Conversão eletromecânica de energia

Conversão eletromecânica de energia

Sérgio de Paula Moreno Timoteo
Annete Faesarella

© 2017 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
Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico
Alberto S. Santana
Ana Lucia Jankovic Barduchi
Camila Cardoso Rotella
Cristiane Lisandra Danna
Danielly Nunes Andrade Noé
Emanuel Santana
Grasiele Aparecida Lourenço
Lidiane Cristina Vivaldini Olo
Paulo Heraldo Costa do Valle
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica
Álvaro Rodolfo Alkschbirs
André Luís Delvas Fróes
Hugo Tanzarella Teixeira

Editorial
Adilson Braga Fontes
André Augusto de Andrade Ramos
Cristiane Lisandra Danna
Diogo Ribeiro Garcia
Emanuel Santana
Erick Silva Griep
Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Timóteo, Sergio de Paula Moreno
T585c Conversão eletromecânica de energia / Sergio de Paula Moreno Timóteo, Annete Faesarella. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.
208 p.

ISBN 978-85-8482-826-5

1. Engenharia elétrica. 2. Energia elétrica. 3. Conversão eletromecânica. I. Faesarella, Annete. II. Título.

CDD 621.31

2017
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 | Componentes discretos, circuitos e materiais magnéticos 7

Seção 1.1 - Circuitos magnéticos 9
Seção 1.2 - Materiais magnéticos 25
Seção 1.3 - Componentes discretos usados em eletricidade 39

Unidade 2 | Conversores eletromecânicos, sistemas magnéticos, força e conjugado magnético 53

Seção 2.1 - Conversão eletromecânica de energia no campo elétrico e no campo magnético 55
Seção 2.2 - Sistemas de campo magnético 67
Seção 2.3 - Força e conjugado magnético 81

Unidade 3 | Indutores, circuitos trifásicos e transformadores de tensão e corrente 97

Seção 3.1 - Dispositivos e Circuitos Indutores 99
Seção 3.2 - Dispositivos e Circuitos Transformadores 117
Seção 3.3 - Circuitos trifásicos e transformadores de tensão e corrente 135

Unidade 4 | Conversores de corrente alternada, corrente contínua e introdução a máquinas elétricas. 155

Seção 4.1 - Conversores de corrente alternada 157
Seção 4.2 - Conversores de corrente contínua 175
Seção 4.3 - Introdução a máquinas elétricas 189

Palavras do autor

O universo de possibilidades que a vida cotidiana nos apresenta, em grande parte, foi construído pelo ser humano a partir do domínio da energia elétrica. Todo conhecimento relacionado à geração e à manipulação da eletricidade tem início no aprendizado das conversões eletromecânicas de energia. A proposta de estudo apresentada por essa disciplina parte da compreensão dos materiais magnéticos elementares e percorre os princípios básicos da conversão eletromecânica de energia, de forma ilustrada, rica em exemplos e boas práticas industriais. Ao final desse curso, o aluno terá compreendido como funciona a indústria das conversões eletromecânicas para a geração de energia, seus princípios matemáticos fundamentais teóricos e práticos e, além disso, terá adquirido alguma experiência em laboratório.

É importante salientar que os princípios de magnetismo e conversão eletromecânica de energia não se limitam à indústria de geração e cogeração de energia, mas se aplicam à computação, aos meios de transporte, às plantas de manufaturas industriais e às telecomunicações.

Para atingir esse objetivo, é de extrema importância que o aluno crie ou aperfeiçoe o hábito de estudar, sempre focando em possuir uma análise crítica em relação ao objeto de estudo, sem deixar lacunas em seu entendimento e em sua linha de raciocínio. Cada tópico será desenvolvido em uma lógica de começo, meio e fim, e cabe ao aluno identificar seus pontos fracos e fortes durante o entendimento e a absorção do conhecimento; para isso, faz-se necessária a interação entre o aluno e outros meios de informação disponíveis, como a internet, a consulta a colegas, a livros didáticos e a outras referências bibliográficas mencionadas na unidade, para que os desafios do aprendizado sejam vencidos. O verdadeiro conhecimento é adquirido sempre através do diálogo e da persistência e a colaboração interpessoal é mandatória para o bom desenvolvimento profissional em seu futuro próximo.

Esse livro está organizado da seguinte maneira: Na Unidade 1, estudaremos os componentes elétricos e magnéticos mais usados pela indústria, os materiais que fazem parte desses componentes e alguns circuitos básicos. Na Unidade 2, aprofundaremos nosso estudo acrescentando os fundamentos de conversão eletromagnética, incluindo alguns circuitos um pouco mais elaborados. Na sequência, a Unidade 3 trará aplicações como o circuito trifásico, os indutores e os transformadores de corrente e tensão. Nossa caminhada pelo mundo das conversões eletromecânicas será finalizada na Unidade 4 com o estudo dos

conversores das correntes alternada e contínua, seguidos de uma breve introdução às máquinas elétricas.

Por fim, gostaríamos de relembrar que o segredo do sucesso para atingir qualquer objetivo de vida é trabalhar duro. Inspire-se, crie metas, trace objetivos e nunca deixe de trabalhar de forma árdua, dia após dia, sem interrupção, pois somente assim suas ideias se tornarão realidade.

Componentes discretos, circuitos e materiais magnéticos

Convite ao estudo

Para iniciar nossa unidade de estudo, em primeiro lugar, convidamos você a fazer um exercício de imaginação. A partir de agora fazemos parte de uma equipe de desenvolvimento de plataformas para controle e automação de sistemas de geração de energia elétrica. Essa equipe está inserida em uma empresa do ramo de geração de energia e nossos clientes podem ser outras pequenas, médias ou grandes empresas.

Como todo bom cliente, um dos requisitos básicos dessas empresas, que é normalmente discutido antes da elaboração do projeto, é o custo do nosso produto, que deve ser sempre competitivo no mercado. Neste contexto, a seleção de materiais e de fornecedores para projetos, de uma forma geral, é uma prática comum e extremamente necessária em indústrias focadas em geração e cogeração de energia elétrica. O foco da empresa em que a equipe está inserida é desenvolver soluções para controle de velocidade em geração de energia.

Grande parte dos projetos desse tipo de indústria visa atender as demandas de pequeno, médio e grande porte relativas ao controle de geração e cogeração de energia. Dessa maneira, cabe ao profissional que atua diretamente nessa área a total compreensão dos materiais e componentes envolvidos no processo de fabricação dos elementos utilizados na montagem, por exemplo, de um painel elétrico para controle de uma turbina a gás ou necessários para a montagem de um rotor de uma turbina ou mesmo para a montagem de sistemas com ímãs permanentes. Também é essencial ao profissional que ele

tenha desenvolvido a habilidade de interpretar a documentação gerada pelos fornecedores de componentes. Cada componente possui uma especificação técnica, também conhecida como *datasheet*, tema em específico que será melhor desenvolvido nas unidades seguintes deste livro.

Vamos imaginar que nossa empresa está prestando serviços para uma indústria que possui um gerador de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis. A tarefa da equipe agora será desenvolver um projeto de circuito magnético para o controle de uma válvula que irá limitar a admissão de combustível em um gerador de acordo com a resposta de um sensor de carga elétrica. O cliente solicitará esclarecimentos ao longo do desenvolvimento e, ao final, um projeto completo do sistema.

Esta unidade tem como objetivo capacitar o aluno a entender e aplicar alguns dos princípios fundamentais de funcionamentos de alguns componentes discretos e materiais magnéticos, iniciando o estudo com uma introdução aos circuitos magnéticos, ao fluxo concatenado em um sistema, uma aplicação em circuitos com indutância magnética. Além disso, uma comparação entre circuitos magnéticos e circuitos elétricos também será feita para relembrarmos um pouco das disciplinas de Circuitos Elétricos.

Seção 1.1

Circuitos magnéticos

Diálogo aberto

Daremos início ao nosso projeto no contexto de uma empresa que desenvolve projetos para controle e automação em geração de energia. Vamos imaginar a seguinte situação: uma indústria que desenvolve projetos para controle de geradores de energia movidos a qualquer tipo de combustível (gás, diesel, eólico) precisa montar um circuito elétrico e um circuito magnético composto por um material magnético, um enrolamento com espiras e uma corrente de excitação conectada a esse material, para o controle de uma válvula que irá limitar a admissão de combustível em um gerador de acordo com a resposta de um sensor de carga elétrica.

Esse tipo de situação pode ser encontrada em qualquer ambiente em que seja necessário um gerador de energia elétrica; se olharmos, por exemplo, para uma indústria de pequeno porte, cada máquina no chão de fábrica consumirá uma quantidade de energia, porém, nem todas as máquinas operam ao mesmo tempo. Dessa forma, é necessário controlar a quantidade de combustível injetada em um gerador de acordo com a demanda energética instantânea, ou seja, de acordo com o número de máquinas em funcionamento simultâneo na fábrica.

Nesse momento podem surgir perguntas como: Como calcular a força magnética que uma válvula magnética suporta com base na intensidade do campo magnético ou do fluxo magnético dos componentes que fazem parte da válvula? Ou, ainda, qual é a equação que determina o fluxo concatenado em um sistema magnético com base no número de espiras de uma bobina que faz parte desse circuito? Na presente unidade compreenderemos o circuito magnético utilizado no controle de uma válvula de admissão de combustível, bem como os componentes utilizados em um circuito magnético, sua relação com um circuito elétrico e como dimensionar diversos circuitos de acordo com a aplicação desejada.

Você lembra que nossa empresa está prestando serviço para uma indústria que possui um gerador de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis. Seu cliente enviou uma lista de especificações do gerador e solicita que para o pré-projeto

sejam calculadas a relutância do material e do entreferro escolhidos por ele, bem como o fluxo estimado que será verificado no núcleo do circuito magnético. Por fim, a carta de solicitação do cliente termina questionando a possibilidade de a corrente conduzida nas espiras do enrolamento ser calculada, para que ele próprio possa identificar qual é a fonte de alimentação necessária para alimentar esse circuito. Cabe a você identificar as variáveis necessárias para responder as questões do cliente.

Após o estudo desta seção, você será capaz de atender essa importante demanda.

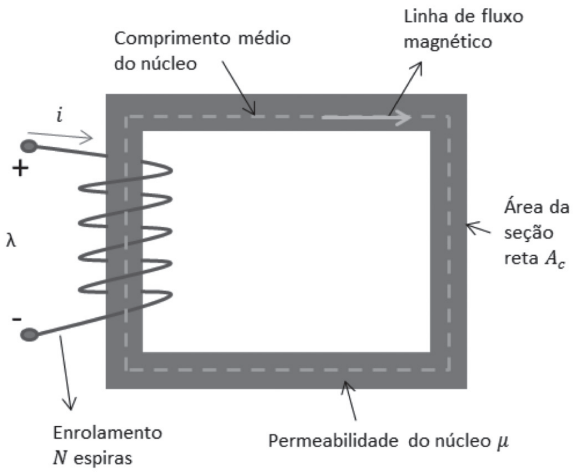
Não pode faltar

Um **circuito magnético** é composto por alguns elementos básicos, ilustrados na Figura 1.1, em formato de diagrama. Podemos considerar que um circuito desse tipo é sempre composto por um material de permeabilidade magnética elevada. A permeabilidade magnética, definida pela letra grega μ é a capacidade que um material possui de manter confinada a energia magnética que flui dentro dele. Materiais como ferro, ímãs, cobre e metais em geral são amplamente utilizados na indústria como matéria-prima para circuitos magnéticos.

O fluir da energia magnética por um material ferromagnético, ou um material condutor, é denominado como fluxo magnético, representado pela notação ϕ. Portanto, se acostume com a expressão: "Este circuito magnético induz um fluxo ϕ em seu núcleo ferromagnético".

Podemos observar, no circuito da Figura 1.1, a presença de um enrolamento composto por N espiras ao redor de um núcleo magnético simples, de seção reta com área A_c e comprimento médio do núcleo l_c. A corrente i que passa pelo material magnético excita um fluxo concatenado λ no enrolamento de espiras.

Figura 1.1 | Diagrama representando um circuito magnético



Fonte: elaborada pelo autor.

O circuito magnético da Figura 1.1 representa um exemplo muito simples de circuito em que:

$\phi \rightarrow$ fluxo magnético no núcleo de um circuito magnético, dado em Weber (Wb)

$B \rightarrow$ densidade do fluxo magnético no núcleo do circuito, dado em Tesla (T)

$A \rightarrow$ área da seção reta do núcleo, dado em m^2

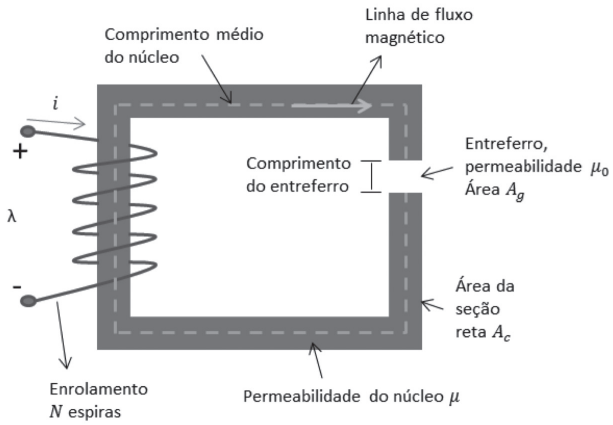
$\mu \rightarrow$ permeabilidade magnética.

Reflita

O fluxo magnético se mantém dentro de materiais com alta permeabilidade magnética. Se fizermos um paralelo com circuitos elétricos, a permeabilidade é inversamente proporcional à resistência. Podemos afirmar que quanto maior a permeabilidade, maior o fluxo magnético e menor a resistência ao fluxo?

Existem diversas formas de dimensionamento de um circuito magnético, a Figura 1.2 apresenta um segundo tipo de circuito, no qual é possível observar uma pequena descontinuidade no material magnético. Esse espaço que separa o material é denominado entreferro. Chamamos de entreferro a parte do circuito magnético que não é composta pelo material magnético predominante, ou seja, uma seção no material magnético, que, conforme mostrado na Figura 1.2, pode ser preenchida ou não por outro material.

Figura 1.2 | Entreferro de ar como componente do circuito magnético



Fonte: elaborada pelo autor.

Quando o entreferro não é preenchido com um material específico, ou seja, quando está preenchido por ar, denominamos a permeabilidade do ar como μ_0 com valor constante de $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. A permeabilidade magnética dos materiais será amplamente explicada na Seção 3 desta unidade.

É importante observar que todo fluxo que entra em uma superfície de volume específico deverá sair dessa mesma superfície, uma vez que as linhas de fluxo magnético sempre formam laços contínuos, ou seja, sem interrupção. Caso haja alguma interrupção, o fluxo como um todo cessará.

Para esse curso de conversão eletromecânica de energia, vamos considerar que a densidade do fluxo magnético B_c no núcleo do material magnético é uniforme. Dessa forma, podemos também considerar que a definição de fluxo magnético no núcleo do material é definida por:

$$\phi_c = B_c A_c . \quad (1.1)$$

e

$$B_c = \mu_c H_c . \quad (1.2)$$

em que:

H → intensidade do campo magnético, dado em Ampere por metro (A/m).

Em um circuito magnético, o campo magnético tem sua origem decorrente do produto entre a corrente que passa pela espira e o número de espiras presentes no enrolamento. Esse campo magnético é denominado força magnetomotriz, ou FMM, determinada por:

$$F = Ni \,. \quad (1.3)$$

ou

$$F = H_c l_c \quad (1.4)$$

em que:

F = força magnetomotriz (FMM).

N = número de espiras.

i = corrente conduzida nas espiras.

l_c = caminho médio do núcleo.

Circuitos elétricos e circuitos magnéticos

Uma aplicação para o tipo de circuito magnético que vimos até agora são os transformadores e estamos estudando os materiais básicos que compõem esses dispositivos.

Dispositivos que contém um elemento móvel possuem um ou mais entreferros de ar em suas composições, conforme exemplificado na Figura 1.2, nos quais é possível verificar a presença de um entreferro de comprimento g. Para facilitar nosso estudo, vamos considerar a área do entreferro de ar A_g como sendo igual à área do material magnético A_c de forma que, para esse circuito, a FMM deve considerar a permeabilidade do material μ_c como diferente da permeabilidade do entreferro de ar μ_g, já definida anteriormente como $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

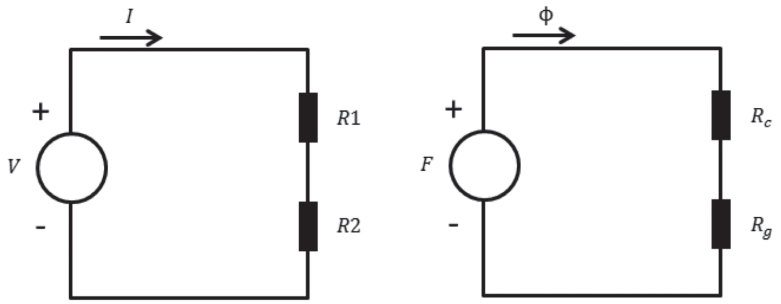
Assimile

No caso de um sistema de controle de velocidade de admissão de combustível em um gerador, é importante a presença de uma válvula de admissão, um dispositivo móvel que regula a quantidade de combustível inserida em um gerador à medida em que é aberta, ou seja, quanto mais aberta a válvula, mais combustível será entregue ao gerador.

Neste sentido, precisamos agora reescrever a Equação (1.4) contemplando o entreferro de ar. Antes disso é importante entender que as forças magnéticas que atuam em um circuito magnético devem ser consideradas como a somatória das FMM menos as relutâncias presentes em cada entreferro.

Para entender melhor o significado de uma relutância presente em um entreferro, vamos fazer uma analogia entre um circuito elétrico e um circuito magnético, conforme Figura 1.3.

Figura 1.3 | Comparação entre circuito elétrico e circuito magnético.



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 1.3 mostra um circuito elétrico composto por dois resistores R_1 e R_2 em série com uma fonte de tensão U. Logo, podemos calcular a corrente *i* que passa pelo circuito elétrico como:

$$i = \frac{U}{R_1 + R_2}. \qquad (1.5)$$

De forma análoga ao circuito elétrico, nosso circuito magnético, ilustrado na Figura 1.3, mostra uma fonte de FMM F que induz um fluxo ϕ que passa por um material magnético de relutância R_c e que também passa por um entreferro de relutância R_g. Logo, podemos considerar o fluxo ϕ que passa pelo circuito magnético como:

$$\phi = \frac{F}{R_c + R_g}. \qquad (1.6)$$

Continuando nossa analogia com circuitos elétricos, podemos afirmar que a relutância R_c em um material magnético de comprimento médio l_c, área de seção reta A_c e permeabilidade magnética μ, é definida pela equação:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu A_c}. \qquad (1.7)$$

Aplicando a Equação (1.4) ao circuito magnético da Figura 1.3, veremos que a FMM total do circuito será a FMM no material magnético somada a FMM no entreferro de comprimento g:

$$F = H_c l_c + H_g l_g. \qquad (1.8)$$

Logo, o fluxo total definido em (1.6) pode ser reescrito utilizando as equações (1.6) e (1.7):

$$\phi = \frac{F}{\frac{l_c}{\mu A_c} + \frac{g}{\mu_0 A_g}}. \qquad (1.9)$$

Em um circuito magnético, a soma das relutâncias é a relutância total R_{tot} definida por:

$$R_{tot} = R_c + R_g . \quad (1.10)$$

ou, considerando o fluxo e a FMM total, de acordo com a Equação (1.6):

$$\phi = \frac{F}{R_{tot}} . \quad (1.11)$$

Existe um termo, definido como permeância P que é determinado pelo inverso da relutância, logo, a permeância total de um circuito magnético pode ser considerada como:

$$P_{tot} = \frac{1}{R_{tot}} . \quad (1.12)$$

Em algumas situações, a relutância do material é muito inferior quando comparada à relutância do entreferro, assim, para os casos em que a relutância do material $R_c \lll R_g$, vamos considerar a relutância total R_{tot} como sendo a relutância do entreferro R_g. Portanto:

$$\phi \cong \frac{F}{R_g} = \frac{F\mu_0 A_g}{g} = Ni\frac{\mu_0 A_g}{g} . \quad (1.13)$$

Pesquise mais

Conforme mencionado anteriormente, vamos considerar a área de atuação do campo magnético da seção reta do entreferro como a mesma área da seção reta do material. Porém, em circuitos magnéticos reais existe um campo magnético não uniforme ao redor do campo magnético formado no interior do entreferro. Para saber mais sobre este campo, chamado Campo de Espraiamento, leia a página 8 de:

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingley**. 7. ed. São Paulo: Mcgraw-Hill, 2014.

