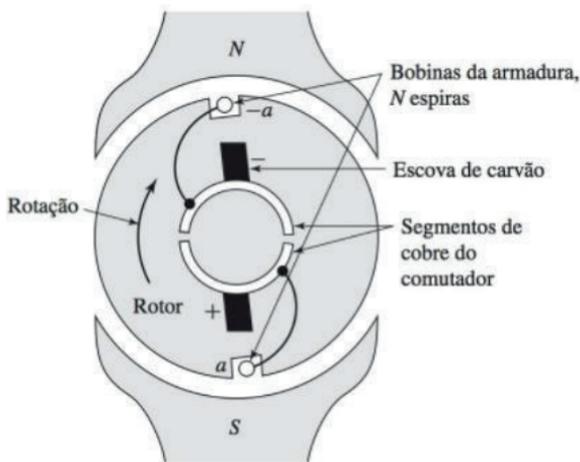
A máquina de indução pode fazer a conversão de energia mecânica em energia elétrica, porém é necessário um magnetismo residual no enrolamento do rotor, normalmente de pequena intensidade, levando a baixas tensões induzidas. No entanto, o fornecimento de potência reativa à máquina pode ajudar a ampliar o efeito do magnetismo residual, e isso pode ser feito através da rede elétrica, quando ocorre a operação interligada, ou de forma isolada por meio de bancos de capacitores em paralelo com os terminais do estator, também chamado de autoexcitação.

Máquinas CC elementares

As máquinas CC recebem este nome porque são acionadas apenas por corrente e tensão constante. A Figura 1.8 mostra uma

máquina CC elementar de dois polos em que o enrolamento de armadura se situa no rotor onde ocorre a excitação da máquina por meio de uma corrente contínua. A corrente chega ao enrolamento de armadura através de comutadores com escovas de carvão deslizando sobre elas. O comutador consiste em lâminas de cobre em formato cilíndrico sobre o eixo do rotor, mas não diretamente acopladas a ele. Este dispositivo tem a função de inverter o sinal da corrente internamente na máquina, de forma que internamente a máquina opere com uma corrente alternada devido a essa comutação.

Figura 1.8 | Máquina CC elementar de 2 polos

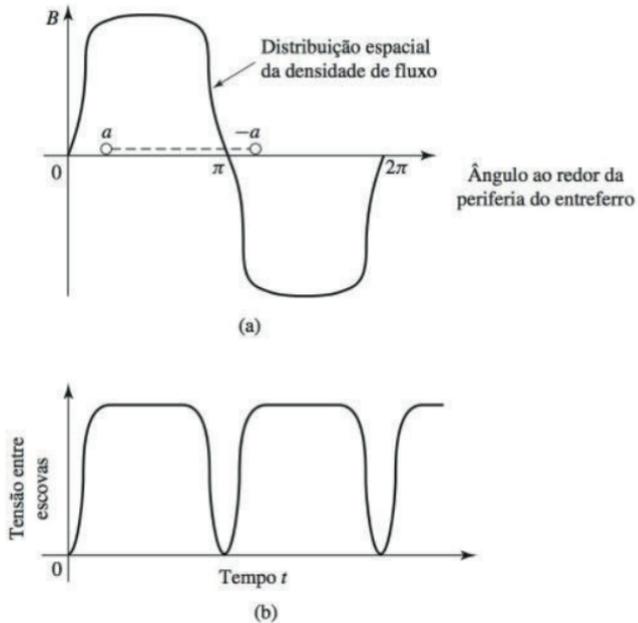


Fonte: Umans (2014, p. 201).

Para entender o princípio de funcionamento das máquinas CC e como ocorre a distribuição dos fluxos nesta máquina, vamos considerar a atuação da máquina como geradora. Neste caso, o rotor recebe uma potência mecânica em seu eixo a uma velocidade constante. No enrolamento da armadura, a distribuição de fluxo é dada conforme a Figura 1.9 (a), em que se percebe que o formato não é senoidal, mas alternado. Além disso, após uma rotação completa (2π radianos mecânicos), tem-se um período de onda. Uma vez que a bobina está em rotação, tem-se uma tensão gerada no enrolamento da armadura, de mesmo formato que a distribuição de fluxo no tempo. Quando os comutadores

passam pelas escovas após meio ciclo (π radianos), ocorre a comutação, e o sentido de circulação da corrente se altera nas escovas. Desta forma, temos a tensão induzida retificada dada pela onda mostrada na Figura 1.9 (b).

Figura 1.9 | Distribuição de fluxo (a) e distribuição do fluxo magnético (b) Tensão nas escovas



Fonte: Umans (2014, p. 201).



Pesquise mais

Além do que vimos nesta seção sobre os aspectos construtivos e o comportamento da distribuição de fluxo na máquina, outros detalhes podem ser encontrados na Seção 4.2 do livro *Máquinas elétricas* de Fitzgerald e Kingsley, como a diferença entre enrolamentos concentrados e distribuídos. Assim, para aprofundar os seus conhecimentos neste tema, sugerimos uma leitura atenta:

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014, p. 193-202.

Também disponível em nossa biblioteca virtual: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580553741/cfi/208!/4/2@100:0.00>>. Acesso em: 15 maio 2018.

Sem medo de errar

Após este estudo inicial sobre as máquinas elétricas rotativas, você pode retomar a tarefa que lhe foi delegada no seu estágio. Vamos lembrar: você está participando de um programa de estágio em uma empresa do segmento petroquímico e está passando por diversas áreas para entender as máquinas elétricas existentes nesta planta industrial.

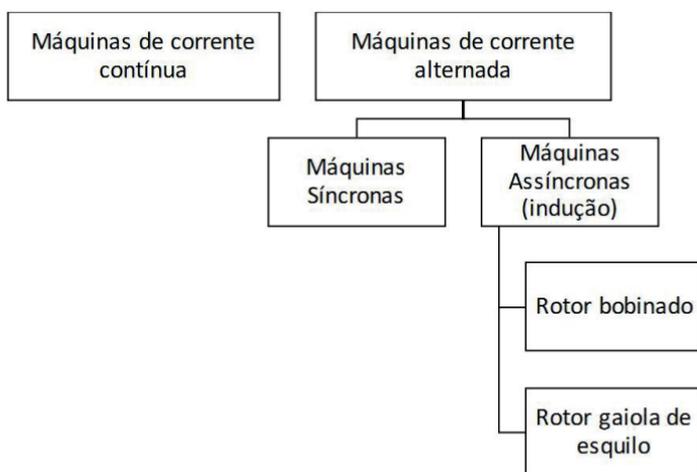
Por ser do segmento petroquímico, é possível que nesta empresa você encontre não somente motores elétricos, mas também motores de combustão interna. Quais seriam as principais diferenças no princípio de funcionamento, vantagens e desvantagens de cada um deles? Considerando os motores elétricos que podem existir nesta planta industrial, como poderiam ser classificados com relação à corrente elétrica e como diferenciar cada um deles?

Verificamos que os motores de combustão interna são máquinas que operam seguindo os princípios da termodinâmica e com os conceitos de compressão e expansão de fluidos gasosos para gerar torque e movimento rotativo. Já os motores elétricos têm a vantagem de apresentarem rendimentos melhores, não produzirem gases poluentes e serem mais silenciosos. Porém, dependem da disponibilidade de uma fonte de energia elétrica, e este problema não existe no motor de combustão interna, pois um combustível é armazenado em um reservatório externo e o motor utiliza este combustível para operar.

As máquinas elétricas rotativas são divididas quanto ao tipo de corrente elétrica na qual operam, sendo classificadas em máquinas de corrente contínua e máquinas de corrente alternada. Todas elas operam segundo o princípio da indução magnética de correntes (Lei de Faraday para a indução). Quanto aos aspectos construtivos, estes tipos de máquinas possuem uma parte denominada estator, que geralmente está fixada nas carcaças das máquinas, e também

uma parte móvel denominada rotor, que gira dentro do estator por meio de um eixo e rolamentos. Também são compostas por enrolamentos denominados enrolamentos de campo e de armadura. As máquinas de corrente contínua apresentam o enrolamento de armadura no rotor e de campo no estator, ambos sendo alimentados por uma fonte de corrente contínua. Entretanto, devem dispor de comutadores e escovas deslizantes para inverter a polaridade internamente no enrolamento de armadura, promovendo assim o torque para giro adequado do motor. Já as máquinas de corrente alternada são divididas entre síncronas e assíncronas (ou de indução). As máquinas de corrente alternada possuem o enrolamento de armadura no estator, mas o enrolamento de campo depende do tipo de máquina CA. As máquinas síncronas possuem o enrolamento de campo no estator, sendo este excitado por corrente contínua para criar um campo magnético que será arrastado pelo campo magnético do estator. As máquinas de indução podem ser do tipo gaiola de esquilo (barras com anéis de curto-circuito) ou de rotor bobinado cujos enrolamentos são fechados em si, de forma a promover o giro através do fenômeno da indução magnética de corrente e consequente torque. A Figura 1.10 apresenta um esquema com a divisão dos principais tipos de máquinas elétricas que podem ser encontrados na indústria:

Figura 1.10 | Principais tipos de máquinas elétricas rotativas



Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta etapa do seu trabalho no programa de estágios já foi possível conhecer os conceitos fundamentais que regem as máquinas rotativas CC e CA e analisar suas características principais. Com estas informações, você pode elaborar o relatório solicitado pelo gestor da sua área.

Avançando na prática

Determinando o número de polos pela placa de identificação do motor

Descrição da situação-problema

Imagine que você está trabalhando em uma empresa de bombas centrífugas e sua tarefa é elaborar um manual técnico que contemple todas as informações do sistema, inclusive os dados nominais dos motores elétricos. Para que seu dever seja cumprido, é necessário que você olhe a placa de dados do motor elétrico e transcreva as informações. Contudo, a placa de dados do motor de indução não apresenta a informação acerca do número de polos da máquina. Na Figura 1.11, é apresentada a placa de um desses motores.

Figura 1.11 | Placa de identificação de um motor de indução

DRM		DRM Motores S.A	
		Rua Monsenhor Salazar, 1344 Fortaleza - Ceará CGCMF 65879141/0001-00 Indústria Brasileira	
Motor de Indução Trifásico			
kW 450	HZ 60		FS 1,15
cv 600	Primário		COS 0,91
MOD KBF55C	V 380	A 768,1	LIG Y
RPM 1778	V	A	AMB 40 °C
CAT	V	A	ALT 1000 M
ISOL F	Secundário		T 80 °C
REG S1	A	A	LIG Y
NR			
ABTN NBR - 7094			

Fonte: Mamede Filho (2017, s.p.).

Uma vez que você precisa identificar o número de polos no manual técnico, como procederia para resolver este problema?

Resolução da situação-problema

A placa de identificação de um motor nos fornece vários dados sobre ele, tais como tensão e corrente nominal, fator de serviço, fator de potência, potência nominal, frequência de operação, entre outros. Entretanto, na placa deste motor não encontramos o número de polos. Estas informações, entretanto, podem ser obtidas de outros valores nominais. No campo HZ encontra-se a frequência de operação do motor em Hertz, e no campo RPM está a velocidade nominal do motor em rotações por minuto. Com estas informações, podemos equacionar a relação de velocidade e frequência do motor, conforme a seguir:

$$n = \frac{120f}{P} \rightarrow 1778 = \frac{120 \times 60}{P}$$

Assim, podemos obter o número aproximado de polos usando esta expressão:

$$P = \frac{120 \times 60}{1778} \rightarrow P = 4,05$$

Logicamente, o número de polos de uma máquina deve ser um número inteiro positivo. Como a máquina é de indução, isso significa que a velocidade nominal de rotação é um pouco abaixo da velocidade síncrona, então podemos arredondar o número de polos. Logo, o número de polos desta máquina é igual a 4.

Faça valer a pena

1. Construtivamente, as máquinas elétricas rotativas são compostas por partes fixas e móveis, assim como os seus respectivos enrolamentos. Considere as colunas a seguir que mostram as principais partes das máquinas rotativas e suas definições:

1 – Rotor

2 – Estator

3 – Enrolamento de campo

4 – Armadura

() é a parte estática da máquina, normalmente envolvendo a parte rotativa.

() é a parte rotativa da máquina, normalmente fixada em um eixo.

() é um enrolamento ou grupo de enrolamentos que conduzem corrente alternada na máquina.

() são enrolamentos alimentados de forma a criar uma fonte primária de fluxo.

Assinale a alternativa que associa corretamente as colunas.

- a) 1 – 2 – 4 – 3.
- b) 1 – 2 – 3 – 4.
- c) 2 – 1 – 3 – 4.
- d) 2 – 1 – 4 – 3.
- e) 3 – 4 – 2 – 1.

2. Com relação às máquinas elétricas rotativas, considere as seguintes assertivas:

A Lei de Faraday da indução magnética é fundamental para entender o princípio de funcionamento das máquinas rotativas.

PORQUE

A armadura da máquina CC opera internamente com uma tensão alternada, sendo que o comutador é o dispositivo responsável para se obter uma tensão contínua nas escovas deslizantes.

Assinale a alternativa que associa corretamente as assertivas.

- a) Ambas estão corretas e a II é uma justificativa da I.
- b) Ambas estão corretas, mas a II não é uma justificativa da I.
- c) Apenas a I está correta.
- d) Apenas a II está correta.
- e) Nenhuma está correta.

3. Um gerador síncrono está sendo projetado para uma usina hidrelétrica de forma a fornecer uma tensão alternada para uma rede de 50Hz na Europa. Para projetar este gerador, é necessário definir o número de polos e um controle de velocidade da turbina, para que a frequência da tensão gerada atenda aos requisitos estabelecidos.

De forma a atender os requisitos de frequência, o número de polos e a velocidade da turbina deverão ser:

- a) 2 polos, 3000 rpm.
- b) 2 polos, 375 rpm.
- c) 16 polos, 375 rpm.
- d) 16 polos, 3000 rpm.
- e) 8 polos, 375 rpm.

Seção 1.2

Campos magnéticos em máquinas rotativas

Diálogo aberto

Olá, aluno. Seja bem-vindo à segunda seção da primeira unidade da disciplina Máquinas Elétricas. Daremos continuidade ao estudo dos fundamentos das máquinas elétricas rotativas elementares, analisando o comportamento da força magnetomotriz (FMM) e dos campos magnéticos internamente à máquina. Entender estes fundamentos é muito importante para prosseguir com os estudos. Isso porque a FMM gerada no entreferro da máquina que está sendo excitada por uma fonte de corrente alternada pode ser decomposta em ondas progressivas girantes e este é um conceito muito importante para a compreensão das máquinas de corrente alternada, por exemplo.

Neste sentido, vamos retomar o contexto em que você participa de um programa de estágio e está sendo treinado pelo seu supervisor para trabalhar com as máquinas elétricas da planta industrial de uma empresa do segmento petroquímico. Você já foi apresentado aos aspectos construtivos das máquinas elétricas rotativas e conheceu como os tipos de máquinas elétricas são classificados de acordo com a corrente elétrica com a qual operam. Também aprendeu a diferenciar as máquinas elétricas rotativas das máquinas de combustão interna, utilizadas, por exemplo, como motores em carros.

Após a visita pela empresa, seu supervisor o conduz para uma subestação de energia que atende à fábrica. Lá há um painel que exibe os valores de tensão alternada e de frequência fornecidos para a planta industrial. Querendo testar seus conhecimentos, seu gestor questiona a importância de se conhecer estes valores para especificar um motor de corrente alternada a ser utilizado na planta petroquímica. Considerando que a frequência da rede é equilibrada e tem frequência igual a 60Hz, seu supervisor solicitou que você fizesse uma apresentação detalhando as possibilidades de conseguir velocidades diferentes com motores de corrente alternada, em

diversos casos, e explicando como ocorre o giro do motor segundo o funcionamento do campo magnético girante.

Como você acha que poderia preparar esta apresentação? Quais conceitos fundamentais deve expor, de forma a mostrar para seu supervisor que você entende com profundidade os conceitos básicos de operação das máquinas de corrente alternada?

No decorrer desta seção você obterá os conhecimentos necessários para poder elaborar uma apresentação atrativa e com os conceitos mais relevantes. Bons estudos!

Não pode faltar

Caro aluno, iniciaremos a discussão com a força magnetomotriz (FMM) das máquinas elétricas apresentadas na seção anterior. Mostraremos os conceitos para os **enrolamentos distribuídos**, nos quais os lados da bobina estão distribuídos em múltiplas ranhuras ao longo da periferia do rotor e posicionados de modo que uma distribuição aproximadamente senoidal de fluxo radial no entreferro é produzida (UMANS, 2014). Contudo, para compreender a FMM em enrolamentos distribuídos, iniciaremos com o estudo da FMM em um enrolamento de uma única bobina de N espiras com passo pleno (extremidades separadas com 180 graus mecânicos). Posteriormente, vamos expandir o conceito para os enrolamentos distribuídos.

Na Figura 1.12 (a), podemos visualizar o enrolamento da bobina única de N espiras. As direções das correntes estão representadas na bobina por cruces e pontos, indicando a corrente entrando e saindo do plano da figura, respectivamente. Para fins de análise, consideraremos que a relutância do material do núcleo de ferro é predominante, desprezando assim a relutância do entreferro. Desta forma, podemos considerar que a FMM em torno de qualquer um dos caminhos fechados representados pelas linhas de fluxo será igual à Ni , e a FMM não sofrerá queda significativa no entreferro. Uma vez que a simetria é assumida com o eixo magnético da bobina do estator no centro do rotor, tem-se que a onda de FMM gerada nesta

bobina de passo pleno é uma onda quadrada de amplitude $\frac{Ni}{2}$,

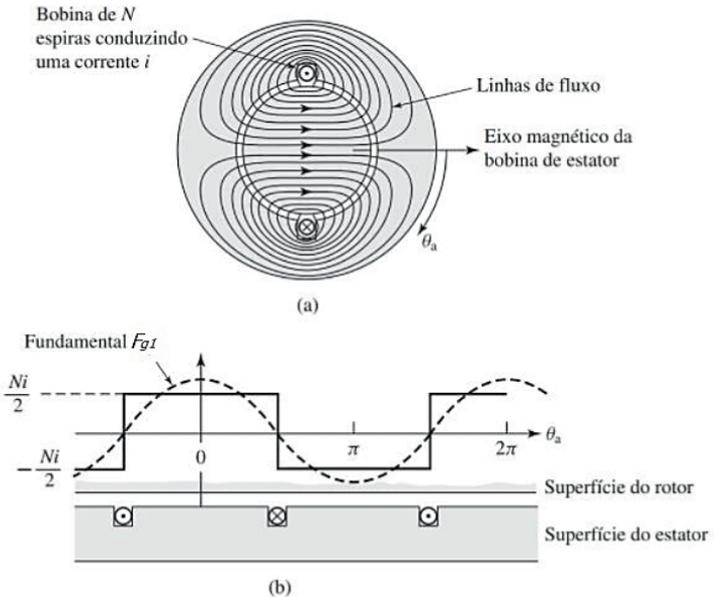
em que i corresponde à corrente elétrica que percorre esta bobina,

como mostra a Figura 1.12 (b). Para que esta onda seja o mais próximo de uma onda quadrada estamos assumindo a abertura das ranhuras muito pequenas, de forma que a FMM faça um salto de Ni ao passar de um lado para outro da bobina.

Esta onda quadrada pode ser decomposta em suas componentes da série de Fourier para extrair a componente fundamental e, desta forma, obteremos a expressão da Equação a seguir:

$$F_{g1} = \frac{4 Ni}{\pi} \cos(\theta_a)$$

Figura 1.12 | Máquina com enrolamento de uma única espira de passo pleno: (a) distribuição das linhas de fluxo e (b) forma de onda da FMM

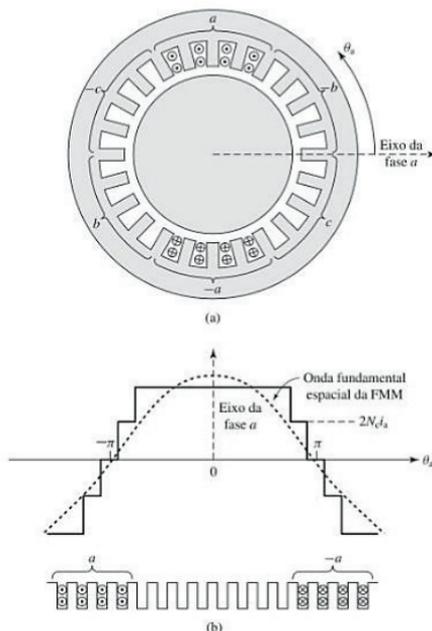


Fonte: Umans (2014, p. 203).

No projeto das máquinas CA ocorre a distribuição do enrolamento para produzir uma distribuição espacial senoidal de FMM. A distribuição do enrolamento é feita a fim de separar as bobinas de cada fase em um número de ranhuras para aproveitar melhor o ferro do núcleo e o cobre dos enrolamentos, melhorando muito a forma de onda. Para entender como isso ocorre, observe a Figura 1.13 (a), onde os enrolamentos da bobina a estão distribuídas em

quatro ranhuras por extremidade, com duas bobinas por ranhura, para que a FMM resultante das linhas de fluxo para uma determinada ranhura seja igual a $2N_c i_a$, em que i_a é a corrente em uma bobina. Observa-se, então, através da Figura 1.13 (b), que a onda resultante é formada por uma série de degraus de altura $2N_c i_a$.

Figura 1.13 | Máquina com enrolamento distribuído: (a) distribuição dos enrolamentos das bobinas das fases a , b e c e (b) forma de onda da FMM



Fonte: Umans (2014, p. 205).



Refleta

No caso de uma máquina com o número de oito ranhuras por extremidade da bobina de uma fase, como ficaria a forma de onda da FMM resultante? E com 12 ranhuras?

Percebe-se que, para o caso do enrolamento distribuído, ocorre uma melhor aproximação senoidal de FMM do que na bobina concentrada em uma única ranhura, como mostrado na Figura 1.13 (b). Pode-se novamente extrair a onda fundamental através da

decomposição em séries de Fourier. No entanto, a onda de FMM resultante é menor que a soma das componentes fundamentais dos degraus individuais, uma vez que os eixos magnéticos das bobinas individuais não estão alinhados. Desta maneira, para um enrolamento distribuído de P polos, com N_{fs} espiras em série por fase, a FMM é dada por meio da equação seguinte, em que o fator de enrolamento k_w leva em conta a distribuição, normalmente entre 0.85 e 0.95.

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{fs}}{2} i_a \cos(\theta)$$



Pesquise mais

Uma das influências mais relevantes quando consideramos a forma de onda e a amplitude da FMM em máquinas CA está relacionada à disposição dos enrolamentos e da geometria geral da máquina. Estes aspectos construtivos, por sua vez, são determinados para garantir o uso econômico do espaço da máquina, além de adequar a máquina para o tipo de aplicação pretendido. Assim, sugerimos uma atenta leitura do Apêndice B.2 do livro a seguir, onde são abordados detalhes mais aprofundados sobre a FMM de enrolamentos distribuídos em máquinas CA.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014. Páginas 657 a 660. Disponível em:

<<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580553741/>>. Acesso em: 25 maio 2018.

É importante ressaltar que a equação descreve o comportamento da componente fundamental espacial da forma de onda de FMM produzida pela corrente elétrica que percorre o enrolamento distribuído. Nota-se que o ângulo de variação corresponde ao cosseno do ângulo formado pelo enrolamento em relação ao eixo do rotor. Entretanto, em uma máquina CA, os enrolamentos são alimentados por corrente senoidal, de forma que a onda de FMM é estacionária no espaço, variando conforme o tempo e o ângulo θ_a .



Considere uma máquina CA cujo fator de enrolamento é de 0,923, tendo oito bobinas por fase e cada bobina com 300 espiras. Se a corrente elétrica que percorre este enrolamento se comporta senoidalmente como $i_a = 10\text{sen}(\omega t)$, determine o valor máximo da FMM nesta máquina.

Resolução:

Neste caso, temos uma corrente senoidal percorrendo o enrolamento da máquina de modo que podemos reescrever a equação para a FMM, como a seguir:

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{fs}}{2} I_m \text{sen}(\omega t) \cos(\theta_a)$$

Sabe-se que o valor máximo para $\cos(\theta_a)$ ou para $\text{sen}(\omega t)$ é igual a um, logo, o valor máximo da FMM será:

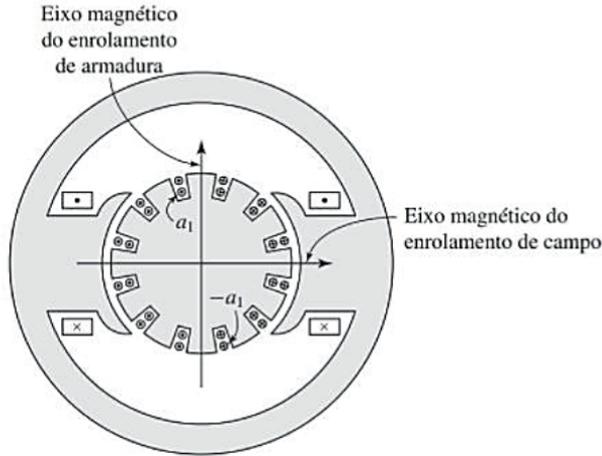
$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{fs}}{2} I_m$$

Substituindo os valores, teremos:

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{4}{\pi} 0,923 \frac{8 \times 300}{2} 10 = 1,41 \times 10^4 \text{ Ae}$$

Nas máquinas CC, a onda de FMM da armadura possui um formato diferente da encontrada em máquinas CA. Na Figura 1.14 é mostrada a seção transversal de uma máquina CC, onde pode ser verificado que, devido ao sentido das correntes no enrolamento da armadura (neste caso, no rotor), o eixo magnético do enrolamento da armadura é perpendicular ao eixo do enrolamento de campo. Por causa da ação do comutador, mesmo quando ocorre o giro do rotor, a perpendicularidade dos eixos é mantida, resultando num conjugado contínuo unidirecional.

Figura 1.14 | Distribuição do enrolamento de armadura na máquina CC



Fonte: Umans (2014, p. 209).

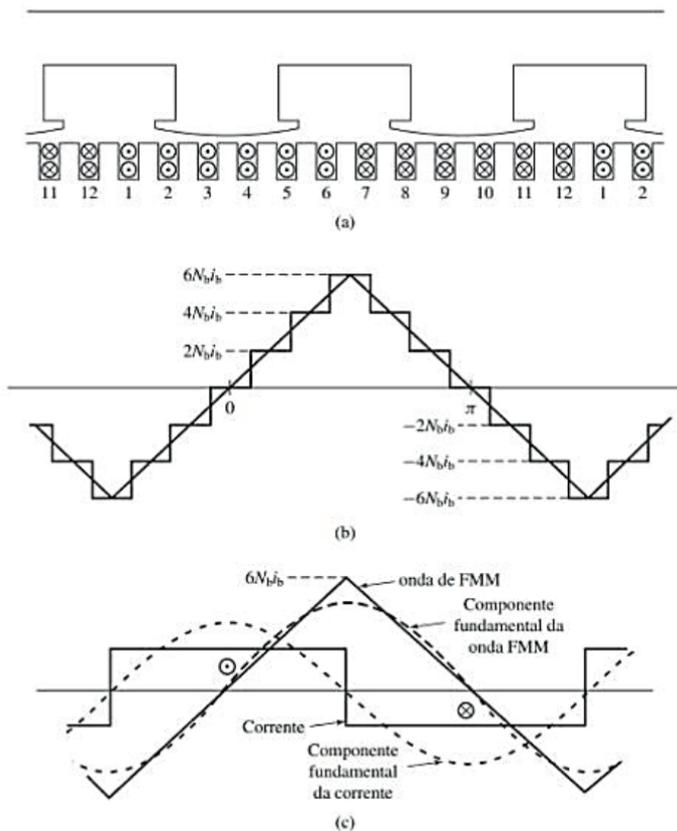
A forma de onda da FMM da máquina da Figura 1.14 é mostrada na Figura 1.15. Na Figura 1.15 (a) o enrolamento de armadura é disposto linearmente, para que os enrolamentos coincidam com os degraus da FMM mostrada na Figura 1.15 (b). A altura de cada degrau é igual ao número de amperes-espiras $2N_b i_b$ (Ae) em uma ranhura. Essa forma de onda dependerá sempre do arranjo do enrolamento e da estrutura magnética de cada polo. Neste caso, a onda de FMM é uma série de degraus e, quanto maior o número de ranhuras por polo na armadura, melhor será a aproximação para uma onda triangular. Da mesma forma que para a FMM em máquinas CA, pode-se extrair a onda fundamental da FMM através da decomposição em transformada de Fourier, conforme mostrado na Figura 1.15 (c). Ao extrair a fundamental da série de Fourier que compõe a onda triangular, obtém-se uma onda senoidal, cujo valor de pico é cerca de $8/\pi^2$ vezes o valor de pico da onda triangular.

Assumindo a simetria dos enrolamentos e dos polos do campo, o comportamento de cada par sucessivo de polos é semelhante aos demais. Portanto, podemos analisar um dos pares de polos adjacentes para determinar uma equação para a FMM na máquina CC. O valor de pico da onda triangular de FMM da armadura é dado pela Equação a seguir, que considera o número de caminhos paralelos (m), o número total de condutores na

armadura (C_a), e em que I_a é a corrente da armadura e P o número de polos da máquina.

$$F_a = \frac{1}{2} \frac{C_a I_a}{P m}$$

Figura 1.15 | FMM na máquina CC: (a) Polos e enrolamento de armadura esticado; (b) forma de onda FMM e (c) componentes fundamentais da FMM e corrente



Fonte: Umans (2014, p. 210).

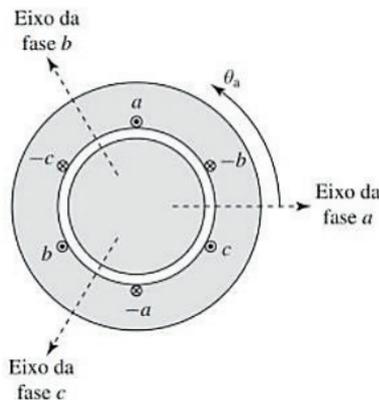
Para que possamos ter uma melhor compreensão das máquinas elétricas CA, vamos estudar como o campo magnético se comporta e qual seu papel no funcionamento dessas máquinas. Entre o rotor e o estator existe um espaço de ar chamado de entreferro, onde ocorre a conversão

eletromecânica de energia. Para simplificar nossa análise, vamos considerar o campo magnético radial em máquinas que possuem o entreferro constante. Isso quer dizer que a distância dos polos no rotor à superfície do estator não varia em nenhum ponto radial da máquina. Já consideramos este aspecto quando apresentamos as estruturas das máquinas nas Figuras 1.12 e 1.13. Dessa forma, o campo magnético radial no entreferro pode ser descrito pela Equação a seguir, em que g corresponde à distância do espaço de ar existente entre o rotor e estator.

$$H_g = \frac{F_g}{g}$$

Assim, o comportamento do campo magnético em uma máquina CA de entreferro constante apresenta o mesmo comportamento da FMM, reduzido de um fator g . Isso significa que podemos analisar o desempenho da FMM em enrolamentos trifásicos e estender a pesquisa para o campo magnético. Na Figura 1.16 é apresentado um esquema simples de uma máquina trifásica com os enrolamentos deslocados de 120 graus elétricos ao longo do entreferro.

Figura 1.16 | Esquema simplificado do enrolamento trifásico do estator em uma máquina trifásica de 2 polos



Fonte: Umans (2014, p. 218).

A partir da Figura 1.16, é possível observar que os enrolamentos são representados pelas bobinas a , b e c . As correntes

instantâneas que alimentam cada fase variam alternadamente com o tempo, podendo ser escritas conforme as três Equações a seguir, em que I_m corresponde ao valor de pico da corrente. Conforme já vimos, a FMM produzida por cada bobina é uma onda senoidal centrada no eixo magnético de cada fase. Assim, as três ondas FMM estão também afastadas uma da outra por 120 graus elétricos e variam espacialmente.

$$i_a(t) = I_m \cos(\omega t)$$

$$i_b(t) = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

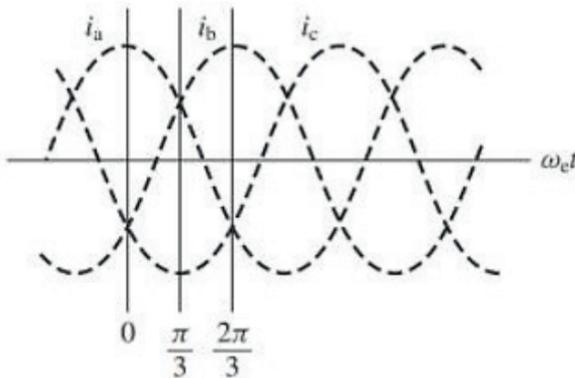
$$i_c(t) = I_m \cos(\omega t + 120^\circ)$$

A Figura 1.17 apresenta a defasagem das ondas de corrente de fase, na sequência abc. Observe que a razão é intuitiva, uma vez que a sequência dos máximos ocorre nesta ordem. Para

cada um dos pontos em que ωt é igual a zero, $\frac{\pi}{3}$ radianos (ou 60°) e $\frac{2\pi}{3}$ radianos (ou 120°), as componentes da

FMM em cada fase apresentam certa magnitude e fase que se somam, formando uma FMM resultante.

Figura 1.17 | Ondas de corrente de fase



Fonte: Umans (2014, p. 219).

Por exemplo, observe na Figura 1.18 (a) o instante inicial $t = 0$ segundo. Nesse instante, tem-se que na fase a o valor da corrente é o máximo ($i_a(0) = I_m$). Sendo assim, é possível observar que a FMM da fase a atinge o seu valor máximo. Observando a Figura 1.18 (a), pode-se verificar que os vetores F_a , F_b e F_c representam as FMM geradas em cada etapa pelas correntes, conforme o tempo. No instante inicial a corrente na fase a atinge o seu valor máximo e, nesse mesmo instante, as correntes das outras duas etapas atingem

os valores $i_b(0) = i_c(0) = I_m/2$. Além disso, é possível observar

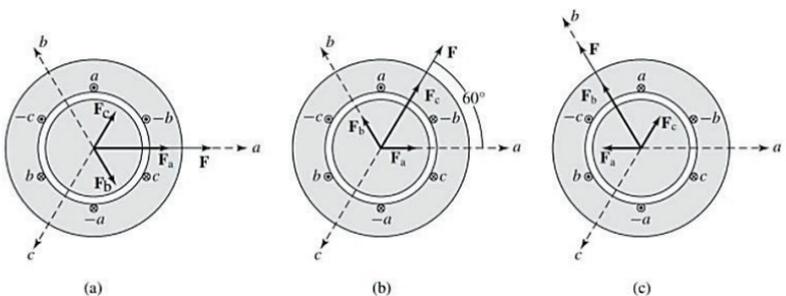
também, pela Figura 1.17, que, enquanto a corrente da fase a é positiva, as correntes das outras têm sinal negativo. Dessa forma, o vetor resultante de FMM é o F na Figura 1.18 (a).

Tendo feito essas observações, fica mais simples de entender o que ocorre quando, depois de algum tempo, o valor de ωt

chega em $\frac{\pi}{3}$ radianos (ou 60°). O comportamento

da FMM é ilustrado na Figura 1.18 (b), em que se verifica que os vetores F_a , F_b e F_c têm resultante F deslocada também de 60° no sentido anti-horário.

Figura 1.18 | Comportamento da FMM para diferentes tempos (a) $\omega t = 0$ (b) $\omega t = 60^\circ$ (c) $\omega t = 120^\circ$



Fonte: Umans (2014, p. 221).

A onda de FMM em cada uma das fases mantém, ao longo do tempo, sua forma senoidal e sua amplitude, mas a resultante é um vetor de magnitude constante que vai alterando a sua posição e direção ao longo do entreferro, com uma certa frequência angular.

Para uma máquina de 2 polos, a onda de FMM sofre uma rotação completa por ciclo. Se for extrapolada para uma máquina de P polos, a onda de FMM apresenta $2 \times P$ rotações por ciclo. Assim, é possível concluir mais uma vez que o número de polos influencia diretamente na velocidade de rotação do campo magnético.



Assimile

O **campo magnético girante** surge na máquina de indução devido ao comportamento das ondas girantes de FMM. Observando a Figura 1.18, pode-se verificar que o vetor F acompanha o polo norte de um campo magnético resultante, devido à FMM total. A velocidade do campo magnético girante será de acordo com os aspectos construtivos dos enrolamentos da máquina. A **velocidade síncrona de rotação** é definida como a velocidade de rotação do campo magnético principal da máquina, em rotações por minuto, dada pela Equação a seguir, em que f_s é a frequência em Hertz (Hz) e P é o número de polos:

$$n_s = 120 \frac{f_s}{P}$$

Sem medo de errar

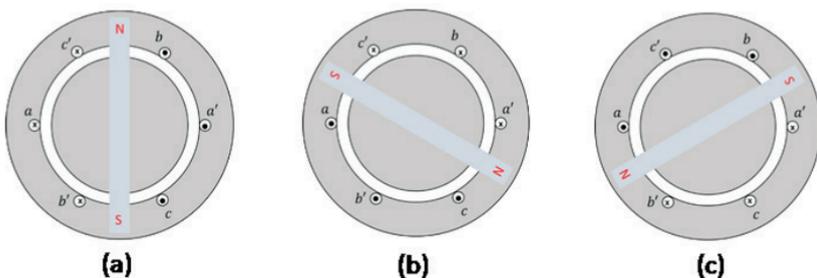
Após compreender como as ondas girantes de FMM e como o campo magnético se comporta nas máquinas elétricas trifásicas de corrente alternada, você poderá elaborar sua apresentação. Lembre-se que nesta etapa você deve fazer uma apresentação detalhando como especificar os motores para diferentes velocidades e como os campos magnéticos se comportam nas máquinas de corrente alternada.

Em uma apresentação de slides, o aspecto visual é muito importante. Ainda, a ideia inicial a ser mostrada é de como o campo magnético girante se comporta na máquina. No decorrer desta seção, você entendeu muito bem como é o comportamento da FMM resultante na máquina, mostrado na Figura 1.18. No entanto, verificar é notável que, devido ao sentido das correntes entrando e saindo do enrolamento do estator, é possível determinar uma polaridade para o campo magnético resultante e também elaborar uma figura semelhante mostrando o sentido deste campo,

conforme mostrado na Figura 1.19, em que se percebe o aspecto rotativo do campo magnético gerado pelas correntes trifásicas induzidas no enrolamento do rotor. Este campo magnético gira a uma velocidade determinada pela frequência da rede e pelo número de polos da máquina, conforme vimos pela Equação

$$n_s = 120 \frac{f}{P}$$

Figura 1.19 | Direção do campo magnético girante na máquina CA (a) $\omega t = 0$ ($\omega t = 2\pi$); (b) $\omega t = \frac{2\pi}{3}$; (c) $\omega t = \frac{4\pi}{3}$.



Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, a pergunta principal é: como especificar motores para trabalhar em diferentes velocidades? A resposta vai depender do tipo de aplicação que o motor terá.

Por exemplo, se precisássemos de diversos motores operando em velocidades fixas, deveríamos estar atentos ao número de polos da máquina. Se a frequência da rede elétrica é de 60Hz, então precisamos de um número maior de polos na máquina, se desejamos obter velocidades mais baixas. Como exemplo, o quadro a seguir mostra as velocidades síncronas de rotação para os motores de acordo com o número de polos para a frequência de 60Hz.

Quadro 1.1 | Velocidade da máquina com relação ao número de polos

Polos	Velocidade (rpm)
2	3600
4	1800
6	1200

Fonte: elaborado pelo autor.

Existem motores com possibilidade de utilizar 2 números de polos diferentes (motores Dahlander), porém não são tão usuais. Assim, se desejamos variar a velocidade de um mesmo motor, ou seja, movimentar cargas em diferentes faixas de velocidade, a variação do número de polos da máquina não é tão trivial. Neste caso, precisamos utilizar inversores de frequência, de forma a alterar a frequência das tensões trifásicas. Fazendo isso, conseguimos variar linearmente a velocidade de rotação do motor com a frequência do sinal de alimentação.

Na sua apresentação, você pode destacar estes dois aspectos e, além disso, citar exemplos de aplicação de ambos. Por exemplo, é necessário obter uma velocidade constante de rotação quando a máquina opera como gerador, pois variações na velocidade causarão variações de frequência. Entretanto, uma velocidade variável é necessária em aplicações que exigem um maior controle sobre o torque entregue à carga, seu posicionamento, sua limitação de processo, etc. Mostrando estes aspectos na apresentação, você terá concluído a tarefa com êxito e, assim, demonstrará ao seu supervisor que conseguiu entender os campos magnéticos girantes nas máquinas elétricas rotativas.

Avançando na prática

Determinação da corrente de enrolamento no projeto de um gerador CA

Descrição da situação-problema

Imagine que você trabalha em uma empresa fabricante de geradores elétricos e recebeu uma demanda de um cliente muito importante. Contudo, um dos requisitos impostos por ele foi que o gerador seja uma máquina CA com o dimensionamento adequado para produzir uma densidade de fluxo magnético espacial correspondente a 1,5 T. Além disso, o rotor deverá ser acionado a uma velocidade de 1800 rpm em 60Hz.

Conversando com a equipe de engenharia, você recebe a informação de que, para a fabricação deste gerador, a quantidade de cobre e de material ferromagnético é suficiente se este gerador

apresentar as seguintes especificações: entreferro liso com um enrolamento de rotor distribuído com 270 espiras em série, um fator de enrolamento de 0,944 e um entreferro de comprimento 0,8 mm. Sabendo que a máxima corrente que o enrolamento de cobre suporta é de 20 A, como você faria para verificar se o projeto é possível?

Resolução da situação-problema

Os parâmetros de projeto para este gerador elétrico estão muito bem definidos, no entanto, é necessário verificar se a corrente elétrica nas condições impostas não vai ultrapassar o valor limite. Inicialmente, vamos determinar o número de polos da máquina: uma vez que o gerador tem uma velocidade de rotação no eixo de 1800 rpm, assumindo que esta seja a velocidade síncrona de rotação, teremos:

$$P = 120 \frac{f}{n} = 120 \frac{60}{1800} = 4$$

Sabemos que podemos determinar a fundamental espacial do campo magnético no entreferro a partir da fundamental espacial da FMM no entreferro, dividida pelo comprimento de entreferro g

(ver Equação $H_g = \frac{F_g}{g}$). Dessa forma, se multiplicarmos este valor

pela permeabilidade do vácuo, teremos a fundamental espacial da densidade de fluxo magnético no entreferro, conforme o equacionamento:

$$B_g = \mu_0 H_g = \mu_0 \frac{F_g}{g} = \frac{4\mu_0}{\pi g} \left(\frac{k_r N_r}{P} \right) I_r$$

Substituindo os valores e colocando a corrente em evidência, obteremos o valor da corrente no enrolamento para as condições de projeto:

$$B_g = \frac{4\mu_0}{\pi g} \left(\frac{k_r N_r}{P} \right) I_r \rightarrow I_r = B_g \frac{\pi g}{4\mu_0} \left(\frac{P}{k_r N_r} \right) = 1,5 \times \frac{\pi \times 0,8}{4\mu_0} \left(\frac{4}{0,944 \times 270} \right) = 11,77 A$$

Logo, verificamos que a corrente é menor que 20 A e, sendo assim, as condições de projeto estão adequadas.

Faça valer a pena

1. O campo magnético girante é importante para compreender o princípio de funcionamento das máquinas elétricas de corrente alternada. Considere as seguintes afirmações:

- I. A velocidade do campo magnético girante está relacionada aos aspectos construtivos da máquina e independe da frequência da rede elétrica.
- II. O número de polos da máquina é inversamente proporcional à velocidade do campo magnético girante.
- III. As máquinas CA síncronas não giram na velocidade do campo magnético girante.

Assinale apenas a alternativa correta quanto às afirmativas.

- a) I apenas.
- b) II apenas.
- c) III apenas.
- d) I e II apenas.
- e) II e III apenas.

2. Imagine uma máquina de indução de corrente alternada, cujo fator de enrolamento é igual a 0,896, sendo construída por bobinas de 200 espiras cada por fase. Por este enrolamento percorre uma corrente elétrica cujo valor máximo é igual a 20 A, em condições normais de operação. Nestas condições, se o número de bobinas por fase for _____ por bobina, então a FMM será de aproximadamente _____.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto.