Fluxo concatenado

Outra forma de medirmos o fluxo no núcleo de um material magnético é medirmos o fluxo concatenado dentro das espiras da bobina, conforme mostrado nos exemplos acima. Vamos imaginar que cada espira gera um fluxo ϕ e que a soma (ou concatenação) de todos os fluxos de uma bobina com N espiras é determinado como fluxo concatenado, ou λ, calculado através do valor instantâneo de um fluxo φ variável no tempo.

$$\lambda = N\varphi . \quad (1.14)$$

O fluxo concatenado é medido em webers-espiras, ou simplesmente webers, e essa medida é sempre feita em relação a um fluxo instantâneo. Todo campo magnético variável no tempo produz um campo elétrico de forma perpendicular a esse campo magnético.

A equação de Maxwell, que determina o campo elétrico no espaço, é conhecida como lei de Faraday (1.15), que demonstra que a integral de linha de um campo elétrico E ao longo de um contorno C, fechado, equivale à razão da variação do fluxo magnético concatenado neste contorno fechado, em função do tempo:

$$\int_C E \cdot ds = -\frac{d}{dt}\int_S B \cdot da . \quad (1.15)$$

Como o fluxo concatenado de uma bobina é igual à integral da superfície do fio que compõe o enrolamento, podemos desprezar o campo elétrico do enrolamento de alta condutividade elétrica, ou baixa relutância. Dessa forma, o que predomina nessa equação é a densidade do fluxo B, mostrada do lado direito da equação de Maxwell (1.15). A forma simplificada dessa equação foi mostrada em (1.14).

Indutância e energia

Vamos agora voltar ao nosso exemplo de um circuito magnético composto por um material de permeabilidade constante, que possui uma seção com entreferro, na qual é observada uma bobina de N espiras em que passa uma corrente i. Nesse contexto, podemos definir a indutância gerada pelo enrolamento como a razão entre o fluxo concatenado no enrolamento e a corrente que passa pelo material que compõe as espiras:

$$L = \frac{\lambda}{i} . \quad (1.16)$$

Se substituirmos a Equação (1.14), considerando $\phi \approx \varphi$ teremos a indutância em função do número de espiras e da relutância total do circuito magnético:

$$L = \frac{N^2}{R_{tot}} = \frac{N^2 \mu_0 A_g}{g} . \quad (1.17)$$

Faça você mesmo

Utilizando as equações que definem a indutância gerada por um enrolamento de espiras (1.16), a equação que mostra a relação entre o fluxo concatenado de uma bobina em função do número de espiras

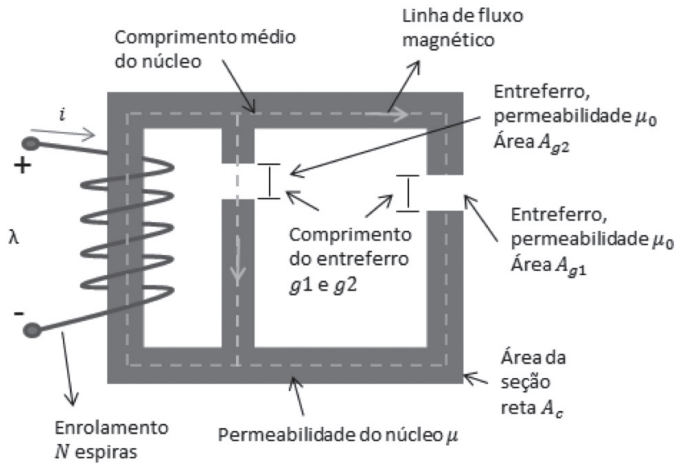
presentes no enrolamento $\lambda = N\varphi$ e a equação que determina o fluxo magnético em função da FMM total $\phi = F/R_{tot}$, demonstre a Equação (1.17) mostrada acima.

Como vimos acima, a indutância é dependente do fluxo concatenado no enrolamento e da corrente conduzida nas espiras. Dessa forma, dado que o fluxo concatenado é medido em webers-espira, a indutância será medida em webers-espira por ampere, ou henry (H).

Exemplificando

Vamos calcular a indutância de um enrolamento com N espiras, em um circuito magnético com 2 entreferros em paralelo, conforme mostra a Figura 1.4.

Figura 1.4 | Circuito magnético com dois entreferros de comprimentos distintos



Fonte: elaborada pelo autor.

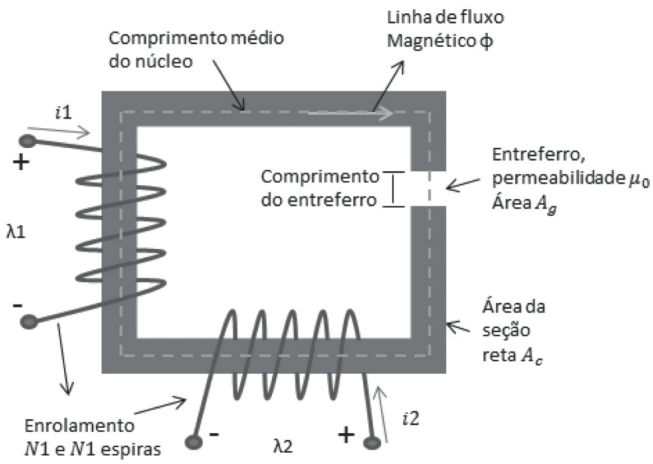
Resolução:

A relutância em cada um dos entreferros é dada por: $R_1 = g_1/\mu_0 A_{g1}$ e $R_2 = g_2/\mu_0 A_{g2}$. Substituindo a Equação (1.16) pela Equação (1.14) e (1.13) teremos:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} = \mu_0 N^2 \left(\frac{A_1}{g_1} + \frac{A_2}{g_2}\right).$$

Dando continuidade aos tipos possíveis de circuitos magnéticos que estamos estudando nesta unidade, começando por um circuito simples e contínuo, em seguida um circuito com um único entreferro e um terceiro circuito com dois entreferros, agora vamos analisar um exemplo com um único entreferro, porém, com duas espiras, N_1 e N_2. O circuito da Figura 1.5 exemplifica um sistema magnético composto por dois enrolamentos e um entreferro.

Figura 1.5 | Circuito magnético com duas espiras



Fonte: elaborada pelo autor.

A FMM resultante neste circuito será a soma dos dois fluxos magnéticos gerados pelo total de amperes-espiras presentes no circuito, representada por:

$$F = N_1 i_1 + N_2 i_2. \qquad (1.18)$$

logo,

$$\phi = \left(N_1 i_1 + N_2 i_2\right)\frac{\mu_0 A_c}{g}. \qquad (1.19)$$

em que ϕ na Equação (1.19) representa o fluxo total resultante no núcleo do circuito. De forma análoga podemos calcular o fluxo concatenado em cada um dos enrolamentos, representados respectivamente por λ_1 e λ_2, definidos como:

$$\lambda_1 = N_1\phi = N_1^2\left(\frac{\mu_0 A_c}{g}\right)i_1 + N_1 N_2\left(\frac{\mu_0 A_c}{g}\right)i_2. \qquad (1.20)$$

que pode ser escrito de forma simplificada como:

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2. \qquad (1.21)$$

onde L_{11} representa a indutância própria da bobina 1 e L_{12} representa a indutância mútua entre as bobinas 1 e 2. De forma análoga, se formos calcular a indutância própria da bobina 2 e a indutância mútua entre as bobinas 2 e 1, teremos como resultado que $L_{12} = L_{21}$ e

$$\lambda_2 = N_2\phi = N_1N_2\left(\frac{\mu_0 A_c}{g}\right)i_1 + N_2^2\left(\frac{\mu_0 A_c}{g}\right)i_2. \quad (1.22)$$

$$\lambda_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2. \quad (1.23)$$

para

$$L_{11} = N_1^2\frac{\mu_0 A_c}{g}. \quad (1.24)$$

$$L_{22} = N_2^2\frac{\mu_0 A_c}{g}. \quad (1.25)$$

Para finalizar nossa seção, vamos agora olhar para o último elemento presente nos circuitos magnéticos, a tensão induzida nos terminais do enrolamento, denominada e, que dá origem à potência p nos terminais de um enrolamento de espiras. Essa potência representa a taxa com que o fluxo de energia flui para dentro do circuito magnético. A potência em um sistema magnético é determinada por:

$$p = i\,e. \quad (1.26)$$

A potência é determinada pelo produto da tensão aplicada aos terminais do enrolamento pela corrente i que flui sobre as espiras. É dada em Watts, ou joule por segundo. Para o caso de um sistema com enrolamento único e indutância constante, a energia magnética armazenada no sistema será definida como:

$$W = \frac{1}{2L}\lambda^2 = \frac{L}{2}i^2. \quad (1.27)$$

Sem medo de errar

Você lembra que nossa empresa está prestando serviço para uma indústria que possui um gerador de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis, para o qual é solicitado o detalhamento do cálculo da corrente conduzida nas espiras do enrolamento? Para realizar a tarefa, vamos agora voltar para a Figura 1.2, com a qual estudamos um circuito magnético com um único entreferro de ar e um único enrolamento para um dispositivo móvel, no nosso caso a válvula de admissão de combustível para alimentar um gerador de energia. O cliente enviou as informações necessárias:

$N = 1200$; $l_c = 0,40m$; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$; $\mu_r = 90000$; $A_g = A_c = 0,03m^2$; $g = 0,007m$; $B_c = 2T$.

Resolução:

Para começar, precisamos determinar a relutância do material e do entreferro, R_c e R_g:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} = \frac{0,4}{90000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0,03} = 1,18 \times 10^2 \frac{A \cdot e}{Wb}$$

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} = \frac{0,007}{4\pi \times 10^{-7} \times 0,03} = 1,85 \times 10^5 \frac{A \cdot e}{Wb}$$

Precisamos também descobrir o fluxo ϕ

$$\phi = B_c A_c = 2 \times 0,03 = 0,06\,\text{Wb}.$$

Agora, temos as informações necessárias para determinar corrente i

$$i = \frac{F}{N} = \frac{\phi\left(R_c + R_g\right)}{N} = \frac{0,06\left(1,18 \times 10^3 + 1,85 \times 10^5\right)}{1200} = 9,3A.$$

Por fim, podemos concluir que a fonte de alimentação necessária para alimentar esse circuito deve fornecer uma corrente mínima de 10A. É sua função responder ao cliente com exatidão, porém é importante também deixar claro a possibilidade de margem sistêmica para as aplicações do cliente. Para o caso de uma fonte de alimentação com margem 50%, a recomendação seria a utilização de uma corrente de 15A.

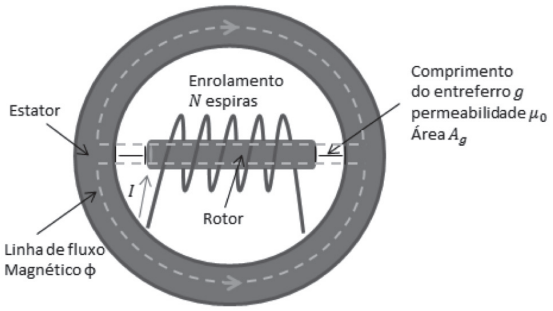
Avançando na prática

Cálculo de uma máquina síncrona

Descrição da situação-problema

Você é um engenheiro que trabalha com dimensionamento de máquinas síncronas. No momento, você está interessado em avaliar uma máquina síncrona simples representada esquematicamente na Figura 1.6, composta por um rotor e um estator.

Figura 1.6 | Circuito eletromecânico para uma máquina síncrona



Fonte: elaborada pelo autor.

Você precisa determinar o fluxo ϕ do entreferro e a densidade de fluxo no núcleo B_g, considerando $i = 15A$, número de espiras igual a 2000, comprimento do entreferro 3cm e área do entreferro 600cm2.

Resolução da situação-problema

$\phi = \frac{Ni\mu_0 A_g}{2g}$, neste caso o comprimento do entreferro foi multiplicado por dois, pois o circuito mostra a presença de dois entreferros em série e de mesmo comprimento. Portanto, sendo:

$$N = 2000 \ ; \ i = 15A \ ; \ \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \ ; \ A_g = 0,06m^2 \ ; \ g = 0,03m$$

$$\phi = \frac{2000 \times 15 \times \left(4\pi \times 10^{-7}\right) \times 0,06}{2 \times 0,03} = 37,7mWb$$

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} = \frac{0,0377}{0,06} = 0,628T$$

Agora que você já sabe determinar o fluxo ϕ do entreferro e a densidade de fluxo no núcleo B_g é possível também alterar qualquer parâmetro como, por exemplo, a número de espiras ou a corrente de alimentação do circuito e será fácil readaptar o circuito para que mantenha o mesmo fluxo ou a mesma alimentação.

Faça valer a pena

1. Em dispositivos encontrados atualmente na indústria, o núcleo de um circuito magnético pode ser constituído de aço elétrico, um material extremamente não linear, ou seja, a permeabilidade do material pode variar.

Considere um circuito magnético simples, composto por um único entreferro 0,06cm e 8cm^2, caminho médio do núcleo 40cm, 600 espiras compondo o enrolamento, permeabilidade do aço elétrico 73000 H/m e

densidade do fluxo no núcleo 1,8T. Calcule a corrente i que passa pelo sistema.

a) 2,90ª

b) 1,45A

c) 0,75A

d) 2,00A

e) 3,10ª

2. Aplicações industriais que utilizam enrolamentos compostos por espiras, em materiais magnéticos sempre são dimensionados com muitas espiras, de forma a garantir um grande fluxo magnético ao material. Para o caso de aplicação móveis, que possuam um entreferro, a interação entre o fluxo magnético e a relutância do entreferro também está diretamente relacionada ao número de espiras de um enrolamento.

Considerando o número de espiras, a corrente que passa pelo enrolamento e o fluxo total presente do material que compõe um circuito magnético, podemos afirmar que:

a) O fluxo concatenado é a soma dos fluxos gerados por cada espira do enrolamento.

b) O fluxo concatenado é a soma entre o fluxo total no enrolamento e o fluxo total no sistema.

c) O fluxo concatenado é a soma dos fluxos que não passaram pelo entreferro.

d) O fluxo concatenado é a diferença entre o fluxo do circuito e o fluxo gerado por uma espira.

e) O fluxo concatenado é a diferença entre o fluxo do circuito e o fluxo gerado pelo enrolamento.

3. A indutância é definida pela multiplicação entre o número de espiras de um enrolamento e o fluxo concatenado instantâneo, ou seja, cada espira gera um fluxo ϕ e a soma (ou concatenação) de todos os fluxos de um enrolamento é determinada como fluxo concatenado λ, calculada através do valor instantâneo de um fluxo φ variável no tempo, $\lambda = N\varphi$, lembrando que o fluxo concatenado é medido em webers-espiras.

Qual deve ser a indutância no circuito magnético da Figura 1.2 se, ao invés de um único entreferro, acrescentarmos ao circuito um segundo entreferro de mesmo comprimento?

a) A indutância total do circuito não pode ser calculada com base no número de entreferros do circuito, pois são grandezas não relacionadas.

b) A indutância total do circuito será igual com a presença de mais um entreferro, pois indutância e relutância são grandezas independentes.

c) A indutância total do circuito será maior com a presença de mais um entreferro, pois indutância e relutância são grandezas diretamente proporcionais.

d) A indutância total do circuito será menor com a presença de mais um entreferro, pois indutância e relutância são grandezas inversamente proporcionais.

e) A indutância total do circuito será menor com a presença do mesmo entreferro, pois a indutância não apresenta variação pela presença do entreferro.

Seção 1.2

Materiais magnéticos

Diálogo aberto

Dando continuidade ao nosso projeto, ainda no contexto de uma empresa de desenvolvimento de projetos para controle e automação em geração de energia, Vamos imaginar agora que você foi chamado para um projeto em que parte das suas funções é determinar quais materiais magnéticos serão utilizados para a montagem de um circuito magnético. Quais características esse material selecionado deve ter? Quais as especificações devem ser passadas para os fornecedores de materiais magnéticos para que eles possam encaminhar os componentes necessários para a elaboração do nosso projeto de um sistema de controle de velocidade para um gerador de energia elétrica? Seu principal foco será o entendimento e a aplicação de conceitos em relação ao que é um circuito magnético e como esse circuito pode ser utilizado, suas limitações e funções básicas.

Estamos na etapa de seleção dos materiais de nosso projeto para a elaboração do controle de uma válvula que irá limitar a admissão de combustível em um gerador de acordo com a resposta de um sensor de carga elétrica. Para construir o circuito magnético adequado, você precisará realizar a cotação dos seus componentes. Você conhece a densidade de fluxo no entreferro e conhece as características do material magnético oferecido pelo fornecedor. Então, qual deve ser a área mínima do ímã capaz de produzir essa densidade de fluxo?

Esse tipo de situação pode ser encontrado em qualquer ambiente industrial. É responsabilidade da equipe de engenharia prover os requisitos básicos para que a equipe de compras possa conversar com os fornecedores e definir em conjunto qual é a melhor opção, considerando sempre o custo-benefício do material oferecido pelos fornecedores.

Durante essa etapa do projeto, é natural e muito importante que você tenha uma visão crítica em relação à determinação dos requisitos básicos do produto como um todo. Nosso foco agora está direcionado para o entendimento dos parâmetros que caracterizam um material magnético, como, por exemplo, a curva de magnetização

de um material. Vamos juntos descobrir o universo das caracterizações dos materiais magnéticos?

Não pode faltar

Propriedade dos materiais magnéticos

Os materiais magnéticos se distinguem de alguns outros materiais por possuírem características peculiares na presença de um campo magnético. Sua alta densidade magnética faz com que um circuito magnético constituído por esse tipo de material precise de um nível muito baixo de força magnética para ser excitado.

Reflita

Você sabe por que um material magnético se comporta dessa maneira?

Um material que permite um grande fluxo magnético ao ser excitado por uma baixa força magnética é um material de permeabilidade alta, ou seja, que permite que o circuito magnético possua uma alta densidade magnética em seu núcleo. Uma das principais propriedades dos materiais magnéticos é a capacidade do material de direcionar um campo magnético confinado, em grande parte, a seu núcleo.

Outra característica importante de um material magnético é a sua capacidade de confinar o campo magnético, de forma que esse campo não se disperse quando excitado por uma fonte de tensão, aumentando assim a eficiência do dispositivo.

Atualmente a indústria utiliza os materiais magnéticos na produção de sistemas magnéticos para transformação de energia eletromecânica ou simplesmente para adaptação da energia produzida por um gerador (dispositivo de conversão de energia eletromecânica).

Como circuito de adaptação da energia produzida por um gerador, podemos citar um transformador, no qual os materiais magnéticos têm a função de maximizar os efeitos do campo magnético criado pela interação entre as partes do transformador, além de minimizar a demanda de corrente de excitação para o conjunto magnético. Outro exemplo amplamente encontrado no mercado são as máquinas elétricas, nas quais os materiais magnéticos são responsáveis por dar forma para a máquina em si e garantir as características desejadas de uma determinada máquina elétrica. Tanto os transformadores quanto as máquinas elétricas serão estudadas ao longo dessa disciplina, com ênfase um pouco maior aos transformadores.

Cada material magnético, ao ser excitado por um campo magnético de intensidade H, responde a esse campo aumentando a densidade de seu fluxo magnético B em função da permeabilidade efetiva μ do material, conforme determinado em nossa última seção:

$$B = \mu H . \quad (1.28)$$

Conforme a força magnetizante aplicada ao circuito é aumentada, a intensidade do campo magnético também se eleva, fazendo com que o fluxo magnético de um determinado material chegue a um limite, em que todos os momentos magnéticos estejam alinhados com o campo magnético. Nesse momento o material perde a capacidade de aumentar seu fluxo magnético, esse ponto de operação é denominado ponto de saturação.

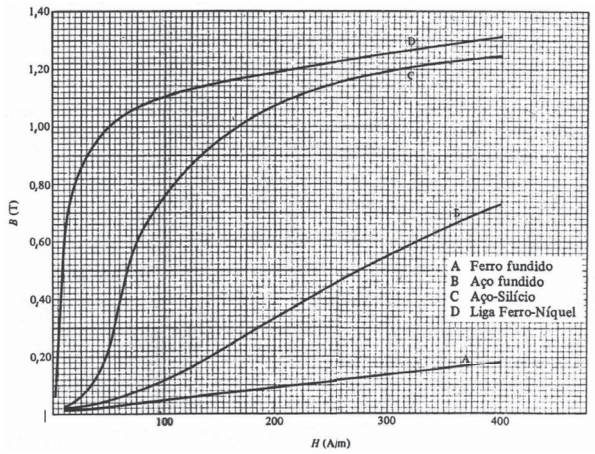
Para entendermos melhor o que é o ponto de saturação de um material, vamos fazer a seguinte analogia com circuitos elétricos. Vamos imaginar que em um circuito elétrico, constituído por uma fonte de alimentação U e um resistor R, passa uma corrente i. Com isso podemos afirmar que existe uma relação entre a tensão aplicada ao circuito e a corrente que passa por ele. Considerando que o resistor é um resistor não variável, quanto maior for a tensão aplicada ao sistema, maior será a corrente no circuito, obedecendo à relação $U = iR$.

Podemos fazer uma analogia ao circuito magnético, no qual a densidade do fluxo magnético B pode ser considerada como a tensão aplicada ao circuito elétrico, a permeabilidade efetiva μ pode ser comparada à corrente i e o campo magnético pode ser considerado como a resistência presente no circuito elétrico. Dessa forma, o circuito elétrico fica saturado quando não se pode mais aumentar a tensão na fonte do sistema elétrico pois a corrente já atingiu seu nível máximo para um resistor específico, de forma que, se a tensão aumentar, o resistor irá queimar.

Em sistemas magnéticos, cada material é caracterizado por uma relação entre o fluxo magnético e a intensidade do campo magnético. A curva que descreve um material magnético é conhecida como curva $B - H$ ou Curva de Magnetização.

A Figura 1.7 exemplifica algumas curvas de magnetização para os materiais: ferro fundido, aço fundido, aço-silício e liga de ferro-níquel.

Figura 1.7 | Exemplo de curvas de magnetização



Fonte: Edminister (1981).

A figura acima mostra a relação entre a densidade de fluxo e a força magnetizante. É possível observar que a curva tende à horizontal para valores próximos à saturação do material, ao passo que, mesmo quando a densidade de fluxo no material tende a zero, o fluxo não é nulo, pois existe a orientação natural do material, o que garante um fluxo mínimo ao material magnético mesmo sem excitação externa. Esse fluxo mínimo é denominado magnetização remanescente.

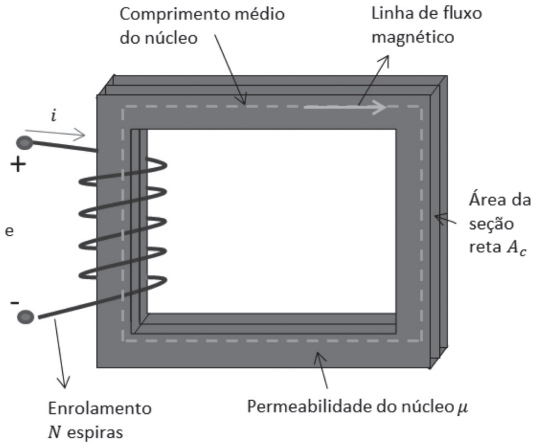
Pesquise mais

Para entender o princípio de formação de uma curva de magnetização, consulte as páginas 19 a 21 de: UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 728 p.

Excitação CA

Para darmos início ao nosso estudo sobre os efeitos da corrente alternada, ou CA, em um circuito magnético, vamos usar a Figura 1.8 como exemplo de um circuito magnético de núcleo fechado, sem a presença de um entreferro, cujo núcleo é constituído de aço laminado e um enrolamento de N espiras.

Figura 1.8 | Circuito de aço elétrico de grão orientado laminado



Fonte: elaborada pelo autor.

Sistemas com excitação CA possuem formas de onda de fluxo magnético e tensão magnética muito similares a um formato senoidal, variando em função do tempo. Neste sentido, podemos considerar o fluxo do núcleo de nosso sistema como:

$$\varphi(t) = \phi_{\max} sen(\omega t) = A_c B_{\max} sen(\omega t). \quad (1.29)$$

em que:

$\varphi(t)$ → fluxo do núcleo em função do tempo [*Wb*]

ϕ_{max} → amplitude máxima do fluxo φ [*Wb*]

$B_{\max}$ → amplitude máxima da densidade de fluxo B_c [*T*]

$\omega = 2\pi f$ → frequência angular

f → frequência em Hz

Portanto, se considerarmos um enrolamento com N espiras, teremos que a tensão e induzida no enrolamento é:

$$e(t) = \omega N \phi_{\max} \cos(\omega t) = E_{\max} \cos(\omega t). \quad (1.30)$$

em que:

$$E_{\max} = \omega N \phi_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max}. \quad (1.31)$$

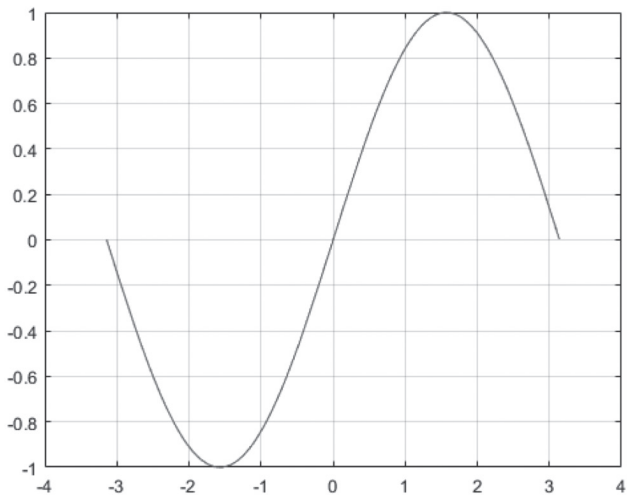
Em sistemas que utilizam corrente alternada para excitação ou alimentação, existem duas formas de representar o valor das tensões aplicadas ao circuito: o

valor eficaz de tensão e o valor instantâneo de tensão. Em nosso estudo não vamos considerar o valor instantâneo de tensão aplicada ao sistema, portanto, o valor de tensão eficaz E_{ef} de uma onda senoidal pode ser representado pela equação:

$$E_{ef} = \pi\sqrt{2}fNA_cB_{\max}. \quad (1.32)$$

Para facilitar nosso entendimento, vamos ilustrar de forma gráfica o comportamento da corrente alternada (CA) ao longo do tempo, conforme vimos nas equações (1.28) e (1.29).

Figura 1.9 | Tensão CA de excitação



Fonte: elaborada pelo autor.

O gráfico mostrado na Figura 1.9 indica o comportamento de uma tensão senoidal de amplitude 1 Volt. O valor da corrente de excitação i_{φ}, que tem seu valor definido como valor eficaz $i_{\varphi,ef}$, é definido de acordo com a equação:

$$i_{\varphi,ef} = \frac{l_cH_{ef}}{N}. \quad (1.33)$$

Sendo l_c a dimensão linear do material magnético, H_{ef} a densidade do campo magnético eficaz e N o número de espiras de enrolamento presente no circuito magnético.

Circuitos magnéticos de corrente alternada são normalmente descritos não como circuitos com resposta à curva de magnetização B-H, mas sim em termos de volt-ampere eficaz, V-A, definido em função de uma densidade de fluxo específica $E_{ef}i_{\varphi,ef}$. Isso se deve ao fato de a excitação em corrente alternada ser uma variável não constante ao longo do tempo.

$$E_{ef} i_{\varphi,ef} = \pi\sqrt{2} f N A_c B_{\max} \left(\frac{l_c H_{ef}}{N} \right) = \sqrt{2}\pi f B_{\max} H_{ef} \left(A_c l_c \right). \quad (1.34)$$

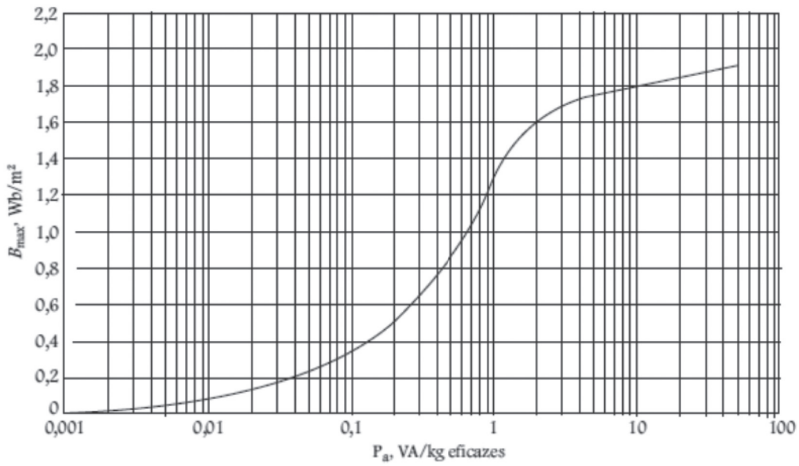
O valor de volt-ampere eficaz de excitação pode ser expresso por unidade de massa S_a, normalmente fornecido pelo fabricante do circuito magnético em função da densidade de massa ρ_c de um material magnético específico. Esse valor de unidade de massa pode ser expresso como:

$$S_a = \sqrt{2}\pi f \left(\frac{B_{\max} H_{ef}}{\rho_c} \right). \quad (1.35)$$

Exemplificando

A Figura 1.10 mostra um exemplo do comportamento Volt-ampere eficaz de excitação por quilograma para um sistema a 60Hz.

Figura 1.10 | Exemplo de uma curva volt-ampere para o aço elétrico de grão orientado do tipo M-5.



Fonte: Umans (2014, p. 21).

Sistemas com excitação em corrente alternada normalmente têm aplicações para frequências em 50Hz e 60Hz, dependendo da região geográfica em que se encontram. Existe um fenômeno relacionado à perda de energia por dissipação térmica para circuitos de corrente alternada, isso se dá ao fato de a corrente eficaz muitas vezes ultrapassar a capacidade magnética do circuito. Esse fenômeno é conhecido como aquecimento óhmico, que acontece devido à dissipação térmica de energia no circuito magnético.

Ímãs permanentes

Alguns materiais magnéticos têm suas características magnéticas não alteradas ao longo do tempo, esse tipo de material é denominado ímã permanente. Para entendermos um pouco melhor o que diferencia um material magnético como o aço de grão orientado de um material magnético como um ímã permanente, precisamos entender dois conceitos importantes:

1. Magnetização remanescente, dada em Tesla [T]: é a capacidade do material de agregar uma elevada densidade de fluxo magnético, com um valor de corrente e tensão elevados.

2. Coercividade magnética, dado em Ampere por metro [A/m]: é a característica natural do material de possuir um campo magnético de alta intensidade, ou seja, é a intensidade do campo magnético necessária para diminuir a densidade de fluxo magnético do material a um valor nulo ou desmagnetizá-lo.

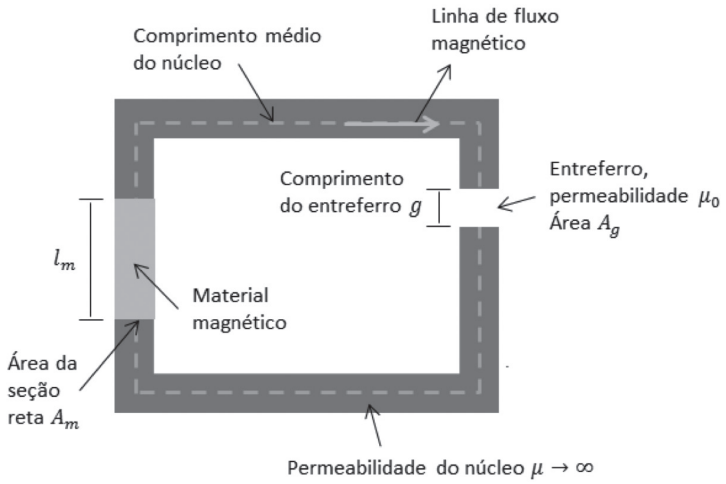
Em termos práticos, a magnetização remanescente é a capacidade do material de produzir um fluxo magnético mesmo sem ser excitado constantemente por um elemento ou uma fonte de excitação externa. Esse tipo de material é amplamente utilizado em ambientes domiciliares (o ímã de geladeira) ou industriais (alto-falantes e máquinas de indução de corrente).

Assimile

Um ímã permanente mantém suas características magnéticas ao longo do tempo, sem a necessidade de estímulos externos.

Ímãs permanentes, como têm a capacidade de estabelecer um fluxo magnético em um material magnético ou em si mesmo, podem ser utilizados como uma fonte de excitação para um circuito magnético, conforme ilustra a Figura 1.11: um circuito composto por um material magnético de indução própria, ou um ímã, de comprimento l_m e seção reta A_m, um material magnético de permeabilidade altíssima, tendendo ao infinito, um entreferro de permeabilidade μ_0 e área de seção reta coincidente com a área de seção reta do material magnético $A_g = A_m$.

Figura 1.11 | Circuito magnético com excitação através de um ímã



Fonte: ebaborada pelo autor.

Podemos considerar a FMM do sistema como sendo nula, pois assumimos que a permeabilidade do núcleo tende ao infinito, então a intensidade do campo magnético H no interior do núcleo pode ser desprezada, considerando-se apenas a intensidade dos campos magnéticos presentes no entreferro e no material magnético, logo:

$$F = H_g g + H_m l_m = 0. \quad (1.36)$$

Também observamos para esse circuito que o fluxo magnético confinado dentro do núcleo é um fluxo contínuo, assim podemos determinar que o fluxo magnético em função da área pela qual esse fluxo passar pode ser descrito como:

$$\phi = A_g B_g = A_m B_m. \quad (1.37)$$

logo:

$$B_g = \frac{A_m}{A_g} B_m. \quad (1.38)$$

Assim como a curva de caracterização de um material magnético não permanente, uniforme, de aço, foi caracterizada pela curva B-H, a medida de capacidade utilizada para caracterização de um ímã permanente é denominada como produto energético máximo $(B \cdot H)_{\max}$, com dimensão de densidade de energia $\mathrm{J/m^3}$.

Existe uma relação entre o volume do material magnético permanente, o ímã,

e o volume do entreferro presente no circuito magnético, essa relação envolve a permeabilidade no entreferro μ_0, a intensidade no campo magnético H_m e a intensidade do fluxo magnético B_m e B_g, definida por:

$$Vol_{mag} = \frac{Vol_{entreferro} B_g^2}{\mu_0 (-H_m B_m)}. \quad (1.39)$$

Essa equação mostra que a densidade de fluxo no entreferro pode ser manipulada de acordo com o volume do ímã, quando operando no ponto máximo de seu produto energético. De forma análoga, a redução no comprimento do entreferro leva ao aumento da densidade de fluxo magnético.

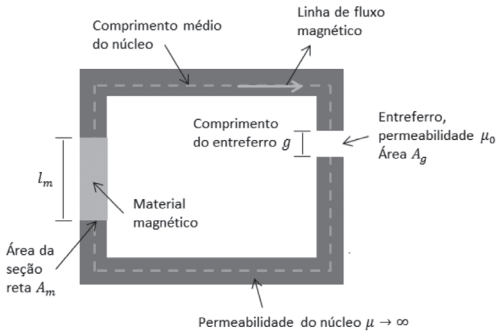
Uma das aplicações mais comuns para ímãs permanentes, por serem materiais de fácil fabricação e de baixo custo, são os ímãs de cerâmica, denominados ímãs de ferrite que, por serem fabricados a partir da utilização de óxido de ferro em pó e possuírem densidade de fluxo residual muito baixo, têm a característica de não perderem a magnetização.

Alguns materiais como samário-cobalto e neodímio-ferro-boro são conhecidos como materiais magnéticos de terra rara, amplamente utilizados em máquinas magnéticas rotativas.

Sem medo de errar

Agora que estamos caminhando muito bem em nosso projeto para o controle de uma válvula de admissão de combustível em um sistema de geração de energia, vamos pegar como exemplo um circuito magnético, Figura 1.12, no qual a área efetiva do entreferro pode ser dada por $A_g = 4cm^2$. Vamos supor que é sua tarefa, como engenheiro de compras, solicitar uma cotação para esses sistemas. Porém, para solicitar essa cotação, lhe foi passado somente a densidade de fluxo no entreferro, de $B_g = 1,6T$. Qual deve ser a área mínima do ímã capaz de produzir essa densidade de fluxo? De acordo com a curva B-H do material oferecido pelo fornecedor, $B_m = 2T$.

Figura 1.12 | Circuito magnético com excitação através de um ímã



Fonte: elaborada pelo autor.

Para solucionar essa questão, vamos relembrar da equação que relaciona a área do entreferro A_g e a área do material magnético A_m, bem como a densidade de fluxo magnético no entreferro B_g e a densidade de fluxo magnético no material magnético B_m, conforme mostrado abaixo:

$$A_m B_m = A_g B_g$$

portanto:

$$A_m = A_g \left(\frac{B_g}{B_m} \right) = 4 \times \left(\frac{1,6}{2,0} \right) = 3,2 cm^2 .$$

A área exigida para o ima é de $3,2 cm^2$.

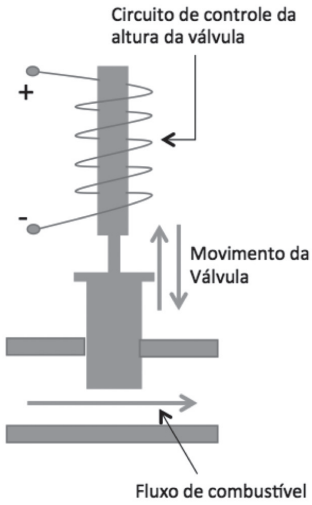
Avançando na prática

Cálculo do êmbolo de uma válvula magnética

Descrição da situação-problema

Você é um engenheiro que presta consultoria e foi contratado para sugerir soluções visando a atualização tecnológica e o aumento de eficiência para seu cliente. Em um determinado equipamento, uma válvula de injeção de combustível chamou sua atenção e por isso você decidiu propor uma alteração em seu projeto. A nova configuração exigiu a realização do cálculo de êmbolo magnético que compõe a válvula. A Figura 1.13 ilustra o funcionamento dela.

Figura 1.13 | Circuito magnético para controle de uma válvula



Fonte: elaborada pelo autor.

Observe que o circuito magnético que controla a válvula não pode ser substituído por um ímã permanente, pois dessa forma a válvula permaneceria fechada indefinidamente.

Os seguintes parâmetros são requeridos para o projeto: $g = 0,4cm$, $A_g = 4cm^2$, $B_g = 1,6T$, $A_m = 3,2cm^2$, $B_m = 2T$ e $H_m = -80\,\text{kA/m}$.