- a) 4 – 4200 Ae.
- b) 6 – 5300 Ae.
- c) 8 – 9100 Ae.
- d) 4 – 9100 Ae.
- e) 8 – 4300 Ae.

3. Imagine uma máquina elétrica síncrona CA construída com 4 polos que opera na planta industrial de uma fábrica têxtil. Esta máquina foi fabricada para utilização no Brasil, onde a frequência da rede elétrica é de 60Hz.

Contudo, para atender à demanda de um cliente, ela teve que ser enviada para a Argentina, onde a frequência da rede elétrica é de 50Hz.

Nas condições acima, pode-se afirmar que a diferença entre a velocidade do campo magnético girante desta máquina entre Brasil e Argentina será de:

- a) 100 rpm.
- b) 200 rpm.
- c) 300 rpm.
- d) 400 rpm.
- e) 500 rpm.

Seção 1.3

Tensão induzida e conjugado em máquinas CC e CA

Diálogo aberto

Chegamos à última seção desta primeira unidade da disciplina de Máquinas Elétricas, e aqui vamos entender os princípios para indução de tensão nas máquinas elétricas elementares, assim como a produção de conjugado eletromecânico.

Desta forma, vamos mais uma vez lembrar da situação em que você é o estagiário de uma empresa do segmento petroquímico e está sendo treinado pelo seu supervisor para lidar com as máquinas elétricas da planta industrial em que atua. Você já foi apresentado aos aspectos construtivos e à classificação de acordo com a corrente elétrica de operação das máquinas. Na seção anterior, você realizou uma apresentação em que demonstrou como especificar a máquina relacionando a sua velocidade de operação à velocidade do campo magnético girante.

Na última etapa de sua visita, seu supervisor te apresenta um setor de ensaio de motores. Nesta ocasião, a equipe está testando um motor elétrico síncrono que será utilizado como gerador no lugar de um motor elétrico. Esta máquina é projetada para 60Hz, possuindo dois polos com ligação de enrolamento em estrela e rotor cilíndrico. O enrolamento de campo é distribuído com 90 espiras em série e um fator de enrolamento de 0,975. O enrolamento do estator apresenta um fator de enrolamento de 0,922 e 15 espiras por fase. O comprimento do entreferro é de 4,5 cm e o raio médio é de 0,60 m. O comprimento ativo do enrolamento de armadura é de 4 m. No ensaio efetuado, o rotor é acionado por uma fonte mecânica de rotação a uma velocidade de 3600 rpm e corrente de campo de 594,5 A CC. Para saber o valor da tensão gerada (eficaz), serão necessários alguns cálculos, e o seu supervisor solicitou que você auxilie a equipe com estes cálculos e com o relato do ensaio em seu relatório.

Como você realizaria esta tarefa? Quais conceitos fundamentais você deve buscar para mostrar para seu gestor que você entende

com profundidade os conceitos básicos de operação das máquinas de corrente alternada como geradores?

No decorrer desta seção, você obterá os conhecimentos sobre a tensão gerada em máquinas elétricas rotativas e a equação que descreve quantitativamente esta tensão, para que possa realizar esta tarefa. Bons estudos!

Não pode faltar

Caro aluno, na primeira seção desta unidade estudamos a Lei de Faraday aplicada a máquinas rotativas. O estudo da **tensão gerada** consiste na aplicação direta da lei de Faraday, que veremos nesta seção. Posteriormente, vamos desenvolver uma expressão para quantificar o conjugado eletromagnético em máquinas elétricas rotativas.



Dica

Existem dois conceitos básicos de cálculo que serão utilizados nesta seção: derivada e integral. Embora o entendimento das expressões quantitativas da tensão gerada e do conjugado eletromecânico não dependam totalmente destes conceitos, sugerimos um breve estudo ou revisão destes pontos, garantindo assim um maior aproveitamento do material.

Inicialmente, aprenderemos como o cálculo da tensão gerada é feito, considerando uma máquina elementar de 2 polos, com uma bobina de campo de N_f espiras e fator de enrolamento k_f , conforme ilustra a Figura 1.20. Nela é possível visualizar o enrolamento trifásico, cada um composto por uma bobina de N espiras construída na periferia da superfície interna do estator. A máquina tem um rotor de polos lisos, no qual a bobina de campo está localizada e concentrada em uma ranhura com passo polar completo (ou pleno), ou seja, com cada um dos condutores ativos da bobina dispostos em 180 graus elétricos. Vamos considerar que o enrolamento de estator desta máquina possua um fator de enrolamento dado por k_w , e que a bobina seja formada por N_{fase} espiras por fase, de forma que $N = k_w N_{fase}$. Encontramos também na figura os eixos magnéticos da bobina da fase a do estator e do rotor, em que podemos ver que o eixo

Note que, para a máquina de 2 polos da Figura 1.20, teremos apenas $\Phi = 2B_{m\acute{a}x} \ell r$. O fluxo concatenado quando os eixos magnéticos (rotor e estator) estão alinhados será dado por $k_w N_{fase} \Phi_P$. Mas, à medida que o rotor gira, o fluxo concatenado no estator varia conforme o cosseno de $\omega_e t$, sendo assim dado por uma equação senoidal, conforme a equação abaixo (lembrando que $\omega_m = \frac{P}{2} \omega_e$):

$$\lambda_a = k_w N_{fase} \Phi_P \cos(\omega_e t)$$

Logo, aplicando a Lei de Faraday na equação acima, chegaremos à equação da tensão induzida nas máquinas CA, dada pela seguinte equação:

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = \omega_e k_w N_{fase} \Phi_P \text{sen}(\omega_e t) - N \frac{d\Phi_P}{dt} \cos(\omega_e t)$$

Nesta equação, do lado direito, temos dois termos. O primeiro corresponde à tensão de velocidade, induzida a partir do movimento do campo e da bobina. O segundo corresponde à tensão de transformador, que existe quando a amplitude da onda de indução magnética varia conforme o tempo. No entanto, em máquinas rotativas operando em regime permanente, a onda de fluxo de entreferro (Φ_P) é constante e, desta forma, o segundo termo do lado direito da equação é igual a zero. Logo, podemos escrever a tensão induzida como sendo apenas a tensão de velocidade: $e = \omega_e k_w N_{fase} \Phi_P \text{sen}(\omega_e t)$.

Da tensão de velocidade é possível verificar o valor máximo da tensão induzida como sendo o valor no qual o seno se iguala à unidade. Então, desta forma podemos escrever:

$$E_{m\acute{a}x} = \omega_e k_w N_{fase} \Phi_P$$

O valor eficaz é dado dividindo o valor de pico por raiz de 2, conforme mostra a equação abaixo:

$$E_{m\acute{a}x,ef} = \frac{\omega_e k_w N_{fase} \Phi_P}{\sqrt{2}}$$



Exemplificando

Um gerador CA tem fator de enrolamento de 0,933 e 180 espiras por fase. Se o fluxo por polo é de 0,02 Wb, qual o valor da tensão gerada (valor eficaz) nas frequências de 50Hz e 60Hz?

Resolução:

Aplicando diretamente a Equação 1.18 teremos:

$$E_{m\acute{a}x,ef}(50\text{ Hz}) = \frac{\omega_e k_w N_{fase} \Phi_P}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f k_w N_{fase} \Phi_P}{\sqrt{2}}$$

$$E_{m\acute{a}x,ef}(50\text{ Hz}) = \frac{2\pi \times 50 \times 0,933 \times 180 \times 0,02}{\sqrt{2}} = 746,13\text{ V}$$

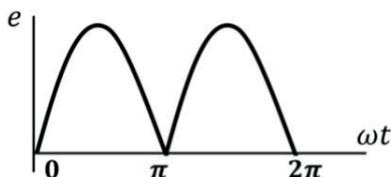
$$E_{m\acute{a}x,ef}(60\text{ Hz}) = \frac{\omega_e k_w N_{fase} \Phi_P}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f k_w N_{fase} \Phi_P}{\sqrt{2}}$$

$$E_{m\acute{a}x,ef}(60\text{ Hz}) = \frac{2\pi \times 60 \times 0,933 \times 180 \times 0,02}{\sqrt{2}} = 895,36\text{ V}$$

E para as máquinas CC, como definimos a tensão gerada? Bem, já vimos que no estudo das máquinas CC elementares a tensão gerada no enrolamento da armadura é essencialmente alternada. Também vimos que a onda de FMM se aproxima mais de uma onda triangular que uma senoide. No entanto, é possível, para fins de cálculo da tensão gerada, considerar a forma de onda senoidal do fluxo, como o já realizado para as máquinas CA, porém, nas máquinas CC existe a necessidade de utilizar alguma forma para retificar a tensão na saída do enrolamento, ou seja, converter a onda CA em CC, o que é feito por meio de uso de comutadores.

Assumindo que a tensão gerada nos enrolamentos seja da forma senoidal, após a retificação a tensão de saída da máquina CC de onda completa terá a forma como mostrada na Figura 1.21. Verifica-se que o período da forma de onda retificada equivale a **180°** ou a **π rad**.

Figura 1.21 | Onda de tensão de saída da máquina CC retificada



Fonte: elaborada pelo autor.

A forma de onda da tensão internamente à máquina CC é alternada, assim como a apresentada para a máquina CA. Entretanto, a tensão retificada conforme mostra a Figura 1.21 é uma tensão contínua e, desta forma, não tem sentido falarmos em valor eficaz. Para este sinal, o comum é considerar a tensão média do período da onda, que será dada pela integral:

$$E_a = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \omega_e k_w N_{fase} \Phi_p \text{sen}(\omega_e t) d(\omega_e t) = \frac{2}{\pi} \omega_e k_w N_{fase} \Phi_p$$

A equação acima da tensão média é dada em função da frequência angular da onda de tensão gerada, no entanto, para máquinas rotativas, usualmente se expressa o valor em função da

frequência angular mecânica ($\omega_m = \frac{P}{2} \omega_e$). Assumindo ainda que

$N = k_w N_{fase}$, a equação acima fica expressa na frequência angular mecânica ou mesmo na velocidade de rotação em rpm (n).

$$E_a = \frac{PN}{\pi} \omega_m \Phi_p = 2PN \frac{n}{60} \Phi_p$$

A equação acima é deduzida para a máquina de um único enrolamento, porém, considerando a máquina CC de enrolamentos distribuídos, a equação produz valores corretos, contanto que as N espiras estejam conectadas em série entre os terminais. Podemos também expressar a tensão gerada em função do número total de condutores ativos (C_a) e do número de caminhos paralelos (m). Considerando que $N = C_a/2m$ (ou seja, para dois condutores ativos compondo um par de caminhos paralelos, correspondendo a uma espira), temos:

$$E_a = \frac{PC_a}{2\pi m} \omega_m \Phi_p = \frac{PC_a}{m} \frac{n}{60} \Phi_p$$



Refleta

Baseado na equação apresentada para a tensão gerada em máquinas CC, reflita sobre quais parâmetros da máquina elétrica poderiam ser variados com a finalidade de controlar a tensão gerada.

Considerando ainda os campos magnéticos atuantes internamente à máquina elétrica, podemos fazer algumas análises para obtermos uma formulação para o **conjugado eletromecânico** desenvolvido pela máquina elétrica rotativa. Inicialmente, devemos deixar bem claro os conceitos de energia armazenada, coenergia e torque.



Assimile

No estudo do conjugado eletromecânico em máquinas rotativas, os conceitos elementares de energia armazenada, coenergia e torque são fundamentais:

- Energia armazenada: corresponde à energia armazenada no campo magnético. Assim, para uma bobina de N espiras, quando percorrida por uma corrente i variante no tempo, haverá também um fluxo magnético variante no tempo, de forma que o diferencial de energia armazenada no campo magnético será igual a:

$$dW_{cmp} = Nid\Phi$$

- Coenergia: na teoria de conversão eletromecânica de energia, a coenergia não possui um significado físico direto, no entanto, é essencial no cálculo de forças nos dispositivos eletromagnéticos. Matematicamente, a coenergia pode ser definida em termos dos parâmetros magnéticos do material, como a seguir, H sendo o campo magnético, μ a permeabilidade do material e V corresponde ao volume do material:

$$W'_{cmp} = \int_V \frac{\mu H^2}{2} dV$$

- Conjugado mecânico: em sistemas mecânicos rotativos, se o deslocamento mecânico é dado por um ângulo θ , então o conjugado mecânico será igual à seguinte equação:

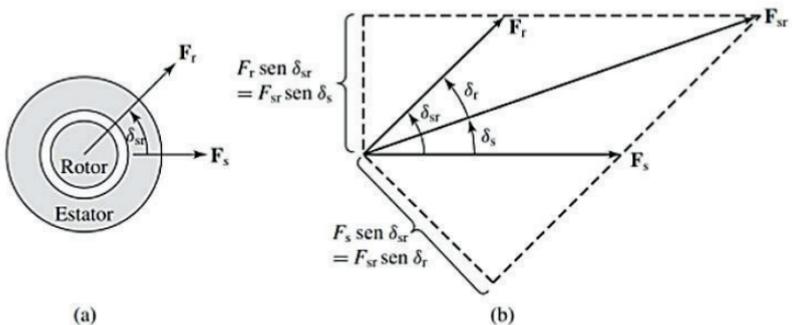
$$T = \frac{\partial W'_{cmp}}{\partial \delta}$$

Podemos considerar uma máquina elétrica rotativa como dois grupos de enrolamentos que produzem fluxo magnético no entreferro: o enrolamento do estator e o do rotor. A partir deste raciocínio e assumindo algumas condições, podemos desenvolver expressões simples para o fluxo concatenado e a coenergia no entreferro. Já fizemos parte deste trabalho quando desenvolvemos as expressões para a tensão gerada e agora faremos o mesmo para o conjugado, que pode ser expresso como a tendência de dois campos magnéticos a se alinharem.

Para ilustrar melhor, considere a Figura 1.22 (a), onde estão representados o rotor e o estator de uma máquina de dois polos com entreferro uniforme, assim como os vetores referentes às FMM dos enrolamentos, que são denotadas como F_r e F_s para, respectivamente, a FMM do rotor e do estator. O ângulo δ_{sr} é medido entre o eixo da FMM do estator e do rotor. Considerando o esquema do diagrama vetorial mostrado na Figura 1.22 (b), podemos concluir que a FMM resultante que atua produzindo o fluxo no entreferro da máquina é denotada por F_{sr} , que corresponde ao fluxo mútuo entre os enrolamentos e é de interesse para a produção de conjugado na máquina. Assim, considerando o diagrama da soma vetorial, vemos que F_{sr} pode ser escrita conforme a equação a seguir:

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr})$$

Figura 1.22 | Máquina de dois polos de entreferro uniforme. (a) Modelo elementar (b) diagrama fasorial das FMM



Fonte: Umans (2014, p. 236).

Já vimos que o campo radial resultante no entreferro da máquina é uma onda senoidal espacial cujo valor de pico é dado conforme a seguinte equação:

$$H_g^{m\acute{a}x} = \frac{F_{sr}}{g}$$

Com base nessa equação e na definição de coenergia da equação $W'_{cmp} = \int_V \frac{\mu H^2}{2} dV$, podemos resolver a integral, a fim de encontrar uma expressão para a coenergia em termos das FMM no estator e no rotor. Fazendo isso, encontramos a equação

$$W'_{cmp} = \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{(H_g^{m\acute{a}x})^2}{2} \right) \pi D \ell g = \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \pi D \ell g, \text{ em que } \ell \text{ é o}$$

comprimento axial do entreferro e D é seu diâmetro médio. Finalmente, substituindo a equação $F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr})$

$$\text{na } W'_{cmp} = \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{(H_g^{m\acute{a}x})^2}{2} \right) \pi D \ell g = \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \pi D \ell g, \text{ chegamos à equação}$$

da coenergia em termos do ângulo δ_{sr} , como mostra a seguinte equação:

$$W'_{cmp} = \frac{\mu_0 \pi D \ell}{4g} (F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr}))$$

O cálculo do torque é diretamente obtido da equação $T = \frac{\partial W'_{cmp}}{\partial \delta}$

$$\text{resultando na Equação } T = \frac{\partial W'_{cmp}}{\partial \delta_{sr}} \Big|_{F_s, F_r} = - \left(\frac{\mu_0 \pi D \ell}{2g} \right) F_s F_r \text{sen}(\delta_{sr}).$$

A expressão genérica para uma máquina de múltiplos polos é dada pela equação a seguir:

$$T = \frac{\partial W'_{cmp}}{\partial \delta_{sr}} \Big|_{F_s, F_r} = - \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{\mu_0 \pi D \ell}{2g} \right) F_s F_r \text{sen}(\delta_{sr})$$



A representação da expressão do conjugado mecânico possui diversas variações. Além das duas últimas equações mostradas, podemos também expressar o conjugado por meio da onda FMM resultante, considerando as igualdades representadas na Figura 1.22 (b), fazendo as adequadas substituições, teremos as seguintes equações:

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\mu_0\pi D\ell}{2g}\right)F_s F_{sr} \text{sen}(\delta_s)$$

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\mu_0\pi D\ell}{2g}\right)F_r F_{sr} \text{sen}(\delta_r)$$

Ainda, sabendo que $F_{sr} = H_g^{\text{máx}} g = \mu_0 B_g^{\text{máx}} g$, então a equação para o conjugado será simplesmente:

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\pi D\ell}{2}\right)F_r B_{sr} \text{sen}(\delta_r)$$

Além disso, o fluxo resultante por polo pode ser expresso em termos do valor médio da densidade de campo magnético B em um polo e da área do polo, conforme a seguir:

$$\Phi_P = \left(\frac{2}{\pi} B_{\text{pico}}\right)\left(\frac{\pi D\ell}{P}\right) = \frac{2D\ell}{P} B_{\text{pico}}$$

Como $B_{\text{pico}} = B_{sr}$ na equação $T = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\pi D\ell}{2}\right)F_r B_{sr} \text{sen}(\delta_r)$,

substituindo a Equação $\Phi_P = \left(\frac{2}{\pi} B_{\text{pico}}\right)\left(\frac{\pi D\ell}{P}\right) = \frac{2D\ell}{P} B_{\text{pico}}$, tem-se:

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)^2 \left(\frac{\pi}{2}\right) \Phi_{sr} F_r \text{sen}(\delta_r)$$

As características gerais das máquinas elétricas que foram vistas nesta unidade dependem muito de como os materiais magnéticos são empregados. De fato, ao retomarmos a equação do torque

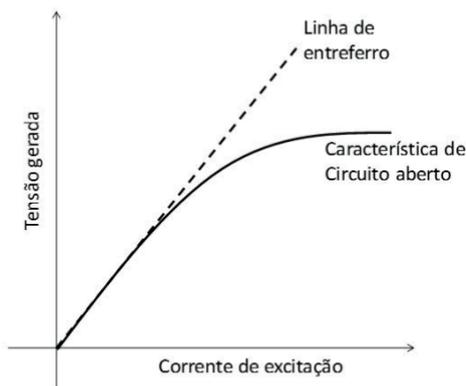
eletromagnético $T = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\pi D\ell}{2}\right)F_r B_{sr} \text{sen}(\delta_r)$, percebemos que

ele pode ser expresso em termos do valor médio da densidade de campo magnético B, que é dependente das características

magnéticas dos materiais empregados. Neste sentido, dois fatores podem influenciar diretamente o comportamento da tensão gerada e, conseqüentemente, a produção de conjugado: a saturação magnética e os fluxos dispersivos.

A saturação magnética ocorre devido à diminuição da permeabilidade do material magnético, à medida que ocorre o aumento do fluxo magnético. A consequência deste fenômeno é mostrada na Figura 1.23. Conforme aumentamos a corrente de excitação, a característica de circuito aberto (tensão gerada na máquina sem a conexão de cargas) é diferente da linha de entreferro (correspondente à relação entre a tensão gerada e a corrente de excitação para baixos valores de fluxo). Em situação sob carga, a saturação é resultado da FMM total que atua na máquina, podendo apresentar um comportamento diferente da curva característica de circuito aberto.

Figura 1.23 | Curva de saturação



Fonte: elaborada pelo autor.

Além disso, quando estudamos as máquinas elétricas rotativas, estamos analisando a interação de múltiplos enrolamentos e, dessa forma, podemos concluir que existem nesta interação fluxos mútuos, responsáveis pelos efeitos do acoplamento dos enrolamentos, e fluxos dispersivos, responsáveis pela indutância própria de cada enrolamento, sendo que estes efeitos podem ser mais ou menos significativos, dependendo da origem da dispersão

do fluxo, tais como os de harmônicas espaciais no entreferro, os fluxos dispersivos de ranhura e os de cabeça de espira.



Pesquise mais

Quando falamos de fluxos dispersivos em máquinas elétricas estamos falando de sistemas com múltiplos enrolamentos, portanto, a análise deve ser cuidadosa. Tanto os efeitos da saturação magnética quanto os fluxos dispersivos podem ser definidos qualitativamente. Na referência indicada a seguir, também disponível em nossa biblioteca virtual, você poderá encontrar um breve texto abordando estes efeitos.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014, p. 244 – 249.

Sem medo de errar

As formas de determinação das expressões da tensão gerada e das equações para o cálculo do conjugado eletromecânico são muito importantes para dar prosseguimento às suas atividades no setor de manutenção de máquinas elétricas. Uma vez que você já conhece o princípio de funcionamento das máquinas e tendo estudado o conteúdo desta seção, está apto para desempenhar cálculos mais robustos para determinar algumas variáveis da máquina. Lembrando que você já passou por diversos setores, agora será necessário fazer um cálculo da tensão gerada em um motor síncrono que será utilizado como gerador. Esta máquina é de 60Hz, com dois polos, com ligação de enrolamento em estrela e rotor cilíndrico. O enrolamento é distribuído com 90 espiras em série e um fator de enrolamento de 0,975. O enrolamento do estator apresenta um fator de 0,922 e 15 espiras por fase. O comprimento do entreferro é de 3,7 cm e o raio médio do entreferro é de 0,6 m. O comprimento ativo do enrolamento de armadura é de 4 m. No ensaio efetuado, o rotor é acionado por uma fonte mecânica de rotação a uma velocidade de 3600 rpm com uma corrente de campo de 594,5 A CC. Como você realizaria esta tarefa? Quais conceitos fundamentais você deve buscar para mostrar a seu supervisor que você entende com profundidade os conceitos básicos de operação das máquinas de corrente alternada como geradores?

Com base nos valores fornecidos, podemos realizar os cálculos para obter esta tensão gerada. Inicialmente, podemos conseguir o número de polos da máquina, considerando que a velocidade é de 3600 rpm e a frequência é de 60 Hz, então:

$$P = \frac{120f}{n} = \frac{120 \times 60}{3600} = \frac{7200}{3600} = 2$$

Agora, podemos obter o valor de pico para a FMM no entreferro, por polo, fazendo os cálculos conforme a equação

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{fs}}{2} i_a \cos(\theta) \text{ (apresentada na Seção 1.2):}$$

$$F_g^{m\acute{a}x} = \left(\frac{4}{\pi}\right) \left(\frac{k_f N_f}{2}\right) I_f = \left(\frac{4}{\pi}\right) \left(\frac{0,975 \times 90}{2}\right) 594,5 = 3,32 \times 10^4 \text{ Ae/polo}$$

Sabendo que a permeabilidade do vácuo μ_0 é igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m e tendo o valor do comprimento do entreferro ($g = 3,7$ cm), o valor máximo da densidade de fluxo magnético no entreferro da máquina por polo será dado por:

$$B_g^{m\acute{a}x} = \frac{\mu_0 F_g^{m\acute{a}x}}{g} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3,32 \times 10^4}{3,7 \times 10^{-2}} = 1,1279 \text{ T}$$

O valor do fluxo será dado considerando o pico da densidade de campo magnético B em um polo e da área do polo, conforme a seguir:

$$\Phi_P = 2(B_g^{m\acute{a}x}) l r = 2 \times 1,1279 \times 0,6 \times 4 = 5,4141 \text{ Wb}$$

E finalmente podemos calcular o valor da tensão gerada:

$$E_{m\acute{a}x,ef} = \frac{\omega_e k_w N_{fase} \Phi_P}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f_e k_w N_{fase} \Phi_P = \sqrt{2} \pi \times 60 \times 0,922 \times 15 \times 5,4141 = 19.960 \text{ V} \approx 20 \text{ kV}$$

Dessa forma, foi possível utilizar o conhecimento adquirido no decorrer desta seção para realizar o cálculo da tensão gerada em uma máquina elétrica CA. Você agora pode apresentar as contas feitas ao seu supervisor e acompanhar os testes no motor síncrono, para comprovar o valor da tensão gerada. Além disso, você deve reportar estas atividades, tanto o cálculo da tensão gerada quanto o ensaio a ser realizado com a máquina, em seu relatório de estágio. Assim, sua tarefa estará cumprida com êxito.

Projeto de um motor para movimentar uma carga específica

Descrição da situação-problema

Uma carga mecânica que deve ser movimentada em uma indústria requer que o motor necessário para movimentar esta carga suporte um torque máximo de 1800 Nm em condições normais de carga. Você foi escolhido para dimensionar os componentes do rotor deste motor, sabendo que o motor deve ter um entreferro de 1,5 mm. O diâmetro médio do entreferro é de 30 cm e seu comprimento axial é de 35 cm. O valor máximo da densidade de fluxo no entreferro é limitada em 2,0 T. Para fazer este dimensionamento, você teve que entrar em contato com a administração do estoque que lhe passou as informações no Quadro 1.2, contendo as espiras pré-montadas de acordo as dimensões descritas acima. Neste quadro é possível verificar o fator de enrolamento, o número de espiras por fase e a corrente máxima suportada pela espira. Com base nestes dados, você deve escolher o conjunto de espiras pré-montadas para a fabricação do rotor.

Quadro 1.2 | Dados das espiras pré-fabricadas disponíveis

Fator de enrolamento	Número de Espiras por fase	Corrente máxima (A)
0,9671	123	10
0,9192	200	15
0,9852	435	20

Fonte: elaborado pelo autor.

Resolução da situação-problema

Para projetar este rotor, devemos considerar as dimensões e encontrar na tabela a combinação mais adequada para atender ao valor de torque máximo que é requerido. A partir da equação

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{\pi D \ell}{2}\right) F_r B_{sr} \text{sen}(\delta_r)$$
 para o torque, podemos escrever:

$$T_{\text{máx}} = \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{\pi D \ell}{2}\right) F_r B_{sr} \rightarrow F_r = \frac{4}{\pi P} \frac{T_{\text{máx}}}{D \ell B_{sr}}$$

No entanto, podemos expressar a FMM do rotor conforme a seguir (da Seção 1.1):

$$F_r = \frac{4}{\pi P} k_r N_r I_f$$

Igualando os termos, teremos:

$$\frac{4}{\pi P} \frac{T_{\text{máx}}}{D \ell B_{sr}} = \frac{4}{\pi P} k_r N_r I_f \rightarrow k_r N_r I_f = \frac{T_{\text{máx}}}{D \ell B_{sr}}$$

E então podemos substituir os valores:

$$k_r N_r I_f = \frac{1800}{0,3 \times 0,35 \times 2,0} = 8571,4$$

Assim, do quadro, podemos escolher a espira com fator de enrolamento igual à 0,9852, 435 espiras por fase e corrente máxima de 20 A. Fazendo os cálculos, temos:

$$k_r N_r I_f = 0,9852 \times 435 \times 20 = 8751,24$$

Percebe-se então que este enrolamento atende ao especificado.

Faça valer a pena

1. No funcionamento normal em regime permanente de máquinas rotativas, geralmente estamos interessados nos valores eficazes de correntes e tensão no lugar de valores instantâneos. Assim, considere uma máquina síncrona elementar de dois polos com uma bobina do estator de 150 espiras em série e fator de enrolamento igual a 1. O valor da tensão gerada nesta máquina é de 600 V em uma frequência de 60Hz.

Determine qual deve ser o valor do fluxo de entreferro desta máquina.

- 0,015 Wb.
- 0,025 Wb.
- 0,250 Wb.
- 0,067 Wb.
- 0,028 Wb.

2. Considere as afirmações a seguir a respeito das máquinas elétricas rotativas:

- I. As características de tensão gerada e conjugado das máquinas elétricas rotativas são afetadas pelas características magnéticas da máquina, tais como a saturação magnética e os fluxos dispersivos.
- II. A saturação magnética consiste na diminuição da tensão gerada, à medida que a velocidade de rotação é aumentada.
- III. Os fluxos dispersivos em máquinas elétricas rotativas devem ser cuidadosamente estudados, devido às particularidades construtivas e de operação destas máquinas.

Assinale a alternativa que elenca as afirmativas verdadeiras em relação às máquinas elétricas.

- a) I e II somente.
- b) I e III somente.
- c) II e III somente.
- d) I somente.
- e) III somente.

3. Considere um motor de corrente alternada que possui um rotor com fator de enrolamento de 0,968 com 600 espiras por fase. O comprimento axial do entreferro é de 0,2 m e o diâmetro médio é de 0,3 m. Considere uma densidade de fluxo máxima de 1,5 T e que os enrolamentos suportam uma corrente máxima de 18 A.

Nestas condições, escolha a melhor alternativa que apresente o torque máximo que este motor suporta:

- a) 634 Nm.
- b) 798 Nm.
- c) 883 Nm.
- d) 941 Nm.
- e) 1124 Nm.

Referências

- CARVALHO, G. **Máquinas elétricas – Teoria e ensaios**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J., **Fundamentos da Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016, vol 3.
- MAMEDE FILHO, J.; **Instalações elétricas industriais: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.

Máquinas de corrente contínua

Convite ao estudo

Caros alunos, sejam bem-vindos à Unidade 2 da disciplina Máquinas Elétricas. Na unidade anterior, passamos por uma etapa introdutória, na qual estudamos os conceitos básicos do eletromagnetismo aplicados às máquinas elétricas rotativas. Tivemos ainda a oportunidade de estudar os aspectos gerais que diferenciam e caracterizam as máquinas elétricas e as suas partes constituintes. Agora, chegou a hora de aprofundarmos os conhecimentos sobre as Máquinas de Corrente Contínua (Máquinas CC), que, apesar da preferência pelos motores assíncronos de corrente alternada, são ainda muito utilizadas na indústria em aplicações que requerem flexibilidade no controle de velocidade e conjugado.

Após estudarmos a Unidade 2, teremos condições de não só entender em detalhes o funcionamento da Máquina CC, os conceitos matemáticos e físicos aplicados nos cálculos das diversas grandezas presentes nesse tipo de máquina, como também seremos capazes de diferenciar a aplicação dessas máquinas como motores e como geradores.

Para contextualizar o nosso estudo, vamos continuar imaginando a situação em que você é um estagiário de uma grande empresa do setor petroquímico que está reestruturando as operações em território nacional. O objetivo da reestruturação é adequar as máquinas e equipamentos para cada tipo de aplicação específica, assim como capacitar os profissionais do setor. Neste contexto, a empresa desenvolveu um programa de estágio no setor máquinas e manutenção, no qual você passará por diversas áreas da empresa de forma a

ser capacitado para trabalhar com todos os tipos de máquinas elétricas existentes nesta planta industrial. No primeiro dia, seu supervisor explicou sobre a importância dos técnicos e engenheiros de manutenção para o bom funcionamento da empresa e o acompanhou por todas as instalações do local. Agora, seu supervisor solicita que você trabalhe com uma equipe que realiza manutenção em máquinas de corrente contínua e explica que esse tipo de máquina é muito importante para a indústria, pois permite uma faixa de variação e controle de torque e velocidade.

Como um estudante na área de tecnologia, você já teve a oportunidade de ver como uma máquina CC funciona, seja como motor ou como gerador? Quais são as principais vantagens da aplicação deste tipo de máquina na indústria?

Na primeira seção desta unidade estudaremos os conceitos básicos sobre a ação do comutador na máquina e a relação da tensão gerada e do torque induzido com a velocidade e a corrente de armadura, respectivamente. Na segunda seção iremos analisar a aplicação da máquina como gerador de energia, considerando os diversos tipos de conexões possíveis. Na última seção, iremos analisar o comportamento da máquina de corrente contínua como motor, e também desenvolveremos uma equação característica para análise da relação entre torque e velocidade da máquina. Esperamos que os conhecimentos adquiridos nesta unidade sejam um diferencial na sua formação de forma a ajudar a desempenhar suas atividades profissionais. Para isso, não deixe de dedicar tempo e esforços para a realização das atividades propostas. Bons estudos!

Seção 2.1

Princípio de funcionamento das máquinas CC

Diálogo aberto

Caro aluno, na primeira seção desta unidade estudaremos o princípio de funcionamento das máquinas CC, veremos como ocorre a ação do comutador na máquina e quais são as variáveis envolvidas no valor da tensão de armadura e do torque induzido na máquina. Apresentaremos também o circuito equivalente da máquina CC. Estes conceitos são muito importantes pois irão nortear os estudos da máquina CC na operação como gerador ou como motor.

Para contextualizar o nosso estudo, vamos continuar imaginando a situação em que você acaba de ser contratado como estagiário do departamento de manutenção elétrica de uma empresa petroquímica. No primeiro dia, seu supervisor explicou sobre a importância dos técnicos e engenheiros de manutenção para o bom funcionamento da empresa e o acompanhou por todas as instalações do local. No seu segundo dia, seu supervisor solicita que você trabalhe com uma equipe que faça uma manutenção em máquinas de corrente contínua. A equipe está realizando um ensaio em um motor de corrente contínua de 10kW, 120 V e 2000 rpm. A resistência do circuito da armadura da máquina foi medida e o valor de 0,4 Ohms foi obtido. Um certo valor de corrente de campo foi ajustado na máquina e a tensão aplicada ao circuito da armadura foi aumentada até que a máquina atingisse a velocidade nominal, com uma carga acoplada ao seu eixo. Os seguintes valores foram obtidos na entrada da máquina:

- Tensão aplicada à armadura: 130 V.
- Corrente de armadura: 25 A.

Diante disso, o responsável pela equipe do ensaio solicitou que você auxiliasse calculando os valores de potência e torque entregues no eixo para a carga. Como você realizaria esta tarefa?

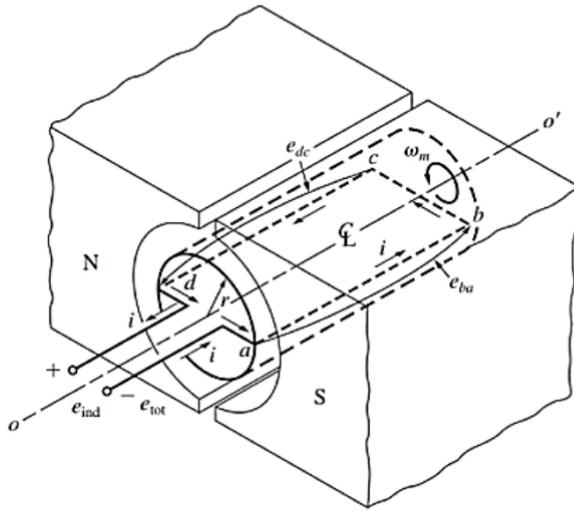
No decorrer desta seção, você irá obter os conhecimentos necessários para fazer este cálculo e auxiliar a equipe da melhor forma. Para isso, sugerimos que você também realize as atividades que forem propostas e discuta com o professor e colegas suas dúvidas a respeito do conteúdo.

Não pode faltar

As máquinas CC, quando funcionam como geradores de energia, convertem energia mecânica em elétrica e, quando funcionam como motor, transformam energia elétrica em mecânica. Além disso, elas convertem as tensões alternadas no interior da máquina em tensões contínuas nos seus terminais. Isso é possível devido a um mecanismo denominado **comutador**. O comutador, também conhecido como coletor, tem a forma de um cilindro formado por um conjunto de segmentos metálicos, isolados entre si. Essa estrutura, além da comutação, estabelece o contato elétrico entre as escovas fixas e a armadura da máquina. As escovas são materiais de desgaste e estruturas de carbono ou de grafite usadas para conduzir a corrente da alimentação da máquina até o comutador, e são fundamentais no processo de comutação. Elas ainda possuem características de auto lubrificação além de serem mais “macias” que o material do coletor (normalmente cobre), aumentando a vida útil do dispositivo.

Antes de entrarmos nos detalhes do processo de comutação, é importante entendermos a tensão gerada e a produção de conjugado na máquina. Para isso, vamos considerar uma única espira que gira em meio a um campo magnético, como mostrado na Figura 2.1. Observe que essa figura apresenta o modelo simples de uma máquina cujo campo é formado por um ímã permanente e a armadura da máquina por uma única espira retangular.

Figura 2.1 | Modelo de uma máquina CC composta por um ímã de campo e uma única espira



Fonte: Chapman (2013, p. 206)

Pelo esquema da Figura 2.1, a espira é composta pelos segmentos ab, bc, cd e da. Os segmentos ab e cd estão perpendiculares às linhas de campo magnético gerado pelos polos (que vão do polo norte ao polo sul, não representados na figura) e os outros segmentos estão paralelos às linhas de campo magnético. Uma corrente percorre essa espira no sentido indicado na figura, e a espira está girando no sentido anti-horário, com velocidade ω_m .

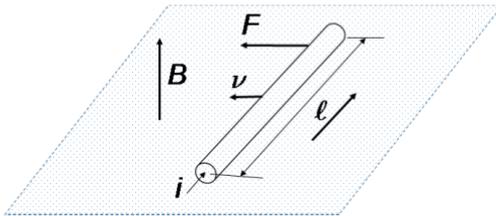


Lembre-se

Se um condutor de comprimento ℓ em movimento com velocidade \mathbf{v} é imerso em um campo magnético \mathbf{B} , conforme mostrado na Figura 2.2, surgirá nele uma tensão induzida dada pela Equação 2.1.

$$\mathbf{e} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \vec{\ell} \quad (2.1)$$

Figura 2.2 | Conductor imerso em um campo magnético



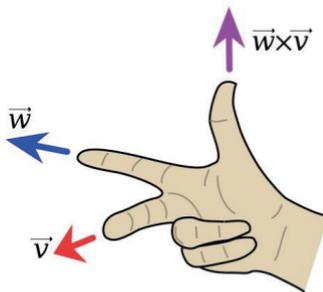
Fonte elaborada pelo autor.

Se este mesmo condutor for percorrido por uma corrente elétrica i , surgirá uma força F dada pela Equação 2.2.

$$F = i \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.2)$$

A direção destes vetores é dada pela regra da mão direita, conforme Figura 2.3

Figura 2.3 | Regra da mão direita



Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Regra_da_m%C3%A3o_direita.jpg>. Acesso em: 5 jul. 2018.

Vamos calcular a tensão induzida em cada segmento da espira, obviamente na região sob influência dos polos pois, fora dessa região, o vetor do campo magnético é nulo.

No segmento ab , \vec{v} está na vertical apontando para cima, perpendicular à \vec{B} . Logo o produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ está na horizontal e é paralelo à \vec{l} . Como resultado, temos que: $e_{ab} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = \nu B \text{sen}(90^\circ) \ell \cos(0^\circ) = \nu B \ell$. No segmento cd ,

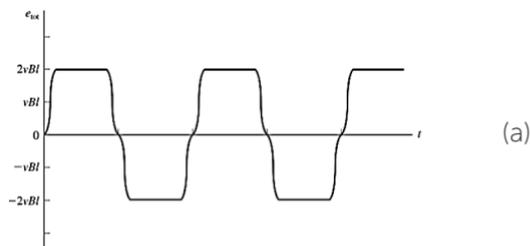
similar à ab, \vec{v} está na vertical apontando para cima, perpendicular à \vec{B} . O produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ está na horizontal e é paralelo à \vec{l} . Dessa forma, temos que: $\mathbf{e}_{cd} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = \nu B l$. Nos segmentos bc e da \vec{v} está na vertical apontando para cima, perpendicular à \vec{B} . Logo, o produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ está perpendicular à \vec{l} . Como resultado, temos que: $\mathbf{e}_{bc} = \mathbf{e}_{da} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = \nu B l \cos(90^\circ) = 0$.

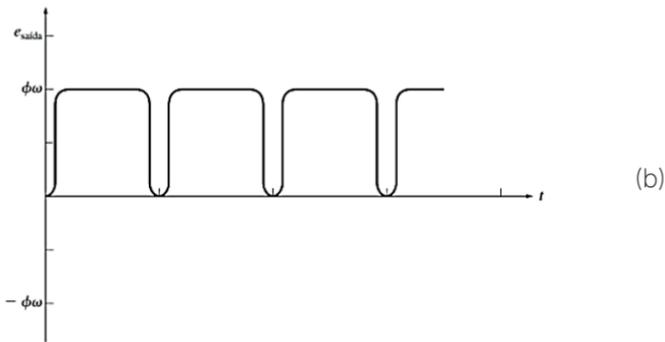
Fazendo $\mathbf{e}_{ind} = \mathbf{e}_{ab} + \mathbf{e}_{bc} + \mathbf{e}_{cd} + \mathbf{e}_{da}$, temos que: $\mathbf{e}_{ind} = 2\nu B l$. De acordo com a rotação, a relação da velocidade é tal que $\nu = r\omega_m$, onde r é o raio do círculo formado pelo movimento da espira (distância entre o eixo de rotação e a borda da espira), e a área da superfície da armadura sobre efeito de um polo é igual à $A_p = \pi r l$, então podemos escrever o fluxo que atravessa esta área como $\Phi_p = A_p B$. Assim, a tensão induzida na espira fica conforme a Equação 2.3.

$$\mathbf{e}_{ind} = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_m \quad (2.3)$$

Desse modo, temos que a tensão induzida é dependente do fluxo magnético e da velocidade angular da rotação da armadura. Quando há um giro de 180°, em relação àquela posição da Figura 2.1, o segmento ab fica próximo do polo sul e teremos o valor da tensão induzida nesse segmento, sendo o simétrico daquele já calculado. Se repetirmos o raciocínio, veremos que é simples chegar à conclusão de que a forma de onda é esta da Figura 2.4 (a). No entanto, após a comutação, a tensão gerada é uma tensão CC, conforme mostrado na Figura 2.4 (b)

Figura 2.4 | Tensão induzida na máquina CC formada por uma espira (a) tensão induzida na espira (b) tensão após a comutação

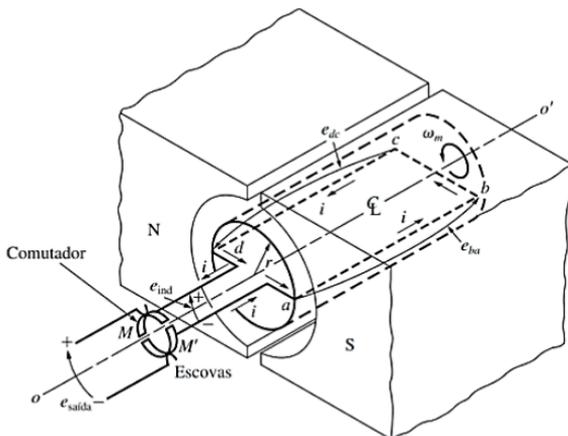




Fonte: Chapman (2013, p. 408, 410).

A Figura 2.5 apresenta um comutador simples (duas estruturas metálicas semicirculares) no final da espira e as escovas (dois contatos fixos) que são montadas num ângulo tal que no instante em que a tensão no circuito fechado é igual a zero, os contatos provocam um curto-circuito no comutador. Então, toda vez que a tensão do circuito muda seu sinal, as escovas também mudam as conexões e a saída dos contatos tem sempre a forma de onda da Figura 2.4 (b). Esse processo que transforma uma tensão com comportamento alternado em uma tensão CC é denominado comutação.

Figura 2.5 | Comutador simples



Fonte: Chapman (2013, p. 410).



Na máquina CC, a tensão gerada na armadura é diretamente proporcional ao fluxo presente no interior da máquina e também à velocidade de rotação. Existe ainda uma constante de proporcionalidade que representa os aspectos construtivos da máquina. Na Unidade 1 Seção 3, nós deduzimos a Equação 1.21 para a tensão gerada na armadura de uma máquina CC de P polos. Podemos reescrever a

equação da forma como mostrada na Equação 2.4, onde $k_a = \frac{PC_a}{2\pi m}$

é uma constante determinada pelo projeto do enrolamento dada em função do número total de condutores ativos (C_a) e do número de caminhos paralelos (m).

$$E_a = k_a \omega_m \Phi_P \quad (2.4)$$

Note que para a máquina exemplo de uma única espira, $k_a = \frac{2}{\pi}$.