Resolução da situação-problema

Para calcularmos o volume do êmbolo magnético é necessário ter em mãos a área do material magnético, já conhecida como $A_m = 3,2cm^2$ e o comprimento do material, calculado por:

$l_m H_m = -gH_g$, portanto:

$$l_m = -g\left(\frac{H_g}{H_m}\right) = -g\left(\frac{B_g}{\mu_0 H_m}\right) = -0,4\left[\frac{1,6}{\left(4\pi \times 10^{-7}\right)\left(-80 \times 10^3\right)}\right] = 6,4cm.$$ Então:

$$Vol = 3,2 \times 6,4 = 20,5cm^3.$$

Faça valer a pena

1. Todo material magnético que é excitado por um campo magnético de intensidade H tem como resposta a esse campo o aumento da densidade do fluxo magnético B que passa pelo circuito magnético. Essa alteração de fluxo está determinada em função da permeabilidade efetiva μ do material que compõe o sistema: $B = \mu H$.

Conforme a força magnetizante aplicada ao circuito é aumentada, a intensidade do campo magnético também se eleva, fazendo com que o fluxo magnético de um determinado material chegue a um limite.

O limite em que a intensidade do campo magnético presente do sistema não pode ser aumentada é denominado ponto de saturação e pode ser definido como o instante em que os momentos magnéticos do material estão alinhados com o campo magnético, de forma que o material _____.

Marque a alternativa que completa corretamente a lacuna acima.

a) Duplica a capacidade de aumentar seu fluxo magnético.

b) Diminui a capacidade de aumentar seu fluxo magnético.

c) Ganha a capacidade de aumentar seu fluxo magnético.

d) Perde a capacidade de aumentar seu fluxo magnético.

e) Não altera a capacidade de aumentar seu fluxo magnético.

2. Um ímã permanente tem a capacidade de estabelecer um fluxo magnético em um material magnético ou em si mesmo. Esse tipo de material pode ser utilizado como uma fonte de excitação para um circuito magnético, como, por exemplo, em sistemas de identificação de presença para circuitos eletrônicos ou acoplamentos de contato que têm a necessidade de permanecer em contato mesmo sem pressão mecânica. Em termos práticos, a magnetização remanescente é a capacidade do material de produzir um fluxo magnético mesmo sem ser excitado constantemente por um elemento de excitação externo.

Vamos supor que um circuito magnético tenha sido montado com um ímã permanente e um enrolamento com N espiras e que, como fonte de alimentação do circuito, além do ímã e do enrolamento, foi acrescentado um entreferro. Podemos afirmar que:

a) O ímã e um enrolamento de N espiras não têm influência na determinação da intensidade do fluxo total do circuito magnético.

b) O ímã não tem influência na determinação da intensidade do fluxo total

do circuito magnético.

c) O enrolamento de N espiras não tem influência na determinação da intensidade do fluxo total do circuito magnético.

d) O ímã e um enrolamento de N espiras têm influência na determinação da intensidade do fluxo total do circuito magnético.

e) O ímã e um enrolamento de N espiras não têm influência entre si, por isso não influenciarão na determinação da intensidade do fluxo total do circuito magnético.

3. Circuitos que utilizam corrente alternada como fonte de alimentação são representados com o valor das tensões aplicadas ao circuito como o valor eficaz de tensão, definido como o E_{ef} . Como se trata de um sinal CA, uma onda senoidal variável no tempo representa a excitação no circuito magnético.

Vamos considerar um sistema magnético que possui N espiras em seu enrolamento e é alimentado por uma fonte CA com valor eficaz E_{ef} . Qual deve ser o número de espiras para se dobrar o valor eficaz do sistema?

a) O número de espiras deve ser reduzido pela metade, pois o valor eficaz e o número de espiras são grandezas inversamente proporcionais.

b) O número de espiras não deve ser alterado, pois o valor eficaz e o número de espiras são grandezas não relacionadas.

c) O número de espiras deve ser dobrado, pois o valor eficaz e o número de espiras são grandezas diretamente proporcionais.

d) O número de espiras deve ser reduzido pela metade, pois o valor eficaz e o número de espiras são grandezas diretamente proporcionais.

e) O número de espiras não será alterado, pois o valor eficaz e o número de espiras são grandezas inversamente proporcionais.

Seção 1.3

Componentes discretos usados em eletricidade

Diálogo aberto

Agora que caminhamos um pouco em nosso projeto de elaboração de um sistema de controle de injeção de combustível em um sistema de energia, estamos aptos para selecionar os materiais magnéticos para a elaboração de um circuito magnético e vamos partir para a próxima etapa do projeto: a definição dos fornecedores dos componentes discretos que utilizaremos para a montagem de um circuito elétrico para controle de corrente e tensão que determinará a posição da válvula de admissão de combustível no sistema de geração de energia.

Com base no circuito magnético estudado nas seções anteriores, precisamos agora introduzir ao sistema uma forma de verificar a altura em que a válvula se encontra e acoplar à nossa lógica de controle para a abertura dessa válvula um medidor de velocidade, para que o sistema identifique a necessidade de abrir ou fechar o dispositivo. Para essa função de sensor de velocidade, foi determinado que nosso projeto utilizará um captador magnético, industrialmente conhecido como *PICKUP* magnético.

Após a definição dos materiais que poderão ser utilizados para o projeto, está na hora de começar a procurar quem no mercado fornece esse tipo de material ou componente. Essa etapa do projeto focaliza o início do desenvolvimento de fornecedores com base no tipo de componente necessário para o projeto, levantando as opções de fornecedores por componente.

É sempre bom ter em mente que para o desenvolvimento de um fornecedor é importante entender de forma distinta cada um dos componentes que compõem o circuito elétrico de controle da válvula de admissão de combustível, além de compreender os limites de operação de cada componente para poder selecionar componentes similares que possam substituir os componentes selecionados para o projeto.

Não pode faltar

Nesta seção vamos adentrar o universo dos circuitos elétricos utilizados para o controle de sistemas de conversão eletromecânicos. O funcionamento desse circuito magnético e seus componentes serão explicados a seguir.

Reflita

Você já parou para pensar de que maneiras os circuitos magnéticos que estudamos nas seções anteriores podem ser conectados com os circuitos elétricos que você já conhece e nas infinitas possibilidades que se abrem para encontrar soluções às necessidades práticas da indústria?

Resistor elétrico

O resistor é um dos componentes discretos utilizados em circuitos elétricos. Esse tipo de dispositivo é considerado um elemento condutor de eletricidade, ou seja, ele possui uma permeabilidade eletromagnética, também denominada como condutividade elétrica, para esse tipo de dispositivo. Sua principal função é limitar de forma controlada a quantidade de corrente que passa por ele, independentemente se a alimentação do circuito foi feita em CC ou CA.

A condução elétrica em um material é resultado da interação entre partículas elétricas, excitadas através de uma fonte de tensão ou corrente, e um material eletricamente condutor. Cada tipo de material condutor possui uma estrutura única em sua composição, o que permite que cada tipo específico de material tenha propriedades diferentes entre si.

A condutividade elétrica em um material se dá através de partículas atômicas denominadas Cargas Elétricas. O exemplo mais comum de carga elétrica é o elétron, com carga $-1,6\times10^{-19}C$ (coulomb). Como vimos anteriormente, a permeabilidade magnética pode ser determinada por uma série de equações em função da corrente que percorre um circuito magnético, bem como pelo fluxo magnético estabelecido por essa corrente. De forma análoga, a equação que determina a relação entre uma tensão V aplicada a um circuito elétrico de resistência R, pelo qual flui uma corrente *i*, pode ser denominada como:

$$V = Ri. \quad (1.40)$$

Em que a resistência R é dada em ohms, representada pela letra grega Ω. Além da resistência de um material, podemos também definir a resistividade de um material, em função da área de seção reta do material, o comprimento l desse material e de sua resistência elétrica, conforme mostra a equação a seguir.

$$\rho = \frac{RA}{l}. \quad (1.41)$$

A resistividade ρ de um material é definida em $\Omega \cdot m$ (Ohm metro) e pode ser considerada como o inverso de uma propriedade de materiais condutivos denominada Condutividade σ, definida como:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (1.42)$$

A condutividade e a resistência elétrica serão as propriedades mais utilizadas durante as próximas seções.

Capacitor elétrico

Diferente de um resistor, um capacitor pode ser considerado um elemento dinâmico de um circuito elétrico, pois ele tem a capacidade de armazenar uma quantidade de energia que pode ser recuperada em um dado instante. Por essa razão, esses componentes também são denominados dispositivos armazenadores.

Capacitores são dispositivos compostos por dois conectores, cada um desses conetores é acoplado a um corpo condutor. Entre os dois corpos condutores presentes no capacitor há um elemento não condutor os separando, de forma que, se houver acúmulo de carga em um condutor, essa carga terá que passar por um circuito externo ao capacitor para que a carga atinja o outro corpo condutor. Para descrever como essas cargas se deslocam por um circuito externo, vamos imaginar que um pequeno deslocamento de cargas Δq ocorreu entre um corpo condutor e outro e que em um condutor foi depositado uma carga $+q$ e no outro condutor uma carga $-q$.

A relação entre o deslocamento de cargas Δq entre os elementos condutores de um capacitor gera uma diferença de potência ΔV entre seus terminais. Cada capacitor possui uma quantidade máxima de carga que pode ser trocada entre seus elementos condutores. Essa capacidade máxima é verificada quando uma tensão v é aplicada a um capacitor de carga q; o capacitor, então, é considerado carregado a uma tensão v, proporcional à carga q.

Em nosso livro consideraremos o fluxo de corrente instantâneo, mesmo sabendo que esse parâmetro é um parâmetro variante no tempo, ou seja, a corrente de determinado elemento medida ao longo do tempo é a somatória de todas as medidas instantâneas em um determinado espaço de tempo.

Assimile

O fluxo de carga entre os elementos condutores de um capacitor acontece ao longo do tempo de forma não instantânea, assim como acontece em um dispositivo puramente resistivo. A variação da tensão nos polos de um capacitor pode ser dada pela equação:

$$v(t) = \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} idt + v(t_0). \quad (1.43)$$

Existe uma relação entre a carga q e a tensão v, aplicada aos terminais de um capacitor, que pode ser calculada através da equação abaixo, considerando C como a capacitância do dispositivo, dada em Farad (F), em homenagem a Michael Faraday:

$$q = vC. \quad (1.44)$$

Considerando o capacitor como um dispositivo de armazenamento de energia, podemos calcular a energia armazenada w_c por esse componente, dada em Joule (J), com base na tensão v aplicada em seus terminais e na capacitância determinada entre os elementos condutores do capacitor. A equação 1.45 mostra como essa energia armazenada pode ser calculada.

$$w_c = \frac{Cv^2}{2}. \quad (1.45)$$

Após ser carregado, um capacitor tem a propriedade de manter constante a carga, a tensão e a energia presentes nele, supondo que o circuito conectado ao capacitor seja aberto ou que o capacitor seja removido do circuito sem que seus terminais sejam curto-circuitados.

Indutor elétrico

Vimos no item anterior que a corrente que flui em um circuito elétrico pode ser resultante da diferença de potencial elétrico entre dois condutores presentes em um capacitor, mesmo que essa diferença de potencial seja estática, ou seja, as cargas de um capacitor carregado se comportam de forma estática até que haja um meio (circuito) para que o fluxo possa fluir.

Assim como cargas estáticas podem exercer força elétrica umas nas outras, cargas em movimento, como em uma corrente elétrica fluindo em um determinado circuito, também podem exercer influência umas nas outras. Essa força magnética exercida pelo movimento de cargas elétricas gera um campo magnético, que, quando confinado em uma série de espiras, ou em um enrolamento, gera uma força magnética em seu núcleo.

Vimos anteriormente que um enrolamento de N espiras gera um fluxo magnético, esse enrolamento de N espiras, composto por um fio condutor e dois terminais, é denominado indutor.

A corrente que flui através do fio que compõe o indutor produz um fluxo magnético ϕ que circula por cada uma das espiras do indutor. O fluxo total λ é determinado pela equação:

$$\lambda = N\phi . \quad (1.46)$$

Não vamos repetir nesta seção todo o estudo realizado nas seções anteriores, nas quais já tratamos os circuitos magnéticos e seus elementos, como o enrolamento de espiras que acabamos de ver, representando o componente indutor. Nosso foco nesta seção é mostrar quais são as propriedades e aplicações de um indutor em um circuito elétrico, ou magnético, desta vez com a variável tempo envolvida em nossa análise.

O fluxo total representa a soma de todos os fluxos de cada espera, denominado fluxo concatenado. Para um indutor linear, o fluxo total é diretamente proporcional à corrente i que passa pelo indutor e à indutância L do componente. Logo, podemos definir o fluxo concatenado como:

$$\lambda = N\phi = Li . \quad (1.47)$$

Assim como acontece com os resistores, os componentes indutores também dissipam potência em forma de calor ao longo do tempo. Se considerarmos um indutor real, o armazenamento de energia w_L em função do tempo $w_L(t)$ é descrito por uma equação em função do tempo, mostrada abaixo:

$$w_L(t) = \frac{1}{2}Li^2(t) . \quad (1.48)$$

Porém, se considerarmos um indutor ideal no qual não há dissipação de energia, essa equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$w_L = \frac{1}{2}Li^2 . \quad (1.49)$$

Fazendo uma correlação entre a presença de indutores, resistores e capacitores em um circuito elétrico, os indutores, além da capacidade de armazenamento de energia, têm a capacidade de converter energia eletromagnética em energia mecânica, como é o caso de uma válvula magnética. Os resistores limitam a tensão aplicada aos terminais dos outros dispositivos presentes no circuito e os capacitores evitam mudanças abruptas na quantidade de energia desses componentes. Uma mudança abrupta de corrente nos terminais de um indutor pode gerar um pico de tensão em seus terminais, de forma que a presença de capacitores neste circuito

garanta uma curva de amortecimento, caso ocorra alguma mudança repentina de tensão ou corrente nos terminais de enrolamento de espiras linear ou indutor linear.

Permeabilidade magnética dos materiais

A permeabilidade magnética de um material específico, dada em Henry/metro (H/m) é a grandeza utilizada para se medir o campo magnético que se encontra no interior de um determinado material ou dispositivo. Essa medida é feita em relação a um segundo campo denominado campo magnetizante ou campo de excitação.

Essa grandeza é determinada tendo como referência a permeabilidade magnética de um espaço livre, ou vácuo, definida como μ_0, conforme já visto na Seção 1 desta unidade:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}. \quad (1.50)$$

A definição da permeabilidade magnética relativa μ_R de um material magnético é a razão entre a permeabilidade característica do material μ magnético, pela permeabilidade absoluta estabelecida como permeabilidade do ar.

$$\mu_R = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (1.51)$$

A utilização da permeabilidade dos materiais, na indústria, é encontrada em seu valor em permeabilidade relativa. A tabela abaixo ilustra a permeabilidade relativa de alguns materiais. Esse tipo de informação é encontrada nos documentos técnicos disponibilizados pelos fabricantes de materiais magnéticos.

Tabela 1.1 | Permeabilidade relativa de diversos materiais

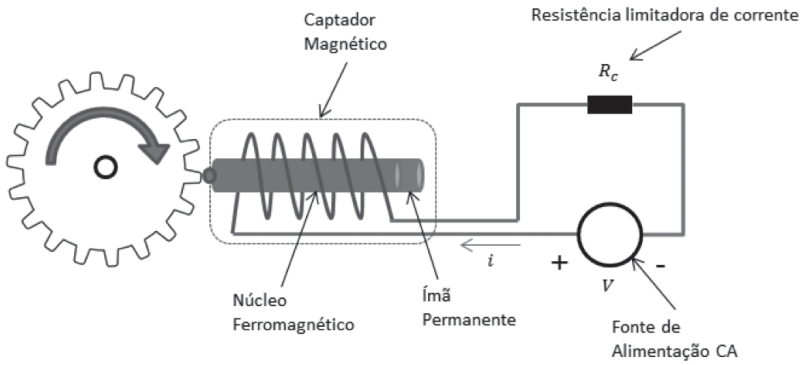
Material	μ_R [H/m]	Classificação
Ferro Puro	4000,00	Ferromagnético
Aço-silício	3000,00	Ferromagnético
Prata	0,99999981	Diamagnético
Alumínio	1,00000065	Paramagnético
Berílio	1,00000079	Paramagnético
Níquel	50,00	Ferromagnético
Ferro Fundido	60,00	Ferromagnético

Fonte: Simone e Creppe (1994).

Exemplificando

Segue abaixo um exemplo de circuito magnético que forma o captador, industrialmente conhecido como *PICKUP* magnético.

Figura 1.13 | Circuito captador magnético.



Fonte: elaborada pelo autor.

O captador magnético depende de alguns componentes, como resistores, capacitores e indutores para seu controle. O dispositivo de detecção do movimento da roda dentada funciona da seguinte forma: todas as vezes em que um dente passar pelo captador magnético é gerada uma oscilação no sistema núcleo ferromagnético + imã que gera um pulso como pico de tensão no circuito; esse circuito não entrará em curto circuito, pois existem resistores que limitam a amplitude do pulso.

O circuito de controle do sistema magnético também dispõe de capacitores que operam em conjunto na detecção desse pulso, ao passo que, no instante em que o dente da roda dentada passa pelo circuito magnético causando a oscilação, os capacitores do circuito de detecção são carregados e o tempo de descarga desse circuito é o tempo que um processador de dados tem para registrar o pulso obtido. Em seguida, há um espaço vazio entre os dentes da roda dentada. Esse espaço representa também uma lacuna no tempo, na qual os capacitores serão descarregados. O circuito processador de controle entende que o pulso teve um fim e espera o próximo pulso no tempo para calcular a velocidade de um sistema de geração, por exemplo, usando como referência o número de pulsos por unidade de tempo.

Pesquise mais

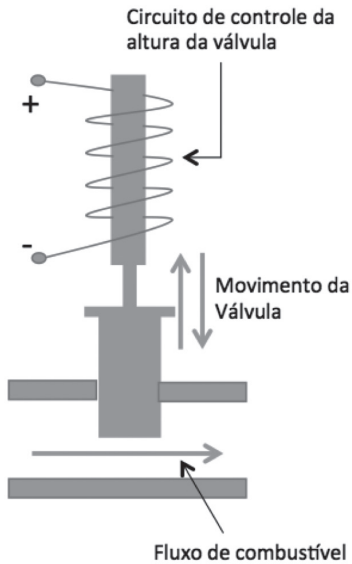
Saiba mais sobre as diversas aplicações de circuitos magnéticos na conversão eletromecânica de energia lendo:

SIMONE, Gilio Aluisio; CREPPE, Renato Crivellari. **Conversão eletromecânica de energia:** uma introdução ao estudo. São Paulo: Erica, 1999.

Sem medo de errar

Vamos considerar um sistema de admissão de combustível em um gerador de energia elétrica controlado por uma válvula que faz parte de um circuito magnético no qual está presente uma espira de N enrolamentos, conforme foi amplamente visto nas seções anteriores. A válvula em questão é movimentada pela indução de uma corrente elétrica que flui sobre as espiras do circuito magnético. A figura abaixo ilustra esta situação.

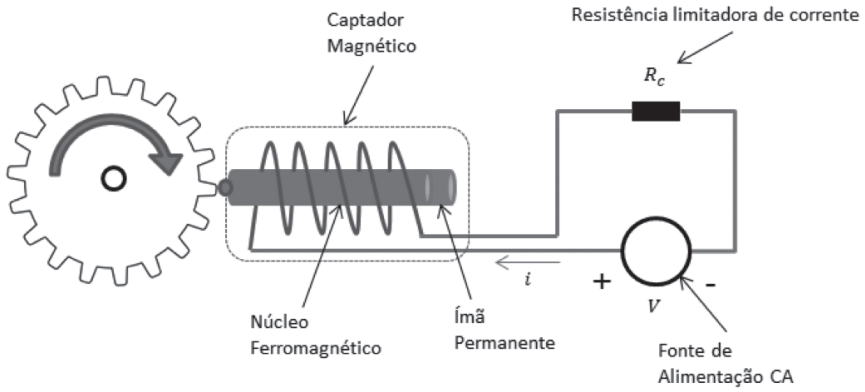
Figura 1.12 | Válvula de admissão de combustível.



Fonte: elaborada pelo autor.

Precisamos introduzir ao sistema uma forma de verificar a altura em que a válvula se encontra e acoplar a nossa lógica de controle para abertura dessa válvula, um medidor de velocidade, para que o sistema identifique a necessidade de abrir ou fechar o dispositivo. A melhor solução para o problema foi identificada como um captador, industrialmente conhecido como *PICKUP* magnético. O circuito pode ser descrito esquematicamente conforme Figura 1.14

Figura 1.14 | Circuito captador magnético.



Fonte: elaborada pelo autor.

Esse tipo de dispositivo pode ser comprado em diversos fabricantes, vale a pena uma pesquisa online para ampliar seus horizontes em relação às opções fornecidas pelo mercado.

Para finalizar essa etapa do projeto, é necessário enviar para aprovação a escolha do fornecedor. Certamente, para responder ao seu supervisor, é importante levantar um número mínimo de 3 fornecedores e 3 cotações para escolha do fornecedor. Em seu relatório final deverá constar o preço e o prazo de entrega de cada um dos fornecedores e as características técnicas de cada um. Para esse caso em específico, o preço é o principal ponto a ser observado, já que se trata de um componente muito simples e comumente utilizado na indústria.

Nesse momento, a válvula e o sistema que a regula podem ser descritos detalhadamente para o cliente, também o seu funcionamento, junto a uma estimativa de custo.

Avançando na prática

Limites de operação para uma válvula magnética

Descrição da situação-problema

Projetos de automação e controle de dispositivos eletroeletrônicos, como, por exemplo, dispositivos para controle de velocidade em geração de energia, utilizam circuitos elétricos para determinados fins específicos. Um circuito elétrico muito utilizado em circuitos de controle de abertura e fechamento de uma válvula, como indicado em nossa seção, além de controlar a altura da válvula, serve para limitar a tensão e a corrente que chega até a válvula, de forma que essa corrente ou tensão

não ultrapasse os limites de operação do sistema.

Imagine que seu supervisor direto solicitou um circuito de controle para um dispositivo que recebe um sinal de 4 a 20mA para operar a válvula servo mecanismo, abrindo e fechando a válvula, sendo que o intervalo de 4mA até 20mA deve ser o intervalo de operação da válvula, considerando a abertura máxima e mínima do dispositivo.

Elabore os requisitos básicos de funcionamento de um circuito para controle de um sinal 4 a 20mA para recepção do sinal proveniente do sistema de controle.

Resolução da situação-problema

Para estabelecer os requisitos de um circuito, é necessário, em primeiro lugar, levantar os dados intangíveis, ou seja, reconhecer as informações pré-determinadas para o projeto; neste caso, a variação na corrente previamente estabelecida entre 4 a 20mA.

Requisito 1: Corrente mínima → 4mA, **Requisito 2:** Corrente máxima no circuito → 20mA.

Dando continuidade ao nosso levantamento de requisitos, como foi explicado durante a seção, o que limita a corrente em um circuito elétrico são os resistores. Para calcular os resistores, precisaremos de uma fonte de alimentação fixa, para que a modificação dos resistores seja o suficiente para os limites de 4 a 20mA. Portanto:

Requisito 3: Fonte de alimentação fixa.

Vamos fazer um teste, escolhemos uma fonte de alimentação muito utilizada em sistemas eletrônicos, a de 48V. Com uma fonte de 48V, para obtermos um circuito simples pelo qual passa uma corrente de 4mA, a resistência pode ser determinada como $R_{min} = \frac{U}{i_{min}} = \frac{48}{0,004} = 12k\Omega$. De forma análoga, podemos calcular a resistência para uma corrente de 20mA: $R_{max} = \frac{U}{i_{max}} = \frac{48}{0,020} = 2,4k\Omega$. Podemos concluir que:

Requisito 4: Resistência deve ser controlada por um resistor variável, ou um potenciômetro de $12k\Omega$ a $2,4k\Omega$.

É importante observar que o sensor de velocidade conta as variações de estado da roda dentada, gerando um sinal de 4 a 20mA, ou seja, a integral dos pulsos é considerada como a soma desses pulsos. Existe um outro circuito associado a essa contagem de dentes da roda dentada que transforma esse número de vezes que os dentes passam em um determinado espaço de tempo com sinal fixo de 4mA a 20mA, que será utilizado como sinal de referência.

Faça valer a pena

1. Todo elemento que é parte de um circuito elétrico possui propriedades resistivas, ou seja, a propriedade de estabelecer uma certa resistência para que a corrente flua pelo circuito. Dentre esses elementos, podemos considerar um fio elétrico condutor, de 1mm de diâmetro e 2 metros de comprimento, como exemplo para conexão da alimentação de um painel de controle a um dispositivo de controle de velocidade, como tem exemplificado nosso projeto.

Em um fio de cobre, com as caraterísticas mencionadas acima, é aplicada uma tensão de 500mV, pelo qual passa uma corrente instantânea de 0,116ª. A resistividade desse fio de cobre pode ser considerada como:

a) $\rho = 1,69 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

b) $\rho = 1,55 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

c) $\rho = 1,89 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

d) $\rho = 1,69 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

e) $\rho = 1,55 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

2. Um capacitor elétrico tem a propriedade de armazenar energia pois o fluxo de carga entre seus condutores não acontece de forma instantânea. Essa propriedade dá ao capacitor uma função amplamente utilizada na indústria, a função de trabalhar em circuitos elétricos variantes no tempo, de forma que sua capacidade de carga e descarga faça com que o circuito possa, por exemplo, trabalhar em regime linear mesmo com uma alimentação variante no tempo, como é o caso de um circuito alimentado por um sistema de corrente alternada CA.

Um capacitor de 50μF está inicialmente carregado com $3,3V$. Podemos afirmar que a carga q presente no dispositivo de armazenamento de energia é de:

a) 165μC

b) 275μC

c) 385μC

d) 495μC

e) 505μC

3. Dispositivos indutores tem a característica de excitar um fluxo magnético no circuito em que se encontram. Esse fluxo magnético é decorrente da interação entre a corrente que percorre o enrolamento de N espiras e o número efetivo de espiras desse enrolamento, bem como a soma do fluxo concatenado em cada uma das espiras.

Calcule o fluxo concatenado de um enrolamento de espiras, ou indutor, pelo qual flui um fluxo por espira de $\phi = 0,05Wb$. Considere um enrolamento de 100 espiras.

a) 1Wb

b) 2Wb

c) 3Wb

d) 4Wb

e) 5Wb

Referências

JOHNSON, David E.; HILBURN, John L.; JOHNSON, Johnny R. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 539 p.

SIMONE, Gilio Aluisio; CREPPE, Renato Crivellari. **Conversão eletromecânica de energia:** uma introdução ao estudo. São Paulo: Erica, 1999. 324 p.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 728 p.

Conversores eletromecânicos, sistemas magnéticos, força e conjugado magnético

Convite ao estudo

Em nossa unidade anterior, tivemos a oportunidade de compreender os conceitos básicos dos circuitos magnéticos, estudar as principais características e funções dos seus componentes e também de alguns exemplos de como esse tipo de material é utilizado pela indústria atualmente. Agora, vamos dar continuidade aos estudos buscando compreender como componentes discretos e materiais magnéticos podem ser integrados a sistemas mais complexos, que utilizam a força de um campo magnético para quaisquer aplicações em conversão eletromecânica.

Para um projeto que envolva geração de energia elétrica, é de extrema importância entender o funcionamento do gerador, mesmo que o objetivo não seja a produção de um gerador em si. Saber avaliar se a malha de controle foi desenhada da forma mais otimizada possível, de acordo com os requisitos do cliente, depende da compreensão do sistema magnético como um todo, tendo como base os princípios de conversão eletromecânica de energia, sabendo quais forças atuam no conjunto e quais modelos matemáticos podem ser aplicados.

Uma das principais questões abordadas nesse contexto é a relação entre a entrada de energia em um sistema, a partir de fontes de alimentação mecânica e a saída em formato de energia elétrica, considerando o deslocamento e/ou acúmulo de energia armazenada nos campos magnéticos envolvidos no sistema. Considerando, claro, que parte dessa energia acaba se dissipando em forma de energia térmica, ou seja,

calor. Será necessário adentrarmos no universo dos sistemas de campo magnético, sendo feita uma análise teórica e prática dos conjugados magnéticos e das forças que atuam nesses sistemas.

Nessa seção, você se colocará no lugar de um engenheiro eletricista que trabalha como consultor para empresas que trabalham com equipamentos de conversão eletromecânica de energia. Sua competência em construir e analisar circuitos magnéticos com base em componentes elétricos e materiais magnéticos é muito valorizada no mercado de trabalho. Um de seus projetos envolve uma empresa geradora de energia elétrica com base em um parque eólico. Você precisa ajudá-los na seleção de um gerador e na avaliação do sistema de controle para atendê-lo. Toda a sua análise deve ser documentada e enviada ao cliente estritamente dentro dos prazos de um cronograma.

Para cumprir essa tarefa, uma compreensão mais profunda dos princípios da conversão eletromecânica de energia é necessária.

Seção 2.1

Conversão eletromecânica de energia no campo elétrico e no campo magnético

Diálogo aberto

No contexto de controle, automação e interação com dispositivos conversores de energia, é sempre importante dimensionar quais serão os limites de operação de um equipamento em termos de sua carga máxima e mínima, com base nas aplicações a que serão destinadas, de pequeno, médio ou grande porte. Esse limite de operação é comumente chamado de range de operação, palavra proveniente da língua inglesa, que significa, nesse contexto, limiar de operação.

Lembre-se, você é consultor para uma empresa geradora de energia, com base na transformação de energia eólica em energia elétrica. Você está auxiliando o cliente na seleção de geradores, dentre as opções disponibilizadas por diversos fornecedores. Parte de sua tarefa envolve verificar os limiares de corrente para um gerador que faz parte de um sistema de geração de energia, que fornece de 10kW a 70kW de potência ao sistema, com tensão de saída em 600V.

Para trabalhar nessa área são necessários os conceitos aprendidos na unidade anterior, além de conceitos como balanço energético e método de energia, serão estudados quais elementos de um circuito magnético devem ser levados em consideração no momento de se criar um modelo matemático que defina o sistema de conversão eletromecânica. Além desses conceitos, nessa fase é importante ter algum contato com a documentação dos componentes de cada fabricante, sempre com uma visão crítica em relação a essa documentação.

Não pode faltar

Alguns tipos de dispositivos conversores eletromecânicos de energia realizam essa conversão por meio da utilização do campo magnético ou campo elétrico do próprio equipamento. Esses equipamentos são dimensionados de forma a propiciar a interação entre o campo elétrico ou magnético do circuito e um elemento passivo presente no sistema, que tenha a capacidade de se movimentar em função da variação do campo elétrico ou magnético mencionado acima.

Para o caso de um gerador de energia baseado na interação mecânica de um dispositivo e um circuito elétrico, o movimento dos elementos mecânicos do sistema faz com que alguma oscilação seja detectada pelo circuito eletromagnético presente no sistema. Dessa forma, ao perceber a oscilação, o circuito eletromecânico gera um sinal, que pode ser reaproveitado de diversas maneiras.

Os dispositivos para controle e medida de frequências exatas, ou variantes no tempo, são denominados transdutores. Como exemplo de um transdutor com capacidade de converter um sinal de onda mecânica em um sinal eletromagnético, podemos citar um captador de guitarra, elemento composto por um circuito que capta a vibração de uma corda oscilando com uma frequência correspondente a uma nota musical e codifica essa vibração mecânica em um sinal elétrico que pode ser gravado, amplificado ou simplesmente transmitido pelo espaço livre, propagando-se até não ser mais detectado.

Outro exemplo de transdutor são os autofalantes de um amplificador, que fazem o caminho contrário, transformando energia proveniente de um sinal elétrico em vibração mecânica da película que compõe o autofalante, fazendo com que o som seja amplificado.

Assim, um captador de guitarra, um autofalante ou um microfone são exemplos de conversão eletromecânica baseados em pulsos ou estímulos não contínuos. Existem ainda os sistemas de conversão eletromecânica que convertem uma entrada de sinal contínuo, como é o caso dos geradores de energia elétrica e motores elétricos. Existem também os transdutores de energia que funcionam como dispositivos produtores de força, ou torque, como é o caso de uma válvula solenoide, um motor de passo, um eletroímã ou uma válvula baseada em um embolo magnético móvel.

Nessa seção, analisaremos os princípios básicos de dispositivos que utilizam campos magnéticos para conversão de energia mecânica em energia elétrica e vice-versa. Nossa razão para analisar esse tipo de dispositivo e não dispositivos mais simples, como os captadores de guitarra ou sistemas de amplificação de som, se deve ao fato de os princípios que regem esses equipamentos mais complexos serem os mesmos princípios que determinam a conversão eletromecânica em dispositivos mais simples, além de serem mais amplamente utilizados na indústria de engenharia nos dias atuais.

Os conceitos apresentados nessa seção começam a dar início ao estudo dos componentes de força envolvidos no processo de conversão eletromecânica de energia.

Um dos principais conceitos a serem estudados é a regra da mão direita, que determina o sentido de uma força eletromagnética $\vec{F}$ de uma partícula de carga

q, que se move sob a influência da densidade do fluxo magnético $\vec{B}$ e do campo elétrico $\vec{E}$ presente no circuito.

Em sistemas que não apresentam os componentes do campo magnético, em que é detectado somente o campo elétrico, a força elétrica é dada por:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \tag{2.1}$$

Em sistemas em que não é detectado o componente elétrico ($E = 0$), ou seja, em sistemas magnéticos unicamente, podemos considerar que a força magnética desse circuito é determinada pela equação:

$$\vec{F} = q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right). \tag{2.2}$$

$\vec{v}$ representa a velocidade da partícula no mesmo referencial que observa o campo magnético.

Assim, a força eletromagnética total sobre uma partícula em movimento na presença de ambos os campos será a soma das contribuições descritas anteriormente: $\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$.

No contexto das Leis de Maxwell, é importante descrever este conceito em sua forma diferencial, tratando da densidade de carga (ρ) presente em um elemento de volume no interior do sistema. Isso permite reescrever a equação em termos da força eletromagnética ou de Lorentz sobre um elemento de carga na presença do campo magnético e do campo elétrico:

$$\vec{F}_v = \rho\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right), \tag{2.3}$$

em que $\vec{F_v}$ representa a força eletromagnética em função da densidade de carga ρ em um elemento de volume no interior de um condutor, por exemplo, e não mais em função da quantidade de carga q de uma partícula individual. Assim, a associação da densidade de carga dá origem à "densidade de força" $\vec{F_v}$. Essa grandeza pode ser integrada para resultar na força total sobre um equipamento elétrico.

De forma análoga à densidade de força, podemos calcular também a densidade de corrente de um circuito magnético, determinada por:

$$\vec{J} = \rho \vec{v} \tag{2.4}$$

Medida em amperes por metro, a densidade de corrente determina, consequentemente, a densidade de força do sistema como:

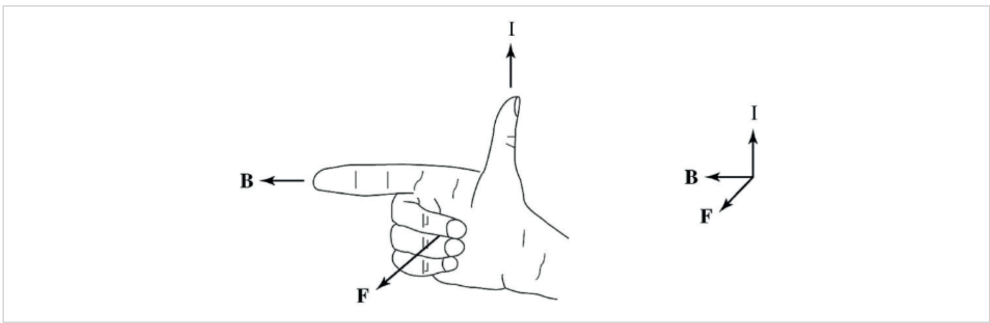
$$\overrightarrow{F_v} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{2.5}$$

O produto vetorial em todas essas equações mostradas acima segue a regra da mão direita, ilustrada na figura abaixo, em que é possível observar a direção do campo elétrico perpendicular ao campo magnético, que por sua vez é perpendicular à velocidade das partículas presentes em um circuito magnético.

Pesquise mais

A regra da mão direita pode ser mostrada também em sua forma negativa, ou também determinada como forma espelhada, pesquise como seria a regra da mão direita em formato Negativo, com base na Figura 2.1, a seguir. Pesquise em FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., C.E KUSKO, A. **Máquinas elétricas**. Nova Iorque: McGraw-Hill, cap 2, 1975, 621 p.

Figura 2.1 | Regra da mão direita



Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Kusko (1975).

Exemplificando

Uma aplicação muito curiosa para eletroímãs, e que prova o quão importante e preciso pode ser um dispositivo dessa natureza na indústria, é a sua utilização para condução de pacotes de elétrons em aceleradores de partículas. Para que serve um eletroímã em um acelerador de partículas?

Ele gera um campo magnético que, por sua vez, desvia os elétrons de sua trajetória em linha reta por meio da força eletromagnética.

Assim, torna-se possível fazer com que os elétrons viajem no interior de um equipamento circular, por exemplo. Aceleradores de partículas são muito utilizados em pesquisa científica fundamental e também em pesquisas aplicadas de novos materiais, como nos aceleradores de luz sincrotron.

O mesmo efeito está na base das antigas televisões de tubo. No interior dos tubos são disparados pacotes de elétrons, que são direcionados por campos magnéticos para atingirem seu alvo na tela da televisão, acendendo sistematicamente e em ordem predeterminada todos os seus pixels.

Existe um conceito muito importante definido como **balanço energético**, que tem relação com a potência que de fato é fornecida ao sistema pelo gerador.

Todo elemento responsável por gerar energia elétrica, ou transformar energia elétrica em energia mecânica, é composto por uma estrutura magnética que serve também para sustentação de todo o sistema.

A característica relevante para esse tipo de dispositivo é de natureza elétrica ou magnética, o que faz com que a força líquida produzida pelo circuito magnético não seja afetada determinantemente em função dos elementos de outra natureza presentes na estrutura rígida do sistema, por exemplo, o atrito entre o mancal e o eixo de um gerador ou a distribuição elétrica em todas as partes de um motor, bem como forças de compressão e desgaste de quaisquer peças do sistema. Esses elementos não são considerados para cálculo da força resultante elétrica ou magnética do conjunto.

Reflita

Podemos, então, compreender um sistema de conversão eletromecânica de energia como um dispositivo em que atuam inúmeras forças, de naturezas distintas. Quais seriam então as forças resultantes e relevantes para o circuito de conversão eletromecânica?

Um exemplo são os motores e geradores de energia elétrica, basicamente constituídos de duas partes: um rotor e um estator. Eles podem ser considerados, a grosso modo, como um par de polos magnéticos, assim como observamos em ímãs permanentes, que possuem dois polos magnéticos, um motor ou um gerador, também possuem dois polos magnéticos que funcionam com um princípio similar a um sistema magnético permanente.

O rotor presente em um motor elétrico é um elemento que possui um enrolamento de espiras por onde flui uma corrente de excitação, essa corrente flui pelo conjunto de espiras, gerando um fluxo magnético que, por sua vez, gera um campo elétrico que irá interagir com o material magnético formado pelo estator. Dessa forma, a interação entre os campos magnéticos é transformada em energia cinética (movimento).

De forma análoga, em um gerador, é necessária energia mecânica para se intensificar a interação entre os campos magnéticos entre rotor e estator. Essa energia cinética é então transformada em energia elétrica, ou corrente elétrica, que deve fluir mais intensamente pelo enrolamento de espiras de forma diretamente proporcional à intensidade da força mecânica presente na rotação do sistema.

Essa analogia nos remete a um princípio fundamental da conversão eletromecânica, o princípio da conservação de energia, em que é afirmado que na natureza nenhuma energia é criada ou perdida, a energia é apenas um estado em constante transformação. Para o caso de um gerador ou de um motor, a energia mecânica se transforma em atrito, calor, movimento e, por fim, em maior quantidade, em energia elétrica.