Assim, a tensão em qualquer máquina CC real dependerá de três fatores (CHAPMAN, 2013):

1. O fluxo na máquina.
2. A velocidade de rotação.
3. Uma constante que represente a construção da máquina.

Outro fenômeno associado ao funcionamento da máquina CC é um conjugado, ou torque, que é induzido na armadura. Para nos ajudar a entender o comportamento do conjugado, vamos recorrer à espira da Figura 2.1. A Equação 2.2 descreve a força que age sobre a espira. O conjugado que age sobre a espira pode ser escrito como na Equação 2.5, em que o vetor \vec{r} correspondente à distância entre o eixo de simetria e o segmento lateral da espira, r cujo módulo é igual à r .

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.5)$$

Fazendo uma análise parecida com a feita para a tensão induzida, teremos que o valor do torque total induzido na armadura será igual à $\tau_{ind} = 2ri\ell B$, e fazendo as substituições considerando que

$\Phi_p = A_p B$ onde $A_p = \pi r \ell$, temos a Equação 2.6 para o conjugado induzido na espira.

$$\tau_{ind} = \frac{2}{\pi} \Phi i \quad (2.6)$$



Assimile

Retomando a equação do conjugado desenvolvida para a máquina CC na Seção 1.3, o torque pode ser expresso em termos da interação entre o fluxo de eixo direto por polo Φ_d no entreferro e a componente fundamental espacial da onda de FMM de armadura (F_a), conforme Equação 2.7 (UMANS, 2014):

$$T_{mec} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_d F_a \quad (2.7)$$

Ainda, o valor de pico da onda dente de serra da FMM da armadura é dado pela Equação 1.7 apresentada na Seção 1.2, sendo que a

fundamental espacial é $\frac{8}{\pi^2}$ vezes o seu valor de pico. Portanto,

fazendo a substituição da Equação 1.7 na Equação 2.7, temos:

$$T_{mec} = \frac{8}{\pi^2} \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_d \left(\frac{1 C_a i_a}{2 P m} \right) \right]$$

$$T_{mec} = \left(\frac{C_a P}{2 \pi m} \right) \Phi_d i_a = k_a \Phi_d i_a \quad (2.8)$$

Note que o coeficiente k_a é o mesmo presente na tensão gerada. Para a máquina composta de apenas uma espira, temos novamente

que $k_a = \frac{2}{\pi}$.

Conclui-se que o conjugado produzido na máquina CC é diretamente proporcional ao fluxo presente no interior da máquina à corrente que percorre os enrolamentos e à constante que representa os aspectos construtivos mecânicos da máquina. Dessa forma, a tensão em qualquer máquina real dependerá dos mesmos três fatores (CHAPMAN, 2013):

1. O fluxo na máquina.
2. A corrente na máquina.
3. Uma constante que representa a construção da máquina.



Considere uma máquina de corrente contínua com constante geométrica igual à $k_f = 0,876 \text{ V}/(\text{A} \cdot \text{rad/s})$. Se essa máquina opera como gerador e tem uma resistência de campo de 110 Ohms e tem o enrolamento de campo alimentado em 220V, determine a tensão gerada na aplicação como gerador quando o eixo é acionado à 190 rad/s.

Resolução:

Podemos escrever a tensão gerada em termos da constante geométrica da seguinte forma

$$E_a = k_a \Phi_p \omega_m = k_f I_f \omega_m$$

A corrente de campo e a tensão gerada podem então ser calculadas:

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{220}{110} = 2 \text{ A} \quad E_a = 0,876 \times 2 \times 190 = 332,88 \text{ V}.$$

Ação do comutador:

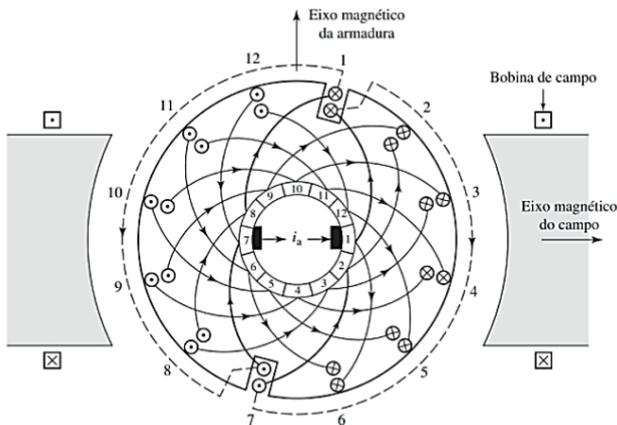
Um aspecto importante a ser analisado na máquina CC é o papel do comutador para o funcionamento da máquina. A Figura 2.6 mostra o enrolamento de armadura, com destaque para o comutador. Note que também temos no esquema as escovas e as conexões das bobinas. O comutador é representado pelo anel de segmentos no centro da Figura 2.6. Trata-se de um anel numerado de 1 a 12. Já as escovas são mostradas como retângulos pretos no interior do anel e elas estão em contato com os segmentos 1 e 7 do comutador. Nas máquinas reais, as escovas fazem contato com o comutador pela superfície externa. Ainda na Figura 2.6, tem-se as ranhuras da armadura (estrutura mais externa), ali estão alocadas as bobinas. Os sentidos das correntes nos condutores das bobinas estão representados pelos pontos (saindo no plano da figura) e as cruzes (entrando no plano da figura).

Para entender bem o esquema da Figura 2.6, acompanhe o seguinte raciocínio: a corrente chega à máquina por meio da escova da direita e entra no comutador pelo segmento 1. Em seguida, essa corrente segue por dois caminhos paralelos:

- Caminho 1 – para o condutor interno da bobina que está na ranhura 1 (ranhura superior da armadura) pelo arco em linha cheia mais densa. Essa corrente entra no plano da figura e segue pela linha tracejada para o condutor interno da bobina que está na ranhura inferior (ranhura 7). Entra no plano da figura e segue para o anel 7 do comutador.
- Caminho 2 – para o condutor externo da bobina que está na ranhura 6 (parte inferior) da armadura pelo arco em linha cheia menos denso. Essa corrente entra no plano da figura e segue por um caminho, não apresentado na figura para não complicar o esquema, para o condutor externo da bobina que está na ranhura 12, na parte superior e diametralmente oposta à ranhura 6. Sai do plano da figura e segue, igualmente ao que acontece no caminho 1, para o anel 7 do comutador.

Se aplicarmos a regra da mão direita, vamos concluir que o campo magnético resultante gerado pelos dois conjuntos de bobinas citadas terá direção vertical e sentido para cima, acompanhando o eixo magnético da armadura, como mostrado na figura. O efeito disso é um conjugado magnético sobre a armadura, no sentido horário, buscando alinhar o campo magnético da armadura com aquele estabelecido pelo enrolamento de campo, que está na direção horizontal e sentido para a direita. O comutador executará um movimento de rotação e estabelecerá contato deslizante com as escovas.

Figura 2.6 | Enrolamento de uma máquina CC com comutador e escovas



Fonte: Umans (2014, p. 412).



O que acontecerá com as características do campo magnético quando o comutador girar, no sentido horário, em um ângulo em que o contato das escovas aconteça entre os segmentos 1 e 2, no lado direito, e com os segmentos 7 e 8 no lado oposto? E quando o comutador girar, no sentido horário, em um ângulo em que o contato das escovas aconteça com os segmentos 2 e 8?

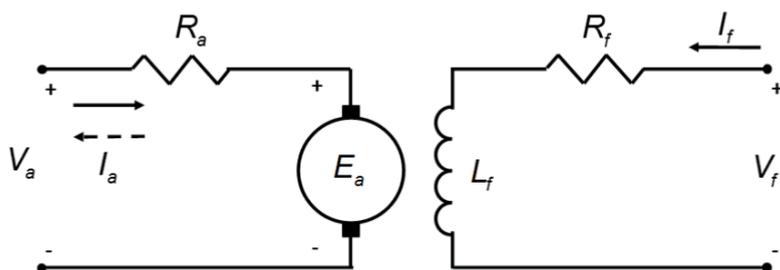
Circuito equivalente da máquina CC:

É importante modelar o circuito equivalente de uma máquina CC, pois a partir dele muitas análises serão realizadas. Essencialmente, o circuito equivalente da máquina CC é representado pelos circuitos do enrolamento de campo, modelado por uma resistência R_f e uma indutância L_f , e pelo circuito de armadura, também modelado por uma resistência R_a e fonte onde haverá a geração de uma tensão induzida E_a , conforme mostrado na Figura 2.7. No circuito de armadura existe também uma indutância, mas não é representada no modelo. O enrolamento de campo é sempre alimentado com tensão contínua de forma a criar o fluxo necessário para a operação da máquina. Já o enrolamento da armadura requer alimentação na operação como motor, e, desta forma, o sentido da corrente no enrolamento de armadura é entrando na máquina (linha contínua, na figura). Já para a operação como gerador, o eixo da máquina é acionado com uma certa velocidade e uma tensão é gerada. Se uma carga for conectada aos terminais do circuito de armadura, então o sentido da corrente será saindo da armadura (linha tracejada, na figura).



Imagine que você só possui uma fonte para alimentar a máquina CC. Como você poderia conectar os enrolamentos utilizando uma só fonte de forma que tanto o circuito do campo como a armadura sejam alimentados?

Figura 2.7 | Circuito equivalente da máquina CC



Fonte: elaborada pelo autor.



Pesquise mais

Existem diversas formas nas quais as espiras do rotor podem ser conectadas aos segmentos do comutador na Máquina CC e, dependendo da conexão realizada, o número de caminhos paralelos de corrente no rotor será afetado, afetando também a tensão de saída e outros aspectos. Assim, recomendamos que você aprofunde um pouco os conhecimentos sobre este aspecto na referência a seguir:

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013 p. 421-433.

Sem medo de errar

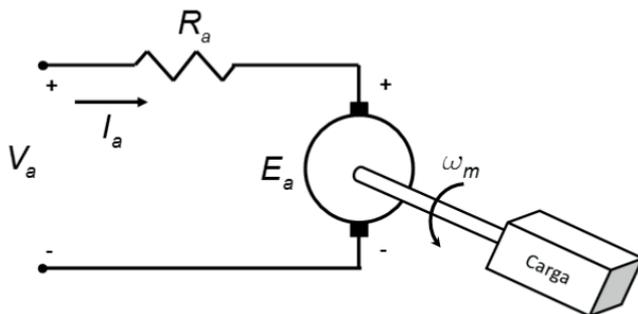
Vamos relembrar a situação na qual você é o estagiário do departamento de manutenção elétrica de uma empresa petroquímica e está realizando um ensaio em um motor de corrente contínua com resistência da armadura de 0,4 Ohms. Um certo valor de excitação foi ajustado e a armadura foi alimentada para velocidade nominal nos seguintes valores:

- Tensão aplicada à armadura: 130 V.
- Corrente de armadura: 25 A.

Agora você é capaz de utilizar os dados de placa da máquina e os valores medidos para obter a quantidade de potência e torque entregues no eixo para a carga mecânica acoplada ao motor CC. Este motor é uma máquina de 120 V 10kW 2000 rpm, com

uma resistência de armadura medida de 0,4 Ohms. Pelos dados medidos, a armadura da máquina está alimentada com 130 V e a corrente que o motor drena da fonte de alimentação é de 25 A. Com estes dados, você já pode executar o primeiro passo para o cálculo da potência, que se refere à obtenção da tensão gerada internamente à máquina. Vamos considerar o circuito da Figura 2.8 que mostra a situação na qual o motor se encontra.

Figura 2.8 | Circuito equivalente da armadura do motor CC para a situação apresentada



Fonte: elaborada pelo autor.

Com base na figura, podemos descrever a equação da malha do circuito da armadura, da seguinte maneira:

$$V_a = I_a R_a + E_a \quad (2.9)$$

Rearranjando os termos podemos calcular a tensão gerada:

$$E_a = V_a - I_a R_a = 130 - 25 \times 0,4 = 120 \text{ V.}$$

A partir da tensão gerada chegamos à potência eletromagnética que é entregue ao eixo do motor.

$$P_m = E_a I_a = 120 \times 25 = 3 \text{ kW.}$$

Conforme vimos nesta seção, temos as equações para o torque e a tensão gerada na máquina conforme a seguir:

$$T_m = k_a \Phi I_a$$

$$E_a = k_a \Phi \omega_m$$

Dividindo uma equação pela outra, podemos chegar na equação do torque em termos da potência e da velocidade de rotação da máquina.

$$\frac{T_m}{E_a} = \frac{k_a \Phi I_a}{k_a \Phi \omega_m} = \frac{I_a}{\omega_m} \rightarrow T_m = \frac{E_a I_a}{\omega_m} = T_m = \frac{P_m}{\omega_m}$$

Substituindo os valores, obtemos o torque:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3000}{2000 \frac{2\pi}{60}} = \frac{3}{\pi} 15 = 14,32 \text{ Nm.}$$

Se você conseguiu calcular a potência e o torque entregue ao eixo, então você conseguiu compreender e dar um primeiro passo para a aplicação da máquina CC como motor. Estes cálculos serão importantes para a equipe de ensaios verificar se a máquina está atendendo o torque mecânico requerido pela carga em seu eixo. Dessa forma, concluímos que você conseguiu cumprir a sua tarefa com êxito!

Avançando na prática

Motor CC: O torque em função da excitação da máquina

Descrição da situação-problema

Quando as máquinas CC funcionam como motores, transformam energia elétrica em energia mecânica. Esses motores são usados na indústria em tarefas que exigem da máquina um valor elevado de torque. Para isso, é necessária uma corrente de excitação que garanta que as condições de torque sejam satisfeitas.

Imagine que em uma empresa que trabalha com motores está sendo realizado um ensaio em uma máquina de corrente contínua cujos enrolamentos na armadura apresentam um número de 700 condutores e 2 caminhos alternativos por polo. A armadura é alimentada com 25 A e a máquina possui quatro polos. Nessas condições é necessário estabelecer uma função que relacione o torque da máquina com o fluxo de campo. Como você procederia com cálculos para obter esta relação?

Resolução da situação-problema

Temos que utilizar a equação do torque que nos foi apresentada.

$$T_{mec} = \left(\frac{C_a P}{2\pi m} \right) \Phi_d i_a$$

A partir da equação, basta substituir os valores para obter a relação pretendida:

$$T_{mec} = \left(\frac{700 \times 4}{2\pi \times 2} \right) \Phi_d \times 25$$
$$T_{mec} = 5570,42 \Phi_d$$

Pela relação obtida, se verifica que o torque mecânico é de cerca de mais de cinco mil vezes o valor do fluxo de campo, de maneira que para um valor de fluxo de 1 Wb teríamos 5570,42 Nm de valor de torque, que representa um torque significativamente alto.

Faça valer a pena

1. Em uma indústria o motor é alimentado por meio de uma fonte de tensão contínua em contato com escovas de carvão que deslizam sobre anéis coletores que comutam continuamente a tensão, gerando internamente uma tensão alternada nos enrolamentos do rotor. Esta mesma fonte de tensão contínua alimenta o circuito de campo da máquina por meio de uma conexão em paralelo.

Assinale a alternativa que expressa corretamente a máquina que o texto acima descreve.

- a) Transformador.
- b) Motor de corrente contínua.
- c) Motor síncrono.
- d) Motor diesel.
- e) Motor flex – gasolina e etanol.

2. Uma máquina elétrica CC é composta por uma única espira imersa em um campo magnético formado por um ímã permanente. A espira possui segmentos laterais de 1 m, distância entre eixo e segmentos laterais de 0,5 m, além de estar imersa em um campo magnético de 0,5 T e corrente elétrica circulante de 10 A.

Nas condições descritas, o torque máximo exercido sobre esta espira será de:

- a) 1,0 Nm.
- b) 2,5 Nm.
- c) 5,0 Nm.
- d) 6,5 Nm.
- e) 10,0 Nm.

3. A forma como o enrolamento da máquina CC é construído, afeta diretamente no valor da tensão gerada. Isso porque o valor da tensão é diretamente proporcional ao número de condutores do enrolamento e inversamente proporcional ao número de caminhos paralelos da máquina. Uma máquina de 4 polos possui _____ condutores totais e _____ caminhos alternativos de corrente no enrolamento de armadura, com uma corrente de armadura de 10 A e tensão induzida de 100 V. A máquina desenvolve um torque de 20 Nm, então, o fluxo de campo dessa máquina é de _____.

Assinale a alternativa que completa corretamente as lacunas

- a) 100, 2, $\pi \times 10^{-2} \text{ Wb}$.
- b) 200, 1, $\pi \times 10^{-2} \text{ Wb}$.
- c) 100, 1, $2\pi \times 10^{-2} \text{ Wb}$.
- d) 200, 2, $\pi \times 10^{-2} \text{ Wb}$.
- e) 200, 2, $2\pi \times 10^{-2} \text{ Wb}$.

Seção 2.2

Gerador CC

Diálogo aberto

Olá, aluno!

Na primeira seção desta unidade estudamos o princípio de funcionamento das máquinas CC. Nesta seção, estudaremos a operação da máquina CC como gerador. Entenderemos como se dá o processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica nesta máquina, estudaremos as principais formas de conexão dos enrolamentos e analisaremos o circuito equivalente e as curvas de magnetização da máquina. Estes conceitos são muito importantes para a compreensão da operação da máquina CC no modo gerador.

Para contextualizar o nosso estudo, vamos continuar imaginando a situação na qual você é um estagiário de uma grande empresa do setor petroquímico que está reestruturando as operações para adequar as máquinas e os equipamentos para cada tipo de aplicação específica. Você participa de um programa de estágios passando por diversas áreas da empresa de forma a ser capacitado para trabalhar com todos os tipos de máquinas elétricas existentes nesta planta industrial. Seu supervisor solicitou que você trabalhe com uma equipe que realiza a manutenção em máquinas de corrente contínua, você já auxiliou a equipe calculando os valores de potência e torque entregues no eixo de um determinado motor, para uma determinada carga.

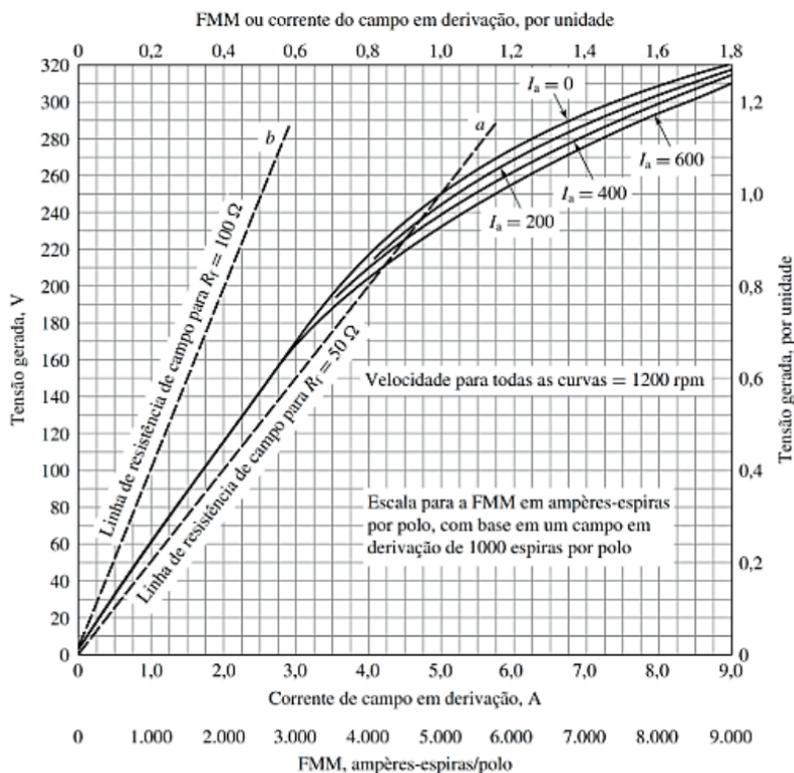
Agora, imagine que a equipe selecionou uma nova máquina CC com tensões nominais para o enrolamento de campo e de armadura de 250 V, 1200 rpm, para ser testada como gerador elétrico. As curvas de magnetização são apresentadas na Figura 2.9 para diferentes valores de corrente devido ao efeito da reação de armadura da máquina. Os enrolamentos da máquina deverão ser conectados em derivação e o eixo do rotor é acionado com velocidade constante de 1200 rpm com a excitação ajustada variando um reostato de campo, de forma a fornecer uma tensão terminal a vazio. Foi verificado que o valor mínimo do reostato permite uma resistência

de campo de 50 Ohms, de forma que é possível obter a tensão nominal em vazio (conforme também mostrado na curva). Depois de ajustada a corrente nominal, uma carga deve ser conectada aos terminais do gerador, drenando dela uma corrente de 200 A. Saiba-se que a resistência de armadura é igual à 0,025 Ohms.

Antes que a equipe realize essa conexão, ela quer saber se o gerador será capaz de manter a tensão de 250V ajustada, para isso, você deve determinar a sua regulação de tensão.

Posteriormente, se a queda de tensão for muito alta, você deverá propor uma solução de modo a se obter um gerador para fornecer uma tensão a vazio correspondente à tensão nominal. Como você realizaria esta tarefa?

Figura 2.9 | Curvas de magnetização para uma máquina 250V 1200 rpm



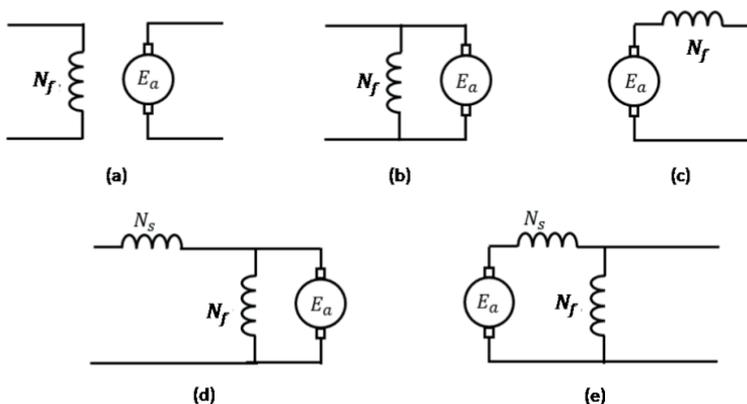
Fonte: Umans (2014, p. 422)

Ao longo desta seção você compreenderá o funcionamento do gerador CC em derivação, assim como em outras conexões, de forma que estes conhecimentos serão suficientes para que você auxilie a equipe nesta atividade. Para isso, seja dedicado, reflita sobre os exemplos apresentados e trabalhe com afinco. Boa leitura!

Não pode faltar

As máquinas CC apresentam diferentes características de acordo com a conexão dos enrolamentos de campo e armadura dependendo da operação como motor ou como gerador. Ainda, cada uma das conexões recebem um nome específico de acordo com o tipo de ligação feita nos enrolamentos. No caso de um gerador cuja excitação é realizada por meio de uma fonte CC independente (separada), a conexão é denominada de *excitação independente*, conforme indicado na Figura 2.10(a). Entretanto, é possível a máquina fornecer a própria excitação, ou de outra forma, é possível conectar o enrolamento de campo de forma que, quando ocorre a geração da tensão induzida, estes enrolamentos serão excitados por esta tensão gerada, ao que se dá o nome de gerador *auto-excitado*. Se o campo estiver ligado em paralelo com a armadura, denomina-se máquina CC de excitação (*ou campo*) *shunt* (*ou em derivação*), conforme indicado na Figura 2.10(b). Na configuração de máquina CC com *excitação série*, a conexão do campo é feita em série com a armadura, assim como a Figura 2.10(c). Pode-se ainda combinar as configurações *shunt* e *série*, formando-se a máquina CC de excitação composta. Neste caso, existe as ligações em *shunt* curto, como na Figura 2.10 (d), com o campo *shunt* em paralelo somente com a armadura, ou *shunt longo*, como na Figura 2.10 (e), com o campo *shunt* em paralelo com a armadura associada com o campo *série*.

Figura 2.10 | Tipos de conexões da máquina CC: (a) excitação independente (b) campo em derivação (c) Campo série (d) composto *shunt* curto (e) composto *shunt* longo



Fonte: elaborada pelo autor.

Operação como gerador

Para que entendamos o conceito de gerador CC, é necessário observar que uma máquina CC funciona como gerador a partir do giro que o seu eixo sofre devido à ação de outra máquina (que pode ser elétrica ou não). Para essa máquina responsável por imprimir movimento ao eixo da máquina CC, é adotado o nome de Máquina Motriz.

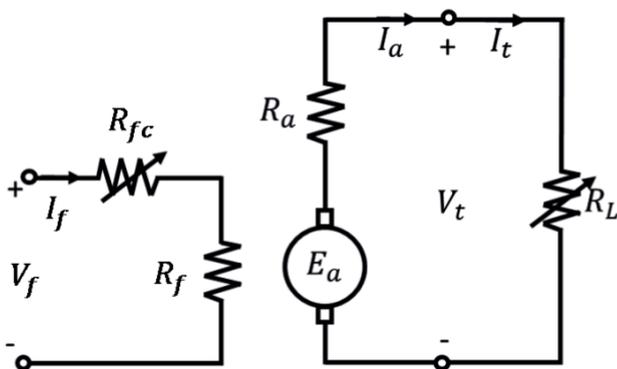
É importante lembrarmos que a máquina CC é composta por dois circuitos (circuito de campo, que está localizado no estator e armadura que está no rotor). O processo de excitação ocorre quando alimentamos o circuito de campo (estator) e esta energia, cedida pela alimentação, gera um campo magnético no circuito. Por outro lado, o movimento do eixo do gerador, via máquina motriz, fará com que a armadura interaja com o campo produzido pelo estator. A energia elétrica, resultante dessa interação, será a extraída pelos terminais que estão conectados ao comutador e às escovas presentes na máquina CC.

Já vimos que o funcionamento do gerador CC se fundamenta no princípio de indução eletromagnética. De acordo com esse princípio, quando um condutor elétrico é submetido a um campo magnético, surgirá uma tensão induzida. A magnitude desta tensão é proporcional de forma direta à intensidade do fluxo magnético e à

frequência de variação, conforme estudado na última seção. Logo, quando o enrolamento do rotor (armadura) é movimentado em meio a um campo magnético fixo, nos condutores da armadura aparece uma força eletromotriz induzida, dada por $E_g = E_a = k_a \Phi \omega_m$, onde k_a é uma constante que depende das características construtivas da máquina, ω_m é a velocidade de rotação mecânica em rad/s e Φ é o fluxo magnético.

Para cada um dos tipos de conexão para a máquina CC, iremos analisar o comportamento da máquina para a operação como gerador. A Figura 2.11 mostra o circuito equivalente, para operação em regime permanente (por isso as indutâncias não precisam ser representadas) de um gerador de excitação independente. Perceba que neste caso, o campo é alimentado por uma fonte CC externa V_f e R_f corresponde à resistência do enrolamento de campo, enquanto R_a representa a resistência do enrolamento de armadura. As bobinas do enrolamento de campo são construídas por fios relativamente finos, de forma que é possível fazer o controle da corrente de campo I_f por meio de um potenciômetro indicado por R_{fc} . Se o gerador for conectado à uma carga R_L esta terá em seus terminais uma tensão terminal dada por V_t e será percorrida por uma corrente terminal I_t , que é igual à corrente de armadura I_a .

Figura 2.11 | Gerador CC de excitação independente – circuito equivalente

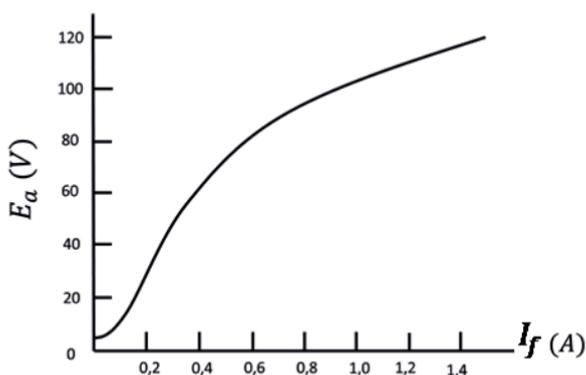


Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos considerar que o circuito de campo está inicialmente desenergizado e o rotor é posto para girar. Neste momento, mesmo ocorrendo excitação de campo na máquina, pode haver uma

magnetização residual de forma que apareça uma força eletromotriz muito pequena nos terminais da armadura. A medida que a corrente de campo é aumentada, aumentando a excitação da máquina, a tensão induzida na armadura também é elevada gradativamente por conta do aumento de fluxo magnético, até que ocorra a saturação magnética, ou seja, a partir de um ponto, mesmo com o aumento do fluxo de campo, a tensão gerada não varia linearmente, sendo atenuada, conforme nos mostra a Figura 2.12.

Figura 2.12 | Curva de magnetização da máquina CC



Fonte: adaptada de Sen (1996, p.143).

Assim que uma carga for conectada nos terminais da armadura, a tensão sofre uma queda devido às resistências do enrolamento de armadura e, também, às resistências das escovas. Um outro aspecto que influencia na tensão entregue a carga é com relação à diminuição do fluxo de campo devido à reação de armadura, que é um fenômeno de desmagnetização que ocorre devido à interação dos fluxos de campo e da armadura na máquina.



Pesquise mais

Reação de armadura: Este fenômeno está associado a interação dos campos magnéticos do campo de excitação com o campo magnético induzido na armadura da máquina. Conseqüentemente, ocorre um deslocamento da zona neutra e pode causar faiscamento excessivo nas escovas, ocasionando dano a estrutura da máquina. Sugerimos

que você se aprofunde neste tópico lendo a Seção 7.4 do link da seguinte obra:

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014. p 417-420.

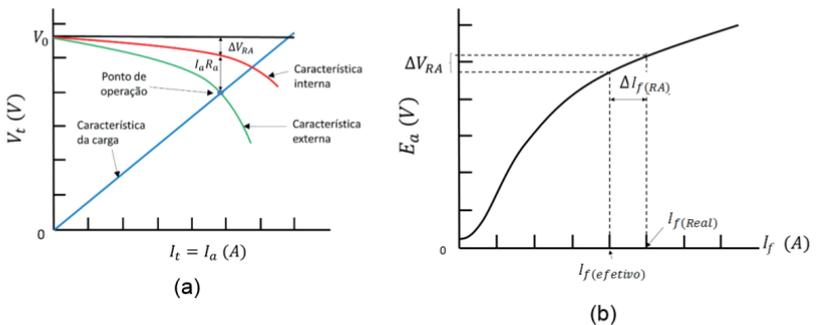
Considerando o circuito equivalente do gerador CC de excitação independente, apresentado na Figura 2.8, pode-se definir as expressões para V_f , que corresponde à tensão de campo e V_t , que corresponde à tensão terminal, conforme as Equações 2.10 e 2.11, respectivamente.

$$V_f = I_f R_f \quad (2.10)$$

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad (2.11)$$

Pela Equação 2.11, a tensão terminal é resultado da tensão induzida na armadura menos a queda de tensão na resistência do enrolamento ($I_a R_a$). Contudo, esta equação não leva em conta o efeito da reação de armadura que causa uma queda de tensão interna (ΔV_{RA}), conforme mostra a Figura 2.13 (a), de forma que a tensão terminal seja menor. Na Figura 2.13 (b), representa-se a característica da carga, onde podemos ver que o ponto de operação da máquina está localizado no ponto de cruzamento destas curvas.

Figura 2.13 | Tensão terminal e tensão gerada, considerando o efeito da reação de armadura (a) Curva característica da tensão terminal e da (b) curva de magnetização



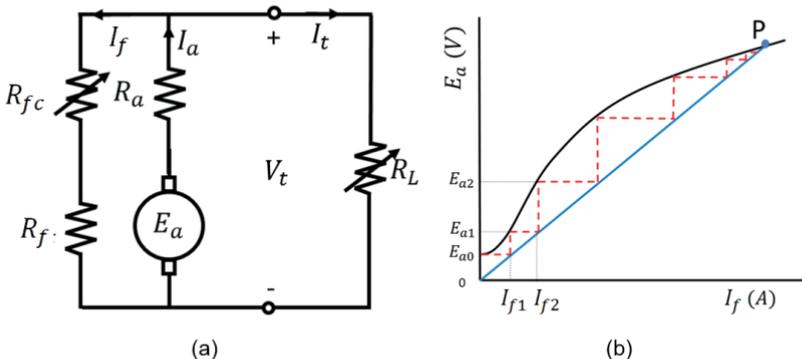
Fonte: adaptada de Sen (1996, p.147, 150).



Que solução poderia ser realizada para compensar esta perda provocada pela resistência de armadura e pelo efeito da reação de armadura? Quais fatores deveriam ter seus valores limites assegurados para que o gerador continuasse com a sua característica de tensão nos seus terminais de modo a se manter adequado para atender a uma carga?

Outro tipo de conexão pode ser feito para obter um gerador cujo enrolamento de campo está em paralelo com o enrolamento da armadura (campo shunt). Na Figura 2.14 (a) é mostrado o circuito equivalente em regime permanente e na Figura 2.14 (b) a curva de magnetização da máquina, que mostra como ocorre o processo chamado de *escorvamento de tensão*, de forma a promover a excitação da máquina. Considere um magnetismo residual inicial na armadura (E_{a0}). Quando o rotor da máquina é colocado para girar, a tensão gerada E_{a0} irá alimentar o enrolamento de campo, surge então uma corrente I_{f1} , que leva a tensão gerada para um valor superior à do magnetismo residual dado por E_{a1} . Essa tensão eleva a tensão de campo, fazendo circular uma corrente I_{f2} . O processo se repete sucessivamente, de modo que o ponto de operação ocorre quando a curva de magnetização intersecciona a reta que representa a característica da resistência de campo.

Figura 2.14 | Gerador CC de campo *shunt* (a) Circuito equivalente, (b) curva de magnetização demonstrando escorvamento de tensão



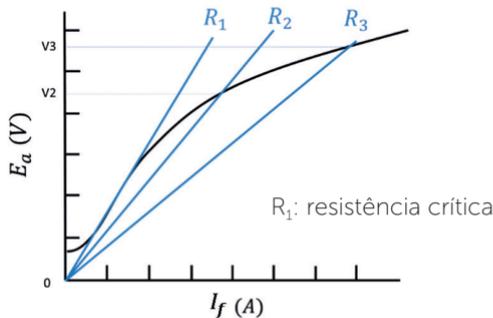
Fonte: adaptada de Sen (1996, p.153).



O escorvamento de tensão ocorrerá somente se as seguintes condições forem satisfeitas:

1. Deve existir um magnetismo residual a fim de produzir E_{a0} .
2. A FMM do enrolamento de campo deve dar suporte ao magnetismo residual.
3. A resistência do enrolamento de campo deve ser tal que possibilite o escorvamento de tensão, ou seja, menor que a resistência crítica, conforme mostra a Figura 2.15.

Figura 2.15 | Resistência crítica



Fonte: adaptada de Sen (1996, p.154).

As Equações 2.9 e 2.10 ainda são válidas, entretanto, agora a corrente de armadura é igual à soma da corrente de campo com a corrente de excitação da máquina, conforme mostra a Equação 2.12.

$$I_a = I_f + I_t \quad (2.12)$$

**Exemplificando**

Considere um gerador CC shunt que possui uma resistência de armadura de 0,5 Ohms e uma resistência de campo de 50 Ohms. Quando ligado à uma carga, fornece 60 V com uma corrente de 10 A. Qual é o valor da tensão induzida?

Resolução:

Inicialmente devemos calcular a corrente de campo:

$$I_f = \frac{60}{50} = 1,2 \text{ A}$$

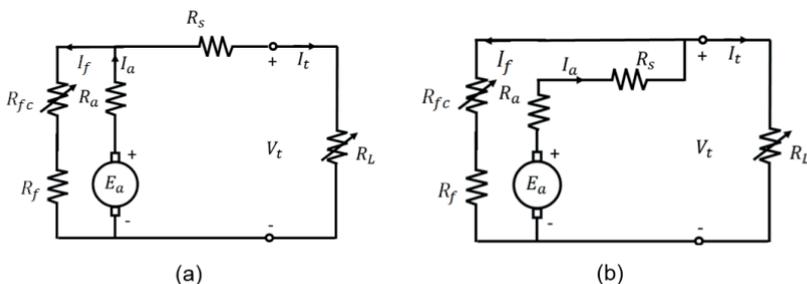
A partir da corrente de campo e da corrente terminal, obtemos a corrente de armadura, e em seguida, a tensão de armadura

$$I_a = I_t + I_f = 10 + 1,2 = 11,2 \text{ A},$$

$$E_a = V_t + I_a R_a = 60 + 11,2 \times 0,5 = 65,6 \text{ V}.$$

As quedas de tensão, devido à resistência da armadura (e a reação de armadura), são indesejadas em aplicações que requerem uma tensão constante. Neste sentido, pode-se utilizar as configurações compostas, com um enrolamento série, cuja função é produzir uma FMM de forma a compensar os efeitos da queda de tensão e da reação de armadura. O enrolamento série pode ser conectado da forma curta, como mostra a Figura 2.16 (a) ou da forma longa, em série com o enrolamento da armadura, conforme mostra a Figura 2.16 (b).

Figura 2.16 | Gerador CC composto (a) campo *shunt* curto (b) campo *shunt* longo

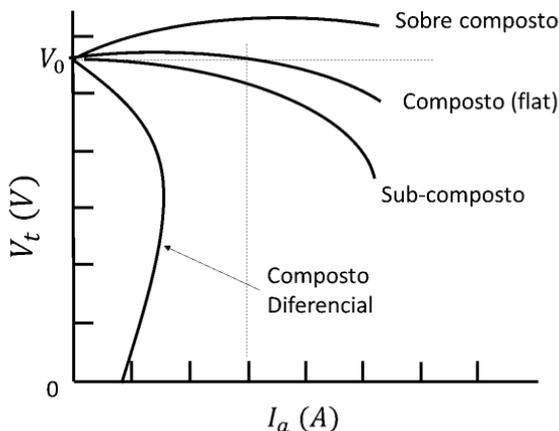


Fonte: elaborada pelo autor.

Utilizando a excitação composta, o campo *shunt* predomina como o mais forte. Quando a FMM do campo série auxilia a FMM do campo *shunt*, o composto é denominado de *composto cumulativo* (ou *aditivo*). Do contrário, o gerador é denominado de *composto diferencial* (ou *subtrativo*). Esse tipo de conexão determina a

espécie de regulação de tensão que o gerador terá conforme o aumento da corrente de armadura, podendo permanecer estável (flat) ou ter um uma redução da tensão, conforme mostra a Figura 2.17. Isso será determinado pelo número de espiras e tipo de conexão shunt (curto ou longo) do enrolamento série.

Figura 2.17 | Característica $V_t \times I_a$ do gerador CC composto



Fonte: adaptada de Sen (1996, p.163).



Assimile

A regulação de tensão de um gerador é dada pela relação entre as tensões a vazio e em carga, conforme equação 2.13.

$$reg_V \% = \frac{V_0 - V_t}{V_t} \times 100 \quad (2.13)$$



Exemplificando

Considere um gerador CC que apresenta uma tensão sem carga 200V, quando uma carga de valor nominal é conectada em seus terminais, essa tensão cai para 189V. Qual é a regulação de tensão?

Resolução:

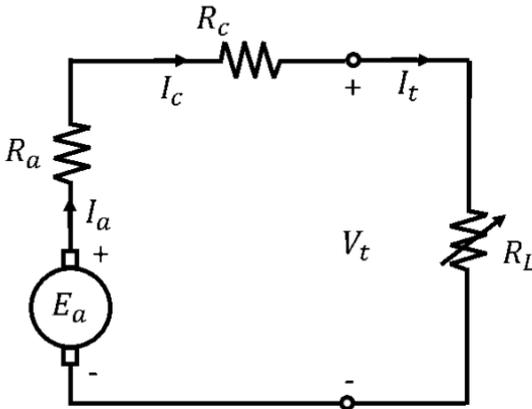
Para calcular a regulação podemos aplicar a equação diretamente

$$\text{reg}_v(\%) = \frac{V_{\text{vazio}} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100 = \frac{200 - 189}{189} \times 100 = 5,82\%$$

Existe ainda a conexão do gerador com campo em série. Nesse caso, o enrolamento de excitação é conectado em série com o enrolamento da armadura, conforme a Figura 2.18. Pode-se inferir que a corrente terminal é a própria corrente de excitação, e também é igual à corrente da armadura ($I_f = I_t = I_a$). Este tipo de enrolamento série é normalmente composto por fios relativamente grossos capaz de suportar uma corrente de armadura, e a excitação só ocorre na presença de uma carga conectada a seus terminais. A equação da tensão terminal em regime permanente é escrita de acordo com a Equação 2.14.

$$V_t = E_a - I_a(R_a + R_c) \quad (2.14)$$

Figura 2.18 | Circuito equivalente do gerador CC de campo série



Fonte: elaborada pelo autor.

Quando em carga, a corrente de armadura é elevada e, uma vez que ela percorre o enrolamento de campo, o fluxo de excitação aumenta fazendo com que a tensão gerada também se eleve. O ciclo se repete até que ocorra a saturação magnética com a

estabilização da tensão. Se a carga for de resistência muito alta, a tensão terminal pode ser muito pequena, a ponto de não permitir o escorvamento de tensão para um valor adequado. Por isso esse tipo de gerador tem uma aplicação muito limitada.

Sem medo de errar

Agora que você já conhece um pouco mais sobre a máquina CC, especificamente operando como gerador, vamos retomar a situação na qual você está auxiliando a equipe em um ensaio para colocar uma máquina CC para operar como gerador. A máquina é de 250V (tanto para o campo quanto para a armadura), 1200 rpm e a resistência de campo *shunt* foi ajustada para 50 Ohms, a resistência de armadura tem o valor de 0,025 Ohms. Pela Figura 2.7 verificamos que em vazio a reta da resistência de campo passa pelo ponto onde a tensão gerada é de 250V, como a corrente é igual a zero, este será o valor da tensão nominal. Como a carga drenará cerca de 200 A e a corrente de campo é muito menor que a de armadura, vamos, por um instante, assumir a corrente de armadura igual a 200 A para utilizar a curva que está sendo apresentada na Figura 2.7. Contudo, para a análise utilizando a curva para 200 A não basta apenas achar a intersecção dos pontos. Deve-se ainda considerar a queda de tensão na resistência de armadura, que será calculada conforme se segue:

$$\Delta V_{R_a} = R_a I_a = 0,025 \times 200 = 5 \text{ V}$$

Deve-se localizar esta queda de tensão na curva (reta vertical) entre a reta da resistência de campo e a curva para 200 V. Ao fazer isso, encontramos os valores de corrente de campo de aproximadamente 3,8 V e uma tensão terminal de 192 V. Assim, você já consegue concluir que não será suficiente para manter a tensão no valor nominal. A corrente terminal nestas condições será: $I_t = I_a - I_f = 200 - 3,8 = 196,2 \text{ A}$.

A regulação de tensão pode ser calculada conforme segue:

$$reg_v(\%) = \frac{V_{\text{vazio}} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100 = \frac{250 - 192}{192} \times 100 = 30,2\%$$

Percebemos que se trata de uma regulação de tensão muito pobre. Com a finalidade de contornar esse problema, uma vez que

o reostato do controle de campo se encontra no mínimo, é possível dimensionar um enrolamento série no campo em derivação de forma a tornar o gerador CC em um gerador composto. Assim, a regulação pode ser melhorada conforme ilustrado na Figura 2.17. Dessa forma, você pode propor esta solução à equipe para que a máquina possa ser utilizada como gerador.

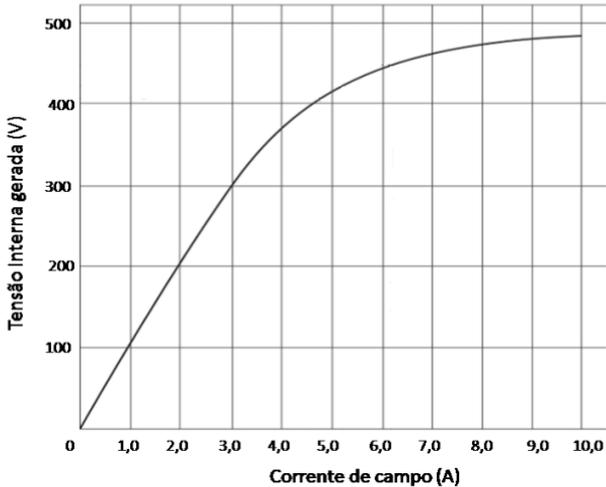
Avançando na prática

Gerador CC com excitação independente e tensão de saída determinada pela carga

Descrição da situação-problema

Imagine que você está trabalhando em uma planta comercial que necessita de um gerador de emergência, principalmente para alimentar os painéis de sinalização e os equipamentos básicos que podem ser alimentados em corrente contínua. Para esta tarefa, foi conseguido um gerador CC com excitação independente com valores nominais de 150 kW, 380 V (campo e armadura), 100 A e 1800 rpm. Esse gerador tem as seguintes características: $R_a = 0,05$ Ohms, $R_f = 125$ Ohms $V_f = 380$ V e $N_f = 2000$ espiras por polo. O fornecedor do gerador disponibilizou para você a curva de magnetização da máquina, como apresentado na Figura 2.19. Note que a curva de magnetização é uma ferramenta gráfica que nos possibilita de forma simples, sem ter que usar um equacionamento, relacionar a corrente de campo com a tensão de armadura. Essas curvas geralmente são geradas com base nos parâmetros das equações que modelam o funcionamento do gerador CC. Porém, para a obtenção de uma curva para um dado gerador CC é necessário tornar constantes alguns parâmetros. Um exemplo disso é manter constante a velocidade do eixo do gerador.