Existe um método para se calcular como essa energia é distribuída ao logo de um processo de conversão. Esse método é denominado **método de energia**, esse conceito será amplamente utilizado até o final dessa disciplina e também para a disciplina em que serão estudadas as máquinas elétricas.

Assimile

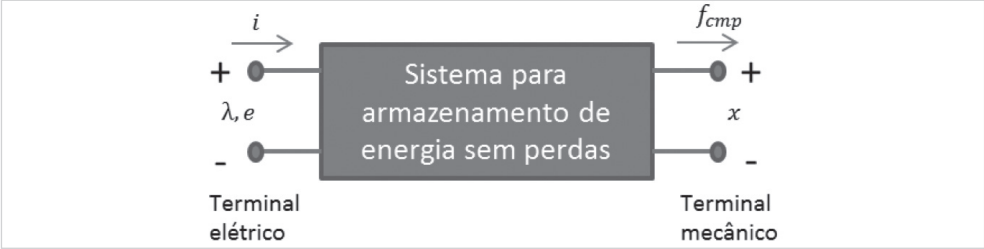
Para circuitos em que o campo magnético é considerado o maior armazenador de energia no sistema, podemos descrever o método de energia como uma variação de uma das leis fundamentais da termodinâmica:

INPUT (Fonte estática) = OUTPUT (Energia mecânica) + Energia acumulada no campo magnético + Calor

A relação acima mostra a geração de energia mecânica através da utilização de uma fonte estática de energia elétrica, o que acontece em um motor, essa relação é responsável por liberar uma certa quantidade de calor. Vale a pena ressaltar que a conversão eletromecânica para essa reação acontece dentro do motor, e a transferência de energia em forma de calor acontece de dentro para fora da máquina rotativa, especialmente por meio do fenômeno denominado aquecimento ôhmico, causado pela circulação de corrente elétrica pelas espiras de um enrolamento.

Para facilitar o nosso entendimento, vamos estudar um modelo de sistema para conversão de energia em que não é verificado, ou ao menos não será mensurado, esse tipo de perda. A Figura 2.2 mostra um sistema de armazenamento de energia magnética que possui como entrada um fluxo magnético λ ou uma fonte de tensão e (lembrando que $e = d\lambda/dt$), e como produto de saída uma força f_{cmp} proveniente desse campo magnético armazenado.

Figura 2.2 | Modelo matemático de um sistema de armazenamento de energia



Fonte: Umans (2014).

É importante diferenciar um sistema real de um modelo matemático. O modelo apresentado na Figura 2.2 desconsidera, por exemplo, o atrito entre os mancais ou a resistência intrínseca do elemento que compõe o enrolamento de espiras, desconsiderando também a energia desprendida em calor ou em ondas mecânicas que provocam ruído sonoro. O modelo possui forte sinergia unicamente ao objeto de estudo, em nosso caso, a conversão eletromecânica de energia.

Dessa forma, podemos descrever a potência elétrica P_{ele} na entrada do sistema como sendo a relação entre a tensão e e a corrente i aplicada aos terminais elétricos.

$$P_{ele} = ei \tag{2.6}$$

e a potência de saída de natureza mecânica pode ser descrita como uma relação entre a força proveniente do campo magnético e a velocidade instantânea do dispositivo mecânico.

$$P_{mec} = f_{cmp}\frac{dx}{dt} \tag{2.7}$$

lembre-se: trabalho está relacionado com força vezes distância, enquanto que potência é trabalho (W) por unidade de tempo ($P = dW/dt$). Para uma força constante, obtém-se a relação 2.7 .

Para um sistema sem perdas de energia, a energia elétrica fornecida deve ser convertida integralmente em energia armazenada nos campos magnéticos e em energia mecânica

Assim, considerando que a tensão aplicada aos terminais de um sistema de conversão é diretamente proporcional ao fluxo concatenado em um enrolamento de espiras, podemos concluir que a taxa de variação de energia magnética armazenada no sistema descrito acima pode ser expressa em função da corrente que flui por um enrolamento, menos a força resultante mecânica que altera a posição x do terminal mecânico:

$$P_{ele} = \frac{dW_{cmp}}{dt} + P_{mec} \quad \rightarrow \quad \frac{dW_{cmp}}{dt} = P_{ele} - P_{mec},$$

Onde $\frac{dW_{cmp}}{dt}$ representa a variação na energia magnética armazenada, de modo que

$$\frac{dW_{cmp}}{dt} = i\frac{d\lambda}{dt} - f_{cmp}\frac{dx}{dt}.$$

Então, em notação diferencial:

$$dW_{cmp} = id\lambda - f_{cmp}dx. \tag{2.8}$$

Essa equação mostra que é possível se obter a energia de um campo magnético armazenado unicamente em função do fluxo concatenado λ nas N espiras de um enrolamento e da posição x do terminal mecânico como resultante da força magnética armazenada.

Sem medo de errar

Para solução de nossa situação-problema, vamos imaginar que estamos trabalhando com um gerador que faz parte de um sistema de geração de energia com base na transformação de energia eólica em energia elétrica. O gerador específico que será estudado trabalha com 10kW a 70kW de potência, com tensão de saída em 600V. Com base nessas informações podemos, por exemplo, calcular o range de corrente de saída desse gerador, utilizando a equação $P_{ele} = ei$.

Assim:

Para corrente máxima $P_{ele} = ei \quad \rightarrow \quad i_{max} = \frac{P_{\max}}{e} = \frac{70000}{600} = 116,67A$.

Para corrente mínima $i_{min} = \frac{P_{\min}}{e} = \frac{10000}{600} = 16,7A$.

Dessa forma, uma possível especificação esperada para um gerador seria:

Range de potência nominal: 10kW a 70kW

Range de corrente nominal de saída: 17A a 117A

Tensão de saída: 600V

Observe que os valores foram arredondados como margem de segurança relacionada à pequena porcentagem de dissipação de energia. Esses valores precisam ser informados em sua análise, que será enviada ao cliente na data solicitada.

Avançando na prática

Ranges de operação para gerador de energia elétrica domiciliar

Descrição da situação-problema

Existem diversos tipos de geradores de energia elétrica, por exemplo, geradores utilizados em usinas hidrelétricas, que utilizam a força mecânica da água para excitar sua rotação e transformar essa energia mecânica em energia elétrica, assim como geradores que utilizam a força mecânica do vento para movimento de rotação, denominados energia eólica e, por fim, um dos geradores dos geradores mais utilizados, principalmente para demandas de pequeno porte, são os geradores movidos a combustível.

Geradores de energia elétrica podem ser utilizados em diversas situações em nosso dia a dia. Na maioria dos casos não temos contato direto com a energia elétrica que é consumida diariamente, seja no escritório, em casa ou nas ruas, essa energia simplesmente está disponível, nós a utilizamos e pagamos por ela, em forma de impostos, para os pontos públicos ou em forma de contas individualizadas, como é o caso da "conta de luz" que recebemos em casa.

Existem geradores, de pequeno porte, que trabalham de forma independente da rede de distribuição pública. Esses geradores podem ser utilizados para alimentar uma residência, caso ocorra alguma instabilidade na rede pública, podem também ser utilizados em locais remotos, como fazendas ou pequenos vilarejos, onde a rede pública ainda não disponibilizou infraestrutura. Esses geradores podem ainda ser usados em eventos e shows onde há uma demanda muito alta de energia em um pequeno período de tempo.

Vamos imaginar que a partir de agora você trabalha em uma empresa que atua nesse tipo de mercado, o mercado de locação de geradores de pequeno porte. Você então recebe de um cliente uma solicitação de locação de um gerador para

alimentar uma grande quantidade de equipamentos de som. A solicitação chega até você da seguinte forma:

"Prezado fornecedor, estamos em busca de um gerador para muitos equipamentos de som que serão ligados ao mesmo tempo, alguns 110 e outros 220. Favor enviar a cotação."

Resolução da situação-problema

Como trabalhamos na área de engenharia, e não em uma área de vendas, nosso dever é encaminhar a solução do ponto de vista técnico, para que a equipe de vendas possa analisar a disponibilidade em estoque para fornecimento de um gerador que cumpra a necessidade do cliente. Vamos dar início à análise. A única informação presente na solicitação é que alguns equipamentos serão alimentados com tensão 110V e outras com 220V, logicamente em corrente alternada. Cabe a você entrar em contato com o cliente e perguntar uma estimativa do número de equipamentos e se possível a potência média dos equipamentos. Após o contato com o cliente, foi informado que, em média, serão utilizados 50 equipamentos com uma potência média de 400W por equipamentos, o que totalizaria uma potência total de 20.000W. Como margem de segurança, vamos acrescentar 10% à potência média indicada pelo cliente e dobrar a potência total do gerador, para termos uma margem de 100%. Dessa forma teremos, 400W + 10% = 440W, para 50 equipamentos 50 x 440W = 22.000W, dobrando a potência para margem de 100%, serão necessários 44.000W. Portanto, se considerarmos que $P_{ele} = ei \Rightarrow 44000 = 220 \times i = \frac{P_{ele}}{e} = \frac{44000}{220} = 200A$.

Poderemos responder ao cliente que um gerador típico, de 400kVA, saída 220/380V, corrente máxima 200A, cumpre as especificações. Nosso dever agora é entrar em contato com alguns fornecedores e solicitar uma cotação para um gerador com tal especificação.

Faça valer a pena

1. O sentido de uma força magnética $\vec{F}$ de uma partícula de carga q, em função da densidade do fluxo magnético $\vec{B}$ e do campo elétrico $\vec{E}$ presente no circuito, pode ser determinado pela regra da mão direita, um dos principais conceitos já estudados nas disciplinas de Física. Essa relação pode ser representada, como mostra a equação abaixo, para sistemas que não apresentam os componentes do campo magnético, ou seja, $B = 0$.

Onde só é possível se detectar o campo elétrico em um sistema, ou seja, o campo magnético é considerado nulo, a força eletromagnética pode então ser definida como:

a) $\vec{F} = \frac{\vec{E}}{q}$

b) $\vec{F} = q\vec{E}$

c) $\vec{F} = \frac{\vec{E}}{q^2}$

d) $\vec{F} = q^2\vec{E}$

e) $\vec{F} = q\vec{E}^2$

2. A equação que determina a força eletromagnética F_v em função da densidade de carga ρ presente em um sistema magnético, do campo magnético $\vec{B}$ e do campo elétrico $\vec{E}$, pode ser determinada por $\vec{F_v} = \rho\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$, sendo v a velocidade da partícula relativa no campo magnético.

De forma análoga a densidade de força, podemos calcular também a densidade de corrente $\vec{J}$ de um circuito magnético, determinada por $\vec{J} = \rho\vec{v}$.

Considerando um sistema puramente magnético, em que a força magnética em função da densidade de carga, do campo magnético e da velocidade relativa de uma partícula, e a densidade de corrente também depende da densidade de carga e da velocidade relativa de uma partícula, podemos assumir que exista uma relação entre a força magnética e a densidade de corrente. Dessa forma podemos representar a força magnética em função da densidade de corrente como sendo:

a) $\vec{F_v} = \vec{J} \times \vec{E}$

b) $\vec{F_v} = \vec{J} \times \vec{B}$

c) $\vec{F_v} = \vec{J} \times \vec{v}$

d) $\vec{F_v} = \rho\vec{J}$

e) $\vec{F_v} = \vec{J} \times \vec{E} + \rho\vec{E}$

3. Algumas variáveis não são relevantes para elaboração do modelo matemático de um circuito gerador de energia, como o atrito entre os mancais de sustentação de um eixo. Dessa forma, podemos descrever a potência elétrica P_{ele} na entrada do sistema como sendo a relação entre a tensão e e a corrente i aplicada aos terminais elétricos. $P_{ele} = ei$, e a potência de saída de natureza mecânica pode ser descrita como uma relação entre a força proveniente do campo magnético e a velocidade instantânea do dispositivo mecânico. $P_{mec} = f_{cmp}\frac{dx}{dt}$.

Sabendo que a variação na energia armazenada no campo $\frac{dW_{cmp}}{dt}$ é uma relação entre a potência elétrica e a potência de saída do sistema, sendo $\frac{dW_{cmp}}{dt} = P_{ele} - P_{mec}$.

Considere que o estímulo elétrico para esse sistema é constante, e a posição x é variante em função do tempo. Podemos afirmar, para esse sistema, que a potência do campo para esse sistema pode ser determinada pela equação:

a) $\frac{dW_{cmp}}{dt} x = e\frac{di}{dt} - f_{cmp}$

b) $W_{cmp} = e\frac{di}{dt} - f_{cmp}\frac{dx}{dt}$

c) $\frac{dW_{cmp}}{dt} = ei - \frac{df_{cmp}}{dt} x$

d) $\frac{dW_{cmp}}{dt} = e\frac{di}{dt} - f_{cmp}\frac{dx}{dt}$

e) $\frac{dW_{cmp}}{dt} = ei - f_{cmp}\frac{dx}{dt}$

Seção 2.2

Sistemas de campo magnético

Diálogo aberto

Agora que estudamos mais profundamente os geradores, precisamos compreender melhor quais forças estão atuando no conjunto, quais energias são transformadas e dissipadas pelo circuito magnético e quais modelos matemáticos podem ser aplicados para um gerador ou um motor, além da total compreensão de um sistema de campo magnético.

Todo sistema de geração de energia elétrica possui um controle feito através de um painel elétrico. Cada componente do painel deve ser validado e testado, tanto funcionalmente como fisicamente, sendo que todas as suas conexões devem ser testadas antes da entrega final ao cliente.

Mesmo para sistemas que atendam uma demanda baixa de energia, como opções com imãs permanentes (para sistemas de baixa potência) ou como sistemas de geração de energia de grande porte, o controle de alguns dispositivos tem que ser feito em um domínio elétrico de baixa potência, com a utilização de relés, sendo cada relé responsável por acionar ou desativar uma funcionalidade específica de um sistema de controle.

A sua próxima tarefa, como consultor da empresa de geração de energia, consiste em determinar qual dispositivo será responsável pelo acionamento de um alarme em caso de falha no gerador eólico. Esse dispositivo deverá ser montado no painel elétrico de controle.

Nesse contexto, estudaremos como a energia é armazenada em sistemas de campo magnético, com excitação única, e como essa energia pode ser armazenada em sistemas multiexcitados. Serão também aprofundados temas como conversores eletromecânicos de energia com ímãs permanentes e, por fim, estudaremos os relés eletromagnéticos.

Não pode faltar

Anteriormente estudamos alguns exemplos de circuitos magnéticos que tinham elementos como um enrolamento de espiras, formando uma bobina, um material magnético rígido e um ou mais entreferros, em que a energia eletromagnética é acumulada para esse tipo de circuito. Os circuitos magnéticos vistos anteriormente mostravam uma conversão eletromecânica indireta, como no caso da válvula de admissão de combustível em um gerador de energia elétrica, o êmbolo da válvula que controla a quantidade injetada de combustível no sistema se movimentava por indução do campo magnético, e nunca por contato entre um material magnético e outro.

Vimos também que a taxa de variação de energia magnética acumulada $w_{ele'}$ em um circuito magnético, pode ser relacionada com a corrente i e a tensão e aplicadas àquele circuito.

$$\frac{dW_{ele}}{dt} = ei \tag{2.9}$$

Em um circuito magnético linear, com a presença de um entreferro, podemos afirmar que a relutância do entreferro é muito maior que a relutância do material magnético.

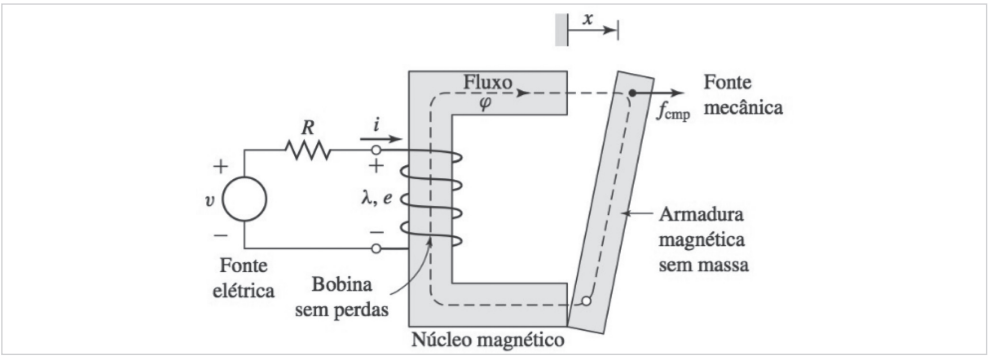
$$R_g >> R_c \tag{2.10}$$

Dessa forma, podemos observar que a energia acumulada em uma determinada parte do circuito magnético depende da capacidade que aquela parte do circuito tem de permitir que a corrente elétrica flua sob sua composição molecular, isso significa que quanto maior for a relutância do material maior será sua capacidade de reter a quantidade de carga que flui sobre ele, fazendo com que a maior parte da energia acumulada em um circuito magnético seja observada em partes de maior relutância, por exemplo, quando comparamos o material magnético, de permeabilidade alta, com o entreferro, de permeabilidade baixa, ou seja, relutância elevada quando comparada com a relutância do material magnético.

Um tipo de circuito magnético que exemplifica essa retenção de energia pode ser relembrado do Seção 2.1, em que foram apresentados os elementos básicos para criação de um circuito magnético com capacidade de conversão eletromecânica de energia. Vamos exemplificar nossa explicação trazendo de volta um dos circuitos vistos anteriormente, porém com uma pequena modificação, ao invés de um circuito composto por uma fonte de alimentação, um entreferro de ar, material

magnético, por onde passa um fluxo excitado por um conjunto de espiras que dá origem a uma bobina, vamos trocar o entreferro de ar por um dispositivo móvel, que, dependendo da resposta do circuito magnético em relação à excitação, pode se manter em uma posição ou em outra. Esse tipo de dispositivo, circuito elétrico com um elemento móvel em sua continuidade, tem como característica assumir duas posições para o elemento móvel, essas posições são abertas ou fechadas. Ele é chamado **relé eletromagnético**, indicado esquematicamente na Figura 2.3 .

Figura 2.3 | Relé eletromagnético



Fonte: Umans (2014, p. 129).

Em posição aberta, conforme mostrado na figura acima, o circuito apresenta uma descontinuidade em seu material magnético. Podemos entender essa descontinuidade como sendo a presença de um entreferro, ao passo que, quando o dispositivo se encontra em posição fechada, essa descontinuidade, ou presença, do entreferro não é verificada.

Se considerarmos o deslocamento do material como sendo representado pela distância x, podemos então afirmar que o fluxo concatenado que passa pelo sistema, excitado pelo conjunto de espiras, pode ser determinado pela relação que existe entre a indutância em função da distância x e a corrente que flui pela bobina, excitada pela fonte de alimentação representada na figura como v. Esse fluxo pode ser escrito de forma simplificada pela equação abaixo:

$$\lambda = L(x)i \tag{2.11}$$

É importante observar que um sistema de armazenamento de energia é um sistema que não apresenta perdas significativas em dissipação de energia, por essa razão, esse sistema pode ser considerado como um sistema conservativo.

Assimile

A energia acumulada W_{cmp} no campo magnético é diretamente proporcional ao fluxo magnético presente no circuito e a distância x verificada após o deslocamento no elemento móvel do dispositivo, decorrente a atuação do campo magnético nesse dispositivo.

Podemos, então, descrever a equação que determina a energia magnética em função do fluxo magnético e da indutância como:

$$W_{cmp} = \frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{L(x)} \tag{2.12}$$

Se substituirmos a Equação (2.11) na Equação (2.12), teremos a energia magnética em função da indutância e da corrente:

$$W_{cmp} = \frac{1}{2}L(x)i^2 \tag{2.13}$$

Lembrando que a indutância é determinada em função do quadrado do número de estiras de um enrolamento N^2, a área da seção reta do entreferro A_{gap}, a permeabilidade relativa do material μ_r e a distância g, ou tamanho, do entreferro.

$$L(x) = \frac{N^2 \mu_r A_{gap}}{2g} \tag{2.14}$$

Exemplificando

Suponha um sistema magnético linear, não variante no tempo, por onde passa um fluxo magnético 20Wb, excitado por uma corrente de 0,5A. Qual deve ser a energia armazenada nesse sistema?