Figura 2.19 | Curva de magnetização típica para o gerador CC



Fonte: adaptada de Chapman (2013).

Antes de se utilizar o gerador, foi feita uma verificação de carga, no qual foi levantada o valor total da planta. Este levantamento indicou que a carga requer uma corrente total de 120 A. A máquina motriz, que se trata de um motor à combustão, foi ajustada para a velocidade de rotação igual à nominal do gerador. É necessário verificar se a tensão terminal da máquina atenderá o requisito principal, que é não ficar abaixo de 250 V.

Resolução da situação-problema

O primeiro passo é calcular a corrente de campo:

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{380}{125} = 3,04 \text{ A}$$

$$I_f \simeq 3,0 \text{ A}$$

Com o valor de corrente, vamos, por meio da curva de magnetização, obter o valor da tensão de armadura. Se verificarmos quando a corrente de campo é de 3,0 A e localizarmos o ponto na curva, veremos que a tensão gerada será de 300 V. Logo, podemos fazer um cálculo simples para obter o que foi pedido, que é a tensão nos terminais do gerador:

$$V_t = E_a - I_a R_a = 300 - 120 \times 0,05 = 294 \text{ V} .$$

Assim, pode ser verificado que a tensão ficará acima do limite especificado para a planta industrial na qual você está trabalhando.

Faça valer a pena

1. No gerador de corrente contínua operando em conexão *shunt*, o enrolamento de campo e de armadura são conectados em paralelo e a geração de energia ocorre devido ao fenômeno denominado escorvamento de tensão. Contudo, no enrolamento de armadura ocorrem quedas de tensão indesejáveis devido à resistência da armadura e a reação de armadura. Por isso, pode-se utilizar uma configuração com um enrolamento adicional, normalmente conectado de forma aditiva, cuja função é produzir uma força magneto motriz que tem a finalidade de compensar as quedas de tensão.

A configuração descrita no texto que utiliza um enrolamento adicional é denominada de:

- a) Gerador com excitação independente.
- b) Gerador de campo *shunt*.
- c) Gerador de campo série.
- d) Gerador composto.
- e) Gerador cc com imã permanente.

2. A regulação de tensão de um gerador é dada como o percentual da diferença entre a tensão em vazio e a tensão em plena carga. É esperado que os geradores tenham uma regulação tal que, quando uma carga for alimentada pelo gerador, a tensão nos terminais da máquina não seja reduzida significativamente.

A tensão sem carga de um gerador de corrente contínua é de 150 V, e sua tensão em plena carga é de 129 V. Qual é a regulação de tensão?

- a) 13,15%.
- b) 14,00%.
- c) 15,18%.
- d) 16,28%.
- e) 17,08%.

3. A tensão induzida em um gerador de corrente contínua é diretamente proporcional à velocidade de rotação da máquina. Mas também é diretamente proporcional ao fluxo do campo de excitação da máquina. Portanto, para se ter o controle da tensão induzida por meio da velocidade de rotação, deve-se atentar para que o fluxo de excitação permaneça constante.

Um gerador de corrente contínua é operado à uma velocidade de 1200 rpm e apresenta uma tensão induzida de 200 V. Este gerador tem excitação independente e constante. Se este gerador for operado à uma velocidade de 1800 rpm, qual a tensão induzida à vazio?

- a) 200V.
- b) 300V.
- c) 500V.
- d) 550V.
- e) 600V.

Seção 2.3

Motor CC

Diálogo aberto

Caro aluno, estamos chegando ao final da unidade sobre máquinas de corrente contínua e, nesta seção, daremos continuidade aos estudos da operação da máquina como motor. Veremos também os conceitos presentes nos motores e os esquemas elétricos. Ao final da seção seremos capazes de entender o funcionamento dos motores CC e identificar as diferenças entre eles. Além disso, desenvolveremos conhecimento sobre os dispositivos de proteção e partida. O estudo deste conteúdo o ajudará a conhecer aspectos básicos relacionados às máquinas rotativas, assim como aplicar a máquina CC nas operações como gerador e motor.

Estes conceitos serão muito importantes para a sua atuação profissional, uma vez que os motores CC ainda encontram algumas aplicações na indústria devido à possibilidade de fornecer uma flexibilidade para controle de conjugado e velocidade da máquina.

Vamos continuar a contextualizar o nosso estudo na situação em que você participa do programa de estágios de uma empresa petroquímica no setor de manutenção elétrica de máquinas. Você está sendo preparado para atuar na assistência técnica das máquinas da empresa e, atualmente, está trabalhando com uma equipe nas máquinas de corrente contínua. Você já auxiliou a equipe calculando os valores de potência e torque entregues no eixo de um determinado motor para uma determinada carga. Também conheceu a curva de magnetização da máquina por ter trabalhado no ensaio de um gerador CC. Nesta etapa, você foi chamado para um trabalho mais prático: um dos motores CC da planta industrial apresenta uma corrente de partida muito alta, que está preocupando a equipe. Trata-se de um motor de 200 V com uma resistência de armadura de 0,2 Ohms e uma resistência de campo de 100 Ohms. A equipe lhe consultou para determinar a corrente de partida e verificar se ela é ou não adequada para as condições da máquina (que suporta uma corrente máxima de 500 A). Para esse tipo de

máquina, esta corrente pode ser muito alta e danificar o motor, então, a equipe solicitou que você dimensione um dispositivo de proteção para reduzir a corrente na partida e levar a máquina até a velocidade nominal. Como você realizaria essa tarefa?

No decorrer desta seção, você descobrirá como. Para isso, faça uma leitura atenta do conteúdo, realize as atividades propostas e tente você mesmo resolver os exemplos propostos antes de verificar a resposta.

Bons estudos!

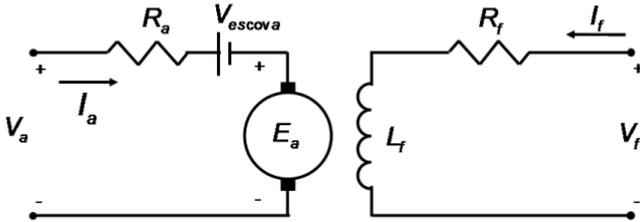
Não pode faltar

Os tipos de motores de corrente contínua também são caracterizados pelo tipo de conexão do enrolamento de excitação, assim como os geradores. Assim, os tipos de motores diferem se o modo de excitação de campo é independente, ou no caso de motores auto-excitados, no modo como os enrolamentos de campo e de armadura são ligados, resultando em diferentes características elétricas.

Basicamente, na operação como motor, a entrada é a potência elétrica enquanto a saída é a potência mecânica no eixo, ou seja, no motor CC há a conversão de energia elétrica em energia mecânica. Assim, se o enrolamento da armadura da máquina CC for conectado a uma fonte de tensão contínua, a máquina irá desenvolver torque mecânico e entregar potência mecânica em seu eixo.

O motor CC tem grande aplicabilidade, pois pode fornecer com precisão uma faixa de velocidades em que pode ser feito o controle de torque. Nesta seção, vamos tratar principalmente de dois tipos de motores CC, que são os motores tipo série e composto, porém, é importante notar que existem outros tipos. Um exemplo é o motor CC com excitação independente, que é apresentado na Figura 2.20, similar ao circuito equivalente da máquina CC apresentado na Seção 2.1, mas com as correntes no sentido de operação como motor.

Figura 2.20 | Circuito elétrico para motor CC com excitação independente



Fonte: elaborada pelo autor.

Pelo circuito equivalente do motor CC podemos observar as seguintes características:

- O lado direito apresenta as bobinas de campo que produzem o fluxo magnético da máquina. Essas bobinas são representadas pela resistência R_f e pela indutância L_f . Pode-se associar um resistor variável a este enrolamento para o ajuste da corrente de campo.
- Do lado esquerdo temos o circuito de armadura, que é composto pela fonte ideal E_a em série com o resistor R_a que representa as perdas na armadura. Há também a tensão nas escovas sendo representada pela fonte CC V_{escova} com polaridade reversa em comparação ao fluxo de corrente. Tais perdas podem ser representadas juntamente com a resistência R_a , de forma que a fonte V_{escova} pode ser omitida.

A equação característica do motor CC com excitação independente é uma equação na qual iremos nos basear para analisar os outros tipos de motores. Ela é obtida por meio da análise de malha no circuito de armadura, conforme a Equação 2.15, considerando a tensão na armadura para o circuito da Figura 2.20.

$$V_a = E_a + R_a I_a \quad (2.15)$$

Algumas equações já conhecidas da seção anterior são aqui apresentadas para que entendamos a relação entre geradores e motores CC. A tensão de armadura E_a é descrita pela Equação 2.16.

$$E_a = k_a \Phi \omega_m \quad (2.16)$$

Onde: k_a é uma constante de proporcionalidade relativa a construção da máquina, Φ é o fluxo magnético e ω_m é a velocidade angular do eixo do motor.

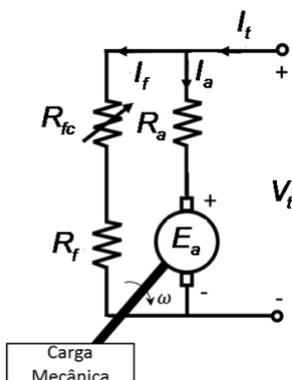
O torque T provocado no eixo do motor é descrito pela Equação 2.17, onde I_a é a corrente de armadura fornecida pela fonte de alimentação do motor.

$$T_m = k_a \Phi I_a \quad (2.17)$$

A seguir, analisaremos cada um dos três principais tipos de motores: o motor CC de derivação (campo *shunt*), o motor CC série e o motor CC composto.

O **motor de derivação ou de campo *shunt*** é o mais indicado para quando se deseja variar a velocidade de rotação do motor, seu o circuito equivalente é mostrado na Figura 2.21. A conexão do enrolamento de campo é conectada em paralelo com o enrolamento de armadura e a máquina é alimentada por uma fonte CC que fornece a tensão terminal V_t . O controle da excitação da máquina pode ser realizado a partir de um resistor em série com o enrolamento de campo (R_{fc}). Ao diminuir a corrente de campo, o fluxo de excitação diminui e, para manter a tensão e o torque no eixo, o motor acelera e a corrente de armadura aumenta. Assim, se verifica que caso a corrente de campo seja interrompida, o motor pode ser danificado pelo excesso de velocidade. Possui velocidade constante, dada uma corrente de campo fixa.

Figura 2.21 | Motor CC de derivação



Fonte: elaborada pelo autor.

A equação que governa o motor CC com campo *shunt*, quando funcionando em regime permanente, é a mesma equação para o motor com excitação independente dada na Equação 2.15.

Entretanto, para o caso do motor CC com campo shunt, a tensão terminal é a mesma tensão aplicada no circuito de armadura ($V_a = V_t$) e a corrente terminal é dada de acordo com a Equação 2.18.

$$I_t = I_f + I_a \quad (2.18)$$

A corrente de campo, por sua vez, é dada conforme Equação 2.19.

$$I_f = \frac{V_t}{R_f + R_{fc}} \quad (2.19)$$

Logo, a diferença entre este tipo de motor CC autoexcitado, e o motor CC com excitação independente é que uma única fonte CC é necessária para a alimentação da máquina. De fato, no caso de operação da máquina CC como motor, é mais conveniente alimentar tanto o enrolamento de campo como o enrolamento de armadura utilizando uma mesma fonte CC do que utilizar duas fontes separadas. Para fins didáticos apenas, em algumas análises, adota-se a conexão por excitação independente de forma a elucidar melhor os conceitos.



Exemplificando

Considere um motor do tipo derivação shunt com tensão de 160 V. Determine a corrente de partida deste motor, sabendo que a resistência de armadura tem resistência igual à 0,08 Ohms e resistência de campo igual à 100 Ohms.

Resolução:

Na partida da máquina a velocidade é igual à zero, logo:

$$E_a = k_a \Phi \omega_m = k_a \Phi \times 0 = 0 \text{ V}.$$

Então, podemos obter a resistência de armadura fazendo:

$$V_t = E_a + R_a I_a \rightarrow I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} = \frac{V_t}{R_a}$$

A corrente de campo será: $I_f = \frac{V_t}{R_f}$, assim podemos escrever a corrente total como:

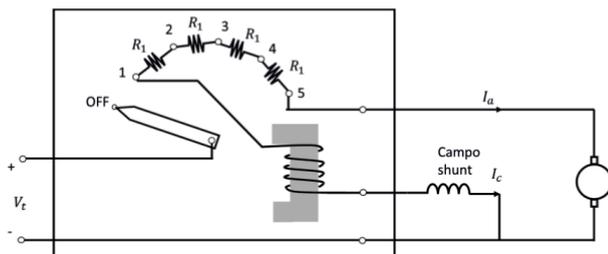
$$I_t = I_f + I_a = \frac{V_t}{R_f} + \frac{V_t}{R_a} = \frac{160}{100} + \frac{160}{0,08} = 1,6 + 2000 = 2001,6 \text{ A}$$

Conforme verificado no exemplo, se um motor CC for diretamente conectado a uma fonte, a corrente de partida pode ser muito perigosa para a máquina, principalmente devido à corrente de armadura no momento da partida. Na aplicação prática, a partida da máquina é feita utilizando resistências externas conectadas ao enrolamento de armadura (os dispositivos de proteção de partida) ou controlando a tensão de armadura da máquina.



O **dispositivo de proteção e partida (DPP)**, conforme mostra a Figura 2.22, é utilizado para realizar a partida do motor CC evitando as altas correntes. Na partida da máquina, o contato é fechado na posição 1, neste momento, todas as resistências estão em série com o enrolamento de armadura limitando a corrente de partida. A medida que o motor aumenta a velocidade, o contato é fechado sequencialmente nas posições 2, 3 e 4 até ser mantido na posição 5 pelo eletroímã que é percorrido pela corrente de campo.

Figura 2.22 | Dispositivo de proteção e partida (DPP)



Fonte: adaptada de Sen (1996, p.184).

Alternativamente, pode-se utilizar uma fonte CC de baixo valor de tensão na partida e aumenta-la à medida que o motor ganha velocidade. No entanto, isso requer uma fonte de tensão variável, o que aumentará o custo de implementação.

No decorrer da operação da máquina, quando a tensão E_a existir devido a rotação, a corrente de armadura pode ser escrita por meio da Equação 2.20, considerando que podemos expressar $E_a = kI_f\omega_m$

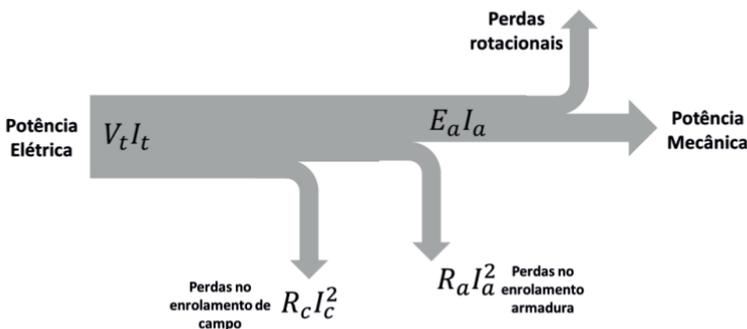
$$I_a = \frac{V_t - kI_f\omega_m}{R_a} \quad (2.20)$$

Dessa forma, a corrente de armadura pode ser controlada variando a tensão de alimentação da máquina, a resistência externa por meio de um DPP, ou ainda, variando a corrente de campo I_f (por meio de potenciômetros em série com o enrolamento de campo). No entanto, deve-se atentar que a velocidade de rotação da máquina também será alterada, exigindo-se um controle adequado.

Já vimos em seções anteriores que a máquina CC é composta basicamente por dois enrolamentos, sendo um de campo (estator) e outro de armadura (rotor), um comutador e escovas. As perdas na armadura consistem em perdas no cobre, perdas por corrente de Foucault e por histerese. Na Figura 2.23 pode-se observar o fluxo direcional das potências que percorrem o motor CC. Este diagrama está apresentado para a conexão *shunt*, mas pode ser também interpretado sem dificuldades para outras conexões.

A potência elétrica é fornecida ao enrolamento de campo de forma a criar um fluxo magnético no qual a armadura do rotor está imersa, transmite-se assim uma potência elétrica dada por $V_t I_t$. Parte dessa potência elétrica é perdida no enrolamento de campo ($R_f + R_{fc}$), e outra parte é perdida no enrolamento de armadura. Como resultado, teremos uma potência entregue no eixo da armadura dada por $E_a I_a$. Entretanto, parte da potência também é perdida por atrito na forma de perdas rotacionais. Dessa forma, a potência de saída é a potência mecânica entregue ao eixo, menos as perdas rotacionais.

Figura 2.23 | Fluxo de potência no motor CC



Fonte: elaborada pelo autor.

Desprezando as perdas rotacionais, temos que a potência mecânica pode ser expressa conforme Equação 2.21.

$$P_m = E_a I_a \quad (2.21)$$



Refleta

Ao comparar a equação das tensões do motor CC com a equação das tensões apresentada para o gerador na seção anterior (Equação 2.11), verifica-se o sentido oposto da corrente. Reflita e responda: como ficaria o fluxo de potência quando pensamos na máquina operando como gerador?

A porcentagem de perdas na máquina CC depende de seu tamanho, tanto em termos construtivos como em termos de potência. De acordo com (SEN, 1996), para máquinas de potência na faixa de 1 a 100 kW ou 1 a 100 hp, normalmente estas perdas se distribuem em 1 a 7% da potência de entrada perdida nos enrolamentos de campo, e de 2 a 4% de perdas nos enrolamentos da armadura. As perdas rotacionais ficam em torno de 3 a 15%. No entanto, máquinas de menor porte podem ter maiores porcentagens de perda e, da mesma forma, máquinas de maior porte apresentam menor porcentagem de perdas. A eficiência da máquina corresponde à razão da potência de saída em relação à potência de entrada, conforme mostrado na Equação 2.22:

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{E_a I_a - P_{rot}}{V_t I_t} \times 100\% \quad (2.22)$$

O **motor CC de campo série** é apresentado no esquemático da Figura 2.24 (a), onde pode se verificar que, assim como apresentado na seção anterior para o gerador série, o enrolamento de campo se encontra em série com o enrolamento de armadura.

Aplicando as leis de Kirchhoff para o esquema ilustrado na Figura 2.24 (a), temos a Equação 2.23 para a tensão.

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_f) \quad (2.23)$$



Considere um motor CC série de 300 V com a impedância dos enrolamentos série e de armadura apresentando uma resistência total de 0,5 Ohms. As perdas rotacionais totalizam em 500 W. Qual será a tensão induzida na armadura, a potência mecânica e o rendimento da máquina quando sua corrente de armadura é de 100 A?

Resolução:

Aplicando diretamente a Equação 2.8 teremos:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_f) \rightarrow E_a = V_t - I_a(R_a + R_f) = 300 - 100 \times 0,5 = 250 \text{ V}.$$

Podemos então calcular a potência mecânica fazendo:

$$P_m = E_a I_a = 250 \times 100 = 25 \text{ kW}.$$

Por fim, calculamos o rendimento da máquina:

$$\eta\% = \frac{E_a I_a - P_{rot}}{V_t I_t} \times 100\% = \frac{25000 - 500}{300 \times 100} \times 100\% = \frac{24500}{30000} \times 100\% \simeq 81,7\%$$

Uma vez que a resistência de campo está em série com a resistência do circuito de armadura, o fluxo magnético para esse tipo de motor é dado pela Equação 2.24, onde c é uma constante de proporcionalidade e I_a é a corrente de armadura.

$$\Phi = c \times I_a \quad (2.24)$$

Se substituirmos a Equação 2.24 na Equação 2.17, teremos como resultado a Equação 2.25 que relaciona o torque à corrente de armadura.

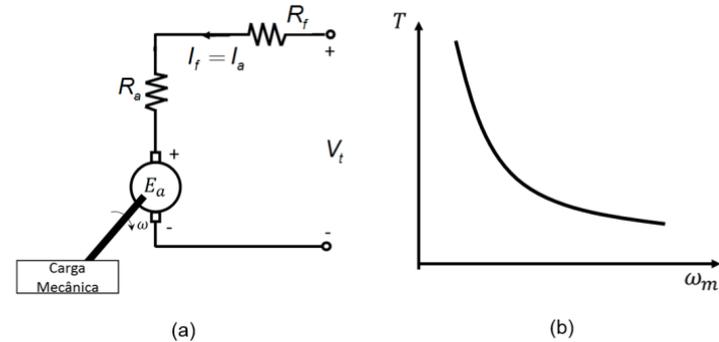
$$T_m = k_a c (I_a)^2 \quad (2.25)$$

A Equação 2.25 explicita a dependência do torque desse tipo de máquina com o quadrado da corrente de armadura. A característica nos terminais de um motor CC série é dada pela relação entre a velocidade de rotação do eixo e o torque induzido da máquina. Para chegarmos em uma forma interessante dessa relação, basta que façamos uma série de substituições simples entre as equações já apresentadas e algumas manipulações algébricas até chegarmos na Equação 2.26 (CHAPMAN, 2013):

$$\omega_m = \frac{V_t}{k_a c T_m} - \frac{R_a + R_f}{k_a c} \quad (2.26)$$

Na Figura 2.24 (b) é dada ainda a característica de velocidade e torque da máquina de onde se verifica que, para cargas elevadas, a velocidade é muito baixa e, para cargas mais leves, a velocidade é elevada. Uma resistência pode ser colocada em série com o enrolamento de campo e de armadura de forma a controlar a velocidade do motor.

Figura 2.24 | Motor CC de campo série (a) circuito equivalente (b) Característica de $T \times \omega$

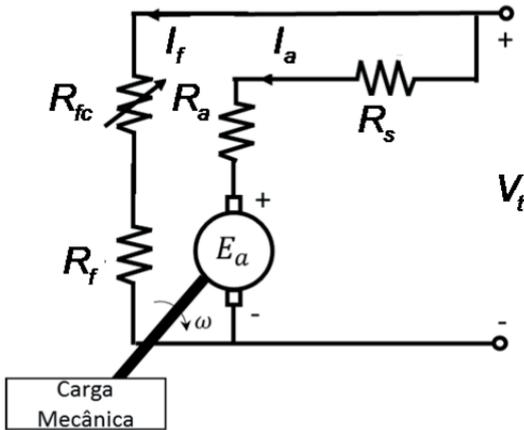


Fonte: elaborada pelo autor.

O motor série é utilizado quando se deseja um grande torque de partida, ou seja, quando é necessário movimentar cargas mais pesadas. A regulação de velocidade é pobre e diminui à medida em que a carga aumenta. Desse modo, é recomendado que o motor parta com carga, pois, caso contrário, ele pode girar com tanta velocidade que pode ser danificado. Um exemplo típico de motor série é o motor de arranque usado em automóveis. Esse tipo de motor é excelente em aplicações que demandam o transporte de cargas pesadas, tais como trens e veículos de tração.

Outra configuração de interesse é o **motor CC composto**, que pode ter ao mesmo tempo características do tipo série e do tipo *shunt*, dependendo de como controlamos a corrente nos campos e como estes são dispostos, sendo possível utilizar esta configuração para eliminar o risco de baixas rotações com elevadas correntes de carga, presente no motor de campo série, por exemplo. O campo é composto por dois enrolamentos: um principal e um auxiliar, que podem ser o enrolamento *shunt* ou a série, que normalmente são ligados de forma que os fluxos se adicionem.

Figura 2.25 | Motor composto aditivo



Fonte: elaborada pelo autor.

Esta configuração permite um comportamento mais estável da máquina na ocorrência de operações com grandes oscilações de carga. No entanto, a corrente de armadura aumenta com a elevação da carga, podendo fazer o motor disparar e, neste caso, a corrente de campo também será aumentada.

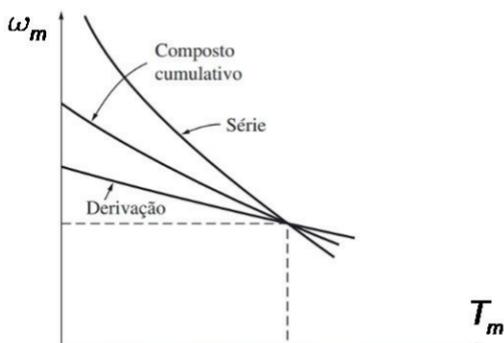
A força magnetomotriz resultante (\mathfrak{S}_{total}) e a corrente de campo efetiva (I_f^{ef}) do ramo em derivação são, respectivamente, dadas pelas Equações 2.27 e 2.28 (CHAPMAN, 2013), onde \mathfrak{S}_f é a força magnetomotriz do circuito de campo, \mathfrak{S}_{SE} é a força magnetomotriz do circuito série, \mathfrak{S}_{RA} é a força magnetomotriz produzida pela reação da armadura, N_{SE} é o número de espiras por polo no circuito série e N_f é número de espiras por polo no circuito de campo.

$$\mathfrak{S}_{total} = \mathfrak{S}_f \pm \mathfrak{S}_{SE} - \mathfrak{S}_{RA} \quad (2.27)$$

$$I_f^{ef} = I_f \pm \frac{N_{SE}}{N_f} I_a - \frac{\mathfrak{S}_{RA}}{N_f} \quad (2.28)$$

A característica de um motor CC composto, velocidade do eixo versus o torque induzido na máquina, pode ser representada pela curva mostrada na Figura 2.26.

Figura 2.26 | Curvas de conjugado por velocidade do motor CC composto



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 502).



Pesquise mais

O controle de velocidade dos motores de corrente contínua pode ser feito essencialmente de 3 formas diferentes:

- Através da tensão de alimentação da armadura.
- Através do controle do campo de excitação da máquina.
- Através do controle da resistência externa conectada ao circuito da armadura.

Para saber mais sobre o controle de velocidade em cada um dos tipos de motores estudados nesta seção, sugerimos a seguinte leitura:

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014. p. 554-567

Também disponível na nossa biblioteca virtual, pelo link a seguir.

Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580553741/cfi/569!/4/4@0.00:0.00>>. Acesso em: 6 jul. 2018.

Sem medo de errar

Com os conhecimentos adquiridos nesta seção, completamos os estudos acerca da máquina CC e, agora, podemos retomar

à situação em que você é o estagiário do departamento de manutenção elétrica de uma empresa petroquímica e deve analisar a corrente de partida de um motor de 200 V com uma resistência de armadura de 0,2 Ohms e uma resistência de campo de 100 Ohms. Você deve verificar se a corrente é ou não adequada para as condições da máquina (que suporta uma corrente de armadura máxima de 500 A). Para este tipo de máquina, esta corrente pode ser muito alta e danificar o motor, então, a equipe solicitou que você dimensione um dispositivo de proteção para reduzir a corrente na partida e levar a máquina até a velocidade nominal.

Primeiramente, vamos verificar a corrente de partida da máquina, considerando conexão em derivação, teremos:

$$I_t = I_f + I_a = \frac{V_t}{R_f} + \frac{V_t}{R_a} = \frac{200}{100} + \frac{200}{0,2} = 2 + 1000 = 1002 \text{ A}$$

Verifica-se que a corrente não é adequada, pois somente a corrente de armadura será igual à 1000 A, portanto, podemos pensar em associar uma resistência externa. Para uma corrente máxima de 500 A fazemos:

$$I_a^{partida} = \frac{V_t}{R_a + R_{ext}} = \frac{200}{0,2 + R_{ext}} < 500 \text{ A},$$

$$200 < 500 (0,2 + R_{ext}) \rightarrow 1 < 0,5 + 2,5R_{ext} \rightarrow R_{ext} > 0,2 \Omega.$$

No entanto, o valor obtido para a resistência externa é o valor mínimo a ser utilizado. Além disso, utilizar uma resistência desse valor colocará a corrente de armadura na partida muito próxima do valor máximo. Também, um valor fixo de resistência irá aumentar a queda de tensão e limitar a velocidade da máquina. Dessa forma, para uma partida mais adequada, deve-se prever um dispositivo de proteção de partida (DPP). Para projetar esses dispositivos, podemos assumir que a corrente de partida varie dentro de uma faixa de corrente adequada: $100 \text{ A} \leq I_a \leq 200 \text{ A}$.

Assim, no momento da partida, a resistência máxima pode ser calculada conforme segue:

$$I_a^{partida} = \frac{V_t}{R_a + R_{T1}} = \frac{200}{0,2 + R_{T1}} = 200 \text{ A}$$

$$200 = 200(0,2 + R_{T1}) \rightarrow 1 = 0,2 + R_{ext} \rightarrow R_{T1} = 1 - 0,2 = 0,8 \Omega.$$

Isso significa que, com 0,8 Ohms de resistência, a corrente de partida será de 200 A e, posteriormente, enquanto o motor ganha velocidade, a tensão induzida aumenta e a corrente de armadura cai para um valor de 100 A. Assim teremos:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_{T1}) \rightarrow E_a = V_t - I_a(R_a + R_{T1}) = 200 - 100(0,2 + 0,8) = 100 \text{ V}.$$

Logo, a resistência total diminui conforme a seguir:

$$\begin{aligned} I_a^{partida} &= \frac{V_t - E_a}{R_a + R_{T2}} = \frac{200 - 100}{0,2 + R_{T2}} = 200 \text{ A} \\ \rightarrow 100 &= 200(0,2 + R_{T2}) \rightarrow \\ R_{T2} &= 0,3 \Omega. \end{aligned}$$

E a tensão induzida quando a corrente reduz será:

$$E_a = V_t - I_a(R_a + R_{T2}) = 200 - 100(0,2 + 0,3) = 150 \text{ V}.$$

Repetindo o processo para obter a nova resistência:

$$\begin{aligned} I_a^{partida} &= \frac{V_t - E_a}{R_a + R_{T3}} = \frac{200 - 150}{0,2 + R_{T2}} = 200 \text{ A} \\ \rightarrow 50 &= 200(0,2 + R_{T2}) \rightarrow R_{T2} = 0,05 \Omega. \end{aligned}$$

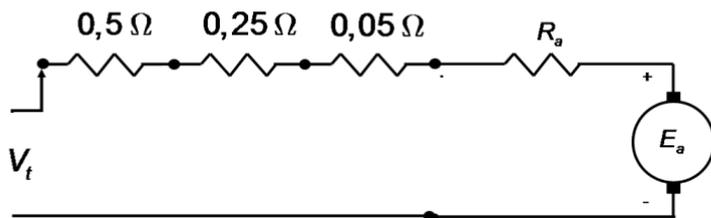
E a tensão induzida:

$$E_a = V_t - I_a(R_a + R_{T2}) = 200 - 100(0,2 + 0,05) = 175 \text{ V}.$$

$$I_a^{partida} = \frac{V_t - E_a}{R_a + R_{T4}} = \frac{200 - 175}{0,2 + R_{T4}} = 200 \text{ A} \quad R_{T4} = -0,075 \Omega$$

Por ser um valor negativo, isso significa que o valor de 0,05 Ohms é o último valor de resistência antes de a alimentação da máquina ser conectada totalmente ao enrolamento de armadura. Sendo assim, pode-se construir um DPP conforme a Figura 2.27. Note que no momento inicial, a resistência total associada é de 0,8 Ohms. Se o cursor se move da esquerda para direita, teremos, em outros dois momentos, as resistências de 0,3 e 0,5 Ohms.

Figura 2.27 | Resistências do dispositivo de proteção de partida para a máquina



Fonte: elaborada pelo autor.

Avançando na prática

Equação geral de torque para a máquina CC

Descrição da situação-problema

Imagine que em uma indústria que trabalha apenas com motores de indução surgiu a necessidade de utilizar um motor CC para realizar um controle diferente de velocidade e conjugado. Este motor estava guardado no almoxarifado da empresa com um manual em que os parâmetros de resistências e constantes estão disponíveis. Os enrolamentos do motor também estão disponíveis de forma que ele pode ser conectado em derivação, em série ou utilizar um campo composto. Para que a aplicação com o motor seja adequada, a equipe que deseja fazer a implementação deste motor solicitou a você um estudo de forma a determinar uma equação geral para a relação de torque por velocidade que pudesse ser utilizado para as diversas formas de conexão da máquina. Como você realizaria esta atividade apenas com os conhecimentos teóricos que foram adquiridos nesta seção?

Resolução da situação-problema

A equação geral para um motor CC pode ser obtida considerando o motor de campo *shunt* e relacionando as potências na máquina. Entretanto, a equação pode ser estendida para outras conexões. Esta equação é obtida multiplicando-se os dois lados da Equação 2.15 pela corrente de armadura I_a , obtendo-se a Equação 2.29. Logo, $V_t I_a$ é a potência aplicada ao motor, $E_a I_a$ é a potência

eletromagnética e, finalmente, $(R_a + R_{ext})I_a^2$ consiste nas perdas nas resistências da armadura e nas resistências conectadas em série com a resistência de armadura. Esta resistência está expressa por R_{ext} , podendo ser uma possível resistência externa ou mesmo o enrolamento série da configuração composta ou série.

$$V_t I_a = E_a I_a + (R_a + R_{ext}) I_a^2 \quad (2.29)$$

O torque na máquina CC foi descrito pela Equação 2.17. Desmembrando o primeiro termo do lado direito da Equação 2.29 (potência eletromagnética), teremos a igualdade descrita na Equação 2.30, onde $T_m \omega_m$ é a potência mecânica da máquina.

$$E_a I_a = k_a \Phi \omega_m I_a = k_a \Phi I_a \omega_m = T_m \omega_m \quad (2.30)$$

Da equação, conclui-se que a potência eletromagnética é igual à potência mecânica da máquina. Na realidade, a potência de fato entregue à carga conectada ao eixo do rotor da máquina será menor devido às perdas rotacionais.

Se considerarmos que $R_{ext} = 0$, e dividirmos essa equação pela equação do torque dada em 2.17, temos:

$$\frac{V_t I_a}{k_a \Phi I_a} = \frac{E_a I_a}{k_a \Phi I_a} + \frac{R_a I_a^2}{k_a \Phi I_a} \rightarrow \frac{V_t I_a}{k_a \Phi I_a} = \frac{k_a \Phi \omega_m I_a}{k_a \Phi I_a} + \frac{R_a I_a}{k_a \Phi}$$

Chegaremos então na equação que será utilizada para analisar o controle de velocidade da máquina CC, conforme Equação 2.31.

$$\omega_m = \frac{V_t}{k_a \Phi} - \frac{R_a}{(k_a \Phi)^2} T_m \quad (2.31)$$

Faça valer a pena

1. O motor CC é composto basicamente por dois enrolamentos: um deles é o enrolamento de campo, que está localizado no estator e é alimentado em CC e outro, o enrolamento de armadura, está localizado no rotor da máquina. Os tipos de motores são definidos pela forma com que estes enrolamentos são conectados.

Assinale a alternativa que lista corretamente os tipos de motores CC classificados de acordo com a conexão dos enrolamentos.

- a) Motor *shunt*, motor de passo, motor composto.
- b) Motor *shunt*, motor de passo, motor série.
- c) Motor *shunt*, motor série, motor composto.
- d) Motor de passo, motor auto-excitado, motor composto.
- e) Motor *shunt*, motor linear, motor composto.

2. No motor CC a potência elétrica é fornecida ao enrolamento de campo de forma a criar um fluxo magnético no qual a armadura do rotor está imersa e a potência é transmitida sendo convertida em energia mecânica de rotação em seu eixo. Dentre as perdas na máquina CC encontramos:

- I. Perda no enrolamento de campo.
- II. Perdas no enrolamento da armadura.
- III. Perdas rotacionais.

Com relação aos tipos de perdas na máquina CC, estão corretos os itens:

- a) I e II.
- b) I e III.
- c) I apenas.
- d) II apenas.
- e) I, II e III.

3. Considere um motor CC *shunt* cuja tensão de alimentação é 380 V, a resistência de armadura é de 0,06 Ohms e a armadura desta máquina suporta uma corrente de plena carga menor do que 200 A. Com relação a este motor:

I. É necessário associar uma resistência externa ao circuito de armadura cujo valor mínimo é de 1,5 Ohms.

PORQUE

II. A corrente de armadura na partida, sem considerar resistências externas associadas, é maior que 200 A.

Com relação às assertivas, assinale a alternativa correta.

- a) As assertivas I e II estão corretas, e a II é uma justificativa da I.
- b) As assertivas I e II estão corretas, mas a II não é uma justificativa da I.
- c) Apenas a assertiva I está correta.
- d) Apenas a assertiva II está correta.
- e) Nenhuma assertiva está correta.

Referências

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013

SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics**. 2. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 1996.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**, 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.

Máquinas de indução

Convite ao estudo

Os motores elétricos transformam energia elétrica em energia rotacional, assim como já vimos nas unidades anteriores. A energia mecânica tem a propriedade de movimentar os mais diversos tipos de máquinas. Nesta unidade iremos tratar das máquinas de indução, um tipo de máquina elétrica rotativa muito utilizada como motor, exemplos dessa aplicação são encontrados em grande variedade no nosso dia a dia. É importante lembrar que a máquina de indução pode operar como motor e gerador, embora o motor elétrico seja a sua aplicação principal. Apesar de motores monofásicos serem mais presentes no nosso dia a dia (como em aparelhos eletrodomésticos, tais como liquidificadores e processadores de alimento), nosso foco serão as máquinas trifásicas. Concentraremos nosso estudo nesse tipo de máquina, pois esse motor é largamente utilizado em aplicações industriais visto que possui uma faixa ampla de potências na faixa de dezenas ou centenas de cavalos de potência. São utilizados em bombas, ventiladores, compressores, usinas de fabricação de papel/têxtil e em muitas outras aplicações. A importância dos motores de indução trifásicos é indiscutível.

Vamos novamente contextualizar o estudo e continuar imaginando a situação em que você é um estagiário de uma grande empresa do setor petroquímico que está reestruturando suas operações no território nacional. O objetivo desta reestruturação é adequar as máquinas e os equipamentos para cada tipo de aplicação específica, assim como capacitar os profissionais do setor. Neste contexto, a empresa desenvolveu um programa de estágio no setor de máquinas e manutenção.

Você está participando deste programa de estágios passando por diversas áreas da empresa de forma a ser capacitado para trabalhar com todos os tipos de máquinas elétricas existentes nesta planta industrial. Desta vez, seu supervisor solicita que você trabalhe com os motores de indução, pois estes são os principais tipos de motores encontrados na planta em que trabalha.

Com os princípios de funcionamento de máquinas elétricas que você já estudou, você saberia descrever como funciona este tipo de máquina? E com relação às partes construtivas, você saberia identificá-la?

Na parte introdutória do estudo das máquinas de indução, ou seja, na primeira seção, analisaremos os aspectos construtivos e estudaremos as relações dos campos magnéticos girantes com a rotação da máquina. Será definido o conceito de escorregamento e também estudaremos alguns aspectos operativos ligados à tensão e torque induzidos.

Na segunda seção analisaremos as características de regime permanente da máquina e do circuito equivalente. Também estudaremos o conjugado desenvolvido por este tipo de máquina.

Finalmente, na Seção 3.3 estudaremos o fluxo de potência e as características de eficiência deste tipo de máquina.

Para que você tenha êxito nos estudos desta unidade, sugerimos uma dedicação ao conteúdo deste material, assim como a realização de todas as atividades propostas. Bons estudos!

Seção 3.1

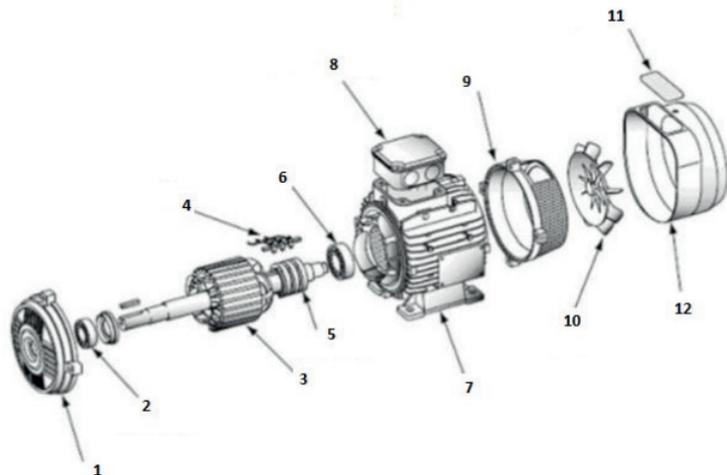
Princípio de funcionamento das máquinas de indução

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção iniciaremos os estudos sobre a máquina de indução trifásica. Iremos conhecer os aspectos construtivos da máquina com uma maior profundidade, e também iremos estudar os aspectos operativos relacionados à velocidade síncrona e o escorregamento. Entenderemos como ocorre a produção das tensões e correntes induzidas na máquina e como elas ajudam na produção do conjugado da máquina. Para isso, trabalharemos utilizando uma situação prática na qual precisa-se saber identificar corretamente as partes do motor.

Vamos lembrar então da situação em que você é um estagiário de uma grande empresa do setor petroquímico. Agora, você trabalhará com manutenção das máquinas de indução da planta. Na primeira etapa do trabalho você recebeu uma figura da visão explodida do motor de indução com o qual a equipe está trabalhando, conforme mostra a Figura 3.1. Esta foto contém as principais partes do motor de indução e é necessário que você nomeie corretamente as partes deste motor, de forma a orientar a equipe para desmontar e montar corretamente a máquina. Note que reconhecer o rotor e o estator é relativamente trivial, mas a sua tarefa é bem mais complexa neste caso, pois você deve nomear cada parte do motor e também descrever as principais funções destes componentes. Você está preparado para esta tarefa?

Figura 3.1 | Motor de indução – vista explodida



Fonte: Franchi (2008, p. 48).

No decorrer desta seção abordaremos os aspectos construtivos da máquina de indução de forma que você esteja preparado para realizar a tarefa com êxito. Por isso, incentivamos você a se dedicar ao estudo desta seção, pois os conhecimentos adquiridos aqui certamente serão um diferencial na sua formação profissional. Bons estudos!

Não pode faltar

A máquina de indução é um tipo de máquina elétrica CA de característica de construção robusta. Essa máquina foi criada por Nikola Tesla, no século XIX, e o seu desenvolvimento e popularidade foram rápidos. Atribui-se essa popularidade ao fato de ser uma máquina de construção relativamente simples. Assim como as demais máquinas, ela é basicamente formada por duas partes: um rotor, sendo esse a parte rotativa da máquina, e um estator, parte estacionária. Nesta seção, estudaremos um pouco mais os aspectos construtivos da máquina de indução com o intuito de ampliar o conhecimento e ter uma melhor visão da máquina.

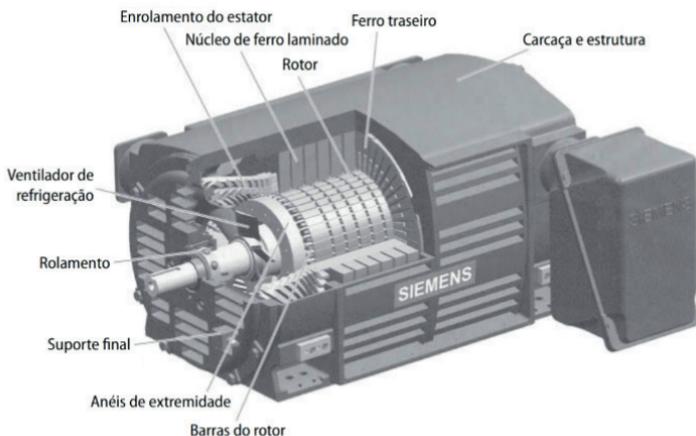
A principal aplicação da máquina de indução é no modo motor, entretanto, ela também pode operar no modo gerador. Contudo, a

eficiência desse modo não é satisfatória, pois é necessário que exista uma magnetização suficiente na máquina para que o fenômeno de indução possa ocorrer neste modo de operação. Dessa forma, normalmente, a máquina de indução opera como geradora apenas se conectada à rede elétrica ou se é excitada por meio de capacitores fornecendo a potência reativa necessária.

As máquinas de indução também recebem o nome de **máquinas CA assíncronas** visto que a velocidade do rotor será sempre em um valor próximo da velocidade síncrona, mas nunca igual a ela. Isso se deve ao fenômeno da indução magnética (por isso o nome *máquina de indução*) que ocorre na máquina. Nesse fenômeno a corrente criada no rotor gera um campo magnético que tende a se alinhar com o campo magnético indutor (campo magnético girante), fazendo o rotor girar no mesmo sentido que ele.

A Figura 3.2 mostra a estrutura construtiva da máquina de indução, onde pode-se verificar as principais partes da máquina. O estator é construído utilizando lâminas de aço magnético empilhadas de forma a reduzir ao máximo as perdas por corrente de Foucault e histerese magnética. Podemos perceber que isso é uma prática recorrente em núcleos de máquinas elétricas, sendo utilizado também nas máquinas CC e transformadores. O material do núcleo é de alta permeabilidade magnética, ou seja, facilita a criação de um campo magnético elevado com forças eletromotrizes relativamente baixas.

Figura 3.2 | Máquina de indução - estrutura



Fonte: Hand (2015, p. 147).

O enrolamento do estator da máquina é o enrolamento que será ligado à rede elétrica trifásica, sendo assim, trata-se de um enrolamento trifásico, também denominado de enrolamento de campo primário. O enrolamento trifásico do estator é composto por três bobinas dispostas a 120° mecânicos, podendo ser conectado em estrela ou triângulo, é fabricado, na maior parte das máquinas, com fios de cobre isolados entre si e alocados em ranhuras.

O rotor pode ser basicamente de dois tipos: o rotor bobinado ou gaiola de esquilo. Quando o rotor for do tipo gaiola de esquilo, a máquina de indução possui baixo custo de construção e manutenção. Já motores com rotor bobinado possuem custo mais elevado devido à construção e aos acessórios necessários para sua utilização.

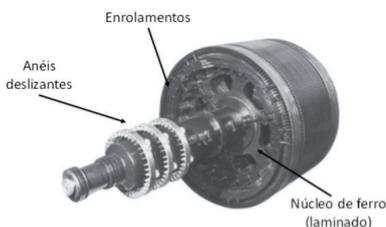


Refleta

Será que existe alguma situação em que a máquina de indução com rotor bobinado é a mais indicada, mesmo que apresentando os custos mais significativos, como já foi mencionado?

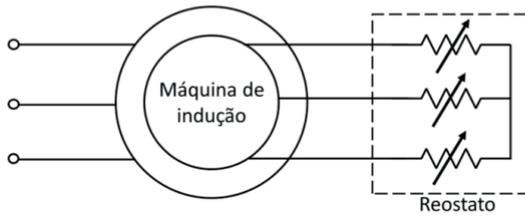
A estrutura de um rotor bobinado pode ser observada na Figura 3.3. O núcleo do rotor é constituído por material ferromagnético laminado com as bobinas trifásicas alojadas sobre essa estrutura. A conexão dos terminais do enrolamento do rotor é feita por meio de três anéis de deslizamento no eixo do rotor que, para causar o efeito de indução, deve ser fechado em si (ou seja, curto-circuitado). Contudo, este curto-circuito dos enrolamentos não é feito diretamente no rotor bobinado. É comum o uso de reostatos de partida conectados aos anéis, da forma como mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.3 | Rotor bobinado



Fonte: Chapman (2013, p. 310).

Figura 3.4 | Circuito para energização do rotor bobinado



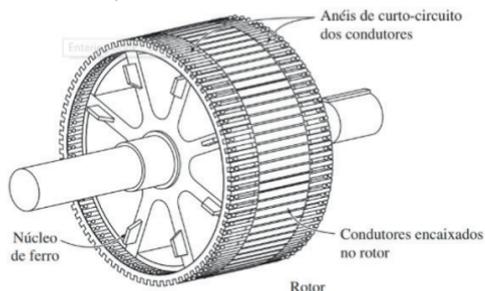
Fonte: elaborada pelo autor.

Esse reostato é composto por resistências ligadas em estrela que podem ser variadas de um valor máximo até um valor mínimo de forma a limitar a corrente de partida. De forma análoga ao que é feito nas máquinas CC, no momento da partida, a resistência é máxima e, posteriormente, aumentando a velocidade do motor, o valor da resistência do reostato é reduzido até zero, para que o motor funcione em velocidade nominal.

O mesmo reostato pode ser utilizado posteriormente para fazer o controle da velocidade da máquina. Contudo, o dimensionamento do reostato tem um importante papel não somente para a partida da máquina, como também na operação, sendo assim, a resistência do reostato deve ser adequada à corrente e ao torque que se deseja obter na partida e na operação da máquina. Neste tipo de acionamento, dispositivos de proteção adequados, como fusíveis e relés de proteção, são extremamente necessários, mas requerem um maior investimento, assim como uma maior necessidade de manutenção da máquina, aumentando também os custos.

Para motores de menor porte, normalmente o rotor é do tipo chamado rotor gaiola de esquilo, que também é composto por um núcleo de material ferromagnético, mas possui ranhuras na superfície, nas quais estão alojadas as barras condutoras de cobre ou alumínio, que são eletricamente conectadas nas extremidades por anéis. A diferença é que neste tipo de rotor o acesso aos terminais não é permitido, e os parâmetros elétricos são determinados em sua construção. Uma vez que o processo de fabricação desse rotor pode ser automatizado, é possível reduzir os custos de fabricação da máquina. Ainda, este tipo de rotor não requer o isolamento dos condutores ao núcleo de ferro, sendo por muitas vezes fabricados diretamente fundidos na estrutura do núcleo.

Figura 3.5 | Rotor gaiola de esquilo



Fonte: Chapman (2013, p. 308).

O rotor da máquina de indução é normalmente montado dentro do estator de forma concêntrica, utilizando-se um sistema de mancais para sustentação da estrutura mecânica da máquina. Entre o rotor e o estator existe um espaço de ar que é chamado de **entreferro**, onde ocorre a conversão eletromecânica de energia.

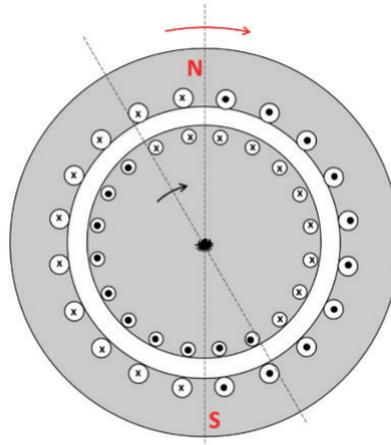
Quando o enrolamento do estator é alimentado por uma fonte trifásica CA, surge nos enrolamentos um campo magnético girante que atravessa o entreferro e o rotor, induzindo tensão no rotor (do tipo bobinado) ou nas correntes (gaiola de esquilo), fazendo com que a energização do rotor ocorra apenas por indução. Se o enrolamento do rotor bobinado for colocado em curto-circuito, perfazendo um circuito fechado, circularão correntes induzidas que produzirão um campo magnético no rotor em oposição ao campo do estator, resultando na produção de torque e no giro do rotor em uma dada velocidade.

O resultado do surgimento das correntes no rotor pode ser observado na Figura 3.6. Percebe-se que na região onde as correntes do estator estão entrando (cruzes), as correntes no rotor estão saindo (pontos), havendo um desalinhamento devido à diferença dos parâmetros do estator e do rotor. Esse desalinhamento está caracterizado pela diferença entre os eixos do campo magnético do rotor e do campo magnético do estator.

Sendo assim, existe sempre um ângulo de defasagem entre os eixos, mas a tendência é que o campo magnético no rotor busque o alinhamento com o campo magnético girante do estator. Esse ângulo de defasagem entre os eixos magnéticos do rotor e do estator é o responsável pela produção de um conjugado rotacional. Para que este ângulo exista, o movimento do rotor deve se dar no mesmo sentido e com velocidade mais baixa que o campo magnético

girante, de forma que as correntes induzidas sejam formadas por meio do movimento relativo entre os campos magnéticos. Como resultado, a velocidade real do eixo do motor será muito próxima da velocidade síncrona, mas nunca se igualará a ela.

Figura 3.6 | Desalinhamento dos campos magnéticos do estator e do rotor



Fonte: elaborada pelo autor.

Antes de seguirmos com a discussão sobre a velocidade real do motor de indução, vamos relembrar o conceito de velocidade síncrona.



A velocidade do campo magnético girante será de acordo com os aspectos construtivos dos enrolamentos da máquina. A velocidade síncrona de rotação é definida como a velocidade de rotação do campo magnético girante. Pode ser dada em rad/s ou em rotações por minuto (rpm) e depende da frequência de excitação e do número de polos da máquina.

$$\omega_s = \frac{2}{P} 2\pi f_e \quad [\text{rad/s}] \quad (3.1)$$

$$n_s = 120 \frac{f_e}{P} \quad [\text{rpm}] \quad (3.2)$$

A velocidade de rotação real do motor de indução é sempre um valor abaixo da velocidade síncrona, no entanto, a velocidade real tem uma relação com a velocidade síncrona devido à tendência de alinhamento dos campos. Dessa forma, ao se variar os parâmetros que definem a velocidade síncrona, como o número de polos ou a frequência elétrica da rede, o valor da velocidade de rotação mecânica também será alterado. Alguns motores de indução são construídos permitindo a variação do número de polos de modo que podem ser conseguidas mais de uma velocidade de rotação. Contudo, a forma mais comum de controle de velocidade do motor síncrono é por meio dos chamados inversores de frequência, que utilizam dispositivos de estado sólido para variar a frequência da rede elétrica.

Devido às características construtivas, se o circuito de enrolamento do estator for alimentado com uma fonte trifásica CA e o enrolamento do rotor for mantido em aberto, surgirá um campo magnético girante no entreferro, que terá a frequência síncrona de rotação e induzirá tensão no enrolamento do rotor que está em aberto na mesma frequência. As Equações 3.3 e 3.4 apresentam a tensão induzida para o enrolamento do estator e do rotor, respectivamente, em que k_{w1} e k_{w2} são os coeficientes dos enrolamentos definidos pelos aspectos construtivos e são, normalmente, muito próximos em valor.

$$E_1 = 4,44f_s N_1 \Phi k_{w1} \quad (3.3)$$

$$E_2 = 4,44f_s N_2 \Phi k_{w2} \quad (3.4)$$

Considerando a característica das tensões, pode-se escrever uma relação transformação dada pelas as tensões do estator e do rotor com base no número de espiras em cada enrolamento (SEN, 1996). Assim, a estrutura estática da máquina de indução de rotor bobinado se assemelha a de um transformador trifásico.

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{N_1}{N_2} \quad (3.5)$$

Ainda considerando o rotor bobinado, se o enrolamento do estator for conectado a uma fonte de alimentação alternada e trifásica e os terminais de conexão para os enrolamentos do rotor for curto-circuitados, a tensão induzida nos enrolamentos do rotor fará induzir correntes que irão interagir com o campo magnético no entreferro, produzindo um torque. De acordo com a Lei de Lenz, o sentido do giro seguirá o mesmo sentido do campo, de forma que a velocidade

relativa entre o campo magnético girante e do enrolamento do rotor diminua. A diferença entre a velocidade do campo girante produzido pelo estator e a do giro mecânico do rotor é denominada **escorregamento**, dada pela Equação 3.6.

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (3.6)$$

O valor do escorregamento pode ser expresso em números decimais ou em porcentagem. Na partida, a velocidade de rotação é nula e, dessa forma, o escorregamento é igual à 1 (ou 100%). A frequência relativa da tensão e corrente induzidas no rotor é determinada pela diferença das velocidades, conforme Equação 3.7

$$f_2 = \frac{P}{120}(n_s - n) = \frac{P}{120}sn_s = sf_s \quad (3.7)$$

As correntes induzidas no rotor também produzem um campo magnético girante, que gira na velocidade dada pela Equação 3.8.

$$n_2 = 120 \frac{f_2}{P} = 120 \frac{sf_s}{P} = s \left(120 \frac{f_s}{P} \right) = sn_s \quad (3.8)$$



Exemplificando

Uma máquina de indução de 6 polos opera na frequência de 60Hz com escorregamento de 5%. Determine a velocidade síncrona e a velocidade de rotação da máquina em rpm.

Resolução:

A velocidade síncrona de rotação pode ser calculada diretamente:

$$n_s = 120 \frac{60}{6} = 1200 \text{ rpm}.$$

Posteriormente, obtém-se a velocidade do rotor utilizando a equação para calcular o escorregamento da máquina.

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \rightarrow n_m = (1 - s)n_s \rightarrow n_m = (1 - 0,05)1200 = 1140 \text{ rpm}$$

Como os campos tendem a se alinhar, o campo magnético do estator pode ser visualizado como arrastando o campo magnético do rotor. Entretanto, se é exercido um torque no eixo do rotor, uma

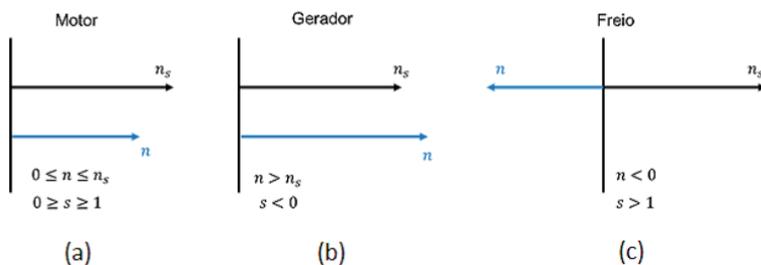
força eletromotriz pode ser induzida. Dessa maneira, com a máquina em movimento, podem ser obtidos três modos de operação: motor, gerador e freio, dependendo dos alinhamentos da velocidade da máquina e do campo magnético girante (SEN, 1996).



Assimile

A Figura 3.7 mostra o comportamento das velocidades em cada um dos modos de operação, considerando também o valor do escorregamento. Na Figura 3.7 (a) o rotor gira na direção do campo magnético girante do estator e a velocidade do rotor é menor do que a do campo girante, então opera como motor. Na operação da máquina no modo gerador (Figura 3.7 (b)), o rotor gira na direção do campo magnético girante mas, nesse caso, a velocidade do rotor é maior que a do campo magnético girante. No modo freio (Figura 3.7 (c)), o rotor gira na direção oposta à do campo magnético do estator, produzindo um torque frenante.

Figura 3.7 | Modos de operação da máquina de indução

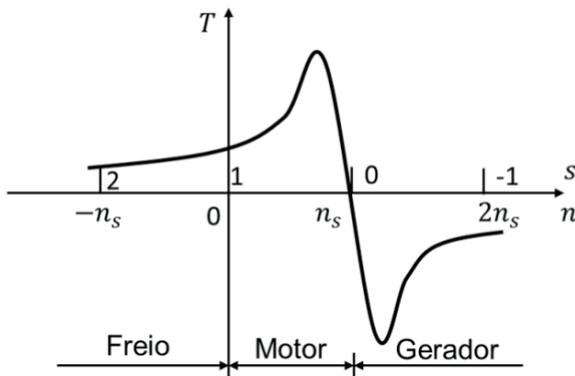


Fonte: elaborada pelo autor.

Os três modos de operação podem também serem refletidos na característica de conjugado em função da velocidade de rotação do eixo e do escorregamento, conforme Figura 3.8. No modo frenante, tem-se velocidade negativa e o escorregamento é superior a 1. No modo de operação como motor, tem-se torque positivo com velocidade sempre inferior à velocidade síncrona. No ponto em que a velocidade é a síncrona, verifica-se que o gráfico corta o eixo, ou seja, a produção de torque é nula. Isso ocorre porque uma vez que a velocidade de rotação for igual à velocidade síncrona, não existirá um movimento relativo responsável pela produção de torque. Finalmente, na operação como gerador tem-

se a velocidade de rotação maior que a velocidade síncrona e o escorregamento negativo. Verifica-se, ainda, que o torque se torna negativo (torque para a produção de tensão induzida).

Figura 3.8 | Gráfico de torque em função da velocidade do rotor e escorregamento



Fonte: elaborada pelo autor.



Pesquise mais

A grande maioria dos motores de indução que são comercializados trazem em seus dados de placa as conexões necessárias a serem efetuadas nos bornes de ligação com a finalidade de ligar os enrolamentos do estator da máquina em estrela ou triângulo. Contudo, em uma situação em que essas informações não estão disponíveis, é importante saber identificar os enrolamentos da máquina. Para saber como fazer este reconhecimento, sugerimos a leitura da Seção 10.6 da referência a seguir:

NASCIMENTO Jr., G. C. **Máquinas elétricas**: teoria e ensaios. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011. p. 192 - 193.

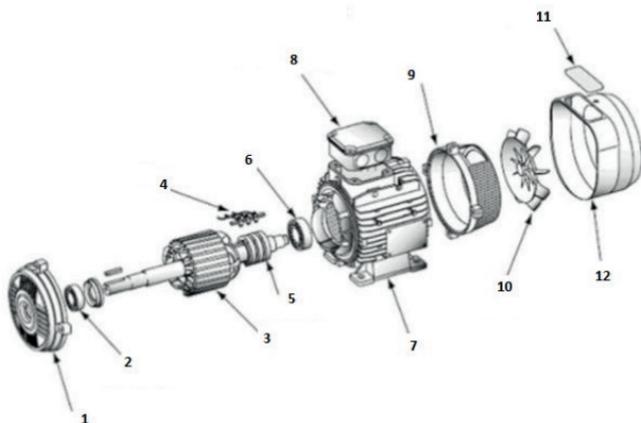
Sem medo de errar

Com os conhecimentos adquiridos nesta seção, será possível você descrever o motor de indução em seus aspectos construtivos e de operação. Vimos que esse motor tem um aspecto construtivo

relativamente simples, no entanto, cada uma de suas partes tem uma função específica na operação da máquina.

Vamos lembrar que você recebeu uma figura da visão explodida do motor de indução com o qual a equipe está trabalhando, conforme mostra a Figura 3.1. A imagem contém as principais partes do motor de indução e é necessário que você as nomeie corretamente, de forma a orientar a equipe a desmontar e montar corretamente a máquina.

Figura 3.1 | Motor de indução – vista explodida



Fonte: Franchi (2008, p. 48)

Numerando adequadamente cada uma das partes do motor temos:

1: Tampa frontal – para fechamento frontal do motor.

2 e 6: Rolamentos – são normalmente do tipo esfera ou roletes, sendo a maioria mais comum do tipo esfera. Alguns motores maiores possuem tipos especiais de rolamentos. Os rolamentos auxiliam na rotação do rotor.

3: Rotor do tipo bobinado – possui enrolamentos trifásicos e são normalmente utilizados em motores de grande potência nominal. São construídos sobre um núcleo de material ferromagnético laminado. Os terminais devem ser fechados em si para que a máquina trabalhe como motor, sendo que este fechamento é normalmente realizado utilizando reostatos trifásicos.

4: Escovas – utilizadas para fazer o contato entre os anéis coletores com as ligações externas cabíveis.

5: Anéis de contato – permitem acesso aos terminais do enrolamento da máquina de indução mesmo que o rotor esteja operando, ou seja, em rotação.

7: Base do motor: sustenta o motor e está conectada ao estator, que corresponde à parte estática da máquina. O estator é construído com um núcleo laminado de material ferromagnético e com bobinas trifásicas alocadas em ranhuras, sendo elas dispostas de 120 graus entre si. Estas bobinas podem ser ligadas em estrela ou triângulo.

8: Caixa de ligação – permite o acesso aos terminais tanto do estator como do rotor. Nos casos de motores do tipo gaiola de esquilo, apenas os terminais dos enrolamentos do estator podem ser acessados.

9: Tampa traseira – permite o fechamento traseiro do motor.

10: Ventilador – utilizado para refrigeração do motor, sendo acionado pelo próprio giro do rotor (em ambos os sentidos). As aletas normalmente estão na carcaça do estator da máquina e são construídas de forma a permitir um fluxo de ar otimizado para a refrigeração da máquina.

11: Porta inspeção para escovas – são utilizadas para acessar as escovas de forma a dar a devida manutenção nesta parte da máquina.

12: Tampa defletora – conectada após o ventilador, utilizada para deflexão.

Identificar as principais partes construtivas da máquina significa que você sabe reconhecer um motor de indução trifásico e detalhar a função de cada parte. Uma vez que você relacionou as partes e as funções, sua atividade foi cumprida com êxito!

Avançando na prática

O eletromagnetismo e suas aplicações nas máquinas de indução

Descrição da situação-problema

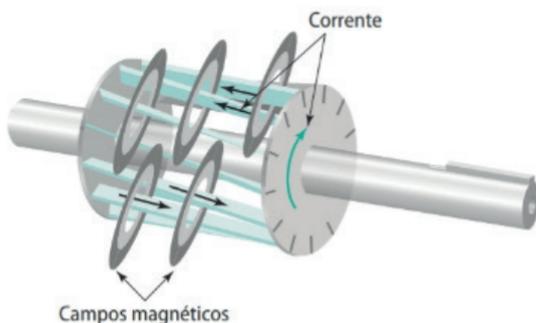
Imagine que você está trabalhando em uma empresa fabricante de motores e um dos técnicos mecânicos que trabalha com você está sem saber qual o princípio, ou conceito, do eletromagnetismo que está presente no princípio de funcionamento da máquina de indução com rotor de gaiola de esquilo. Ou seja, o que ele quer

saber é qual a principal lei do eletromagnetismo que explica o funcionamento desse tipo de máquina elétrica rotativa, que dentre os variados tipos, é mais popular.

Resolução da situação-problema

Se relembremos o que lemos durante esta seção, veremos que a máquina de indução tem o seu estator ligado à rede de alimentação. A excitação gera um campo magnético girante que atua sobre os enrolamentos do próprio estator e do rotor. Esse campo girante, por sua vez, induz no rotor uma tensão (FEM) que gera a circulação de corrente elétrica nas barras condutoras, uma vez que ali existe um caminho elétrico fechado. Este efeito pode ser visualizado na Figura 3.9. Lembrando também que o rotor é a parte móvel da máquina de indução e que possui um eixo de rotação, é observado que ele tende a girar no mesmo sentido e à mesma velocidade do campo girante do estator, de forma a anular a causa do aparecimento das correntes induzidas.

Figura 3.9 | Corrente induzida no rotor da máquina de indução



Fonte: Petruzella (2013, p. 132).

O princípio dentro da teoria eletromagnética que explica esse fenômeno é a Lei de Faraday-Lenz. Como já estudamos, o rotor não atinge a velocidade dos campos girantes. Esses campos, o do rotor e o do estator, giram à mesma velocidade, conhecida como velocidade síncrona. O rotor, devido a vários fatores, inclusive perdas mecânicas causadas pelo atrito, não atinge a velocidade síncrona. Ele gira a uma velocidade inferior a ela.

Faça valer a pena

1. O motor de indução é o tipo de motor mais utilizado nas plantas industriais. Considere que uma indústria brasileira possui um motor de indução de quatro polos, alimentado em rede trifásica com os enrolamentos conectados em estrela. O escorregamento desse motor operando em plena carga é de 5%.

Pode-se afirmar que a velocidade do motor, em rpm será de:

- a) 1610.
- b) 1710.
- c) 1800.
- d) 2000.
- e) 2230.

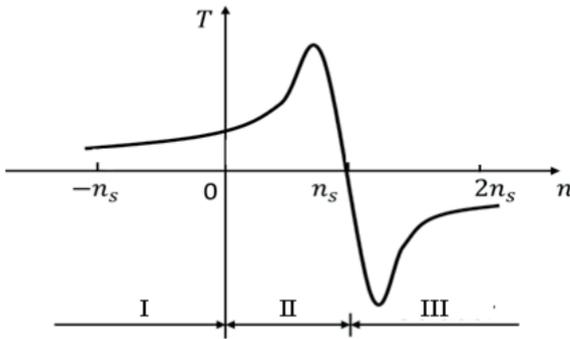
2. A máquina assíncrona é também chamada de máquina de indução, e é um tipo de máquina elétrica rotativa de corrente alternada. Criada por Nikola Tesla, no século XIX, teve o seu desenvolvimento e popularidade rapidamente alcançados. Tal popularidade é atribuída ao aspecto construtivo relativamente simples.

Com relação às máquinas de indução, assinale a alternativa correta.

- a) Máquinas de indução só podem ser utilizadas como motores elétricos.
- b) O rotor do tipo gaiola de esquilo é mais utilizado em máquinas de alta potência.
- c) A existência do campo magnético girante é condição essencial para o funcionamento da máquina.
- d) Esse tipo de máquina é alimentado por uma fonte de alimentação trifásica no rotor.
- e) Esse tipo de máquina é alimentado por uma fonte de alimentação de corrente contínua no estator.

3. As máquinas de indução possuem uma característica de torque por velocidade que é caracterizada conforme a Figura 3.10. Dependendo do ponto de operação da máquina, ela pode operar como motor, como gerador ou como freio, sendo que, para cada situação, existe um valor característico para o escorregamento.

Figura 3.10 | Curva característica de conjugado por velocidade na máquina de indução para o exercício



Fonte: elaborado pelo autor.

Assinale a alternativa que relaciona corretamente as regiões I, II, e III da curva com os modos de operação e escorregamento (s).

- a) I – modo gerador ($s < 0$), II modo motor ($0 < s < 1$), III – modo freio ($s > 1$).
- b) I – modo freio ($s > 1$), II modo gerador ($0 < s < 1$), III – modo motor ($s < 0$).
- c) I – modo freio ($s > 1$), II modo motor ($s < 0$), III – modo gerador ($0 < s < 1$).
- d) I – modo freio ($s > 1$), II modo motor ($0 < s < 1$), III – modo gerador ($s < 0$).
- e) I – modo freio ($s < 0$), II modo gerador ($s > 1$), III – modo motor ($0 < s < 1$).

Seção 3.2

Estudo de desempenho em regime permanente

Diálogo aberto

Olá, aluno!

Nesta seção daremos continuidade ao estudo das máquinas de indução. Para muitas análises do comportamento da máquina em regime permanente, é interessante que se conheça o seu circuito equivalente. Tratando-se de uma máquina de indução, devido aos aspectos construtivos apresentados anteriormente, pode-se intuir que o circuito equivalente deste tipo de máquina rotativa se assemelha muito ao circuito equivalente de um transformador. De fato, a máquina de indução é também conhecida como um transformador generalizado.

Para estimular ainda mais os estudos desta seção, vamos retomar a situação em que você é um estagiário de uma grande empresa do setor petroquímico. Você está aprendendo a trabalhar com manutenção das máquinas de indução da empresa, dessa forma, é necessário que você analise algumas características da máquina utilizando o circuito equivalente.

A equipe de manutenção está trabalhando com um motor de indução que possui as seguintes características: é um motor de seis polos, 460V, 20kW, 60Hz, e opera com velocidade de 1181 rpm. As resistências dos enrolamentos do estator e do rotor são, respectivamente, 0,3 e 0,2 Ohms por fase. As reatâncias dos enrolamentos do estator e do rotor são 1,12 e 1,91 Ohms por fase. A máquina é utilizada para movimentar um equipamento que no momento encontra-se sem carga controlável. No entanto, existe um acoplamento que exerce algum torque no eixo da máquina. Para analisar se o comportamento da máquina está adequado para outros valores de carga, é preciso determinar inicialmente qual é a potência mecânica que a máquina desenvolve, e a partir daí, elaborar um plano para que seja verificado se outros valores de carga produzem valores de escorregamentos coerentes. Portanto, você precisa elaborar um plano para determinação dos valores

de potência da máquina com base nos parâmetros elétricos e de operação. Você tem ideia de como realizar essa tarefa?

Para tanto, iremos aprofundar os estudos da máquina de indução analisando a frequência induzida no rotor e conhecendo o circuito equivalente da máquina. Com base no circuito equivalente, será possível analisar as influências do escorregamento na máquina e realizar o cálculo da corrente induzida no rotor. Estes valores serão fundamentais para se obter uma análise concisa da potência desenvolvida pela máquina.

Para que você tenha sucesso em sua atividade, é importante se dedicar ao conteúdo deste material. Ao final desta aula você irá entender a importância do escorregamento no funcionamento da máquina assíncrona, saberá como analisar o circuito equivalente da máquina de indução e estabelecer uma comparação (ou fazer uma analogia) da máquina de indução com os transformadores.

Sendo assim, realize as atividades propostas, tire suas dúvidas em sala de aula e contribua ativamente para a construção do conhecimento junto dos seus colegas. Resolva os problemas propostos ao final da seção e não deixe de pesquisar mais informações na bibliografia disponível em nossa biblioteca virtual. Seguindo estas recomendações, você certamente terá êxito nas atividades desenvolvidas aqui.

Bons estudos!

Não pode faltar

Se observamos com bastante atenção, verificaremos que a máquina de indução pode ser considerada um transformador generalizado. A justificativa para isso é o fato já estudado de que a energia presente no estator (analogamente ao primário do transformador) induz tensões e correntes no rotor (analogamente ao secundário do transformador, quando em carga), sem que haja conexão física entre as duas partes. Existe, entretanto, uma diferença entre a máquina de indução e o transformador. Essa diferença se refere à frequência do sinal no estator que é diferente da frequência do sinal induzido no rotor. Em condições-limite, se o rotor tiver o seu giro bloqueado, ou seja, se for possível manter o rotor estático, a frequência da tensão induzida será a mesma do sinal do estator.



Analogamente, no caso de o rotor girar na mesma frequência do sinal do estator, qual seria a frequência do sinal induzido no rotor?

Na literatura, são várias as formas de se relacionar a frequência do sinal induzido no rotor (f_2) e a frequência do sinal de excitação do estator (f_1). Vamos adotar uma que é mais usual, conforme a Equação 3.9, onde s corresponde ao escorregamento da máquina.

$$f_2 = sf_1 \quad (3.9)$$



Em um motor assíncrono de 380 V, a 60 Hz, com escorregamento de 8%, qual é a frequência elétrica do rotor?

Resolução:

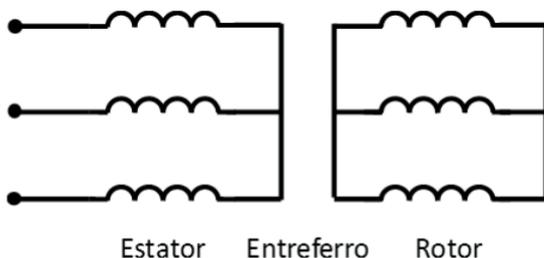
$$f_2 = sf_1 = 0,08 \times 60 = 4,8 \text{ Hz.}$$

Na seção anterior iniciamos os estudos da máquina de indução considerando os aspectos construtivos e analisando o comportamento dinâmico da máquina. Foi apresentado também o conceito de escorregamento, fundamental para a operação da máquina assíncrona. Nesta seção, modelaremos o circuito equivalente da máquina de indução e este circuito será utilizado para estudar a performance da máquina com certa precisão, ele também será modelado por fase, em estado de regime permanente, pois é suficiente para análise uma vez que a máquina pode ser considerada um circuito equilibrado.

Para compreender a analogia da máquina com um transformador iremos inicialmente considerar a estrutura de uma máquina com rotor bobinado, conforme mostrado na Figura 3.11. No entanto, esta análise também valerá para os motores do tipo gaiola de esquilo. Já dissemos que, se tanto o enrolamento do estator como do rotor forem percorridos por corrente, surgirão campos magnéticos girantes no entreferro que, adicionados, giram na velocidade síncrona, induzindo tensões no estator e no rotor. Este

comportamento é semelhante ao que acontece no transformador, de modo que é possível representar a máquina de indução por um circuito semelhante ao do transformador por fase.

Figura 3.11 | Estrutura simplificada da máquina de indução

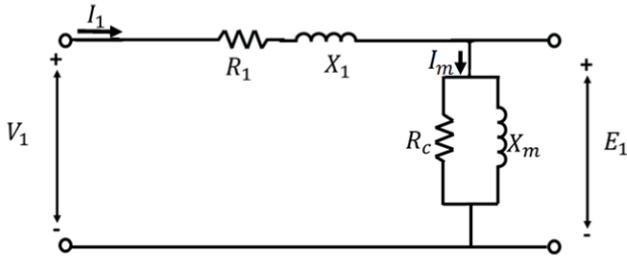


Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos iniciar representando o circuito do estator, que pode ser modelado de acordo com o diagrama exposto na Figura 3.12. Nesta figura, a tensão terminal por fase é descrita por V_1 . Para modelar o circuito do enrolamento do estator, podemos considerar uma resistência do enrolamento R_1 e a indutância de dispersão, que produz uma reatância de dispersão X_1 . Para modelar os fenômenos magnéticos que ocorrem no núcleo de ferro da máquina, tem-se X_m , que representa a reatância de magnetização e a resistência R_c , que representa as perdas pelas correntes de Foucault. Note que esse circuito é exatamente igual ao circuito do primário do transformador real.

Quais seriam então as diferenças entre os circuitos do transformador e do estator da máquina de indução? Uma delas está na magnitude dos parâmetros envolvidos, uma vez que, devido ao entreferro na máquina de indução, as correntes de magnetização são maiores. Além disso, as características construtivas do enrolamento do estator sobre o núcleo de ferro (na periferia, em vez de envolvendo, como nos transformadores) acarreta em reatâncias de dispersão maiores, também.

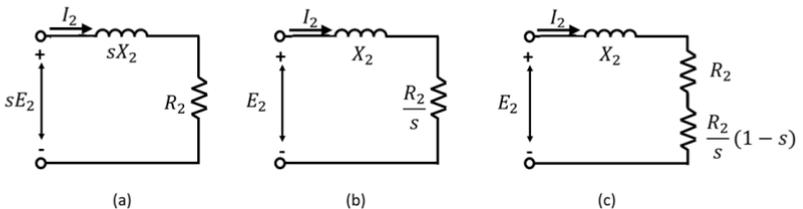
Figura 3.12 | Circuito equivalente do estator da máquina de indução



Fonte: elaborada pelo autor.

Já para o rotor da máquina, o circuito equivalente por fase também é definido por uma resistência (R_2) em série com uma reatância (sX_2), conforme a Figura 3.13 (a). Quando a máquina está parada, E_2 é a tensão induzida no enrolamento do rotor e X_2 é a reatância do rotor. No entanto, quando a máquina está em operação com um escorregamento s , a frequência da tensão induzida no rotor será dada pela Equação 3.9, logo, tanto a tensão induzida como a reatância indutiva terão seus valores afetados e poderemos escrever estes valores em termos do escorregamento como sE_2 e sX_2 . Dessa forma, podemos ter circuitos alternativos para representar o circuito do rotor, conforme mostrado nas Figuras 3.12 (b) e (c), adotando-se como tensão de entrada a tensão induzida E_2 .

Figura 3.13 | Circuito do rotor da máquina de indução (a) em termos da tensão induzida sE_2 ; (b) em termos da tensão E_2 ; (c) separando a resistência do rotor



Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos verificar como podemos chegar nestes circuitos alternativos. Podemos partir do circuito da Figura 3.13 (a) e escrever a corrente que percorre o enrolamento do rotor conforme mostra a

Equação 3.10, cujo circuito é representado na Figura 4(a).

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} \quad (3.10)$$

Dividindo o denominador e o numerador da Equação 3.10 pelo escorregamento, obtemos a Equação 3.11, que representa o circuito da Figura 3.13 (b).

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (3.11)$$

É importante ressaltar o fato de que as Equações 3.10 e 3.11 apresentam algumas diferenças conceituais. Enquanto a corrente obtida pela Equação 3.11 é uma corrente alternada cuja frequência corresponde à frequência síncrona de rotação (f_1), a corrente obtida pela Equação 3.10 tem a frequência igual à do sinal induzido no rotor, que é a de escorregamento (f_2). Outra diferença corresponde à reatância de dispersão, que, na Equação 3.10, tem o seu valor alterado devido a frequência do sinal, e assim pode ser escrita em função do escorregamento, mas a resistência se mantém fixa. Contudo, na Equação 3.11 e, conseqüentemente, no circuito da Figura 3.13 (b), a reatância é fixa com a frequência, correspondendo à frequência f_1 . Neste caso, os efeitos reais da diferença de frequência devem ser refletidos no valor da resistência do enrolamento do rotor. Em outras palavras, o circuito da Figura 3.13 (a) é o circuito visto do rotor, enquanto o da Figura 3.13 (b) é o circuito visto pelo estator.

Adicionalmente, podemos escrever a potência que representa a dissipação na resistência do enrolamento do rotor, conforme Equação 3.11.

$$P_2 = R_2 I_2^2 \quad (3.12)$$

Por outro lado, considerando a Figura 3.13 (b), a potência por fase associada ao circuito é dada por:

$$P = \frac{R_2}{s} I_2^2 = \frac{P_2}{s} \quad (3.13)$$

Assim, podemos concluir que a potência representada pela Equação 3.13 inclui não somente as perdas na resistência do enrolamento do rotor, mas também a potência mecânica. Em outras palavras, P é a potência que atravessa o entreferro, uma parte dessa

potência é perdida no enrolamento do rotor e a outra é convertida em energia mecânica. Portanto, pode-se escrever a Equação 3.13 conforme mostra a Equação 3.14, onde P_g é a potência referente ao entreferro e P_m é a potência mecânica.

$$P = P_g = I_2^2 R_2 + I_2^2 \frac{R_2}{s} (1-s) = P_2 + P_m \quad (3.14)$$



Exemplificando

Com base na Equação 3.14, mostre que é necessário que a máquina de indução opere com escorregamento mínimo para melhor aproveitamento da potência transmitida.

Resolução:

Com base na Equação 3.14 podemos escrever:

$$P_m = P - P_2 = I_2^2 \frac{R_2}{s} - I_2^2 R_2 = I_2^2 \frac{R_2}{s} (1-s) = \frac{(1-s)}{s} \quad (3.15)$$

Verifica-se então que o motor de indução deve operar com escorregamento mínimo, de forma que a grande parte da potência transmitida ao entreferro seja efetivamente convertida em potência mecânica.

Com base na Equação 3.14, chegamos ao circuito da Figura 3.13 (c), onde a resistência é separada para representar as perdas no cobre e a potência é convertida em potência mecânica. É importante destacar que antes de a potência ser efetivamente entregue à carga conectada ao eixo que o motor movimenta, parte será perdida no acoplamento na forma de perdas rotacionais. Combinando os circuitos obtidos para o estator e o rotor, podemos chegar a um circuito equivalente da máquina de indução.

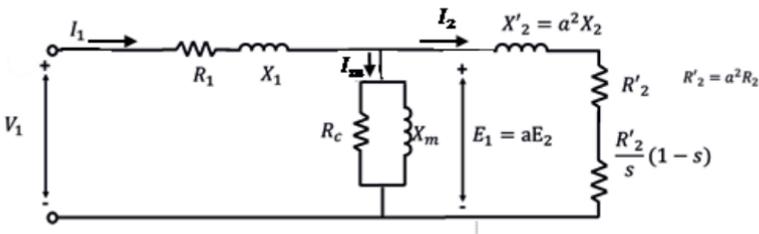


Assimile

O circuito equivalente completo da máquina de indução é representado na Figura 3.14, na qual os circuitos referentes ao rotor e ao estator também estão representados. Uma particularidade

que foi levada em conta neste circuito equivalente foi a relação de transformação dada pelo número de espiras dos enrolamentos do estator e do rotor, representado por a . As impedâncias do enrolamento do rotor podem ser refletidas para o enrolamento do estator, de forma que se obtém as resistência e a reatância R'_2 e X'_2 . Normalmente, devido às características construtivas da máquina, assume-se que esta relação de transformação é unitária, bastando então representar R_2 e X_2 . Note que esse circuito é idêntico ao circuito equivalente do transformador ideal.

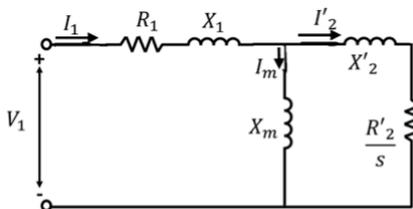
Figura 3.14 | Circuito completo da máquina de indução por fase



Fonte: elaborada pelo autor.

Apesar do circuito equivalente completo apresentado, existem algumas versões simplificadas que na prática são utilizadas. Pode-se, por exemplo, desprezar a resistência R_c no circuito completo da Figura 3.14 e considerar o circuito do rotor como apresentado na Figura 3.13 (b), resultando no circuito recomendado pelo IEEE, mostrado na Figura 3.15. Esse circuito é recomendado quando a reatância de dispersão X_1 é significativa, de forma que o deslocamento da reatância X_m possa afetar os valores de tensão e corrente nesta reatância.

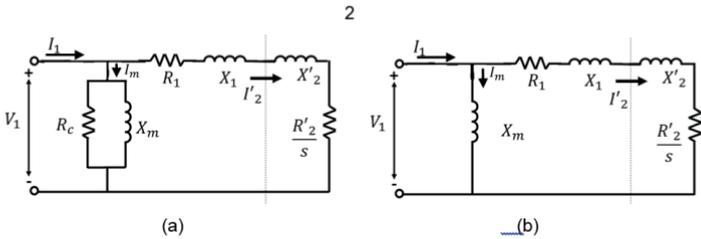
Figura 3.15 | Circuito equivalente da máquina de indução – recomendado pelo IEEE



Fonte: elaborada pelo autor.

Formas alternativas ainda são possíveis, como a mostrada na Figura 3.16 (a), na qual o circuito equivalente referente ao núcleo do estator é deslocado para a entrada do circuito quando o valor desta impedância é muito maior que a formada pela resistência e reatância do estator. Essa aproximação pode ser realizada sem que se perca a precisão da análise. Ainda, pode-se desprezar a resistência R_c , resultando no circuito alternativo da Figura 3.16 (b).

Figura 3.16 | Circuito equivalente da máquina de indução (a) aproximação 1; (b) aproximação 2

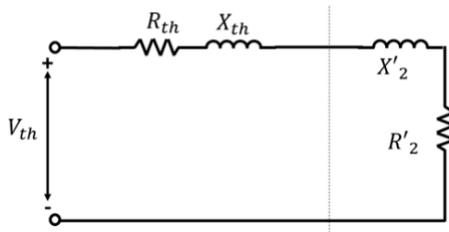


Fonte: elaborada pelo autor.

Circuito equivalente de Thévenin

Os cálculos utilizando o circuito equivalente da máquina de indução podem ser significativamente simplificados quando o teorema de Thevenin é aplicado ao circuito do estator. Este procedimento possibilita obter um circuito RL série como o apresentado na Figura 3.17.

Figura 3.17 | Circuito equivalente da máquina de indução – equivalente de Thevenin



Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando o circuito equivalente da Figura 3.15, por exemplo, os valores da tensão de Thévenin e da impedância (resistência e reatância) mostradas no circuito da Figura 3.17 ficariam conforme as Equações 3.16 e 3.17.

$$V_{th} = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_1 \quad (3.16)$$

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = R_{th} + jX_{th} \quad (3.17)$$

Uma vez que os valores de corrente elétrica tanto no estator como no rotor podem ser obtidos por meio da análise do circuito equivalente da máquina, é intuitivo que os valores de potência apresentados nas Equações de 3.12 a 3.15 também podem ser obtidos analisando o circuito equivalente. Além da potência, o torque mecânico pode ser adquirido por meio da Equação 3.18, que relaciona a potência mecânica (P_m), dada em Watts, com a velocidade mecânica (ω_m), dada em radianos por segundo. A velocidade mecânica, por sua vez, pode ser obtida a partir da velocidade síncrona de rotação, dada pela Equação 3.19 (SEN, 1996).

$$P_m = T_m \omega_m = I_2^2 \frac{R_2}{s} (1-s) \quad (3.18)$$

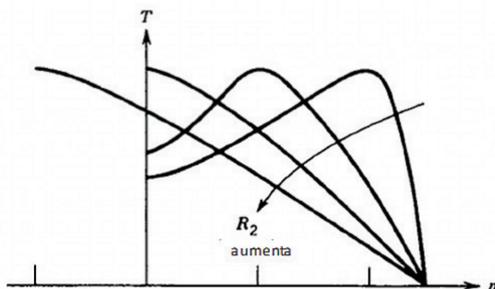
$$\omega_m = \omega_s (1-s) \quad (3.19)$$

Com a substituição da Equação 3.19 na Equação 3.18, obtém-se a Equação 3.20. Esta equação mostra uma relação entre o torque mecânico e a potência do entreferro. Ainda, encontramos uma relação entre o torque mecânico e a resistência do rotor. Lembre-se de que estamos assumindo uma relação de transformação unitária entre o enrolamento do estator e o enrolamento do rotor. A Figura 3.18 mostra a característica do conjugado mecânico pela velocidade da máquina para diversos valores de resistência de rotor. Observa-se que a curva característica pode ser alterada, para isso, basta aumentar ou diminuir a resistência do rotor. De fato, este é um artifício utilizado para o controle das características de conjugado e velocidade da máquina de indução com rotor bobinado.

$$T_m \omega_s = I_2^2 \frac{R_2}{s} = P_g$$

$$T_m = \frac{1}{\omega_s} P_g = \frac{1}{\omega_s} I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (3.20)$$

Figura 3.18 | Característica de torque versus velocidade da máquina com a variação da resistência do rotor



Fonte: Sen (1996, p. 236).