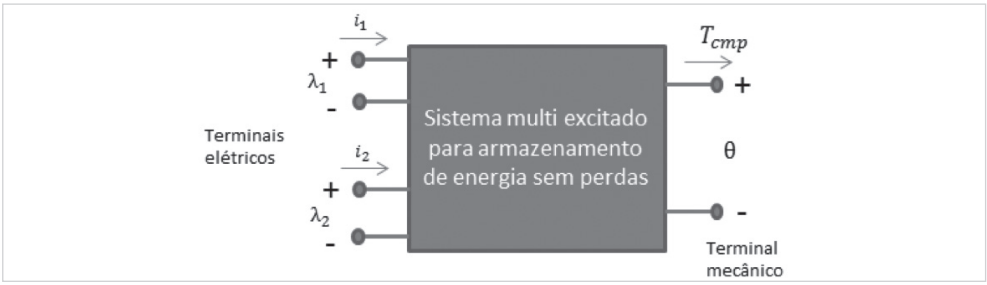
Solução:

Existe uma relação entre a determinação da energia e da coenergia. A equação a seguir mostra que essa relação é definida em função do fluxo concatenado que passa pelo sistema e pela corrente que excita esse fluxo, $W_{cmp} + W'_{cmp} = \lambda i$, considerando o sistema linear, em que a energia é igual a coenergia, teremos:

$$W_{cmp} + W'_{cmp} = \lambda i \Rightarrow 2W_{cmp} = \lambda i \Rightarrow W_{cmp} = \frac{\lambda i}{2} = \frac{20 \times 0,5}{2} = 5J\,.$$

Até o momento, vimos apenas exemplos e equações que funcionam muito bem para circuitos de excitação única, ou seja, com uma única fonte de alimentação. Vamos agora adentrar ao universo dos circuitos magnéticos, que apresentam mais de uma fonte de excitação, também denominados **sistemas de campo magnético com excitação múltipla**. Esse tipo de sistema pode ser entendido esquematicamente conforme a Figura 2.4:

Figura 2.4 | Sistema de armazenamento de energia por excitação múltipla



Fonte: Umans (2014, p. 147).

Pela lei da conservação de energia em um sistema de conversão eletromecânica, podemos considerar a quantidade total de energia armazenada no campo magnético como a somatória das energias responsáveis pela excitação do sistema, nesse caso, representadas pelos fluxos λ_1 e λ_2 respectivamente e consequentemente i_1 e i_2, além de considerar a parte da energia que é convertida em energia mecânica pelo conjugado conectado aos terminais mecânicos T_{cmp}. Dessa forma, a relação entre energia acumulada e a energia nos terminais de entrada e terminal de saída do sistema pode ser descrita como:

$$W_{cmp} = i_1\lambda_1 + i_2\lambda_2 - T_{cmp} \tag{2.15}$$

Para se calcular os limiares de operação de um sistema de excitação múltipla, é uma boa prática sempre levar em consideração a indutância individual de cada uma das fontes, de forma que considerando as fontes de forma independente uma da outra, teremos:

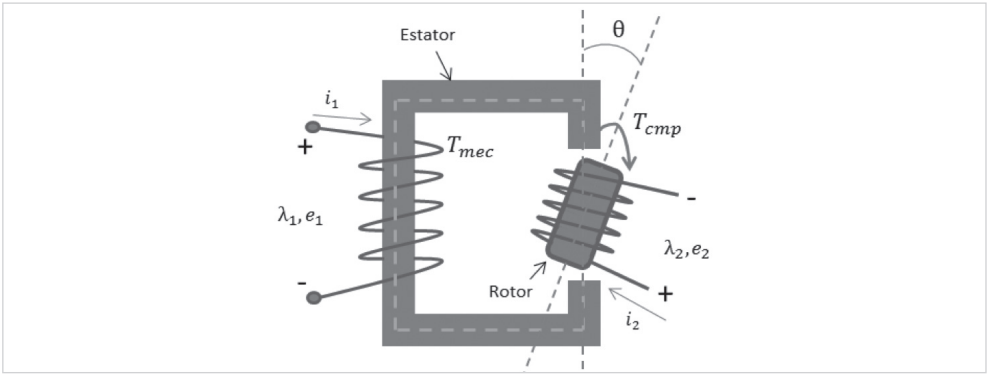
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \\ \lambda_2 &= L_{21}i_1 + L_{22}i_2 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Em sistemas multiexcitados precisamos retornar aos conceitos de *indutância própria e indutância mútua*, diferenciados na equação acima, (2.15), em que L_{11} representa a indutância própria do enrolamento de excitação 1, e L_{22}, a indutância própria referente ao enrolamento 2. De forma análoga, podemos determinar como L_{12} e L_{21} a representação da indutância mútua entre os enrolamentos 1 e 2, de forma que L_{12} representa a indutância presente do enrolamento 1 decorrente a presença da corrente i_2 gerada pelo enrolamento 2. Consequentemente L_{21} representa a indutância presente do enrolamento 2, decorrente a presença da corrente i_1 , gerada pelo enrolamento 1. Com isso concluímos que:

$$L_{12} = L_{21} \tag{2.17}$$

Em sistemas que apresentam um terminal mecânico rotativo, o deslocamento mecânico é determinado em função do conjugado T_{cmp} e do momento angular θ , confirme mostra a Figura 2.5, circuito com duas excitações, sendo uma delas um enrolamento presente em um elemento terminal rotativo, com deslocamento angular representado como θ .

Figura 2.5 | Circuito magnético com dupla excitação e terminal rotativo



Fonte: elaborada pelo autor.

A energia em um sistema multiexcitado com terminal rotativo, partindo de um sistema multiexcitado com terminais fixos, pode ser calculada da seguinte maneira, em função do deslocamento mecânico.

$$dW_{cmp}\left(\lambda_1, \lambda_2, \theta\right) = i_1 d\lambda_1 + i_2 d\lambda_2 - T_{cmp} d\theta \tag{2.18}$$

Estudamos circuitos excitados por enrolamentos de espiras, dependentes unicamente de corrente elétrica de excitação, para que ocorra a formação de um fluxo magnético no enrolamento e, em seguida, consequentemente, a manifestação do campo magnético.

Como vimos em nossos capítulos anteriores, existem outras fontes de excitação em circuitos magnéticos, como as fontes de fluxo magnético feitas com ímãs permanentes, também determinadas como material magnético rígido. Esse tipo de fonte eletromagnética pode ser utilizada em conjunto a um enrolamento de espiras, em circuitos multiexcitados, com alimentação heterogênea, podendo apresentar um ou mais enrolamentos de espiras, bem como um ou mais ímãs permanentes em sua composição.

Pesquise mais

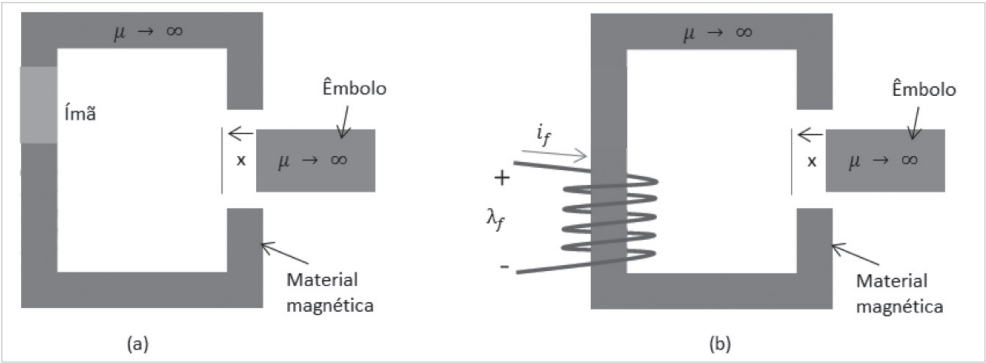
Ímãs permanentes podem ser constituídos de diversos materiais, entre eles o Neodímeo Ferro Boro, utilizado em autofalantes, fones de ouvido e disco rígido de computadores. Pesquise mais sobre esse material e suas aplicações em: **MagTek**, Soluções magnéticas, **Neodímio Ferro Boro**. Disponível em:

<http://www.magtek.com.br/imas/neodimio-ferro-boro/>. Acesso em: 24 ago. 2016.

Circuitos com ímãs permanentes funcionam de maneira ligeiramente diferente dos circuitos excitados por um ou mais enrolamentos de espiras, pois esse tipo de circuito não depende de uma corrente elétrica que flui sobre o enrolamento. Porém, é uma boa prática utilizar um artifício matemático para descrever a equação que determina a energia armazenada em um sistema excitado por ímã permanente.

Podemos considerar, como artifício matemático, a atuação do ímã como sendo a atuação de um campo magnético formado por um enrolamento de espiras fictício em série a um ímã permanente, de forma que a corrente de excitação no sistema passa a ser a corrente que passa pelo enrolamento fictício, conforme mostra a Figura 2.6.

Figura 2.6 | Circuito magnético com excitação por ímã (enrolamento fictício)



Fonte: elaborada pelo autor.

A figura ilustra o artifício matemático considerando um enrolamento fictício situado na mesma linha de atuação do campo magnético do ímã permanente.

Reflita

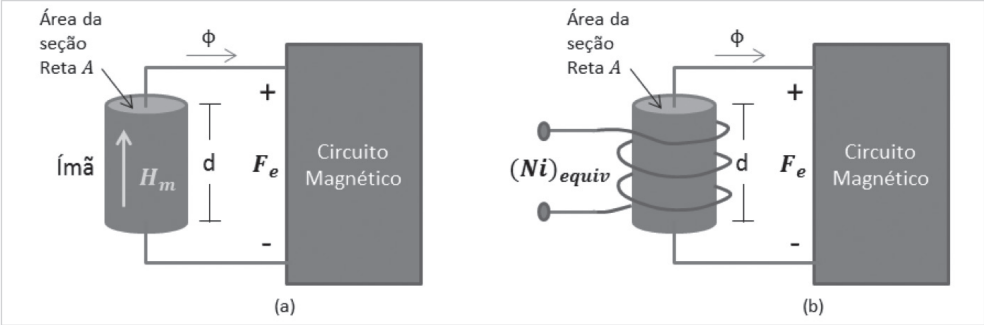
Olhando para o circuito indicado na figura 2.6(a), que contém um imã permanente, será que ele poderia ser substituído pelo circuito indicado na figura 2.6(b)?

Dessa forma, podemos calcular a energia armazenada por esse circuito em função do fluxo magnético fictício λ_f, da corrente fictícia i_f que passa pelo enrolamento de N_f espiras.

$$dW'_{cmp}\left(i_f, x\right) = \lambda_f di_f + f_{cmp} dx \tag{2.19}$$

Dando continuidade ao nosso estudo, vamos agora analisar um sistema genérico, em que uma seção de material magnético rígido, ou permanente, é substituída por uma seção de material magnético uniforme e linear, com a inclusão de um enrolamento fictício, como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 | (a) Circuito com ímã. (b) Circuito equivalente com espiras



Fonte: Umans (2014, p. 158).

Partindo da equação que define a força magnetomotriz em função da intensidade do campo magnético, podemos definir que:

$$H_m d + F_e = 0 \tag{2.20}$$

A intensidade do campo magnético no material magnético é definida como H_d, e F_e, define a densidade de força elétrica resultante no sistema magnético em função do comprimento longitudinal d do material magnético. Outro parâmetro importante para verificação da energia armazenada no sistema é a densidade de fluxo magnético B, determinada respectivamente para o sistema com ímã permanente e o sistema com enrolamento de espiras como:

$$B_m = \mu_R \left(H_m - H_c^{'} \right) \tag{2.21}$$

$$B = \mu_R H \tag{2.22}$$

O fluxo externo Φ produzido pelo conjunto magnético permanente, ou ímã, atua nesse circuito em função da área A de seção reta do material magnético, da densidade de fluxo magnético que, por consequência, é determinado em um sistema de excitação por ímãs permanentes em função da permeabilidade de recuo $\propto_R$ e intensidade do campo magnético H do material, como sendo:

$$\Phi = AB_m = \mu_R A \left(H_m - H_c^{'} \right) \tag{2.23}$$

Substituindo a Equação (2.20) na Equação (2.21) teremos:

$$\Phi = \mu_R A\left(-H_c^{'} - \frac{F_e}{d} \right) \tag{2.24}$$

Se compararmos o circuito mostrado na Figura 2.7(a) com o circuito mostrado na Figura 2.7(b), em que o elemento magnético rígido foi substituído por um enrolamento de espiras flexível, por onde flui uma corrente i, podemos escrever a equação equivalente à Equação (2.22) como:

$$\Phi = \mu_R A\left(\frac{(Ni)_{equiv}}{d} - \frac{F_e}{d} \right) \tag{2.25}$$

Em que $(Ni)_{equiv}$ representa a alimentação equivalente do circuito (b) em relação ao circuito (a). Vemos também que o mesmo fluxo será produzido no circuito magnético externo se o valor de $(Ni)_{equiv}$ do enrolamento de espiras for igual a $-H_c^{'}d$.

Sem medo de errar

Vamos agora retornar ao nosso projeto de um sistema de controle para atender a um gerador de energia elétrica, relembrando os conceitos que acabamos de aprender em relação aos dispositivos armazenadores de energia, indutores e circuitos alimentados por múltiplos enrolamentos, componentes que fazem parte do circuito elétrico que controla o dispositivo de armazenamento de energia, que pode ser transformada em energia mecânica.

Um sistema de controle para geração de energia é um sistema bastante complexo, em que estão presentes inúmeras variáveis de controle, para que nada ocorra de forma inesperada. Dentre essas variáveis de controle vamos focar em dispositivos que têm a função de alertar o mau funcionamento de um dispositivo. A escolha de um relé resolve o problema em alertar ao usuário que uma determinada função alterou seu estado, ou seja, relé aberto pode significar sistema sem problemas, enquanto que, se o relé se encontrar na posição fechada, representa algum problema no sistema. Essa escolha deve ser baseada na tensão que será aplicada aos seus terminais e a corrente que o dispositivo deve suportar.

É importante ter compreendido o funcionamento de um relé, como a energia pode ser armazenada em um campo magnético e como especificar componentes

para controle de um circuito magnético que controle um relé, quais os parâmetros e valores devem ser levados em consideração na hora da escolha. Para atender à solicitação do nosso cliente, poderia ser utilizado um relé biestável, com alimentação em 12VDC. Ao energizar o aparelho, o relé de saída permanecerá no estado de repouso. A cada pulso no comando externo, os contatos do relé de saída mudam de estado. As especificações técnicas detalhadas do fornecedor deverão ser encaminhadas para o cliente.

Outros relés trabalham com correntes altas, que, mesmo trabalhando com tensões baixas, têm a capacidade de controlar sistemas com correntes e tensões altas, uma vez que o relé funciona como um contato acionado automaticamente. Dessa forma, o circuito eletrônico de controle fica protegido e isolado do sistema de geração de energia, sistema por qual passam correntes altíssimas. É importante compreender que o relé é um dispositivo simples para controle de sistemas muito complexos e de alta capacidade.

Atenção

Um dos pontos críticos para escolha da especificação de um relé elétrico está relacionado à corrente máxima aplicada ao dispositivo, ou seja, aos terminais de carga, e não aos terminais da bobina ou enrolamento de espiras. Fique atendo quando for especificar o relé a ser utilizado, verifique se o circuito, por alguma razão, não fornecerá corrente maior que o especificado no relé.

Avançando na prática

Eletroímãs controlados por corrente

Descrição da situação-problema

Algumas aplicações que utilizam eletroímãs para controle de excitação dependem de um controle de corrente externo ao sistema. Essa corrente determina, por exemplo, a quantidade de energia fornecida ao sistema em função da indutância no enrolamento de espiras presentes no eletroímã.

Um eletroímã seria aplicável, por exemplo, para controle de um relé presente no painel elétrico de controle de um guindaste eletromagnético. Um sistema de controle para esse tipo de dispositivo é um sistema bastante complexo, em que estão presentes inúmeras variáveis de controle, para que nada ocorra de forma inesperada. Dentre essas variáveis de controle existem alguns dispositivos que têm a função de alertar o mau funcionamento de um dispositivo. Imaginem o estrago que um guindaste eletromagnético pode causar caso ocorra alguma falha em seu sistema.

Vamos imaginar que parte do projeto de controle do guindaste engloba utilizar o sinal de 4mA a 20mA, proveniente do dispositivo de carga que atua na ascensão do braço mecânico do guindaste, dispositivo eletrônico que possui uma lógica embarcada com a capacidade de avaliar, pela medida da quantidade de energia dissipada em formato de tração pelo circuito que controla o braço mecânico, se ele se encontra fora de seu limiar de operação, ou seja, se o peso está acima do suportado pelo guindaste. Foi solicitado que você identifique os valores máximos e mínimos de quantidade de energia que devem ser programados no regulador de peso do conjunto guindaste/carga, sabendo que a indutância referente ao circuito interno de controle é de $20H$, para que esse dispositivo eletrônico avise ao operador, via painel frontal, que o guindaste está atuando fora de seu range de operações.

Resolução da situação-problema

Considerando que a lógica programável do controle de carga possui como entrada um sinal de 4mA a 20mA e que o indutor de referência para cálculo da energia magnética tem valor $20H$, a referência de máxima e de mínima energia magnética esperada pelo controle de carga deve ser equivalente aos valores de 4mA a 20mA, respectivamente. Para esse cálculo utilizaremos a equação que determina a energia magnética em função da indutância e da corrente do sistema, dada por $2W_{cmp} = L(x)i^2$, logo, podemos calcular a energia mínima esperada como:

$$W_{cmp} = \frac{1}{2}L(x)i^2 = \frac{1}{2} \times 20 \times \left(4 \cdot 10^{-3}\right)^2 = 160 \cdot 10^{-6} = 0{,}16\,\text{mJ}.$$

Consequentemente, a quantidade de energia máxima deve ser:

$$W_{cmp} = \frac{1}{2}L(x)i^2 = \frac{1}{2} \times 20 \times 20^2 = 4\,\text{mJ}.$$

Faça valer a pena

1. Circuitos magnéticos têm a propriedade de armazenamento de energia, de forma que a energia acumulada W_{cmp} no campo magnético é diretamente proporcional ao fluxo magnético presente no circuito, em função da distância x, que representa o deslocamento no elemento móvel do circuito, decorrente da atuação do campo magnético nesse dispositivo.