Pesquise mais

Um dos aspectos que interferem diretamente na impedância dos enrolamentos das máquinas de indução é referente à bobinagem. Este conhecimento é imprescindível para os profissionais que desejam atuar com o dimensionamento e fabricação de motores. Para saber mais sobre este tema, sugerimos uma leitura da Seção 2.3 da referência a seguir:

FILHO, G. F., **Motor de indução**, 2. ed. São Paulo: Erica, 2013. p. 47 – 53.

O livro também pode ser acessado em sua biblioteca virtual.

Sem medo de errar

Com os conhecimentos adquiridos no estudo desta seção podemos retomar então a sua atividade a ser realizada. Lembre-se que você está aprendendo a trabalhar com manutenção das máquinas de indução e, desta vez, a sua equipe está trabalhando com um motor que possui as seguintes características: motor assíncrono de seis polos, 460V, 20kW, 60Hz, e opera com velocidade de 1181 rpm. As resistências dos enrolamentos do estator e do rotor são respectivamente 0,3 e 0,2 Ohms por fase. As reatâncias dos enrolamentos do estator e do rotor são respectivamente 1,12 e 1,91 Ohms por fase.

Inicialmente, você precisa verificar o escorregamento no qual a máquina opera, para isso, é importante que seja determinada a

velocidade síncrona de rotação. Como o motor está operando em 1181 rpm, podemos já determinar esta velocidade síncrona também em rpm. Assim, utilizando os dados de placa da máquina, teremos:

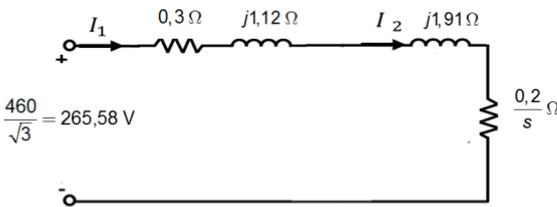
$$n_s = 120 \frac{f_1}{P} = 120 \frac{60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

O escorregamento da máquina pode ser dado então conforme a seguir:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{1200 - 1181}{1200} = 0,0158 \text{ ou } 1,58\%$$

Verifica-se que a máquina opera com um baixo escorregamento. Para determinar a potência mecânica que está sendo desenvolvida, primeiro precisamos encontrar a corrente elétrica que percorre o enrolamento do rotor. Para fazer isso é necessário obter o circuito equivalente da máquina. Vamos assumir que a reatância de magnetização seja muito grande, de forma que possa ser desprezada do circuito equivalente, assim como a resistência que representa as perdas por corrente de Foucault. O circuito equivalente por fase da máquina em estudo se resume ao apresentado na Figura 3.19.

Figura 3.19 | Circuito equivalente da máquina de indução analisada



Fonte: elaborada pelo autor.

Portanto, a corrente no rotor pode ser calculada - conforme segue:

$$\hat{I}_2 = \frac{460/\sqrt{3}}{\left(0,3 + \frac{0,2}{0,0158}\right) + j(1,12 + 1,91)} = \frac{460/\sqrt{3}}{\left(0,3 + \frac{0,2}{s}\right) + j(1,12 + 1,91)} = 19,4327 - j4,5439 \text{ A}$$

$$\hat{I}_2 = 19,96 \angle -13,16^\circ \text{ A}$$

Logo, a potência mecânica para uma fase será:

$$P_m = I_2^2 \frac{R_2}{s} (1-s) = 19,96^2 \frac{0,2}{0,0158} (1-0,0158) \simeq 5 \text{ kW}$$

Para três fases temos:

$$P_m^{3\phi} = 3 \times 5 = 15 \text{ kW}$$

Apresentando estes cálculos à equipe de manutenção, é possível verificar experimentalmente o que ocorre em outros valores de carga. Para fazer isso, basta aumentar a carga e determinar novamente o escorregamento no eixo e utilizar o circuito equivalente para fazer os cálculos semelhantes e assim comparar com o valor de carga controlável adicionada. Portanto, a sua tarefa está concluída com sucesso!

Avançando na prática

Dependência da corrente no rotor com a velocidade de rotação

Descrição da situação-problema

Uma fábrica de motores elétricos está realizando ensaios em um determinado motor para elaborar o descritivo técnico de uma máquina. Uma das especificações necessárias que foi requerida pelo cliente é a obtenção de uma curva que mostrasse a dependência da corrente induzida no rotor com a velocidade mecânica deste. Os engenheiros responsáveis realizaram um ensaio em que foram feitas as medições da corrente elétrica induzida no rotor e a velocidade de rotação da máquina, no entanto, estão em dúvida se a característica obtida confere com o que é esperado na teoria de máquinas elétricas. Imagine que você foi chamado por esta equipe para auxiliar nesta dúvida. Como você faria para determinar, teoricamente, a relação da corrente induzida com a velocidade de rotação da máquina?

Resolução da situação-problema

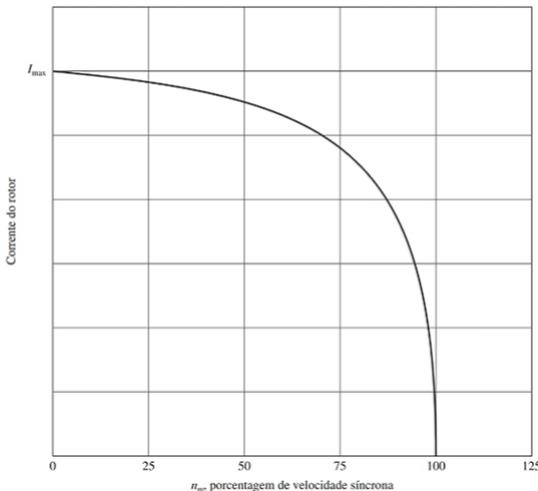
Aqui, teremos que recordar a equação já estudada que relaciona a corrente do rotor com os componentes desse modelo e com o escorregamento. A Equação 3.11 descreve esta relação da seguinte maneira:

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (3.11)$$

Nesta equação temos os fatores E_2 , que é a tensão do rotor na situação de bloqueio, s , que é o escorregamento da máquina, R_2 , que é a resistência do rotor e X_2 , que é a reatância do enrolamento do rotor na situação de bloqueio.

A velocidade mecânica do rotor é sempre uma fração da velocidade síncrona da máquina de indução. Com o auxílio de uma ferramenta para cálculos repetitivos e mantendo os componentes do modelo fixados em valores tradicionais para as máquinas de indução, podemos traçar uma curva como a mostrada na Figura 3.20 que mostra a dependência da corrente e velocidade do rotor.

Figura 3.20 | Curva de corrente induzida no rotor com a velocidade



Fonte: Chapman (2013, p. 319).

Se os valores medidos no ensaio conferirem com esta característica, então a dúvida dos engenheiros poderá ser sanada. Entretanto, se os

dados estiverem divergentes, os engenheiros deverão repetir o ensaio e observar se não existem fatores externos influenciando nos resultados. De qualquer forma, a sua atividade estará concluída com êxito!

Faça valer a pena

1. Apesar das semelhanças presentes nos circuitos equivalentes, existe uma diferença entre a máquina de indução e o transformador. Esta diferença se refere à frequência do sinal no estator, que é diferente da frequência do sinal induzido no rotor. Imagine que um motor de indução é excitado por um sinal de frequência de 60 Hz e apresenta um sinal induzido no rotor com frequência de 3 Hz.

Considerando a frequência do sinal do estator e a frequência do sinal no rotor, determine a alternativa que contém o valor do escorregamento desse motor.

- a) 1%.
- b) 3%.
- c) 5%.
- d) 7%.
- e) 10%.

2. Considere um motor de indução alimentado em 380 V trifásico. A potência no entreferro desta máquina é de 31,65 kW. O motor rotacional e a velocidade com escorregamento são iguais a 5%. Este motor apresenta perdas rotacionais de 600 W. Nas condições dadas, parte da potência é perdida no cobre e, descontando as perdas rotacionais, tem-se a potência no eixo.

Considerando o exposto, determine a alternativa que contém o valor aproximado da potência entregue no eixo da máquina.

- a) 15 kW.
- b) 29 kW.
- c) 34 kW.
- d) 45 kW.
- e) 52 kW.

3. O modelo do circuito equivalente de um motor de indução é geralmente apresentado por fase. Considere um motor que é alimentado

em tensão nominal de 440 V, 60 Hz, tem 6 polos e é ligado em Y. Os parâmetros do motor são conforme a seguir

$$R_1 = 0,3 \Omega \quad X_1 = 0,4 \Omega \quad R_2 = 0,15 \Omega \quad X_2 = 0,2 \Omega \quad X_m = 15 \Omega$$

Considere que a corrente no estator é aproximadamente igual a corrente que percorre o rotor, de 20 A, que todas as perdas decorrentes de atrito, ventilação e no ferro somam 150 W, independentemente de rotação e carga.

Nas condições descritas, a potência de saída desse motor com escorregamento de 4% em Watts é:

- a) 1869.
- b) 4170.
- c) 11360.
- d) 11834.
- e) 12194.

Seção 3.3

Fluxo de potência na máquina de indução

Diálogo aberto

Uma grande empresa do setor petroquímico está reestruturando suas operações no território nacional. O objetivo dessa reestruturação é adequar as máquinas e os equipamentos para cada tipo de aplicação específica, assim como capacitar os profissionais do setor. Nesse contexto, a empresa desenvolveu um programa de estágio no setor de máquinas e manutenção, no qual o candidato passará por diversas áreas do setor de forma a ser capacitado para trabalhar com todos os tipos de máquinas elétricas existentes nesta planta industrial.

Imagine que você acaba de ser contratado como estagiário do departamento de manutenção elétrica desta empresa. No primeiro dia, seu supervisor explicou sobre a importância dos técnicos e engenheiros de manutenção para o bom funcionamento da empresa e o acompanhou por todas as instalações da empresa. No segundo dia, você trabalhou com uma equipe que realiza manutenção em máquinas de corrente contínua. E terceiro dia na empresa, você está conhecendo as máquinas de indução trifásicas, sendo alocado para trabalhar em uma equipe que é especializada neste tipo de máquina.

Você está trabalhando com um motor de seis polos, 460 V, 20 kW, 60 Hz, e opera com velocidade de 1181 rpm. As resistências dos enrolamentos do estator e do rotor são respectivamente 0,3 e 0,2 Ohms por fase. Considera-se uma impedância de magnetização muito maior que os valores das impedâncias dos enrolamentos e que as perdas totais de atrito, ventilação e no núcleo sejam de 300 W. Nestas condições, a equipe deseja avaliar o rendimento da máquina e calcular a potência de eixo da máquina. Como você pode ajudar o time?

No decorrer desta seção, estudaremos o fluxo de potência nas máquinas de indução operando como motores elétricos, assim, você terá os conhecimentos necessários para realizar a tarefa que lhe foi atribuída.

Bons estudos e mãos à obra!

Não pode faltar

Como já foi abordado anteriormente, o funcionamento de uma máquina de indução se assemelha ao funcionamento de um transformador visto que utiliza o princípio da indução magnética de dois enrolamentos magneticamente acoplados. Já explicitamos as principais diferenças entre esses dois tipos de máquina elétricas na seção anterior, porém, é sempre interessante fazer essas analogias para que tornemos mais claras as semelhanças e as diferenças, e assim buscarmos maior compreensão de todos os tipos de máquinas que estudaremos. Dessa forma, podemos fazer a analogia entendendo o motor de indução como um transformador, cuja potência na saída não é de natureza elétrica, e sim mecânica.

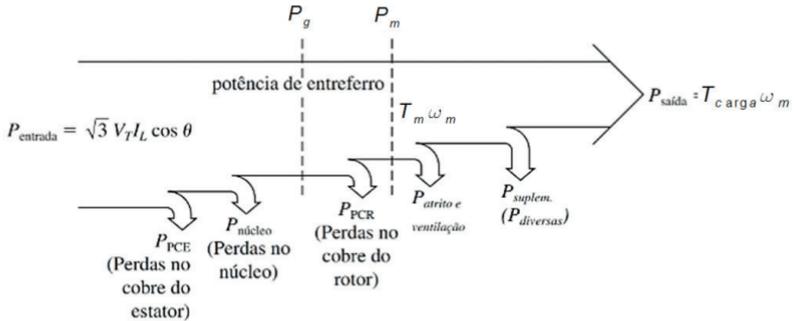


Refleta

Quais fatores influenciam no baixo desempenho de um gerador de indução, fazendo com que seja aplicado em situações tão especiais e específicas, que o motor de indução se torne a máquina assíncrona mais aplicada?

A potência da máquina de indução flui desde a entrada (alimentação) do motor até a ponta do seu eixo. Na entrada, a potência é elétrica e é determinada pelas tensões e correntes elétricas trifásicas. A medida que ocorre a transformação eletromecânica de energia, algumas perdas de potência ocorrem dentro da máquina e, portanto, a potência de saída na forma de potência mecânica deverá ser inferior à potência de entrada da máquina. Este balanço de potência pode ser mais bem entendido quando observamos o fluxo presente na Figura 3.21.

Figura 3.21 | Fluxo de potência no motor de indução



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 322).

Quando observamos a Figura 3.21, verificamos que o fluxo de potência desde a entrada até a saída sofre uma sequência de perdas que se dá na seguinte ordem:

- Perdas nos enrolamentos do estator (P_{PCE}): também são conhecidas como perdas no cobre do estator, e correspondem às perdas devido à corrente que percorre o enrolamento do estator. Assim, pode-se dizer que essas perdas são do tipo $I^2 R$.
- Perdas no núcleo ($P_{\text{NÚCLEO}}$): correspondem às perdas por histerese e corrente parasita no núcleo do estator. No diagrama da Figura 3.21, estas perdas ocorrem logo após as perdas no cobre do estator, no entanto, é difícil dizer de fato a ordem de ocorrência dessas perdas devido à sua natureza no núcleo. Estamos aqui considerando o circuito equivalente sem aproximações, conforme também mostrado na Figura 3.22.

Lembre-se

A histerese magnética é uma propriedade inerente aos materiais magnéticos que causa o atraso ou retardo do fluxo magnético. Já as correntes parasitas, ou também chamadas correntes de Foucault, são as correntes induzidas em um material condutor devido a um campo magnético variante no tempo. Ambos os fenômenos são indesejáveis (porém inevitáveis) do ponto de vista de desempenho da máquina.

- Perdas no cobre do rotor (P_{PCR}): essas perdas são também devido à corrente que percorre o enrolamento do rotor.

Assim, pode-se dizer que estes tipos de perdas também são do tipo I^2R .

- Perdas por atrito e ventilação (P_{AV}): são, como o nome diz, devido ao atrito na rotação da máquina e à ventilação.
- Perdas suplementares ($P_{suplem.}$): correspondente às demais perdas, como por exemplo decorrente de um mau acoplamento do eixo.

À medida que a potência de entrada sofre as perdas, ela reduz de valor em determinadas localizações da máquina. Assim, podemos complementar essa sequência estabelecendo as relações para as potências internas e a potência de saída, nos baseando sempre no diagrama de fluxo de potência mostrado na Figura 3.22.

Para a potência no entreferro da máquina (P_g), temos conforme a Equação 3.21:

$$P_g = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{NÚCLEO} \quad (3.21).$$

A potência convertida da forma elétrica para a mecânica (P_m) é dada conforme mostra a Equação 3.22:

$$P_m = P_g - P_{PCR} \quad (3.22).$$

Finalmente, a potência de saída pode ser descrita conforme mostra a Equação 3.23. É fácil verificar que a soma das perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares correspondem às perdas rotacionais da máquina.

$$P_{saída} = P_m - P_{AV} - P_{suplem.} \quad (3.23).$$



Exemplificando

Vamos tomar como exemplo um motor de indução trifásico de 380 V (tensão 3 trifásica de linha), 60 Hz e 30 HP, está usando 30 A (corrente de linha) com fator de potência 0,85 atrasado. A perda no cobre do estator é 1 kW e as perdas no cobre do rotor são 500 W. As perdas por atrito e ventilação são 400 W, as perdas no núcleo são 1500 W e as perdas suplementares são desprezíveis. Qual é a potência de entreferro, a potência convertida e a potência de saída desse motor?

Resolução:

Inicialmente, precisamos calcular a potência de entrada por fase da máquina. Uma vez que os valores de tensão e corrente correspondem aos valores de linha, podemos considerar a característica balanceada da máquina para assim calcular os valores por fase. O ângulo entre corrente e tensão pode ser dado pelo fator de potência:

$$fp = \cos \theta = 0,85 .$$

Calculando o valor da potência de entrada teremos:

$$P_{entrada} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta ,$$

$$P_{entrada} = \sqrt{3} \times 380 \times 30 \times 0,85 ,$$

$$P_{entrada} = 16,8 \text{ kW} .$$

A potência do entreferro pode ser calculada subtraindo da potência de entrada as perdas no cobre do estator e as perdas no núcleo:

$$P_g = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{NÚCLEO}$$

$$P_g = 16,8 - 1 - 1,5 ,$$

$$P_g = 14,3 \text{ kW} .$$

A potência convertida em potência mecânica é obtida subtraindo as perdas no cobre do rotor:

$$P_m = P_g - P_{PCR} ,$$

$$P_m = 14,3 - 0,5 ,$$

$$P_m = 13,8 \text{ kW} .$$

Por fim, tem-se a potência de saída ao subtrairmos as perdas de atrito e ventilação e as perdas suplementares:

$$P_{saída} = P_m - P_{AV} - P_{suplem.}$$

$$P_{saída} = 13,8 - 0,4 - 0 ,$$

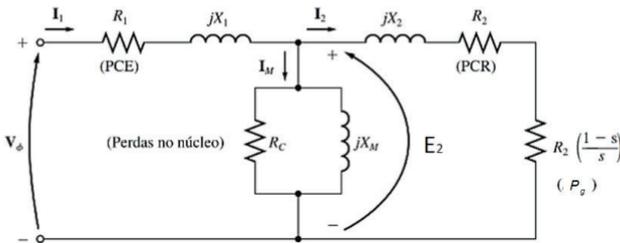
$$P_{saída} = 13,4 \text{ kW} .$$

Podemos definir o conjugado mecânico induzido (T_m) no motor de indução como sendo a relação entre a potência convertida em mecânica (P_m) e a velocidade do motor (ω_m). Essa relação é mais bem representada pela Equação 3.24:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (3.24)$$

A maneira mais clara de estudo para a obtenção do conjugado induzido do motor de indução e, por conseguinte, da característica de saída, conjugado por velocidade, é com uma análise do circuito equivalente da máquina. Por meio do circuito, conseguimos obter as potências e, conseqüentemente, o conjugado. A Figura 3.22 mostra o circuito equivalente do motor de indução, assim como a localização das perdas e das potências principais, onde temos também representada a tensão E_2 que corresponde à tensão no rotor, definida anteriormente.

Figura 3.22 | Circuito equivalente da máquina de indução com a localização das potências



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 326).

Para a análise do circuito equivalente, começaremos definindo alguns equivalentes de componentes presentes no circuito do motor de indução. Vamos definir Z_2 como a impedância equivalente do rotor, conforme a Equação 3.25.

$$Z_2 = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s} + jX_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (3.25)$$

Como um segundo passo, vamos definir a impedância equivalente da associação em paralelo entre o circuito do rotor e o circuito de magnetização. Nomearemos esta impedância como Z_1 , conforme a Equação 3.26.

$$Z_1 = \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{Z_2} \right)^{-1}$$

$$Z_1 = \left(G_c - jB_m + \frac{1}{Z_2} \right)^{-1} \quad (3.26)$$

E, seguindo adiante, podemos definir uma única impedância série equivalente do circuito, que é representada pela Equação 3.27.

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + Z_1 \quad (3.27)$$

Finalmente, a corrente de estator pode ser descrita pela Equação 3.28:

$$I_1 = \frac{V_{entrada}}{Z_{eq}} \quad (3.28)$$

Podemos definir, com base nos elementos do circuito, todas as potências e perdas de potência envolvidas nesse modelo. Estas equações estão elencadas na sequência, para as três fases da máquina.

Para as perdas no cobre do estator, temos a Equação 3.29.

$$P_{PCE} = 3R_1 I_1^2 \quad (3.29)$$

Para as perdas no núcleo, temos a Equação 3.30.

$$P_{NÚCLEO} = 3G_c E_2^2 \quad (3.30)$$

Para a potência no entreferro, temos a Equação 3.31.

$$P_g = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (3.31)$$

Note que a potência no entreferro pode ser representada por um balanço de potência, como já foi mostrado na Equação 3.21.

Para as perdas resistivas no rotor, temos a Equação 3.32.

$$P_{PCR} = 3R_2 I_2^2 \quad (3.32)$$

Observe que as perdas no rotor possuem relação direta com as perdas no entreferro, por meio do escorregamento.

Para a potência mecânica desenvolvida, temos a Equação 3.33.

$$P_m = 3R_2 I_2^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (3.33)$$

Devemos lembrar que essa potência, já apresentada na Equação 3.22, representa a potência convertida da forma elétrica para a mecânica e que pode ser obtida com um balanço de potência entre a potência no entreferro e as perdas no rotor.

Por fim, chegamos na potência de saída, já apresentada na Equação 3.23.



Assimile

Outro destaque dentro do estudo das máquinas de indução é o rendimento, ou eficiência da máquina. A eficiência da máquina é dada por uma relação entre a potência de saída e de entrada do motor. A Equação 3.34 representa esta relação.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_m - P_{AV} - P_{suplem.}}{\sqrt{3}V_T I_L \cos \theta} \times 100\% \quad (3.34)$$

Já estudamos que o torque mecânico induzido está relacionado à potência mecânica e à velocidade de rotação. Assim, podemos utilizar a Equação 3.33 para encontrar o torque, dividindo-a pela velocidade mecânica ω_m . Uma vez que $\omega_m = (1-s)\omega_s$, onde ω_s é a velocidade síncrona de rotação, se aplicarmos todas as relações apresentadas o conjugado induzido pode ser obtido em função da velocidade síncrona e da potência do entreferro:

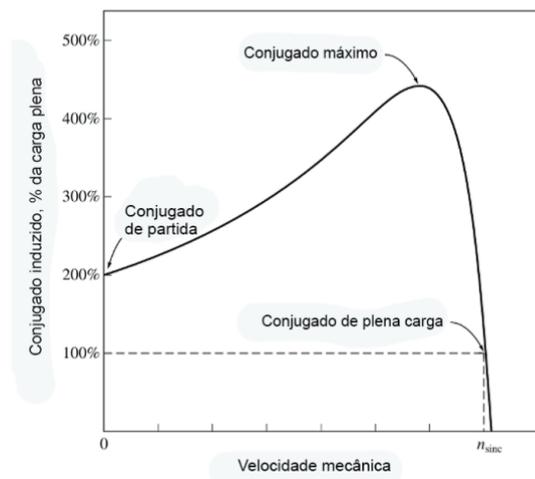
$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3R_2 I_2^2 \left(\frac{1-s}{s} \right)}{(1-s)\omega_s} = \frac{3R_2 I_2^2 \left(\frac{1}{s} \right)}{\omega_s}$$

Logo, chegaremos à expressão apresentada na Equação 3.35, que é mais prática pois a velocidade síncrona não varia, ou seja, uma vez conhecendo a potência no entreferro, conseguimos calcular o conjugado induzido.

$$T_m = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (3.35)$$

Com o conjugado induzido definido, e determinada a forma de calculá-lo, podemos determinar a curva característica desse conjugado na máquina de indução. Essa curva já foi apresentada anteriormente e nossa intenção é analisar melhor alguns aspectos da operação da máquina no modo motor, conforme é mostrado na Figura 3.23. Esta curva apresenta o conjugado induzido como uma porcentagem do conjugado de plena carga.

Figura 3.23 | Curva característica de conjugado do motor de indução

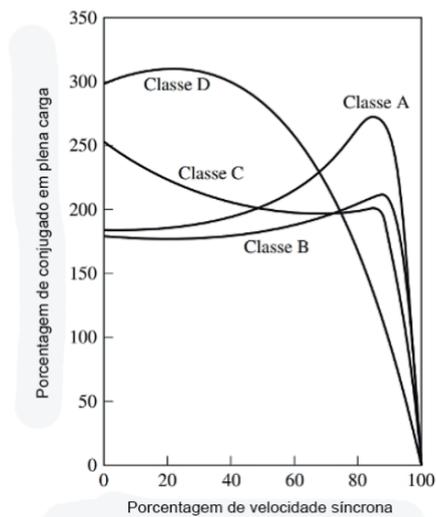


Fonte: Chapman (2013, p. 336).

A partir dessa característica, podemos observar algumas particularidades do comportamento do conjugado em um motor de indução. Por exemplo, observamos que o conjugado é nulo na velocidade síncrona e que há um conjugado máximo que não pode ser ultrapassado, com pena de dano ao motor. Verificamos também que o conjugado de partida é maior que o de plena carga.

A Figura 3.24 apresenta, em um único gráfico, as curvas características típicas de conjugado para motores de indução. Esse tipo de curva define uma classificação de motores em quatro classes, cujas características são adequadas para aplicações específicas. Essas curvas nos dão condições de entender as características de cada classe de forma a compará-las mais facilmente. Note que na Figura 3.23, a curva está em função da velocidade mecânica do motor (do seu rotor), já na Figura 3.24, a curva está em função de uma fração da velocidade síncrona.

Figura 3.24 | Curvas características de motores de indução divididas em classes



Fonte: Chapman (2013, p. 347).



Assimile

Baseados na curva característica do motor de indução, órgãos internacionais como a NEMA (associação de fabricantes do setor elétrico nacional dos EUA) e o IEC (Comissão Internacional de Eletrotécnica) estabelecem as classes dos motores de indução definidas para cada uma das aplicações específicas. Vamos apresentar, resumidamente, o que cada classe de motor de indução apresenta (CHAPMAN, 2013):

- Classe A: os motores desta classe apresentam conjugado normal de partida, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Essa classe é considerada a classe padrão dos motores de indução.
- Classe B: os motores da classe B apresentam conjugado normal de partida, corrente de partida com valor mais baixo que os da classe A e baixo escorregamento.
- Classe C: os motores desta classe apresentam conjugado elevado na partida, corrente de partida baixa e baixo escorregamento (inferior a 5% do valor que atinge à plena carga).

- Classe D: os motores da classe D apresentam conjugado de partida acima do dobro do valor nominal, corrente de partida normal e um escorregamento elevado, quando em plena carga.



Pesquise mais

Apesar de o motor de indução ter sido concebido na segunda metade da década de 1880, a tecnologia envolvida na construção e operação desse tipo de máquina está em constante evolução. Para saber mais como os motores evoluíram desde sua origem até os tempos atuais, sugerimos uma leitura da Seção 6.7 do livro na referência a seguir.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013. p. 353 - 357

Sem medo de errar

Vamos retornar para a situação em que você está conhecendo as máquinas de indução trifásicas, sendo alocado para trabalhar em uma equipe que é especializada nesse tipo de máquina. O motor com o qual você está lidando é de seis polos, 460 V, 20 kW, 60 Hz, fator de potência de 0,9 e opera com velocidade de 1181 rpm. As resistências dos enrolamentos do estator e do rotor são respectivamente 0,3 e 0,2 Ohms por fase. Considera-se uma impedância de magnetização muito maior que os valores das impedâncias dos enrolamentos e que as perdas totais de atrito, ventilação e no núcleo sejam de 300W. Sob essas condições, a equipe deseja avaliar o rendimento da máquina quando ela consome da rede uma potência nominal em condições nominais de fator de potência, e calcular a potência entregue no eixo da máquina.

Para realizar esta tarefa, vamos inicialmente determinar o escorregamento da máquina, que pode ser dado pela seguinte equação:

$$n_s = \frac{1200 - 1181}{1200} \times 100\% = 1,58\% \quad (\text{ou } 0,0158).$$

Considerando as condições nominais, temos que a máquina opera com fator de potência de 0,9 e drena uma potência de 20 kW, então, podemos calcular a corrente consumida desta maneira:

$$I_1 = \frac{20.000}{\sqrt{3} \times 460 \times 0,9} = 27,89 \text{ A} .$$

A partir daí, podemos calcular a potência de entreferro, subtraindo as perdas no cobre do estator da potência de entrada.

$$P_g = P_{\text{entrada}} - I_1^2 R_1 = 20.000 - 27,89^2 \times 0,3 = 19766,7 \text{ W} .$$

A potência mecânica é calculada por:

$$P_m = (1 - s)P_g = (1 - 0,0158) \times 19766,7 = 19454,3 \text{ W} .$$

Subtraindo as perdas rotacionais, tem-se a potência no eixo:

$$P_{\text{eixo}} = P_m - 300 \text{ W} = 19454,3 - 300 = 19154,3 \text{ W} .$$

Portanto, o rendimento desta máquina será:

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\% = \frac{19154,3}{20000} \times 100\% = 95,7\% .$$

Com estes cálculos, a equipe poderá avaliar o rendimento da máquina apropriadamente. Um rendimento de 95,7% corresponde que esta porcentagem do valor da potência de entrada é aproveitada na saída da máquina. Esta informação, juntamente com a potência no eixo, era o que a equipe desejava analisar, dessa forma, você concluiu sua tarefa com êxito!

Avançando na prática

Fluxo de potência na operação como gerador

Descrição da situação-problema

Suponha que você trabalhe em uma empresa que está envolvida em uma tarefa de tornar uma máquina de indução de 380 V (tensão de linha) com 6 polos, que inicialmente é empregada como motor, na função de gerador para alimentar uma carga de 8kW. Para isso,

é preciso conectar o eixo da máquina a uma fonte de rotação primária para fornecer uma potência no eixo de 10 kW. As perdas rotacionais totalizam 500 W e considera-se uma impedância de magnetização muito maior que os valores das impedâncias dos enrolamentos. As resistências dos enrolamentos do rotor e do estator são iguais à 0,2 e 0,4 Ohms, respectivamente.

Para que a máquina alimente a carga com potência e tensão adequada, você como projetista foi incumbido de prestar uma consultoria sobre a viabilidade de utilização da máquina como gerador elétrico. Como você realizaria esta tarefa?

Resolução da situação-problema

O uso do motor de indução como gerador não é usual, pois sua eficiência neste modo de operação deixa muito a desejar. Existem algumas formas de fazer com que a máquina opere como gerador, mas para isso é necessário fornecer potência reativa adequada nos terminais da máquina. Vamos considerar para a análise de viabilidade que a máquina primária que está conectada ao eixo do motor gira em uma velocidade maior que a velocidade síncrona, levaremos em conta também uma velocidade com escorregamento de -5% para realizar os cálculos, dessa forma, tem-se que o eixo deve girar em uma rotação em rpm dada por:

$$n = 120 \frac{60}{6} (1 + 0,05) = 1200 \times 1,05 = 1260 \text{ rpm.}$$

Para considerar o fluxo de potência em um gerador, deve-se considerar o caminho inverso do fluxo de potência apresentado na Figura 3.21. Assim, fornecendo uma potência no eixo de 10 kW, tem-se a seguinte potência mecânica, descontadas as perdas rotacionais:

$$P_m = 10.000 - 500 = 9.500 \text{ W.}$$

A potência no entreferro será:

$$P_g = \frac{P_m}{(1 - s)} = \frac{9.500}{1 + 0,05} \simeq 9.000 \text{ W.}$$

Desejamos uma potência de saída de 8 kW, logo:

$$P_{\text{saída}} = P_g - I_1^2 R_1.$$

$$\rightarrow I_1^2 = \frac{P_g - P_{saída}}{R_1} = \frac{9.000 - 8.000}{0,4} = 2500 \rightarrow I_1 = \sqrt{2500} = 50 \text{ A.}$$

Além disso:

$$P_{saída} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \rightarrow \cos \theta = \frac{P_{saída}}{\sqrt{3} V_T I_L} .$$

$$\cos \theta = \frac{8.000}{\sqrt{3} \times 380 \times 50} = 0,243 .$$

Logo, verifica-se que a máquina opera com fator de potência muito baixo. A potência reativa será dada por

$$Q = 8.000 \times \tan(\cos^{-1} 0,243) = 31,9 \text{ kVAR} .$$

Para que seja possível fazer a máquina de indução funcionar como gerador, é necessário conectar os terminais da máquina a um banco de capacitores de forma a fornecer a potência reativa adequada à máquina. Veja que, para operar nesta tensão e fornecer a potência requerida, é preciso uma potência reativa muito grande. Esta característica limita a aplicação da máquina de indução como gerador.

Faça valer a pena

1. A potência da máquina de indução flui desde a entrada (alimentação) do motor até o seu eixo. Na entrada, tem-se a potência elétrica dada pela alimentação da máquina e na saída tem-se a potência mecânica entregue à carga. A medida que ocorre a transformação eletromecânica de energia, alguma potência é perdida internamente. Considere as seguintes perdas e suas definições:

- I. Perdas no cobre
- II. Perdas no núcleo
- III. Perdas por atrito e ventilação
 - A. Perdas devido ao atrito na rotação da máquina e à ventilação.
 - B. Essas perdas ocorrem devido a corrente que percorre o enrolamento do estator e do rotor, sendo perdas do tipo $I^2 R$.
 - C. Correspondem às perdas por histerese e corrente parasita no material ferromagnético do estator.

Escolha a alternativa que relaciona corretamente os tipos de perdas e suas definições.

- a) I – A; II – B; III – C.
- b) I – B; II – A; III – C.
- c) I – C; II – B; III – A.
- d) I – B; II – C; III – A.
- e) I – A; II – C; III – B.

2. Uma máquina de indução de 380 V, 60 Hz e 6 polos, funciona como motor drenando da fonte uma corrente de 20 A e com fator de potência igual à 0,86 atrasado. Esta máquina possui perdas rotacionais totais de 500 W e opera com uma velocidade de rotação de 1152 rpm. Os enrolamentos do estator e do rotor possuem ambos uma resistência de 0,2 Ohms e a impedância de magnetização é extremamente alta. Considere as seguintes afirmações:

- I. O escorregamento no qual a máquina opera é de 4%
- II. A máquina desenvolve um torque na carga de 84,05 Nm.
- III. A potência de entreferro da máquina é igual à 11kW.

Com relação às afirmativas feitas sobre a máquina de indução, estão corretas apenas:

- a) I e II.
- b) II e III.
- c) I e III.
- d) Somente a I.
- e) I, II e III.

3. Baseados na curva característica do motor de indução, órgãos internacionais como a NEMA (associação de fabricantes do setor elétrico nacional dos EUA) e o IEC (Comissão Internacional de Eletrotécnica) estabelecem as classes dos motores de indução definidas para cada uma das aplicações específicas. Vamos apresentar, resumidamente, o que cada classe de motor de indução apresenta (CHAPMAN, 2013). Considere o quadro a seguir:

Quadro 3.1 | Classes de motores

Classe	Conjugado de partida	Corrente de partida	Escorregamento
I.	Elevado	Baixo	Baixo
II.	Normal	Baixo	Baixo
III	2 x nominal	Normal	Elevado

Fonte: elaborado pelo autor.

As classes referentes aos números I, II e III são dados na alternativa:

- a) I. Classe A - II. Classe C e B - III classe D.
- b) I. Classe B - II. Classe A e D - III classe C.
- c) I. Classe C - II. Classe A e B - III classe D.
- d) I. Classe B - II. Classe C e D - III classe A.
- e) I. Classe B - II. Classe A e C - III classe D.

Referências

- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013.
- FILHO, G. F. **Motor de indução**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**, 4. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- HAND, A. **Motores elétricos: manutenção e solução de problemas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- NASCIMENTO Jr., G. C. **Máquinas elétricas: teoria e ensaios**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- PETRUZELLA, F. D. **Motores elétricos e acionamentos**. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics**. 2. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 1996.
- UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.

Máquinas síncronas

Convite ao estudo

Olá, alunos, sejam bem-vindos à quarta unidade da disciplina *Máquinas Elétricas*. Nesta unidade, trataremos de outra classe de máquinas elétricas: as máquinas síncronas. Nos estudos anteriores tivemos a oportunidade de analisar desde os fundamentos eletromagnéticos das máquinas elétricas, passando pelos princípios de funcionamento das máquinas CC e das máquinas CA assíncronas, chegando até as características e aplicações dessas máquinas. Nesta unidade, analisaremos as características das máquinas síncronas que se encaixam na categoria de máquinas CA.

Uma vez tendo acesso às informações contidas nesta unidade e buscando o aprofundamento necessário, atingiremos o grau de conhecimento no assunto que nos propiciará atingir a competência de descrever o funcionamento, identificar as características intrínsecas e operar este tipo de máquina elétrica rotativa, com a segurança e perícia requerida.

Dessa forma, vamos continuar imaginando a situação em que uma grande empresa do setor petroquímico está reestruturando suas operações com o objetivo de adequar as máquinas e equipamentos para cada tipo de aplicação específica, assim como capacitar os profissionais do setor. Nesse contexto, a empresa desenvolveu um programa de estágio no setor máquinas e manutenção. Nesse programa de estágios o candidato passará por diversas áreas desse setor de forma a ser capacitado para trabalhar com todos os tipos de máquinas elétricas existentes nessa planta industrial.

Você foi contratado como estagiário do departamento de manutenção elétrica e está desempenhando muitas atividades

importantes até o momento. No primeiro e no segundo dia, seu supervisor explicou sobre a importância dos técnicos e engenheiros de manutenção para o bom funcionamento da empresa e o acompanhou por todas as instalações da empresa onde você já teve contato com alguns tipos de máquinas elétricas e aprendeu muitas coisas interessantes. Agora você irá conhecer uma equipe especializada em máquinas síncronas. Esse tipo de máquina pode operar tanto como motor ou como um gerador, mas para isso é necessário conhecer profundamente as características da máquina.

Você está preparado para uma nova etapa no seu desenvolvimento profissional?

Na primeira seção desta unidade começaremos analisando o princípio de funcionamento da máquina síncrona, estudando as suas características construtivas, o circuito equivalente e os testes de circuito aberto e curto-circuito para determinação dos parâmetros da máquina. Já na segunda seção, estudaremos as características do ângulo de carga em regime permanente. Iremos construir juntos o diagrama fasorial da máquina síncrona e a partir dele determinar as características de conjugado e potência da máquina síncrona de polos lisos. Também faremos uma breve introdução da teoria de máquinas de polos salientes, para a qual podemos facilmente estender os conceitos estudados.

Na terceira e última seção, estudaremos a principal aplicação da máquina: a operação como gerador síncrono. Determinaremos a frequência síncrona de operação, os limites de operação do gerador síncrono e traçaremos as curvas de capacidade e a curva em V da máquina síncrona.

Aproveite ao máximo este estudo e que os conhecimentos adquiridos possam lhe ajudar na vida profissional ou em um curso posterior. Para isso, dedicação é fundamental!

Bons estudos!

Seção 4.1

Princípio de funcionamento das máquinas síncronas

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção iniciaremos os estudos da máquina síncrona e para isso faremos uma discussão sobre os aspectos construtivos da máquina. Também abordaremos o circuito equivalente da máquina síncrona de forma a nos ajudar em futuras análises. Para determinar os parâmetros da máquina síncrona normalmente são realizados os ensaios de circuito aberto e de curto-circuito. Embora existam outros tipos de ensaios, estes são os mais tradicionais e relativamente simples de serem realizados. Por isso, o assunto discutido nesta seção é extremamente importante para a sua formação profissional.

Dessa forma, vamos retomar a situação do programa de estágio que você participa. Nessa etapa do seu trabalho você foi encaminhado para ser treinado em máquinas síncronas, que são empregadas principalmente como geradores síncronos.

A sua primeira tarefa junto dessa equipe será a de estudar o circuito equivalente da máquina síncrona e determinar os valores dos parâmetros da máquina por meio dos ensaios a vazio e curto circuito. Assim, foram realizados os ensaios com uma máquina de 30 kVA, 220 V, seis polos e 60 Hz, com enrolamento ligado em Y, e os seguintes valores foram obtidos:

Quadro 4.1 | Característica de circuito aberto

V_{fase} (V)	82,13	89,6	97,1	104	112	119	125	127
I_f (A)	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 4.2 | Característica de curto circuito:

I_f (A)	1,5	1,8
I_a (A)	78,75	94,14

Fonte: elaborado pelo autor.

Com esses valores, como você determinaria os valores da reatância síncrona não saturado e saturado na tensão nominal?

No decorrer desta seção você irá adquirir os conhecimentos necessários para traçar as características de circuito aberto e de curto-circuito da máquina e, por meio delas, calcular os valores das reatâncias síncronas. Por isso, sugerimos particular empenho e dedicação nas atividades que forem propostas. Não deixe também de ser curioso de forma a ampliar os seus conhecimentos na literatura recomendada. Bom trabalho!

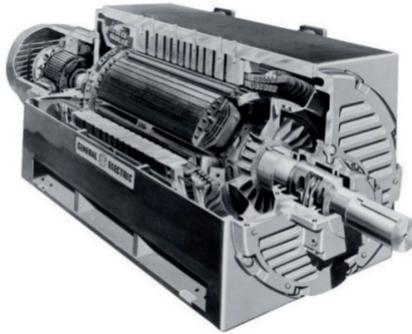
Não pode faltar

A máquina síncrona, assim como a máquina de indução, é uma máquina elétrica rotativa de corrente alternada. Por causa disso, são encontradas semelhanças entre esses dois tipos de máquinas. A principal semelhança está no estator: construtivamente o estator da máquina síncrona é idêntico ao da máquina de indução. Os enrolamentos do estator são enrolamentos trifásicos (um circuito de armadura) que quando alimentados com tensão trifásica produzem um campo magnético girante. O mesmo ocorre com as máquinas assíncronas de indução. Assim como na máquina de indução, esses enrolamentos estão dispostos com uma diferença angular de 120° , podendo ser conectados em configuração estrela ou triângulo.

Contudo, o rotor da máquina síncrona apresenta diferenças construtivas em relação à máquina de indução, o que leva também a uma diferença importante relacionada a seu princípio de funcionamento. A máquina síncrona, de forma diferente do que acontece na máquina assíncrona, possui um rotor com um enrolamento de campo que é alimentado com corrente contínua, mediante uma excitatriz, por meio de escovas deslizantes sobre anéis coletores que giram com o rotor, de forma a surgir um fluxo CC e criando polos magnéticos no rotor. Uma corrente contínua circula no enrolamento, produzindo um campo magnético unidirecional no entreferro, aproximadamente senoidal, devido à rotação. Esse fluxo também pode ser gerado por um conjunto de ímãs, comumente utilizado em máquinas síncronas de ímãs permanentes. A Figura 4.1 mostra uma foto de uma máquina síncrona de grande porte. A excitatriz é montada sobre o eixo do

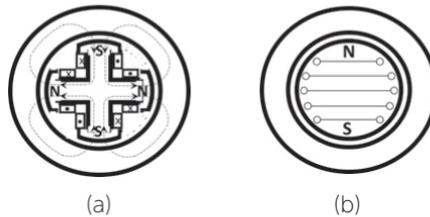
rotor. Podemos encontrar as máquinas síncronas com rotor de polos salientes e com polos lisos. Um esquema desses dois tipos de máquinas é mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.1 | Máquina síncrona de polos salientes



Fonte: Chapman (2013, p. 196).

Figura 4.2 | Estrutura do rotor da máquina síncrona (a) polos salientes (b) polos lisos



Fonte: elaborada pelo autor.



Assimile

Em rotores de polos salientes, verifica-se um espaço variável nas faces polares. Podemos identificar esse tipo de rotor pelo seu diâmetro grande e comprimento pequeno, e normalmente, o eixo é vertical. As máquinas primárias do gerador síncrono de polos salientes fornecem potência ao eixo da máquina e são turbinas de alta inércia, como as turbinas hidráulicas. Por conta disso, a velocidade é baixa e, conseqüentemente, o rotor deve ter muitos polos considerando a frequência de 60 Hz da rede na qual ele deve ser conectado.

Já as máquinas de polos lisos é um tipo de máquina caracterizada por possuir um rotor de pequeno diâmetro, grande comprimento e eixo na posição horizontal, de forma que as bobinas no rotor são distribuídas uniformemente, sendo normalmente utilizadas como geradores em usinas termoelétricas, por exemplo, nas quais as fontes primárias de energia são as turbinas a vapor ou a gás. Essas turbinas possuem baixa inércia rotacional e, dessa forma, a velocidade do rotor pode ser muito alta, de forma que o rotor pode ter poucos polos.

A velocidade síncrona de rotação de um motor síncrono é dada como uma relação entre a frequência da rede elétrica e o número de polos da máquina. De forma análoga, se utilizamos a máquina como gerador elétrico, a velocidade de rotação do eixo é determinada pela turbina, e o número de polos é fixo. Para saber qual será a frequência da tensão gerada, podemos isolar a frequência elétrica da equação da velocidade síncrona, conforme Equação 4.1.

$$n_s = 120 \frac{f_s}{P} \rightarrow f_s = \frac{n_s \times P}{120} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Assim, de forma a ter um gerador com frequência fixa (normalmente a frequência padrão da rede elétrica, que no caso do Brasil é 60 Hz), máquinas de turbinas com altas velocidades requerem um número menor de polos que as máquinas de baixas velocidades. Quando comparamos a máquina síncrona com a máquina assíncrona, vemos que uma das diferenças marcantes está no fato de que na primeira a velocidade do rotor (velocidade mecânica) é idêntica àquela dos campos girantes (velocidade elétrica). Essa diferença está estampada na denominação da própria máquina: máquina síncrona.



Exemplificando

Considere um gerador síncrono de 16 polos conectado à rede elétrica de 60 Hz. Qual deve ser a velocidade que a turbina deve ser controlada para garantir o sincronismo do gerador com a rede? Que tipo de gerador é esse?

Resolução:

Substituindo os valores de número de polo e frequência, conseguimos obter a velocidade de rotação do rotor:

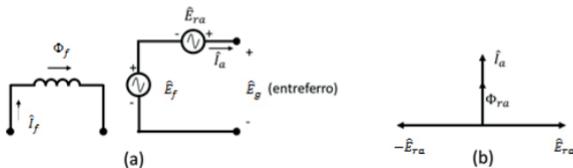
$$n_s = 120 \frac{60}{16} = 450 \text{ rpm}$$

Este provavelmente é um gerador de polos salientes, pois possui um número elevado de polos e uma rotação baixa da turbina.

Para o estudo da máquina síncrona em regime permanente, precisaremos desenvolver um modelo para o circuito equivalente. Por simplicidade, os conceitos serão apresentados com base em uma máquina de **polos lisos**. Esse circuito permite uma análise adequada das características de performance da máquina em regime permanente.

Vamos inicialmente considerar uma das fases da máquina. O circuito representativo da máquina pode ser definido como um circuito de excitação, correspondente ao circuito do rotor, e um circuito do enrolamento de armadura, correspondente ao circuito do estator, conforme é possível observar na Figura 4.3 (a), na qual também é exposto o diagrama fasorial das correntes e tensão na Figura 4.3 (b).

Figura 4.3 | Circuito representativo da máquina síncrona (a) Tensões na máquina síncrona; (b) diagrama fasorial das tensões



Fonte: adaptada de Sen (1996, p. 307).

A corrente de campo \hat{i}_f produz um fluxo Φ_f no entreferro, enquanto a corrente no estator \hat{i}_a (armadura) produz um fluxo Φ_a . O fluxo Φ_a no estator pode ser dividido nas componentes de fluxo de reação de armadura (Φ_{ra}), que é produzido no entreferro e está

ligado ao enrolamento de campo, e no fluxo de dispersão (Φ_{al}). O fluxo do enrolamento de campo produz uma tensão \hat{E}_f , enquanto que o fluxo de reação de armadura produz uma tensão \hat{E}_{ra} . Assim, a tensão resultante induzida no enrolamento do estator devido aos fluxos no entreferro é dada por \hat{E}_g , que é definida na Equação 4.2.

$$\hat{E}_g = \hat{E}_f + \hat{E}_{ra} \quad \text{Eq. 4.2}$$



Refleta

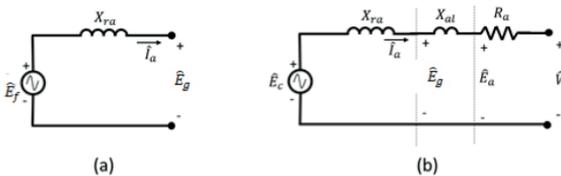
Como é possível obter a tensão gerada pelo campo em função das tensões terminais e de reação de armadura?

No diagrama fasorial ilustrado na Figura 4.3 (b), verifica-se que a tensão \hat{E}_{ra} está atrasada em 90° do fluxo Φ_{ra} . Também verifica-se que a corrente \hat{I}_a está atrasada em 90° do fasor de $-\hat{E}_{ra}$. Essa tensão pode ser representada como uma queda de tensão sobre uma reatância X_{ra} , denominada de reatância de reação da armadura (ou reatância de magnetização). Portanto, pode-se substituir a tensão \hat{E}_{ra} por $-j\hat{I}_a X_{ra}$ na Equação 4.2, obtendo-se a Equação 4.3.

$$\hat{E}_f = \hat{E}_g + j\hat{I}_a X_{ra} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Com base na Equação 4.3 podemos obter um circuito equivalente com a reatância X_{ra} , como mostrado na Figura 4.4 (a). Na Figura 4.4 (b), o circuito completo da máquina síncrona inclui o enrolamento do estator, com a resistência do enrolamento (R_a) e a reatância de dispersão do enrolamento (X_{al}).

Figura 4.4 | Desenvolvimento do circuito equivalente da máquina síncrona (a) com a reatância X_{ra} e (b) com a resistência R_a e reatância X_{al}



Fonte: adaptado de Sen (1996, p. 307).



É interessante saber mais sobre as indutâncias presentes na máquina síncrona. Uma indutância importante é a indutância mútua entre o enrolamento de campo e o enrolamento de uma fase ϕ qualquer, pois a partir desse valor pode-se determinar o valor da tensão gerada fazendo:

$$E_{\phi f} = \frac{2\pi f L_{\phi f} I_f}{\sqrt{2}}$$

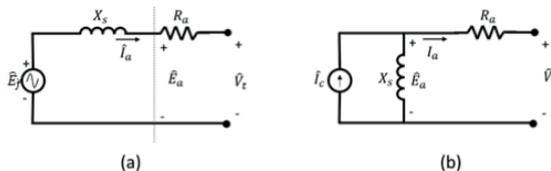
Para saber mais, sugerimos a leitura da Seção 5.2 do livro da referência a seguir:

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014. p. 265-269.

Combinando as reatâncias de dispersão e de reação da armadura, tem-se o valor da reatância síncrona ($X_s = X_{ra} + X_{al}$). A reatância síncrona leva em conta o fluxo total, tanto o de dispersão quanto o de magnetização, que são produzidos pela corrente no enrolamento do estator (armadura). Os valores de R_a e X_s são definidos para diferentes potências das máquinas síncronas e, normalmente, são definidos em valores por unidade (pu). Um valor de impedância de 0,1 pu significa que, para um valor de corrente nominal percorrendo o enrolamento, a queda de tensão será de cerca de 0,1 da tensão nominal.

O circuito equivalente com a reatância síncrona é apresentado na Figura 4.5 (a). Note que devido à convenção adotada para a corrente (saindo da máquina), o circuito está descrito para a operação como gerador. No modo de operação como motor, a corrente terá o sentido oposto. A Figura 4.5 (b) mostra um circuito equivalente alternativo, utilizando o equivalente Norton do circuito.

Figura 4.5 | Circuito equivalente da máquina síncrona (a) circuito equivalente convencional (b) circuito com equivalente Norton



Fonte: adaptada de Sen (1996, p. 307).

Na condição de operação síncrona, a corrente e o fluxo concatenado na armadura possuem comportamento senoidal, variando com o tempo. Se usarmos, por exemplo, o esquema da Figura 4.5 (a), podemos escrever a equação da tensão:

$$\hat{V}_t = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_f \quad \text{Eq. 4.4}$$

A obtenção dos parâmetros da máquina síncrona pode ser feita por meio dos ensaios de circuito aberto e de curto-circuito. A seguir detalharemos como cada tipo de ensaio é feito.

Iniciaremos discutindo a característica da máquina na operação em vazio (cav), que pode ser obtida pelo ensaio de circuito aberto. Esse tipo de ensaio é realizado com a máquina síncrona, quando ela está funcionando na velocidade síncrona, sem estar conectada a nenhuma carga. Ou seja, nesse caso, teremos um circuito aberto nos terminais da máquina, o que traz como consequência que a tensão terminal é igual à tensão gerada. Para ajudar nessa conclusão, reveja a Equação 4.4, para a situação em que a corrente é igual a zero.

A Figura 4.6 mostra a curva de saturação a vazio e nela podemos notar a existência de uma região linear, conhecida como linha de entreferro, em que não há o efeito da saturação. Nessa região a excitação é o valor assumido pela corrente de campo suficiente para gerar a tensão nos terminais da máquina.

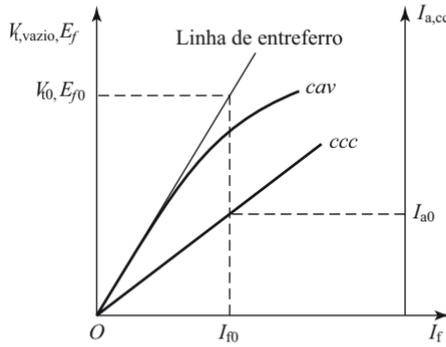
A curva se dobra para baixo devido ao efeito da saturação. Nessa região, a relutância do caminho magnético da máquina aumenta e a efetividade da corrente de campo diminui. Por esse motivo, seria necessária uma corrente de campo maior para produzir a mesma tensão nos terminais da máquina.

É importante destacar que a potência mecânica para que a máquina atinja a velocidade síncrona durante o ensaio de circuito aberto corresponde às perdas rotacionais em vazio. Se não houver excitação, as perdas são devido ao atrito e ventilação. Se houver a excitação, o valor das perdas por atrito e ventilação se somam às perdas no núcleo. Na velocidade síncrona, as perdas por atrito e por ventilação são constantes, enquanto que as perdas no núcleo variam conforme o fluxo que é proporcional à tensão em vazio.

Outra característica que devemos levantar é a característica de curto-circuito (ccc), por meio do ensaio de curto-circuito. Esse ensaio consiste em colocar a máquina girando em velocidade

nominal, por meio de outra máquina acoplada ao seu eixo, zerar novamente a corrente de campo, curto-circuitar os terminais da máquina e medir a corrente de armadura a cada incremento da corrente de campo. A característica sob curto-circuito da máquina síncrona está mostrada na Figura 4.6 e estabelece a relação entre a corrente de terminal de curto-circuito e a corrente de campo.

Figura 4.6 | Característica do ensaio de circuito aberto (cav) e curto-circuito (ccc) da máquina síncrona



Fonte: Umans (2014, p. 277).

Se nos retomarmos da Equação 4.4, fazendo a tensão terminal igual à zero (curto-circuito) e adotarmos o sentido de referência do tipo gerador, teremos a Equação 4.5.

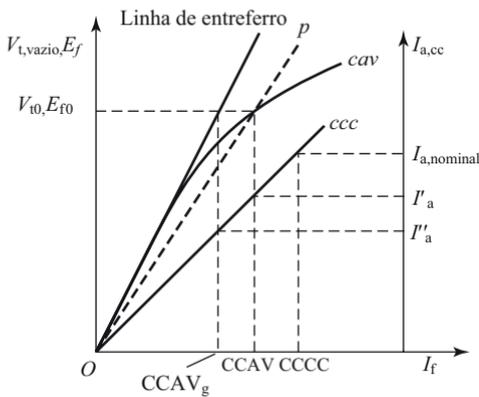
$$\hat{E}_f = \hat{I}_a (R_a + jX_s) \quad \text{Eq. 4.5}$$

A obtenção dos parâmetros da máquina síncrona pode ser feita por meio da análise das características levantadas nos ensaios. A reatância síncrona não saturada pode ser obtida considerando o valor da tensão em vazio e a corrente de campo para essa tensão, por meio de uma relação simples encontrada na linha de entreferro obtida da característica em vazio. A corrente de armadura para essas condições em curto-circuito pode ser obtida da característica de curto-circuito, conforme mostra a Figura 4.6. Posteriormente, calcula-se a reatância não saturada conforme Equação 4.6.

$$X_{s,ns} = \frac{E_{f0}}{I_{a0}} \quad \text{Eq. 4.6}$$

Podemos, entretanto, considerar os valores nominais de tensão terminal e corrente de armadura, pois esses valores são normalmente referidos como valores de base. Assim, se levantarmos a curva em valores por unidade, poderíamos simplesmente localizar os valores nas curvas tais que teremos $V_{t,nominal} = 1,0 \text{ pu.}$ e $I_{a,nominal} = 1,0 \text{ pu.}$ Para evidenciar importantes parâmetros da máquina síncrona, observe a curva característica na Figura 4.7.

Figura 4.7 | Característica do ensaio de circuito aberto (cav) e curto-circuito (ccc) da máquina síncrona para cálculo das reatâncias não saturada e saturada



Fonte: Umans (2014, p. 279).

Nesta curva temos a linha tracejada que vai da origem, passando pelo ponto de tensão nominal da característica a vazio, que representa a característica de magnetização da máquina síncrona.

Quando a corrente de campo assume o valor CCAV (corrente de campo a vazio), obtém-se, por meio da curva da figura, a corrente de armadura de curto-circuito (I'_a) e a tensão nominal de fase da armadura ($V_{t,nominal}$). A relação dessas grandezas resulta na reatância síncrona saturada X'_s , conforme Equação 4.7

$$X'_s = \frac{V_{t,nominal}}{I'_a} \quad \text{Eq. 4.7}$$

Pode-se usar um raciocínio análogo para a determinação da reatância não saturada ($X_{s,ns}$) usando-se o valor CCAVg, corrente de campo correspondente à tensão nominal na linha de entreferro e

a I_a^r na característica de curto-circuito. Dessa forma obteremos a Equação 4.8, que nada mais é que a Equação 4.6 escrita de uma forma diferente para valores específicos.

$$X_{s,ns} = \frac{V_{t,nominal}}{I_a^r} \quad \text{Eq. 4.8}$$

O valor CCCC (corrente de campo em curto-circuito) é o valor atingido pela corrente de campo, para determinar a corrente nominal na armadura.

Uma vez determinada a reatância síncrona, faz-se importante também determinar, mesmo que aproximadamente, a resistência do enrolamento. A resistência pode ser determinada aplicando uma tensão CC nos enrolamentos enquanto a máquina se conserva em regime permanente e medindo o fluxo de corrente. Esse método anula o valor da reatância dos enrolamentos, uma vez que a tensão usada é contínua durante o processo de medição. Assim, a impedância dos enrolamentos ficará reduzida à sua parte resistiva.



Faça você mesmo

Considerando os valores da curva característica obtidos em por unidade e considerando as Equações 4.7 e 4.8, obtenha as seguintes relações para as reatâncias saturada e não saturada da máquina síncrona:

$$X_s = \frac{CCCC}{CCAV}$$

$$X_{s,ns} = \frac{CCCC}{CCAV_g}$$

Outra relação usada para descrever as máquinas síncronas é a razão de curto-circuito (RCC). Esse parâmetro é definido como a razão entre a corrente de campo requerida para gerar a tensão nominal a vazio e a corrente de campo requerida para gerar a corrente nominal de armadura em curto-circuito, conforme descrito na Equação 4.9:

$$RCC = \frac{CCAV}{CCCC} \quad \text{Eq. 4.9}$$

É possível demonstrar que essa grandeza é o inverso do valor por unidade da reatância síncrona aproximada em saturação que foi calculada usando a Equação 4.7.

Sem medo de errar

A sua primeira tarefa com essa equipe será a de estudar o circuito equivalente da máquina síncrona e determinar os valores dos parâmetros da máquina por meio dos ensaios a vazio e curto circuito. Assim, foram realizados os ensaios com uma máquina de 30 kVA, 220 V, seis polos e 60 Hz, com enrolamento ligado em Y, e os seguintes valores foram obtidos:

Quadro 4.3 | Característica de circuito aberto

V_{fase} (V)	82,13	89,6	97,1	104	112	119	125	127
I_f (A)	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 4.4 | Característica de curto circuito

I_f (A)	1,5	1,8
I_a (A)	78,75	94,14

Fonte: elaborado pelo autor.

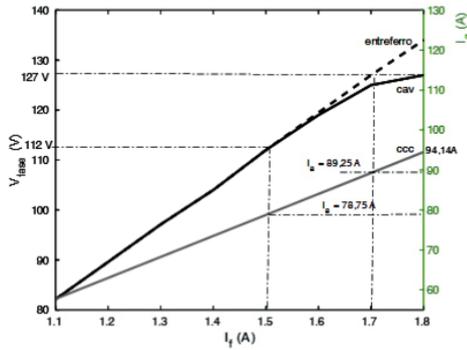
Com esses valores, como você determinaria os valores da reatância síncrona não saturado e saturado na tensão nominal?

Primeiramente, cabe calcular a corrente nominal será dada por:

$$I_{a,nominal} = \frac{30.000}{\sqrt{3} \times 220} = 78,75 \text{ A} \quad \text{Eq. 4.10}$$

Verifica-se que a corrente nominal foi utilizada para obter as medições no ensaio de curto-circuito como mostrado no Quadro 4.4. Analisando esse quadro, verificamos que a característica de curto-circuito é uma reta. Dessa forma, podemos plotar a característica de circuito aberto traçando a linha do entreferro, conforme mostra a Figura 4.8.

Figura 4.8 | Análise das características do ensaio de circuito aberto (cav) e curto-circuito (ccc)



Fonte: elaborado pelo autor.

Para calcular a reatância síncrona não saturada podemos utilizar qualquer ponto da linha do entreferro e a corrente de armadura associada a ela, assim temos:

$$X_{s,ns} = \frac{112}{78,75} = 1,42 \Omega/\text{fase} \quad \text{Eq. 4.11}$$

Para o cálculo da reatância síncrona saturada, utilizamos o valor da tensão nominal, e a corrente de armadura associada a ela no ensaio de curto circuito:

$$X_s = \frac{127}{94,14} = 1,35 \Omega/\text{fase} \quad \text{Eq. 4.12}$$

Em valores por unidade, as reatâncias também podem ser calculadas. Analisando as características, podemos identificar as seguintes correntes:

$$CCCC = 1,5 \text{ A}, CCAVg = 1,7 \text{ A} \text{ e } CCAV = 1,8 \text{ A} \quad \text{Eq. 4.13}$$

Então podemos calcular:

$$X_{s,ns} = \frac{CCCC}{CCAVg} = \frac{1,5}{1,7} = 0,8824 \text{ pu} \quad \text{Eq. 4.14}$$

$$X_s = \frac{CCCC}{CCAV} = \frac{1,5}{1,8} = 0,8333 \text{ pu} \quad \text{Eq. 4.15}$$

Assim, as reatâncias síncronas da máquina puderam ser obtidas com sucesso. Esses parâmetros são de extrema

importância para o estudo e análise da máquina em regime permanente. Dessa forma, você tem as informações necessárias para, posteriormente, analisar as características de potência e torque da máquina.

Avançando na prática

Determinação das indutâncias saturadas e não saturadas

Descrição da situação-problema

Suponha que um engenheiro na empresa em que você trabalha lhe mostre um relatório com os resultados de um ensaio a vazio realizado em um gerador síncrono trifásico de 60 Hz. Nesse relatório lê-se que uma tensão nominal a vazio de 13,8 kV é produzida por uma corrente de campo de 300 A. O engenheiro chama a atenção para o fato de que, extrapolando a linha de entreferro a partir de um conjunto de medidas feitas na máquina, pode-se mostrar que a corrente de campo correspondente a 13,8 kV sobre a linha de entreferro é 260 A. O engenheiro pede sua ajuda para calcular os valores, saturado e não saturado, da indutância mútua entre o enrolamento de campo e o enrolamento de uma das fases do motor. Esse cálculo é importante pois, de posse dos parâmetros da máquina síncrona, é possível analisar o comportamento da máquina em regime permanente. Como você procederia para fazer este cálculo?

Resolução da situação-problema

Vamos começar realizando o cálculo da tensão de armadura de fase, pois o valor de 13,8 kV é tipicamente de uma tensão nominal de linha para a máquina trifásica. Assim, teremos a seguinte tensão por fase. Por exemplo, para a fase A teremos:

$$E_{af} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 7,97 \text{ kV} \quad \text{Eq. 4.16}$$

Agora precisaremos da expressão que relacione a indutância mútua com a tensão de fase gerada na armadura, com a frequência do sinal de alimentação e com a corrente de campo conforme a seguir:

$$L_{af} = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{2\pi f I_f} \quad \text{Eq. 4.17}$$

Essa expressão foi apresentada anteriormente de forma que para a região de saturação, podemos calcular:

$$L_{af,saturada} = \frac{\sqrt{2} \times 7970}{2\pi \times 60 \times 300} = 99,66 \text{ mH} \quad \text{Eq. 4.18}$$

E da mesma forma, para a região não saturada:

$$L_{af,saturada} = \frac{\sqrt{2} \times 7970}{2\pi \times 60 \times 260} = 114,99 \text{ mH} \quad \text{Eq. 4.19}$$

Concluídos os cálculos, podemos ver o efeito da saturação que reduz o valor da indutância mútua saturada a aproximadamente 86,67% do seu valor não saturado. Outra observação importante é que quanto menor essa indutância mútua, maior é o valor da corrente de campo para se atingir o valor nominal da tensão na armadura da máquina.

Faça valer a pena

1. Na teoria que trata das máquinas síncronas, tratamos da tensão gerada internamente. A indutância mútua entre o enrolamento de campo e o enrolamento de uma fase qualquer da máquina pode nos dar informações suficientes para determinar a tensão gerada com base nas variáveis que são definidas, como a frequência do campo magnético girante.

Além da frequência, qual a outra grandeza diretamente responsável pela tensão gerada na máquina síncrona?

- Tipo do rotor.
- Conjugado do rotor.
- Tensão nos terminais.
- A corrente de campo.
- A corrente de armadura.

2. As máquinas síncronas são as máquinas mais utilizadas como fontes de geração de energia elétrica. Mais de 90% de toda a energia elétrica gerada é proveniente de usinas hidrelétricas, termoelétricas ou nucleares (ANEEL, 2018) e nessas aplicações os geradores síncronos são amplamente utilizados.

Com relação às máquinas síncronas, analise as afirmativas e assinale a afirmativa correta:

- I. O rotor da máquina síncrona é alimentado por uma fonte CC e está livre para girar entre os polos do estator.
- II. A estrutura construtiva do rotor é igual à da máquina de indução com gaiola de esquilo.
- III. O rotor gira na velocidade síncrona, dada em função do número de polos da máquina.

- a) I e II estão corretas apenas.
- b) I e III estão corretas apenas.
- c) I apenas está correta.
- d) II apenas está correta.
- e) III apenas está correta.

3. A rotação de um motor síncrono em rotações por minuto é diretamente proporcional à frequência da rede elétrica a qual o motor está conectado. O motor síncrono recebe esse nome porque a velocidade de rotação é constante e igual à velocidade síncrona, que é a velocidade de rotação do campo magnético girante da máquina, ou seja, existe um sincronismo entre campo nos enrolamentos do estator e do rotor.

Assinale a alternativa correta quanto às características das máquinas síncronas de corrente alternada:

- a) Nas máquinas síncronas, o enrolamento do rotor é chamado de armadura.
- b) O condensador síncrono é uma aplicação típica da máquina síncrona operando como gerador.
- c) As máquinas com poucos polos e baixa velocidade em geral têm o rotor de polos salientes.
- d) Em rotores de polos salientes verifica-se um espaço variável nas faces polares.
- e) Máquinas com poucos polos e baixa velocidade em geral têm o rotor de polos lisos.

Seção 4.2

Ângulo de carga em regime permanente

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção continuaremos analisando o comportamento da máquina síncrona. Estaremos agora mais interessados em analisar as características da máquina em operação em regime permanente. Dessa forma, a análise do ângulo de carga da máquina e de sua potência fornecida é de extrema importância. A aplicação da máquina síncrona é mais usual como gerador elétrico e, por conta disso, faremos a análise considerando esse modo de operação. Contudo, as conclusões que chegaremos podem ser facilmente estendidas para a máquina na operação como motor.

Para contextualizar nosso estudo, vamos continuar trabalhando com a máquina síncrona de 30 kVA, 220 V, seis polos e 60 Hz que analisamos anteriormente. Você se lembra que encontramos uma impedância saturada de 0,8334 pu? Na próxima etapa dos ensaios, a equipe deseja operar a máquina como gerador síncrono conectado à um sistema externo. A máquina síncrona será acionada no eixo para funcionar como gerador e será ligada a um sistema externo cuja reatância equivalente é de 0,1 p.u e cuja tensão é 1.0 p.u considerando como base os valores do gerador. A equipe deseja calcular a potência máxima que pode ser fornecida para o sistema externo se a tensão interna do gerador for mantida no valor nominal. Você seria capaz de ajudar a equipe nessa tarefa?

Nesta seção investigaremos a característica de torque e potência elétrica da máquina. Inicialmente desenvolveremos uma equação que relacione essas duas variáveis e posteriormente analisaremos a equação de forma a obter as curvas características de operação. Também faremos uma pequena introdução sobre a teoria de eixos direto e de quadratura de forma a analisar a máquina de polos salientes. Dessa forma, ao final desta seção você será capaz de aplicar os conhecimentos para realizar a tarefa que lhe foi delegada. Para isso, sugerimos dedicação e que você realize todas as atividades propostas. Bons estudos!

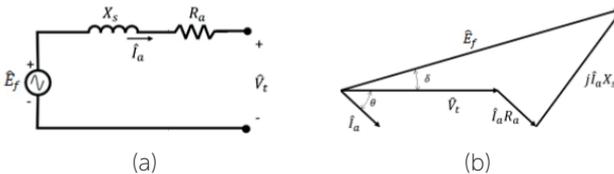
Não pode faltar

A partir do circuito equivalente da máquina síncrona, os diagramas fasoriais que mostram as relações das tensões e correntes na máquina podem ser obtidos dependendo da operação da máquina como gerador ou como motor. Para isso, vamos retomar a representação do circuito equivalente da máquina conforme mostra a Figura 4.9.

Com base no circuito por fase, ilustrado na Figura 4.9, podemos descrever a Equação 4.20 que corresponde à equação da malha do circuito equivalente do gerador. Tomando a tensão terminal (\hat{V}_t) como referência, os fasores das demais tensões são dispostos conforme mostra o diagrama fasorial apresentado na Figura 4.9. Devido à convenção adotada para a corrente \hat{I}_a , a Equação 4.20 descreve um gerador síncrono.

$$\hat{E}_f = \hat{V}_t + \hat{I}_a R_a + j\hat{I}_a X_s = E_f \angle \delta \quad \text{Eq. 4.20}$$

Figura 4.9 | Máquina síncrona de polos lisos: (a) circuito equivalente; (b) diagrama fasorial



Fonte: elaborada pelo autor.

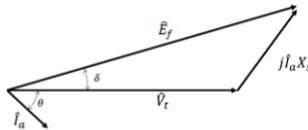


Assimile

Na Figura 4.9, pode-se observar o diagrama fasorial para representação da operação da máquina como gerador. O ângulo δ entre a tensão de excitação \hat{E}_f e a tensão terminal \hat{V}_t é denominado ângulo de potência (ou ângulo de carga) da máquina síncrona. Nesse caso, observa-se que o ângulo de potência é maior que zero e conseqüentemente a potência ativa também será positiva. Quanto maior for o ângulo de potência, maior será a potência transferida. Ainda, enquanto \hat{E}_f for maior que \hat{V}_t teremos que a potência reativa será positiva e dizemos que a máquina opera sobre-excitada. Do contrário, dizemos que a máquina opera subexcitada, ou seja, quando a magnitude da tensão \hat{E}_f for menor que a magnitude da tensão terminal \hat{V}_t .

Nas máquinas de potência elevada a reatância síncrona é muito maior que a resistência do enrolamento do estator e, por conta disso, a queda de tensão na resistência do enrolamento do estator é muito menor que a queda de tensão na reatância síncrona. Dessa forma, a queda de tensão na resistência pode ser desprezada para aproximar o diagrama fasorial da máquina a um diagrama triangular de tensões da forma, como podemos verificar na Figura 4.10.

Figura 4.10 | Diagrama fasorial da máquina síncrona de polos lisos desprezando R_a



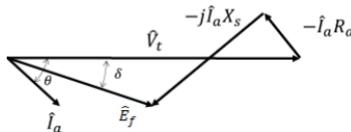
Fonte: elaborada pelo autor.

Tomando novamente como base o circuito por fase definido na Figura 4.9(a), mas invertendo o sentido da corrente \hat{I}_a (entrando na máquina), temos a convenção adotada para o comportamento de um motor síncrono e, então, podemos descrever a Equação 4.21.

$$\hat{E}_f = \hat{V}_t - \hat{I}_a R_a - j\hat{I}_a X_s = |\hat{E}_f| \angle -\delta \quad \text{Eq. 4.21}$$

Como motor, temos o diagrama fasorial representado na Figura 4.11. Nele, observa-se que o ângulo de potência será menor que zero e conseqüentemente a potência ativa é negativa, ou seja, a máquina absorve potência da alimentação. Quanto menor for o ângulo de potência nesse caso, menor será a transferência de potência ativa.

Figura 4.11 | Diagrama fasorial para a máquina síncrona no modo motor



Fonte: elaborada pelo autor.



Reflita

Como é possível obter o valor do fator de potência com base nos diagramas fasoriais apresentados?



Exemplificando

Uma máquina síncrona opera com o ângulo de potência maior que zero e a tensão de campo menor que a tensão terminal. Com base nessas informações, qual a situação de excitação e o modo de operação da máquina?

Resolução:

Se o ângulo de potência é maior que zero, a máquina síncrona opera como gerador elétrico. Com base na tensão de excitação, podemos dizer se a máquina opera sobre-excitada ou subexcitada. Se a tensão de excitação é maior que a tensão terminal, a máquina está sobre-excitada; e se a tensão de excitação é menor que a tensão terminal, a máquina está subexcitada.

A característica principal da máquina síncrona é a operação em uma velocidade constante. Como motor, é usualmente conectada a uma fonte de tensão fixa. Para operação como gerador síncrono, uma fonte primária de potência mecânica é acoplada ao eixo da máquina, mas existe um limite de potência ativa que a máquina é capaz de entregar em seus terminais. De forma análoga, para os motores síncronos, existe um limite de torque mecânico que a máquina é capaz de entregar em seu eixo, sem que ocorra a perda de sincronismo da máquina com a rede.

Retornando à análise do circuito por fase, em que \hat{V}_t é uma tensão de fase fixa (rede elétrica, por exemplo), a potência complexa por fase da máquina é definida na Equação 4.22.

$$S = P + jQ = \hat{V}_t \hat{I}_a^* \quad \text{Eq. 4.22}$$

Se escrevermos a corrente conjugada teremos a forma como expressa a Equação 4.23, onde Z_s é a impedância dada pela resistência de armadura e pela reatância síncrona, ou seja $Z_s = R_a + jX_s$:

$$\hat{I}_a^* = \left(\frac{\hat{E}_f - \hat{V}_t}{Z_s} \right)^* = \left(\frac{\hat{E}_f}{Z_s} \right)^* - \left(\frac{\hat{V}_t}{Z_s} \right)^* = \left(\frac{|\hat{E}_f| \angle -\delta}{|Z_s| \angle -\theta} \right) - \left(\frac{|\hat{V}_t| \angle 0^\circ}{|Z_s| \angle -\theta} \right)$$

$$\hat{I}_a^* = \frac{|\hat{E}_f|}{|Z_s|} \angle (\theta - \delta) - \frac{|\hat{V}_t|}{|Z_s|} \angle \theta \quad \text{Eq. 4.23}$$

Para obter a equação da potência complexa (S) basta substituímos o valor da corrente na equação da potência, como é possível observar na Equação 4.24 e, posteriormente, desenvolver a equação separando as partes real e imaginária, as equações para a potência ativa, dada em Watts (W), e a potência reativa, dada em Volt-Ampere reativo (VAR). Podemos ainda assumir os fasores de tensão dados por $\hat{E}_f = E_f \angle \delta$ e $\hat{V}_t = V_t \angle 0^\circ$ conforme a Equação 4.25 e 4.26. Essas equações são dadas por fase.

$$S = \hat{V}_t \hat{I}_a^* = \frac{E_f V_t}{|Z_s|} \angle(\theta - \delta) - \frac{V_t^2}{|Z_s|} \angle \theta \quad \text{Eq. 4.24}$$

$$P = \frac{E_f V_t}{|Z_s|} \cos(\theta - \delta) - \frac{V_t^2}{|Z_s|} \cos(\theta) \quad \text{Eq. 4.25}$$

$$Q = \frac{E_f V_t}{|Z_s|} \sin(\theta - \delta) - \frac{V_t^2}{|Z_s|} \sin(\theta) \quad \text{Eq. 4.26}$$

Já vimos que a resistência de armadura pode ser desprezada pois o seu valor é menos significativo que o valor da reatância síncrona. Então, a impedância síncrona será dada apenas pela reatância síncrona. Além disso, já saberemos que o ângulo da impedância é igual a 90 graus, uma vez que Z_s se torna apenas igual à jX_s . Dessa forma, as equações das potências ativa e reativa podem ser manipuladas e simplificadas. Além disso, para obtermos a potência trifásica as equações devem ser multiplicadas por um fator de 3, conforme mostram as Equações 4.27 e 4.28. A potência trifásica corresponde também à potência do entreferro da máquina e por isso o torque desenvolvido em Newton-metro (Nm) pode ser dado dividindo a equação da potência trifásica pela velocidade síncrona da máquina, conforme mostra a Equação 4.29

$$P_{3f} = 3 \frac{E_f V_t}{X_s} \sin(\delta) \quad \text{Eq. 4.27}$$

$$Q_{3f} = 3 \frac{E_f V_t}{X_s} \cos(\delta) - 3 \frac{V_t^2}{X_s} \quad \text{Eq. 4.28}$$

$$T = \frac{P_{3f}}{\omega_s} = 3 \frac{E_f V_t}{\omega_s X_s} \sin(\delta) \quad \text{Eq. 4.29}$$

A curva característica da potência e do torque mecânico desenvolvido de acordo com o ângulo de potência pode ser visualizada na Figura 4.12 (a). Na Figura 4.12 (b) podemos observar

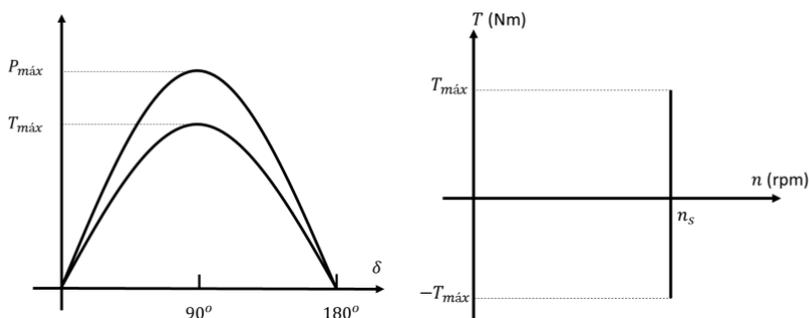
a característica de torque versus velocidade da máquina. Ademais, como a máquina opera com velocidade constante, a velocidade não varia para os valores de torque desenvolvidos. Observe que, pela característica dessas curvas, existe um torque e uma potência máxima e ambos ocorrem quando o ângulo de potência é igual a 90 graus e esse valor corresponde ao limite de estabilidade estático da máquina.



Refleta

Como é possível obter o valor da potência máxima e do torque máximo que uma máquina síncrona pode desenvolver?

Figura 4.12 | Característica da máquina síncrona: (a) potência e torque em relação ao de ângulo de carga, (b) curva de conjugado versus velocidade

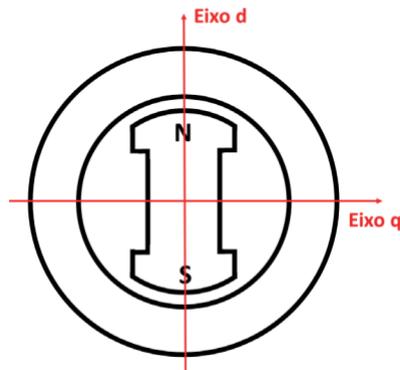


Fonte: adaptada de Sen (1996, p. 307).

Podemos notar que, se a tensão terminal é constante então a potência e o torque máximos podem ser controlados com a variação da tensão E_f , que por sua vez pode ser variada, fazendo o ajuste adequado do campo de excitação da máquina. Quando o motor síncrono sofre um incremento de carga que faça com que ele fique na iminência de perder o sincronismo, a corrente de campo pode ser aumentada, o que aumenta o torque eletromagnético e evita a perda de sincronismo. De forma análoga, no gerador síncrono, as variações de torque provenientes da fonte primária de potência no eixo podem ser contrabalanceadas fazendo o adequado ajuste da corrente de campo para evitar a perda de sincronismo da máquina.

Já vimos que as máquinas elétricas síncronas de rotor cilíndrico possuem polos lisos, em que o entreferro se apresenta de forma uniforme ao longo da superfície do rotor. Entretanto, nas máquinas síncronas de polos salientes o fluxo produzido depende da posição do rotor, uma vez que o entreferro não é constante, e consequentemente o valor das indutâncias da máquina variam conforme a posição do ângulo do rotor. Um exemplo de uma máquina de polos salientes, com 2 polos é mostrado na Figura 4.13, e nesta figura também estão representados dois eixos denominados o eixo direto (eixo d) e o eixo de quadratura (eixo q). Analisando a figura, verificamos que ao longo da superfície polar o entreferro tem menor espessura, o que implica em uma relutância magnética alta, de forma que o fluxo magnético na região da superfície polar (ao longo do eixo direto) é maior. O contrário ocorre para a região em que se encontra o eixo de quadratura, na região entre os polos. Com maior valor de entreferro, tem-se uma relutância magnética baixa, e consequentemente um menor fluxo magnético ao longo do eixo de quadratura. Com a diferença de fluxos para essas regiões, a reatância da máquina não pode ser representada apenas por uma reatância como é feito para a máquina de polos lisos.

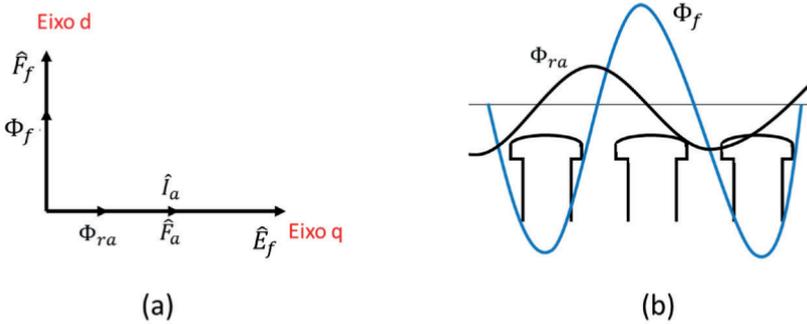
Figura 4.13 | Máquina de polos salientes



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 4.14 mostra a corrente do estator em fase com a tensão induzida, sendo que a FMM de campo está denotado pelo vetor \hat{F}_f e o fluxo Φ_f estão ao longo do eixo direto, enquanto que a FMM da armadura \hat{F}_a e o fluxo Φ_a estão ao longo do eixo de quadratura. As formas de onda dos fluxos estão também em quadratura.

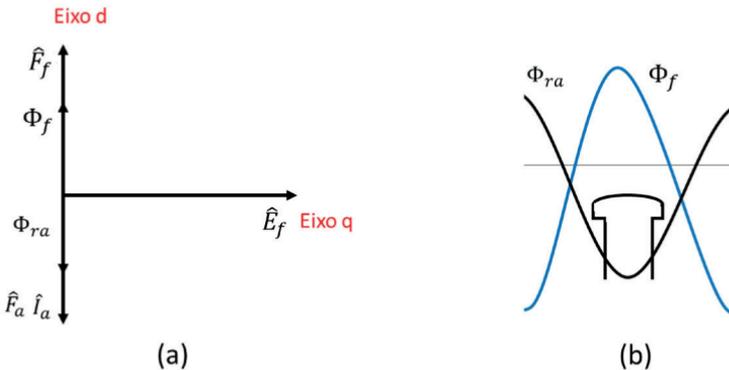
Figura 4.14 | Disposição dos fluxos quando corrente e tensão em fase: (a) diagrama fasorial, (b) forma de onda dos fluxos



Fonte: Sen (1996, p. 333).

Quando a FMM da armadura está defasada da tensão de excitação em 90 graus o fluxo produzido pela FMM da reação de armadura é maior em amplitude que o mesmo fluxo gerado no caso mostrado na Figura 4.14, como mostra a Figura 4.15. O fluxo devido à FMM da reação de armadura é maior quando está ao longo do eixo direto do que quando está ao longo do eixo de quadratura. Isso porque a relutância magnética no eixo direto é maior que no eixo q, conforme mencionado anteriormente. Conclui-se que a reatância devido à FMM de reação de armadura apresenta diferenças quando considerados o eixo direto e o eixo de quadratura das máquinas de polos salientes.

Figura 4.15 | Disposição dos fluxos quando corrente e tensão defasados: (a) diagrama fasorial, (b) forma de onda dos fluxos



Fonte: adaptada de Sen (1996, p. 333).

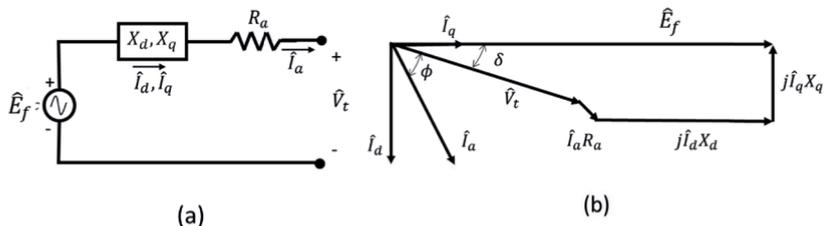
Dessa forma, a característica física da máquina de polos salientes implica em uma característica elétrica diferente da observada na máquina de polos lisos. Uma vez que a reatância representa a capacidade de gerar fluxo, pode-se concluir que a reatância de magnetização do eixo direto será diferente da reatância no eixo de quadratura. Essa diferença será representada no circuito equivalente da máquina.

Para representar essa diferença na reatância síncrona, pode-se dividir a corrente \hat{I}_a em duas componentes. Uma agindo ao longo do eixo d e uma agindo ao longo do eixo q. As componentes \hat{I}_d e \hat{I}_q produzem os fluxos Φ_{ad} e Φ_{aq} ao longo dos respectivos eixos d e q. Esses fluxos podem ser representados pela reatância de armadura de eixo direto (X_{ad}) e pela reatância de armadura de eixo de quadratura (X_{aq}). Conjuntamente com a reatância de dispersão da armadura X_{al} , a reatância síncrona de eixo direto e a reatância síncrona do eixo de quadratura (X_d, X_q), conforme mostra a Equação 4.30. É fácil concluir que $X_d > X_q$, pois a relutância magnética no eixo q é menor que no eixo d, devido à maior região de entreferro no eixo q. Tipicamente X_q é aproximadamente 50% ou 80% do valor de X_d (SEN, 1996).

$$\begin{aligned} X_d &= X_{ad} + X_{al} \\ X_q &= X_{aq} + X_{al} \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.30}$$

No circuito equivalente da máquina de polos salientes as duas reatâncias síncronas devem ser consideradas, assim como no diagrama fasorial. Na Figura 4.16(a) pode ser observada a representação do circuito equivalente na convenção de gerador, com as reatâncias síncronas de eixo direto e quadratura representados.

Figura 4.16 | Modo gerador : (a) circuito equivalente, (b) diagrama fasorial



Fonte: elaborada pelo autor.

A equação das tensões pode ser escrita conforme a equação 4.31.

$$\left| \hat{E}_f \right| \angle \delta = \hat{V}_t + \hat{I}_a R_a + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q \quad \text{Eq. 4.31}$$

Normalmente, o valor da resistência R_a pode ser desprezado, obtendo a Equação 4.32

$$\left| \hat{E}_f \right| \angle \delta = \hat{V}_t + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q \quad \text{Eq. 4.32}$$



Pesquise mais

Para aprofundar os seus estudos sobre a influência dos polos salientes nas características e parâmetros das máquinas síncronas, sugerimos a leitura atenta da Seção 6.6 da referência a seguir:

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014. p. 306-312

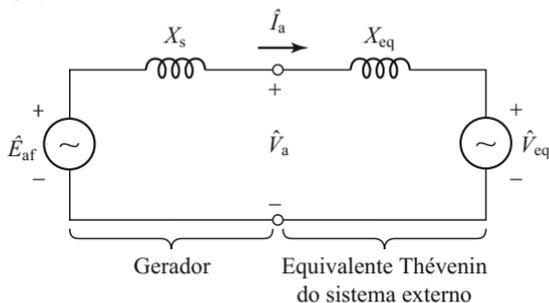
Este livro também é encontrado na biblioteca virtual, por meio do link a seguir: <<https://goo.gl/tFXEjk>>.

Sem medo de errar

Retomando os trabalhos com a máquina síncrona de 30 kVA, 220 V, seis polos e 60 Hz e reatância saturada de 0,8334 pu, iremos, agora, com os conhecimentos adquiridos nesta seção, realizar a tarefa que foi delegada a você. A sua equipe de ensaios deseja operar a máquina como gerador síncrono conectado a um sistema externo, cuja reatância equivalente é de 0,1 pu, e a tensão é 1.0 pu, considerando como base os valores do gerador. A máquina síncrona será acionada no eixo para funcionar como gerador e será ligada a um sistema externo. A equipe deseja calcular a potência máxima que pode ser fornecida para o sistema externo se a tensão interna do gerador for mantida no valor nominal.

Para iniciar a pensar em uma possível solução para essa tarefa, devemos lembrar que a máquina trifásica conectada a um sistema externo equilibrado pode ser analisada a partir do circuito equivalente de uma das fases. Vamos por exemplo, considerar o circuito da fase a da máquina síncrona conectada ao circuito equivalente de Thevenin do sistema externo, conforme mostra a Figura 4.17

Figura 4.17 | Ligação da máquina síncrona com um sistema externo



Fonte: Umans (2014, p. 297).

Ao considerar o circuito, temos que $\hat{E}_{af} = 1,0 \angle \delta$ pu, onde δ é o ângulo de potência da máquina. Além disso, tomaremos a tensão do sistema externo como referência e então $\hat{V}_{eq} = 1,0 \angle 0^\circ$ pu. As reatâncias mostradas no circuito são $X_s = 0,83$ e $X_{eq} = 0,1$ pu. Assim a característica de potência da máquina pode ser escrita pela Equação 4.33.

$$P = \frac{|\hat{E}_{af}| |\hat{V}_{eq}|}{X_s + X_{eq}} \sin(\delta) \quad \text{Eq. 4.33}$$

Nesse caso, como estamos lidando somente com valores por unidade não é necessário multiplicar por 3. A potência máxima é obtida quando o ângulo de potência é igual a 90 graus, e dessa forma teremos $\sin(\delta) = 1$, então:

$$P^{m\acute{a}x} = \frac{|\hat{E}_{af}| |\hat{V}_{eq}|}{X_s + X_{eq}} \quad \text{Eq. 4.34}$$

E substituindo os valores teremos:

$$P^{m\acute{a}x} = \frac{1 \times 1}{0,83 + 0,1} = 1,075 \text{ pu} \quad \text{Eq. 4.35}$$

Avançando na prática

Condensador síncrono

Descrição da situação-problema

O condensador síncrono é uma aplicação típica da máquina síncrona operando como motor. No entanto, nessa forma de

operação o motor gira em vazio, ou seja, sem carga em seu eixo. Assim, com o controle automático da corrente de campo pode-se injetar potência reativa para fazer o controle de tensão.

Tem-se um condensador síncrono com reatância síncrona de 5 Ohms ligado em 13.8 kV (linha) e injetando 20 MVar quando a corrente de campo é de 200 A. Desprezando a saturação, qual deve ser aproximadamente a corrente de campo para que o condensador injete apenas 10 MVar?

Resolução da situação-problema

Nessa forma de operação, o ângulo de potência da máquina é de 0 graus, ou seja, a corrente de armadura está perpendicular à tensão terminal. Pode-se escrever a seguinte equação:

$$E_a = V_t + I_a X_s \quad \text{Eq. 4.36}$$

Deve-se calcular as correntes para que se tenha 20 MVar e 10 MVar:

$$V_t I_a \text{sen}(90^\circ) = Q$$

$$\frac{13800}{\sqrt{3}} I_{a1} = \frac{20 \times 10^6}{3} \rightarrow I_{a1} = 836 \text{ A} \quad \frac{13800}{\sqrt{3}} I_{a2} = \frac{10 \times 10^6}{3} \rightarrow I_{a2} = 418 \text{ A} \quad \text{Eq. 4.37}$$

Para esses valores são obtidos os valores de E_a , a partir da Equação 4.36:

$$E_{a1} = V_t + I_{a1} X_s = \frac{13800}{\sqrt{3}} + 836 \times 5 = 12156,87 \text{ V} \quad \text{Eq. 4.38}$$

$$E_{a2} = V_t + I_{a2} X_s = \frac{13800}{\sqrt{3}} + 418 \times 5 = 10066,87 \text{ V}$$

Considerando a proporcionalidade de E_a com a corrente de campo, e desconsiderando a saturação magnética, pode-se fazer:

$$E_{a1} = K I_{f1} \rightarrow K = \frac{E_{a1}}{I_{f1}} = \frac{12156,87}{200} = 60,78 \quad \text{Eq. 4.39}$$

$$E_{a2} = K I_{f2} = 60,78 \times I_{f2} = 10066,87 \rightarrow I_{f2} = 165,62 \text{ A}$$

Faça valer a pena

1. A partir do circuito equivalente da máquina síncrona, podem ser obtidos os diagramas fasoriais que mostram as relações das tensões e correntes na máquina síncrona. Tomando a tensão terminal por referência angular e observando os diagramas fasoriais, se a máquina opera como gerador o ângulo entre a tensão terminal e tensão gerada é _____, e na operação como motor esse ângulo é _____. Se a máquina está sobre-excitada

a tensão gerada é _____ que a tensão terminal, e se a máquina está subexcitada a tensão gerada é _____ que a tensão terminal.

Assinale a alternativa que completa corretamente as lacunas do texto.

- a) Negativo, positivo, menor, igual.
- b) Positivo, negativo, maior, menor.
- c) Negativo, positivo, maior, menor.
- d) Positivo, negativo, igual, maior.
- e) Negativo, positivo, menor, maior.

2. Para geradores de potência elevada, tem-se que a reatância síncrona é muito maior que a resistência do enrolamento. Dessa maneira, a queda de tensão na resistência do enrolamento do estator pode ser desprezada. Contudo, considere uma máquina síncrona de baixa potência que não pode ter a resistência do enrolamento do estator desprezado.

Nessas condições, assinale a alternativa verdadeira.

- a) O torque máximo da máquina ocorre quando o ângulo de potência é exatamente igual a zero.
- b) A potência máxima da máquina ocorre quando o ângulo de potência é exatamente igual a 180 graus.
- c) O torque máximo da máquina ocorre quando o ângulo de potência é exatamente igual a 90 graus.
- d) Ao operar como gerador, o torque mecânico fornecido no eixo da máquina não pode exceder o torque máximo, ou a máquina perderá o sincronismo com a rede.
- e) Ao operar como motor, o ângulo de máxima potência transmitida é exatamente 90 graus.

3. Considere as informações a seguir acerca da máquina síncrona:

- I. Se a tensão de campo induzida é maior que a tensão terminal, a máquina opera sobre-excitada.
- II. Se a tensão de campo induzida é menor que a tensão terminal, a máquina é dita subexcitada.
- III. Em máquinas de polos salientes, a reatância síncrona é a mesma em qualquer região do rotor.

Estão corretas as seguintes afirmações:

- a) I e II.
- b) II e III.
- c) I e III.
- d) I, II e III.
- e) Nenhuma alternativa está correta.

Seção 4.3

Operação do gerador síncrono

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta última seção continuaremos analisando o comportamento da máquina síncrona em regime permanente, focando um pouco mais na operação como gerador. Desta vez, temos o interesse em analisar as características de capacidade de fornecimento de potência da máquina quando operando como gerador. Logo, iremos estudar as curvas de capacidade e curva V do gerador síncrono. Essas curvas apresentam uma grande importância, principalmente se a máquina está inserida dentro de um grupo gerador que inclui, entre outros aspectos, a capacidade de fornecimento de potência mecânica de uma turbina.

Para ilustrar esses aspectos vamos continuar imaginando o programa de estágio que você participa. Nessa etapa do seu trabalho você foi encaminhado para ser treinado em máquinas síncronas. Você está trabalhando com a máquina síncrona de 30 kVA, 220 V, seis polos e 60 Hz. Você se lembra que encontramos uma impedância saturada de 0,8334 pu e posteriormente analisamos a característica do ângulo de carga em regime permanente para determinar a potência máxima que o gerador consegue fornecer a um sistema externo? Imagine agora que essa máquina será inclusa em um grupo gerador, cuja turbina tem capacidade de fornecimento de 27 kW. Além disso, considere que o fator de potência da máquina é de 0,9 atrasado. Sua tarefa agora é determinar a curva de capacidade do grupo gerador (em valores pu), considerando, ainda, que a excitação mínima que a máquina deve ter para superar o torque de partida seja de 0,3 pu. Como você descreveria essa curva de capacidade? Quais são os pontos importantes a se considerar nessa curva?

No decorrer da seção serão apresentados os principais conceitos sobre a curva de capacidade do gerador síncrono

e, dessa forma, você estará apto a dimensionar essa curva, indicando a região de operação do gerador. Entretanto, para isso é necessário que você se dedique ao conteúdo, realizando um estudo atento e tirando todas as suas dúvidas com o seu professor. Bons estudos e sucesso em sua vida profissional!

Não pode faltar

Nesta seção, vamos nos concentrar nos geradores síncronos, que correspondem à principal aplicação das máquinas síncronas. De fato, a grande parte das usinas hidrelétricas e termoeletricas que geram a maior parte da energia consumida no planeta fazem uso desse tipo de gerador.

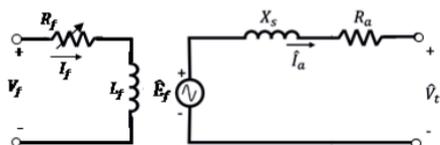
Sabemos que as máquinas síncronas recebem essa nomenclatura porque a frequência elétrica produzida está em sincronismo com a velocidade mecânica de rotação do rotor. O rotor de um gerador síncrono consiste basicamente em um eletroímã que é alimentado por uma corrente contínua. O posicionamento do rotor, sob giro constante, determina a direção do campo magnético presente no rotor. A relação entre a velocidade elétrica de rotação dos campos magnéticos do rotor da máquina e a frequência elétrica do sinal do estator foi descrita, na seção 1 desta unidade, na Equação 4.1, que repetiremos aqui:

$$n_s = 120 \frac{f_s}{P} \rightarrow f_s = \frac{n_s \times P}{120} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Onde: se f_s é a frequência elétrica (em Hz); n_s é a velocidade mecânica do rotor nas máquinas síncronas em rpm (por consequência, é a velocidade do campo magnético ali presente) e P é o número de polos da máquina.

O circuito equivalente típico da máquina síncrona funcionando como um gerador é apresentado na Figura 4.18. Cabe destacar que nessa imagem vemos apenas uma das fases da máquina. Diferente dos outros circuitos apresentados anteriormente, neste estamos representando o circuito de campo da máquina.

Figura 4.18 | Circuito equivalente do gerador síncrono



Fonte: elaborada pelo autor.

É muito importante entender o significado físico do sentido da corrente de armadura, pois ele determina a forma de operar da máquina síncrona: como motor ou como gerador. Assim, se o sentido da corrente de armadura é saindo da máquina, ela está operando como gerador. Do contrário, ou seja, se a corrente de armadura tem o sentido entrando na máquina, então a operação é como motor.

Dessa forma, em estudos anteriores conseguimos aprofundar os conceitos das diversas potências presentes no funcionamento do gerador síncrono, entendendo que a potência aparente (S), por unidade, é obtida pela Equação 4.40.

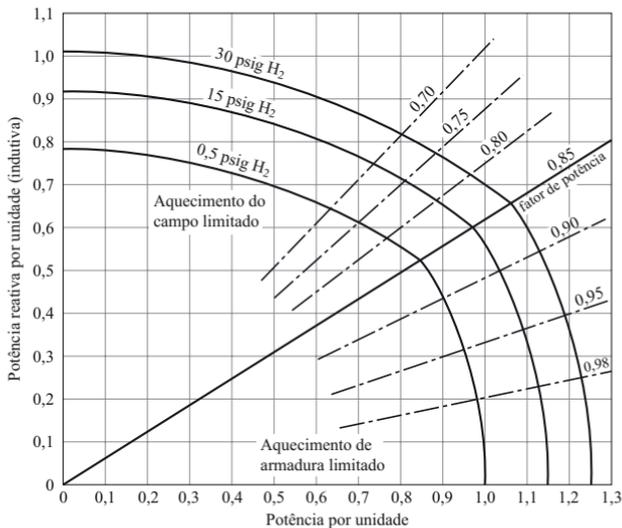
$$S = \hat{V}_t \hat{I}_a \quad \text{Eq. 4.40}$$

Entre as grandezas mais importantes para o completo entendimento do funcionamento da máquina síncrona, certamente estão a tensão de terminal, a corrente de campo (que controla a tensão gerada internamente) e a corrente de armadura. No caso do gerador síncrono, juntaremos a essas grandezas o rendimento e o fator de potência, e suas interdependências.

Nas máquinas elétricas, tipicamente, temos fator de potência atrasado (ou ainda, um fator de potência indutivo). Uma vez entendido o princípio de funcionamento, passamos a identificar os valores nominais de um gerador síncrono, que geralmente são descritos pela potência aparente máxima, a qual poderá ser demandada continuamente da máquina. Essa potência geralmente é apresentada em kVA ou em MVA. Outro dado apresentado no conjunto de especificações da máquina é o fator de potência. Adicionalmente, os geradores síncronos apresentam, tipicamente, uma tensão de terminal que atinge valores que variam de 95% a 105% do valor de tensão nominal da máquina. Geralmente, entre os valores requeridos pela carga, a potência ativa e a tensão de alimentação são as principais. Contudo, deve-se saber atentar para o fato de que a

potência reativa garante o fator de potência adequado (normalmente entre 80% e 90%) e que não existam fatores limitantes na operação da máquina. Assim surge a necessidade de se determinar qual é a curva de capacidade do gerador síncrono, que pode ser entendido como sendo um conjunto de curvas que delimitam a região de operação segura dessa máquina. A Figura 4.19 mostra um conjunto típico de curvas de capacidade para um turbogerador de grande porte refrigerado com hidrogênio. Podemos observar uma grande quantidade de informação apresentada na curva, de forma que saber interpretá-la é crucial para operar corretamente a máquina.

Figura 4.19 | Curva de capacidade de um turbogerador típico



Fonte: Umans (2014, p. 294).



Pesquise mais

Note na Figura 4.19 as regiões de aquecimento dos enrolamentos e as curvas que mostram as pressões do hidrogênio que está sendo usado para resfriar a máquina. Entre outros fatores limitantes, saber essas informações contribui para evitar uma sobrecarga do gerador. Para obter mais informações, leia a página 294 da referência a seguir:

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.

A curva de capacidade é uma fonte de dados importante para os profissionais que lidam cotidianamente com as máquinas síncronas. Aos profissionais que lidam com os projetos de sistemas de potência cabe a tarefa de, ao planejar modificações dos sistemas, identificar qual o conjunto de máquinas pode atender à demanda estabelecida pela carga presente no sistema. Ao operador de máquinas cabe interpretar as curvas de capacidade e verificar periodicamente se a resposta requerida pelas alterações de carga cabe dentro das regiões de operação recomendadas para uma máquina ou para um conjunto delas.

Vamos desenvolver o raciocínio e o equacionamento para a obtenção das curvas de capacidade de um gerador síncrono, e estabelecer a sua região de operação, sob condições de tensão de terminal e corrente de armadura constantes, buscando o valor máximo permitido pelas limitações de aquecimento dos enrolamentos. Assim, buscaremos estabelecer o valor constante corresponde de potência aparente de saída. Já temos em mente o que a Equação 4.40 descreve a potência aparente de uma fase de um gerador síncrono. Vamos estabelecer outra relação para essa potência aparente, conforme Equação 4.41.

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{Eq. 4.41}$$

Onde: P representa a potência ativa por unidade e Q representa a potência reativa.

Se fizermos uma breve revisão no conteúdo de geometria analítica, veremos que a Equação 4.41 pode ser representada em um plano com os eixos P e jQ em quadratura e para cada coordenada desse eixo se obtém um valor de S. Aqui, vamos assumir que a tensão de terminal é mantida constante, dessa forma, S se manterá constante se a corrente de armadura se mantiver constante. Assim sendo, concluímos que haverá um aquecimento no enrolamento de armadura dessa máquina devido às perdas ohmicas. Essa conclusão servirá para delimitarmos a primeira região da curva de capacidade. Vamos escrever a relação entre as potências ativa P, a reativa Q e a aparente S como descrito na Equação 4.42:

$$P - jQ = \hat{V}_t \hat{I}_a \quad \text{Eq. 4.42}$$

E, baseando-nos no circuito equivalente da máquina, obtemos a Equação 4.43:

$$\hat{i}_a = \frac{\hat{E}_f - \hat{V}_t}{jX_s} \quad \text{Eq. 4.43}$$

Reescrevemos a Equação 4.41, chegamos à Equação 4.44:

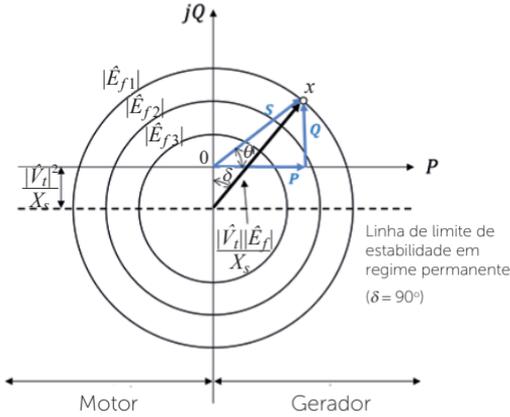
$$\begin{aligned} P - jQ = \hat{V}_t \hat{i}_a &\rightarrow P - jQ = \hat{V}_t \left(\frac{\hat{E}_f - \hat{V}_t}{jX_s} \right) \rightarrow P - jQ = \left(\frac{\hat{E}_f \hat{V}_t - |\hat{V}_t|^2}{jX_s} \right) \rightarrow P - jQ = \frac{\hat{E}_f \hat{V}_t}{jX_s} - \frac{|\hat{V}_t|^2}{jX_s} \\ \rightarrow P - jQ &= -j \frac{\hat{E}_f \hat{V}_t}{X_s} + j \frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s} \rightarrow P - jQ - j \frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s} = -j \frac{\hat{E}_f \hat{V}_t}{X_s} \\ \rightarrow P - j \left(Q + \frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s} \right) &= -j \frac{\hat{E}_f \hat{V}_t}{X_s} \quad \text{Eq. 4.44} \end{aligned}$$

Calculando-se os módulos de ambos os membros da equação anterior, obtemos a Equação 4.45.

$$\begin{aligned} \left| P - j \left(Q + \frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s} \right) \right| &= \left| -j \frac{\hat{E}_f \hat{V}_t}{X_s} \right| \rightarrow \sqrt{P^2 + \left(Q + \frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s} \right)^2} = \frac{|\hat{E}_f| |\hat{V}_t|}{X_s} \\ P^2 + \left(Q + \frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s} \right)^2 &= \left(\frac{|\hat{E}_f| |\hat{V}_t|}{X_s} \right)^2 \quad \text{Eq. 4.45} \end{aligned}$$

Mais uma vez, se buscarmos na geometria analítica veremos que a Equação 4.45 é a equação de uma circunferência com centro em $(0, \frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s})$. Para uma máquina de polos lisos, a potência complexa pode ser representada no plano complexo conforme mostra a Figura 4.20. Nessa figura os círculos representam o local possível da potência para diferentes valores de tensão de excitação. O local do ponto de operação está em um círculo de raio equivalente ao valor máximo da potência ativa. Para um determinado ponto de operação (x), o ângulo de potência e o ângulo do fator de potência estão indicados. A linha tracejada representa o local da potência máxima na qual o limite de estabilidade em regime permanente se encontra.

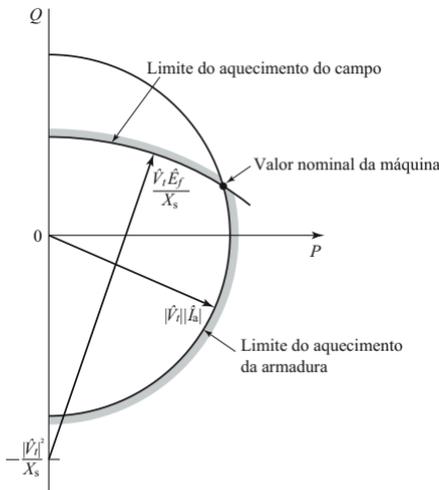
Figura 4.20 | Localização da potência no plano complexo



Fonte: adaptada de Sen (1996, p. 325).

Essa região circular define a região de operação segura mediante o limite de aquecimento do enrolamento de campo. Uma vez que temos duas circunferências, estabelecemos como ponto de operação, portanto, os valores nominais da máquina (S e fator de potência), o ponto de interseção das duas circunferências.

Figura 4.21 | Traço das circunferências para determinação da curva de capacidade



Fonte: adaptada de Umans (2014, p. 295).



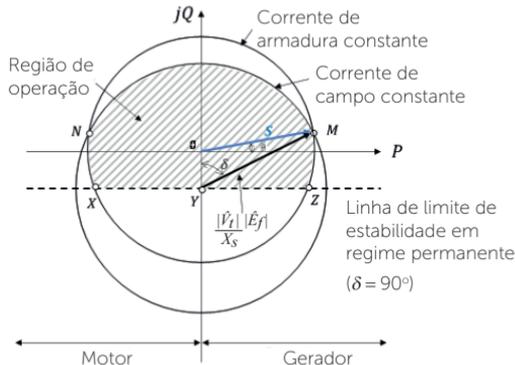
Aqui se colocou como fatores limitantes para uma operação segura do gerador síncrono os limites de potência permitidos pelos aquecimentos dos enrolamentos de campo e de armadura. Se uma turbina for conectada para fornecer potência mecânica ao eixo do gerador, que outros fatores limitantes teremos para a potência gerada?

Assim, a máquina síncrona não pode operar em qualquer um dos pontos dos círculos mostrados na figura anterior sem que os valores nominais se excedam. A região de operação da máquina está restrita a, basicamente, três fatores (SEN, 1996):

1. O aquecimento da armadura, determinada pela corrente de armadura.
2. O aquecimento do enrolamento de campo, determinado pela corrente de campo.
3. O limite de estabilidade em regime permanente.

Dessa forma, a curva de capacidade define a região e os limites da potência no plano complexo de potências, denotado por P e jQ , considerando uma tensão terminal constante, conforme mostra a Figura 4.22. Note que essa figura mostra os limites de operação tanto para a operação como gerador ($P > 0$) quanto para a operação como motor ($P < 0$).

Figura 4.22 | Curva de capacidade da máquina síncrona



Fonte: Sen (1996, p. 326).



Esse é um exemplo de como usar as curvas de capacidade para determinar os valores-limite de um gerador síncrono, trata-se de um exemplo adaptado de Umans (2014): considere um gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 100 MVA, 0,95 de fator de potência atrasado com uma reatância síncrona de 1,50 pu (por unidade) e CCAV = 500 A. Sabendo que o fator de potência nominal do gerador é determinado pela intersecção das curvas limites de aquecimento da armadura e do campo, calcule a corrente de campo máxima que pode ser fornecida ao gerador sem ultrapassar o limite de aquecimento do campo.

Resolução:

No ponto de intersecção das curvas limite (campo e armadura) temos que a tensão nominal de terminal é sempre unitária: 1,0 pu.

Dado que o fator de potência é 0.95 atrasado, então podemos definir o ângulo entre a corrente de armadura e tensão terminal como:

$$\theta = \cos^{-1} 0,95 = -18,95^\circ$$

Por consequência, a corrente de armadura pode ser escrita como:

$$\hat{I}_a = 1,0 \angle -18,39^\circ \text{ pu}$$

O fator de potência, estando a corrente atrasada, nos dá a informação de um ângulo de defasagem negativo. A equação de armadura ficará:

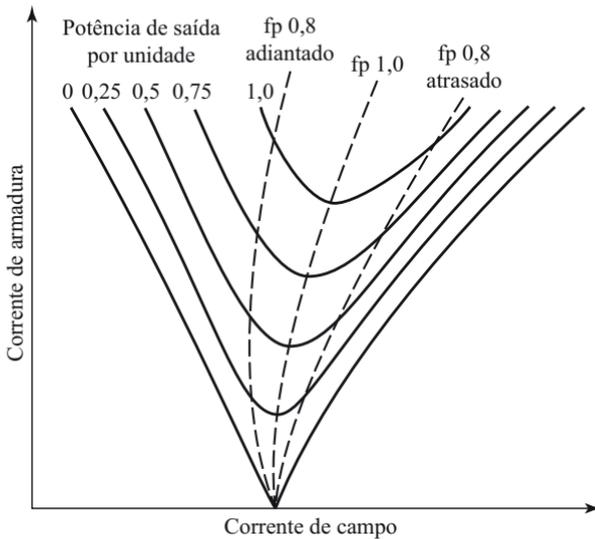
$$\begin{aligned} \hat{E}_f &= V_t + (R_a + jX_s)\hat{I}_a = 1,0 + (0,0 + j1,5)(1,0 \angle -18,39^\circ) \\ &= 1,0 + 1,5 \angle (90^\circ - 18,39^\circ) \\ &= 1,0 + 1,5 \angle (71,8^\circ) = 1,0 + 1,5 \angle (71,8^\circ) = 1,468 + j1,4249 = 1,468 + j1,4249 \\ &= 2,05 \angle 44,34^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Sendo assim, a corrente de campo máxima, que estabelece a tensão de armadura, obtida anteriormente, está relacionada com a Corrente de Campo A Vazio (CCAV) da seguinte forma:

$$I_{f,\max} = E_f \times \text{CCAV} = 2,05 \times 500 = 1,023 \text{ kA} .$$

Outro conjunto de curvas que nos auxilia na operação e na especificação de uma máquina síncrona é conhecido como curvas V. A Figura 4.23 mostra as curvas V de um gerador síncrono típico.

Figura 4.23 | Curvas V típicas de um gerador síncrono



Fonte: Umans (2014, p. 297).

As curvas V auxiliam na determinação do valor da excitação de campo, dentro de um perfil de fator de potência, quando se conhecem e são mantidas constantes a potência ativa de saída, requerida pela carga, e a tensão de terminal. Dessa forma, para um determinado aumento de carga, se é desejado manter um fator de potência atrasado, é necessário aumentar a corrente de excitação, e para manter um fator de potência adiantado deve-se ajustar a corrente de campo, subexcitando a máquina.

As linhas tracejadas na Figura 4.23 são as linhas que determinam fator de potência constante. Para entendermos melhor o significado das curvas V, busquemos auxílio nos diagramas fasoriais, em pu, de um gerador síncrono com fatores de potência unitário, adiantado e atrasado.

Observando as curvas e assumindo que a potência ativa (P) e a tensão de terminal $|\hat{V}_t|$ são mantidas constantes (requerimento da carga), temos a Equação 4.45, por meio da qual concluiremos que a projeção da corrente de armadura sobre a tensão de terminal ($|\hat{I}_a| \cos \theta$) é também constante.

$$P = |\hat{V}_t| |\hat{I}_a| \cos \theta \quad \text{Eq. 4.45}$$

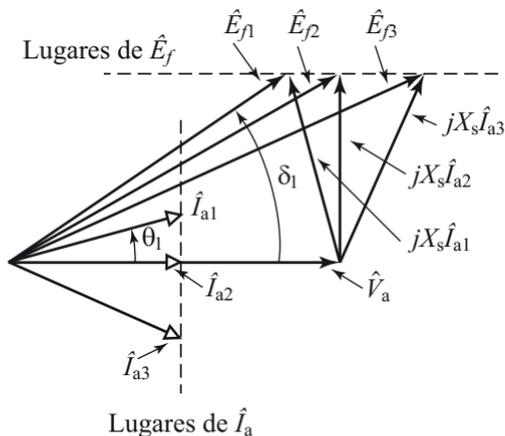
Assim, para cada variação de fator de potência ($\cos \theta$), haverá uma variação característica da corrente de armadura ($|\hat{I}_a|$) de forma a manter o valor de P. Na Figura 4.24 isso é verificado para três correntes de armadura \hat{I}_{a1} , \hat{I}_{a2} e \hat{I}_{a3} .



Assimile

Observe pelo diagrama fasorial apresentado na Figura 4.24 que quando o gerador opera com fator de potência adiantado ($\theta > 0$) a máquina se encontra subexcitada ($\hat{E}_r < \hat{V}_t$), enquanto que quando a máquina opera com fator de potência atrasado ($\theta < 0$), ela está sobreexcitada ($\hat{E}_r > \hat{V}_t$).

Figura 4.24 | Diagramas fasoriais de um gerador síncrono com fatores de potência diversos



Fonte: Umans (2014, p. 298).

Sem medo de errar

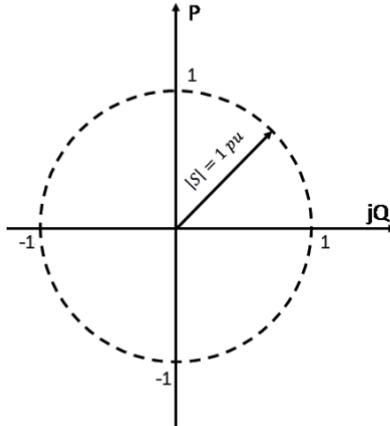
Vamos então retomar a situação em que você está trabalhando com a máquina síncrona de 30 kVA, 220 V, seis polos e 60 Hz, reatância síncrona de 0,8334 pu e essa máquina será inclusa em um grupo gerador, cuja turbina tem capacidade de fornecimento de 27 kW. Além disso, considere que o fator de potência da máquina é de 0,9 atrasado. Sua tarefa agora é determinar a curva de capacidade do grupo gerador (em valores pu), considerando ainda que a excitação mínima que a máquina deve ter para superar o torque de partida seja de 0,3 pu.

Para iniciar, devemos calcular a potência aparente em condições nominais:

$$|S| = |\hat{V}_t| |\hat{I}_a| = 1 \times 1 = 1,0 \text{ pu} \quad \text{Eq. 4.46}$$

Nesse caso podemos traçar a circunferência correspondente, centrada na origem do plano cartesiano das potências, conforme mostra a Figura 4.25.

Figura 4.25 | Curva de capacidade do gerador síncrono – Passo 1



Fonte: elaborada pelo autor.

Posteriormente, considerando o fator de potência nominal da máquina é possível obter a tensão E_f para traçar a curva correspondente ao limite determinado pela corrente de campo:

$$fp = 0,9 \Rightarrow \theta = -25,84^\circ$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_r &= \hat{V}_t + jX_s \hat{I}_a = 1,0 + j0,8334 \times 1,0 \angle -25,84^\circ \\ &= 1,56 \angle 28,82^\circ \end{aligned}$$

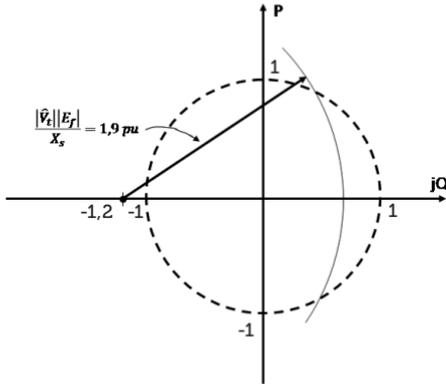
$$\frac{|\hat{E}_r| |\hat{V}_t|}{X_s} = \frac{1,56 \times 1,0}{0,8334} = 1,9 \text{ pu}$$

Eq. 4.47

Sabemos que esa curva está centrada nas coordenadas $(-1,2, 0)$,

pois $\frac{|\hat{V}_t|^2}{X_s} = \frac{1,0}{0,8334} = 1,2$. Note que os eixo P está na vertical e o eixo jQ na horizontal. Dessa forma, podemos traçar esse limite como na Figura 4.26.

Figura 4.26 | Curva de capacidade do gerador síncrono – Passo 2



Fonte: elaborada pelo autor.

Ainda, deve-se considerar mais dois limites: a potência máxima fornecida pela turbina e a excitação mínima da máquina. A potência da turbina será:

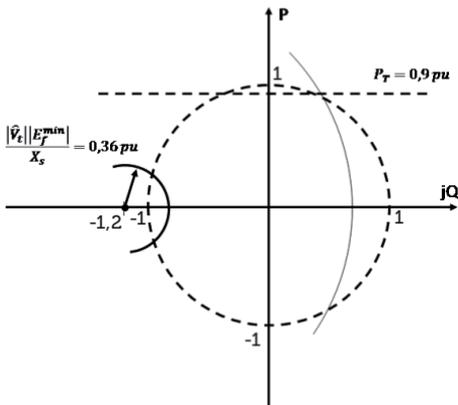
$$P_T = \frac{27}{30} = 0,9 \text{ pu} \quad \text{Eq. 4.48}$$

E considerando a excitação mínima, teremos:

$$\frac{|\hat{E}_r^{\min}| |\hat{V}_t|}{X_s} = \frac{0,3 \times 1,0}{0,8334} = 0,36 \text{ pu} \quad \text{Eq. 4.49}$$

Esses valores devem ser traçados no diagrama como mostra a Figura 4.27.

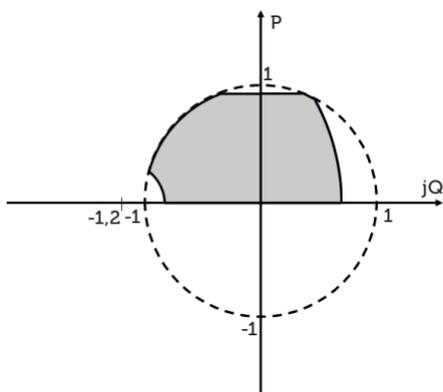
Figura 4.27 | Curva de capacidade do gerador síncrono – Passo 3



Fonte: elaborada pelo autor.

Assim a região de operação é definida como mostra a Figura 4.28, considerando que somente os valores de potência ativa positivos são considerados.

Figura 4.28 | Curva de capacidade do gerador síncrono – finalizado



Fonte: elaborada pelo autor.

Avançando na prática

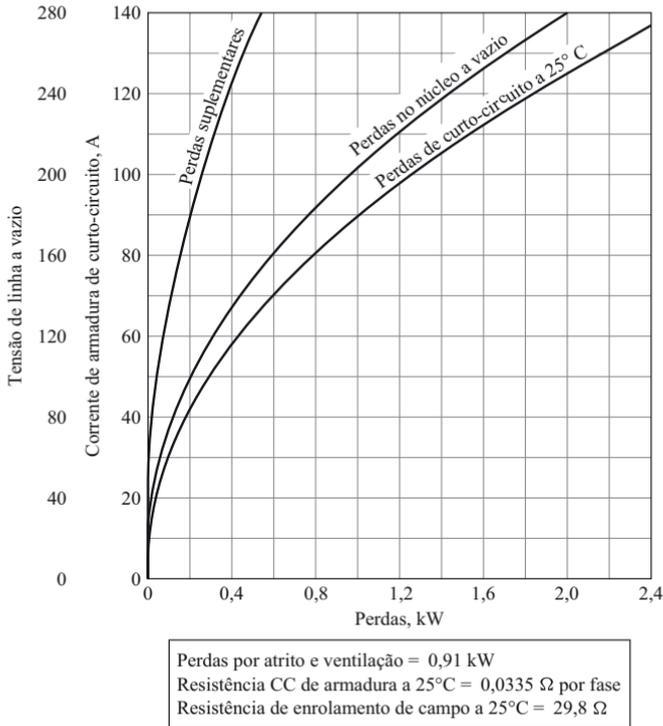
Calculando o rendimento de um gerador síncrono

Descrição da situação-problema

No estudo das máquinas elétricas rotativas, verificamos que devido as várias perdas típicas, o conhecimento do seu rendimento é fundamental. Como exemplos de perdas na máquina síncrona podemos citar as perdas ôhmicas nos enrolamentos, as perdas no núcleo, as perdas suplementares e as perdas mecânicas. Para auxiliar os profissionais que lidam com as máquinas elétricas, foram desenvolvidos procedimentos apropriados para se obter o rendimento das máquinas síncronas, devido à dificuldade de medição das perdas envolvidas. A Figura 4.29 apresenta um conjunto de curvas de ensaios feitos com um motor síncrono e as perdas medidas. Trata-se de um motor síncrono trifásico de 45 kVA, 220 V, 6 polos e 60Hz e reatância síncrona de 0,775 pu. Imagine que, como profissional na área de manutenção das máquinas em uma empresa, foi solicitado que você determine o rendimento do motor

síncrono com uma tensão de terminal de 220 V, uma corrente de armadura de 120 A e uma potência de entrada na sua armadura de 45 kVA, com um fator de potência 0,95 adiantado. Suponha que os enrolamentos de armadura e de campo estejam a uma temperatura de 75 graus Celsius. Para esse motor, considere que as perdas mecânicas são de 1 kW.

Figura 4.29 | Curvas de ensaios de um motor síncrono para determinação de perdas



Fonte: Umans (2014, p. 302).

Resolução da situação-problema

As perdas mecânicas de uma máquina elétrica geralmente estão relacionadas ao atrito e à ventilação da máquina. Assim, observando as curvas, vemos que as resistências de enrolamento foram obtidas para a temperatura de 25°C e precisamos corrigir para 75°C. Faremos isso da seguinte forma:

Calculamos a resistência do enrolamento de campo:

$$R_{f(75^{\circ}\text{C})} = \frac{234,5 + 75}{234,5 + 25} R_{f(25^{\circ}\text{C})} \rightarrow R_{f(75^{\circ}\text{C})} = \frac{234,5 + 75}{234,5 + 25} 29,8 \rightarrow R_{f(75^{\circ}\text{C})} = 35,54 \Omega \text{ Eq. 4.50}$$

Calculamos a resistência CC de armadura:

$$R_{a(75^{\circ}\text{C})} = \frac{234,5 + 75}{234,5 + 25} R_{a(25^{\circ}\text{C})} \rightarrow R_{a(75^{\circ}\text{C})} = \frac{234,5 + 75}{234,5 + 25} 0,0335 \rightarrow R_{a(75^{\circ}\text{C})} = 0,04 \Omega/\text{fase Eq. 4.51}$$

Posteriormente, temos que determinar a tensão gerada na armadura (em pu). Entretanto, devemos passar o valor de resistências para o sistema pu, dividindo o valor em Ohms pela resistência base:

$$Z_{base} = \frac{220^2}{45000} = 1,08 \Omega \rightarrow R_{a(\text{pu})} = \frac{0,04}{1,08} = 0,037 \text{ pu}$$

$$\hat{E}_f = 1,0 - (0,037 + j0,775)1,0 \angle 18,39^{\circ} = 1,42 \angle -31,79^{\circ} \text{ pu}$$

Eq. 4.52

Então determinamos as perdas na armadura e no campo:

$$P_f = I_f^2 R_f = (1,42 \times 2,84)^2 \times 35,64 = 0,579 \text{ kW}$$

$$P_a = I_a^2 R_a = (1,00)^2 \times 0,037 = 0,037 \text{ pu} = 0,037 \times 45 \text{ kVA} = 1,673 \text{ kW}$$

Eq. 4.53

Para a determinação das perdas suplementares, basta observar na curva da Figura 4.25 quando a corrente de armadura é 120 A, que resulta em 0,4 kW.

As perdas no núcleo correspondem ao valor na curva da Figura 4.21 quando a tensão de terminal é 220 A, ou seja, 1,2 kW.

As perdas totais, então, são dadas por: $0,579 + 1,673 + 0,4 + 1,2 + 1,0 = 4,852 \text{ kW}$.

A potência de entrada pode ser calculada utilizando o fator de potência:

$$P_{ent} = 0,95 \times 45 = 42,75 \text{ kW} \quad \text{Eq. 4.54}$$

A potência de saída corresponde à potência de entrada menos as perdas, ou seja:

$$P_{saida} = 42,75 - 4,852 = 37,90 \text{ kW} \quad \text{Eq. 4.55}$$

Finalmente, calculamos o rendimento:

$$\eta = \frac{P_{saida}}{P_{ent}} = \frac{37,90}{42,75} = 0,8865 \text{ ou } 88,65\% \quad \text{Eq. 4.56}$$

Faça valer a pena

1. Quando se localiza o ponto de operação da máquina síncrona no plano complexo das potências, esse ponto é definido por um raio de uma circunferência característica da tensão de armadura gerada. Entretanto, a máquina síncrona não pode operar em qualquer um dos pontos dos círculos que definem a circunferência sem que os valores nominais se excedam.

Com base na curva de capacidade da máquina síncrona, é correto afirmar que a região de operação da máquina será definida:

- a) Somente pelo limite de estabilidade em regime permanente.
- b) Somente pela corrente de armadura.
- c) Somente pela corrente de campo.
- d) Pelo limite de estabilidade em regime permanente e pela corrente de campo.
- e) Pelo limite de estabilidade em regime permanente, pela corrente de campo e pela corrente de armadura.

2. O entendimento do sentido da corrente de _____ é essencial para entender como a máquina pode funcionar como motor ou como gerador, independentemente da excitação da máquina. Assim, se o sentido dessa corrente é _____ da máquina, ela está operando como gerador. Do contrário, ou seja, se a corrente tem o sentido _____ na máquina, então a operação é como motor.

Assinale a alternativa correta que contém as palavras que, na ordem, completam corretamente o texto.

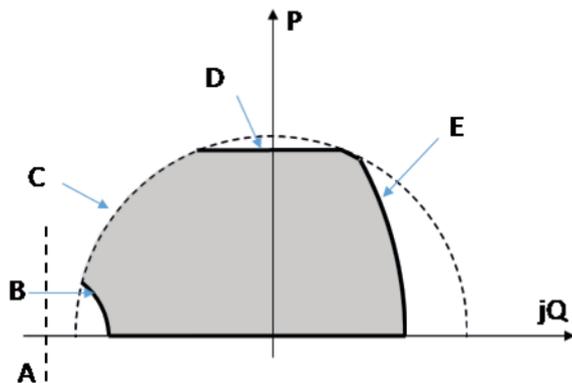
- a) Campo, saindo, entrando.
- b) Armadura, entrando, saindo.
- c) Campo, entrando, saindo.
- d) Armadura, saindo, entrando.
- e) Fuga, saindo, entrando.

3. A região de operação de um grupo gerador síncrono composto de máquina síncrona e turbina está restrita a, basicamente, cinco fatores:

- 1. O aquecimento da armadura, determinada pela corrente de armadura.
- 2. O aquecimento do enrolamento de campo, determinado pela corrente de campo.
- 3. O limite de estabilidade em regime permanente.
- 4. Potência máxima fornecida pela turbina.
- 5. Limite mínimo de excitação.

Sendo assim, observe a curva mostrada na Figura 4.30:

Figura 4.30 | Curva de capacidade do grupo gerador síncrono com limites de operação



Fonte: elaborada pelo autor.

Assinale a alternativa que correlaciona corretamente os números e as letras na figura.

- a) A – 1; B-5; C-3; D-4; E-2.
- b) A – 3; B-1; C-5; D-4; E-2.
- c) A – 4; B-5; C-1; D-3; E-2.
- d) A – 3; B-5; C-1; D-4; E-2.
- e) A – 3; B-1; C-5; D-2; E-4 .

Referências

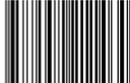
ANEEL. **BIG – Banco de informações da geração**. Disponível em: <<https://goo.gl/p1Xd4U>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução de Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013.

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley and Sons, 1996.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.

ISBN 978-85-522-1146-4



9 788552 211464 >