Considere um sistema magnético que atua em um dispositivo móvel, excitado por um fluxo magnético $\lambda = 50Wb$, criado por uma espira de indutância $L = 10H$, calcule a corrente i verificada no sistema.

a) $1A$

b) $2A$

c) $3A$

d) $4A$

e) $5A$

2. Circuitos com ímãs permanentes funcionam de maneira ligeiramente diferente dos circuitos excitados por um ou mais enrolamentos de espiras, pois esse tipo de circuito não depende de uma corrente elétrica que flui pelo enrolamento. Porém, é uma boa prática utilizar um artifício matemático para descrever a equação que determina a energia armazenada em um sistema excitado por ímã permanente. Esse artifício matemático consiste em considerar o ímã um enrolamento de espiras fictício atuando em série a um ímã permanente, de forma que a corrente de excitação no sistema passa a ser a corrente que passa pelo enrolamento fictício

Calcule a densidade do fluxo magnético para um circuito excitado por um ímã permanente, onde foi verificada a intensidade do campo magnético $H = 0,5\,A/m$, e a coercividade ou intensidade do campo magnético fictício $H_c = 0,2\,A/m$, em um sistema em que a permeabilidade de recuo é $\mu_R = 6 \times 10^{-3}\,H/m$

a) $1,8 \times 10^{-3}T$

b) $3,6 \times 10^{-3}T$

c) $5,4 \times 10^{-3}T$

d) $7,2 \times 10^{-3}T$

e) $9,0 \times 10^{-3}T$

3. Todo sistema de geração de energia elétrica possui um controle feito através de um painel elétrico, que deve ser validado, testado, tanto funcionalmente como fisicamente, sendo todas as suas conexões testadas antes da entrega final ao cliente. Mesmo para sistemas que atendam uma demanda baixa de energia, como opções com imãs permanentes (para sistemas de baixa potência) ou como sistemas de geração de energia de grande porte, o controle de alguns dispositivos tem que ser feito em um domínio elétrico de baixa potência, com a utilização de relés, sendo cada relé responsável por acionar ou desativar uma funcionalidade específica de um sistema de controle

Considerando que um relé pode operar em dois estados (contato aberto ou contato fechado), sendo que o relé assume estado fechado quando uma corrente elétrica excita sua bobina, fazendo com que o contato seco presente no relé feche e a corrente flua pelo circuito, determine o módulo da intensidade da força necessária para se fechar um relé de campo magnético $H = 0,5A/m$ com distância entre os contato de $5mm$.

a) $2,0 \times 10^{-3} N$

b) $2,5 \times 10^{-3} N$

c) $3,0 \times 10^{-3} N$

d) $3,5 \times 10^{-3} N$

e) $4,0 \times 10^{-3} N$

Seção 2.3

Força e conjugado magnético

Diálogo aberto

Projetos de sistema de geração de energia, independentemente do porte, devem ser estudados matematicamente com o auxílio de softwares simuladores, antes de serem iniciados efetivamente. Esse estudo feito com base em simulações é conhecido como análise de factibilidade do projeto, a partir dela é tomada a decisão entre executar ou não o projeto. Para isso, é importante compreender a coenergia e algumas equações dinâmicas do sistema, além de técnicas analíticas para modelagem de um circuito.

Mesmo que teóricos, esses artifícios matemáticos nos fazem refletir sobre a solução que se está desenvolvendo, além de permitir que novas opções sejam levantadas e testadas em curto prazo para o mesmo projeto. Muitas vezes um cliente procura a indústria com uma demanda, mas esse mesmo cliente não tem ideia de como uma solução bem planejada pode suprir suas necessidades no futuro, conforme a escalabilidade do sistema.

Em um ambiente simulado, é possível analisar os parâmetros de um circuito elétrico ou magnético, considerando seus limiares de operação máximos e mínimos, além de projetar o funcionamento do sistema já verificando seu funcionamento ao longo do tempo.

Você, como consultor de soluções para geração de energia eólica, já venceu algumas etapas, os geradores disponíveis no mercado foram estudados e a estação de controle e automação dos sistemas de geração de energia elétrica está sendo projetada. Uma fase final do projeto exige que você avalie a força magnética de um dispositivo de armazenamento de energia magnética, com base em uma tabela de valores típicos de indutância em função do deslocamento x causado pela interação do campo magnético e o material magnético do dispositivo.

Para isso, você precisa entender bem quais forças estão atuando no conjunto, a total compreensão de um sistema de campo magnético, além de compreender quais os modelos matemáticos e soluções numéricas podem ser aplicados para a situação de interesse.

Não pode faltar

Alguns dispositivos de conversão eletromecânica têm a característica de transformação instantânea de toda a energia mecânica de excitação do circuito em energia elétrica ou vice-versa, transformação instantânea de todas os componentes de excitação eletromagnéticas em energia mecânica e movimento. Outra forma encontrada na indústria de conversores eletromecânicos de energia são os conversores, que além de transformarem energia elétrica em energia mecânica, ou vice-versa, têm a capacidade de armazenar parte da energia durante o processo de transformação, esse sistema tem uma curiosa característica de alterar o seu estado de forma permanente enquanto a energia é acumulada em seu circuito magnético.

Pesquise mais

Para saber mais sobre sistemas armazenadores de energia para conversão eletromecânica, acesse o artigo de Thelma Solange Piazza Fernandes.

Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/thelma/Capitulo7.pdf>. Acesso em: 29 set. 2016.

Para determinação da força resultante em um conjugado magnético, é importante considerar o conjunto magnético como um sistema de armazenamento de energia, em que a energia magnética armazenada W_{cmp} em um campo magnético pode ser calculada em função de duas variáveis independentes: o fluxo magnético λ e o deslocamento mecânico x causado pela força magnética resultante da interação entre o campo magnético armazenado e um dispositivo móvel magnético que componha o circuito. Podemos descrever a equação que determina a força magnética em função de λ e x como:

$$dW_{cmp}\left(\lambda, x\right) = id\lambda - f_{cmp}dx \tag{2.26}$$

Nessa seção, trataremos de um assunto extremamente importante em áreas como engenharia elétrica, eletrônica, automação e controle. Trataremos dos modelos matemáticos que determinam o comportamento dos sistemas de conversão eletromecânica. Para iniciarmos nossa análise e modelamento de um sistema, vamos resgatar o princípio de formação para uma equação de estado que contemple duas variáveis independentes.

Considerando uma função F, com variáveis independentes x_1 e x_2, de forma que a função $F(x_1, x_2)$ seja uma função de duas variáveis, podemos, então, escrever a diferencial de F como sendo:

$$dF(x_1, x_2) = \left.\frac{\partial F}{\partial x_1}\right|_{x_2} dx_1 + \left.\frac{\partial F}{\partial x_2}\right|_{x_1} dx_2 \tag{2.27}$$

Em que cada uma das componentes das derivadas parciais da equação acima é definida em relação a uma das variáveis x_1 e x_2, mantendo constante a outra variável. Ou seja, a derivada parcial em relação a x_1 mantém constante x_2 e a derivada parcial em relação a x_2 mantém constante x_1. Logo, de forma análoga ao que vimos na generalização da Equação (2.27), podemos descrever as componentes da função de estado $dW_{cmp}(\lambda, x)$ como sendo:

$$i = \left.\frac{\partial W_{cmp}(\lambda, x)}{\partial \lambda}\right|_{x} \tag{2.28}$$

Em que a corrente i é definida a partir da derivada da energia magnética, mantendo o deslocamento x constante. Logo, a segunda componente da mesma função de estado pode ser definida a partir do fluxo λ constante:

$$f_{cmp} = -\left.\frac{\partial W_{cmp}(\lambda, x)}{\partial x}\right|_{\lambda} \tag{2.29}$$

Com esse modelamento matemático de equações, podemos determinar as formas simplificadas da corrente em função do fluxo magnético armazenado do sistema, e a equação simplificada da equação, que determina a força mecânica produzida pelo campo magnético, também em função do fluxo magnético e do deslocamento mecânico.

$$f_{cmp} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\left.\frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{L(x)}\right)\right|_{\lambda} = \frac{\lambda^2}{2L(x)^2}\frac{dL(x)}{dx} \tag{2.30}$$

considerando $\lambda = L(x)i$, teremos:

$$f_{cmp} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(x)}{dx} \tag{2.31}$$

Exemplificando

O modelo matemático torna-se mais inteligível e amigável quando atribuímos um polinômio que define a indutância $L(x)$ do sistema, por exemplo, se adotarmos um polinômio de quinta ordem para representar a indutância em função do deslocamento x.

$$L(x) = a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x + a_5 \tag{2.32}$$

Derivando $L(x)$ em função de x, na função que determina a energia armazenada W_{cmp}, teremos, utilizando a equação (2.32):

$$f_{cmp} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(x)}{dx} = \frac{i^2}{2}\frac{a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x + a_5}{dx} = \frac{i^2}{2}\left(4a_1x^3 + 3a_2x^2 + 2a_3x + a_4\right) \tag{2.33}$$

A maneira mais usual de se modelar esse tipo de equação é utilizando o software MATLAB®, utilizado em diversas áreas da engenharia para modelagem matemática e composição de sistemas complexos, com diversos parâmetros inter-relacionados. Sem esse tipo de ferramenta, seria necessário um elevado número de horas e uma grande quantidade de profissionais qualificados para executar uma tarefa de caracterização de um modelo matemático.

Vamos agora partir para uma análise em sistemas rotativos de excitação múltipla, em que estão presentes um elemento fixo (estator) e um elemento rotativo (rotor). Em um circuito magnético em que se encontra um terminal mecânico rotativo, a energia armazenada no campo magnético não é mais verificada em função do deslocamento linear x, mas, sim, em função do deslocamento angular θ. Com base nisso, podemos afirmar que a energia armazenada em um sistema rotativo pode ser determinada como:

$$dW_{cmp}(\lambda,\theta) = id\lambda - T_{cmp}d\theta \tag{2.34}$$

Em que a quantidade de energia acumulada pelo sistema é determinada pela equação da energia em função das variáveis de estado λ e θ.

Assimile

É importante ressaltar que os modelos matemáticos descritos nessa seção têm como objetivo mostrar como as variáveis de estado se comportam em função umas das outras. Uma outra forma de se calcular essa quantidade de energia, tanto em sistemas rotativos como em sistemas com deslocamento linear, é a utilização desses parâmetros de forma não variável, ou seja, realizando o cálculo com base em uma determinada amostra. Dessa forma poderíamos descrever as equações de energia em função do fluxo e deslocamento da seguinte forma:

$$W_{cmp}(\lambda, x) = i\lambda - f_{cmp}x \tag{2.35}$$

$$W_{cmp}(\lambda, \theta) = i\lambda - T_{cmp}\theta \tag{2.36}$$

De forma análoga ao que vimos para sistemas de armazenamento de energia com deslocamento linear mecânico, podemos também aplicar às derivadas parciais da equação, que determinam e energia em função do fluxo magnético do circuito e do deslocamento angular $dW_{cmp}(\lambda, \theta)$. Podemos, então, observar que a segunda componente da derivada parcial dessa equação pode ser descrita como:

$$T_{cmp} = -\left.\frac{\partial W_{cmp}(\lambda, \theta)}{\partial \theta}\right|_{\lambda} \tag{2.37}$$

De forma que, se considerarmos um sistema magnético que se comporta de forma linear, em que $\lambda = L(\theta)i$, a energia presente no conjugado magnético pode ser determinada como:

$$T_{cmp} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(\theta)}{d\theta} \tag{2.38}$$

Além de artifícios teóricos que funcionam como ferramenta para facilitar nosso modelamento matemático, como o enrolamento fictício em um sistema com imãs permanentes, o uso de softwares para resolução de cálculos complexos com o auxílio de softwares matemáticos, por exemplo o MATLAB®, é muito utilizado na indústria e no mercado de trabalho. Temos ainda um terceiro artifício matemático para cálculo da energia armazenada em um sistema de conversão eletromecânica, denominado como coenergia.

Para entender a coenergia, vamos retornar a seguinte equação, $f_{cmp} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(x)}{dx}$, que define a força magnética em um campo em função da corrente e do deslocamento x. Essa função é a representação da coenergia em relação a função que define a força magnética em função do fluxo magnético, definida como:

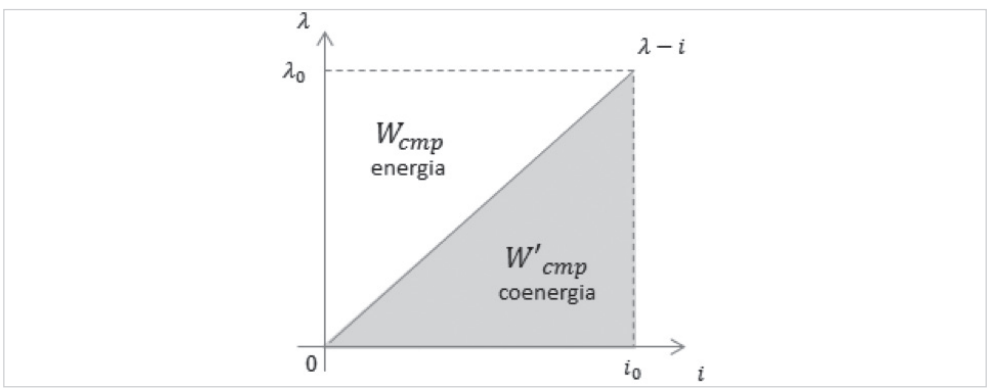
$$f_{cmp} = \frac{\lambda^2}{2L(x)^2}\frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{L} = \frac{1}{2}Li^2 \tag{2.39}$$

De forma análoga, podemos considerar a correlação entre energia e coenergia para sistemas lineares em termos da densidade de energia magnética, considerando a energia e a coenergia, respectivamente como:

$$\frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2}\mu H^2 \tag{2.40}$$

Esse artifício matemático funciona unicamente para sistemas lineares. Funções não lineares, que determinam a força magnética e a intensidade de energia magnética não podem ser consideradas como equivalentes numericamente. A forma mais simples de compreender a coenergia W'_{cmp} em sistemas lineares, por exemplo, é através do artifício gráfico.

Figura 2.8 | Comparação gráfica entre energia e coenergia em um sistema linear



Fonte: elaborada pelo autor.

É possível observar que o gráfico determina o fluxo magnético em função da corrente que circula pelo sistema. A coenergia é definida pela função de estado em função dos parâmetros corrente i e deslocamento linear x.

$$W'_{cmp}(i,x) = i\lambda - W_{cmp}(\lambda,x) \tag{2.41}$$

De forma que a equação diferencial da energia magnética pode ser escrita como:

$$dW'_{cmp}(i,x) = d(i\lambda) - dW_{cmp}(\lambda,x) \tag{2.42}$$

ou em função da força magnética:

$$dW'_{cmp}(i,x) = \lambda di + f_{cmp}dx \tag{2.43}$$

Podemos, então, definir a coenergia magnética e a força magnética decorrente da coenergia para sistemas lineares como sendo, respectivamente:

$$W'_{cmp}(i,x) = \frac{1}{2}L(x)i^2 \qquad f_{cmp} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(x)}{dx} \tag{2.44}$$

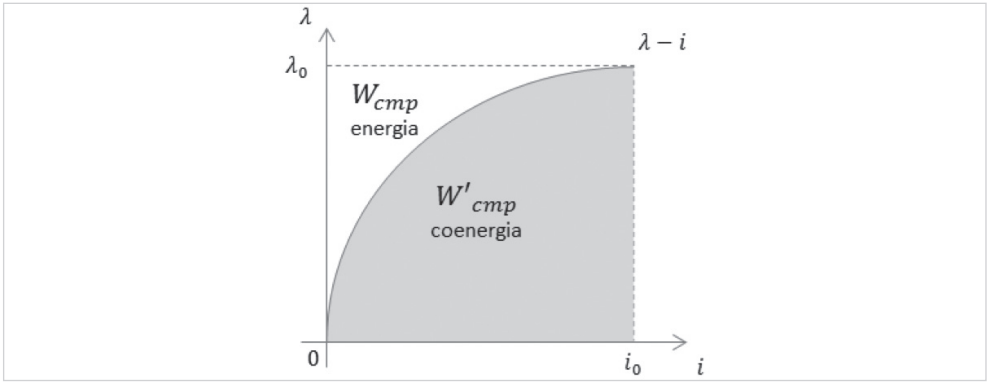
De forma análoga à energia, em sistemas rotativos, magneticamente lineares, considerando $\lambda = L(x)i$, podemos definir a energia magnética e a força exercida pelo campo magnético em um sistema rotativo em função da corrente e do deslocamento angular θ.

$$W'_{cmp}(i,\theta) = \frac{1}{2}L(\theta)i^2 \qquad T_{cmp} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(\theta)}{d\theta} \tag{2.45}$$

As equações mostradas acima mostram que para um sistema linear, a energia e a coenergia são numericamente iguais $\frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{L} = \frac{1}{2}Li^2 \Rightarrow \lambda = Li$, bem como a densidade de energia e a coenergia $\frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2}\mu H^2 \Rightarrow B = \mu H$, em que λ representa o fluxo magnético concatenado, L a indutância do circuito, i a corrente que excita o fluxo magnético no enrolamento de espiras, B a densidade de fluxo magnético, μ a permeabilidade do material magnético e H a intensidade do campo magnético.

Em sistemas não lineares, as variáveis μ, i, B e H não podem ser verificadas como variáveis diretamente proporcionais, logo, essas funções não podem ser consideradas numericamente iguais. A Figura 2.9 ilustra o comportamento de um sistema não linear, em que: $W_{cmp} + W'_{cmp} = \lambda i$, conforme ilustra o gráfico abaixo.

Figura 2.9 | Comparação gráfica entre energia e coenergia em um sistema não linear

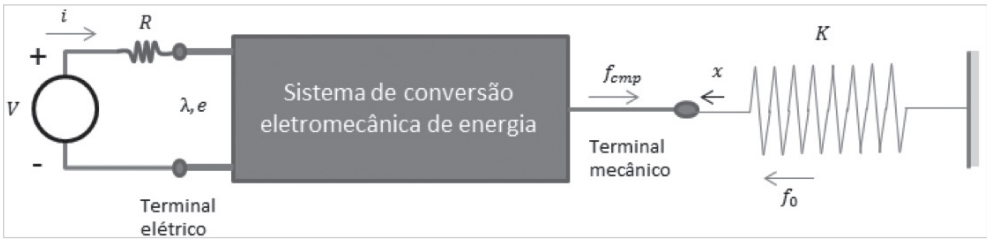


Fonte: elaborada pelo autor.

Até o momento, estudamos como a energia e a coenergia se comportam em função da corrente, do fluxo magnético e do deslocamento, tanto linear como angular dos dispositivos móveis do sistema. A quantidade de energia dissipada através de atrito, calor ou outras formas de dissipação não foram tratadas nessas equações de determinação da energia e da força magnética presentes em um sistema de conversão eletromecânica de energia.

Para o modelamento de um sistema mais próximo de um sistema real, é importante considerarmos algumas formas de dissipação de energia em um sistema de conversão eletromecânica, onde, além do dispositivo de conversão em si, existem outros componentes básicos que compõem o sistema, como: alimentação do sistema composta por uma fonte de tensão v_0, uma resistência interna a fonte de alimentação R, a constante de elasticidade do elemento móvel K, a constante de amortecimento B resultante do movimento, a massa do elemento móvel M e uma força externa de excitação f_0.

Figura 2.10 | Comparação gráfica entre energia e coenergia em um sistema linear



Fonte: elaborada pelo autor.

Podemos definir a equação que modela o sistema da Figura 2.10, em uma modelagem matemática para o domínio elétrico e para um sistema não variante no tempo, como:

$$v_0 = i(R + 2L) \tag{2.46}$$

e

$$f_0 = -Mx^2 - Bx - K(x - x_0) + f_{cmp} \tag{2.47}$$

Considerando a força resultante e a força decorrente da atuação do campo magnético em sentido positivo e as forças contrárias ao movimento do dispositivo móvel como negativas.

Até o momento vimos alguns circuitos básicos considerados como circuitos grosseiros, utilizados em circuitos de conversão eletromecânica. Circuitos mais elaborados ou mais complexos serão estudados nas próximas seções. Porém, é importante mencionar que as bases de cálculo, o modelamento matemático e as equações fundamentais que determinam os princípios de conversão eletromecânica deverão ser considerados tanto para circuito básicos, como para esses que vimos até agora, como para circuitos mais complexos, encontrados na indústria.

O relé é um exemplo de circuito conversor eletromecânico grosseiro, sem precisão, ele opera em posição aberta, ou fechada, unicamente, e mesmo assim é amplamente utilizado, pois funciona como uma chave "liga-desliga", podendo ser utilizado em qualquer ambiente onde se encontram dispositivos de acionamento elétrico, indústria, automóveis, sistemas de controle em geradores de energia e até mesmo em dispositivos de sinalização de trânsito.

Reflita

Você conseguiria imaginar onde mais os relés são utilizados em seu dia a dia?

Sem medo de errar

Nosso desafio nessa seção é modelar um sistema utilizando o MATLAB®. Outras soluções numéricas, gratuitas ou pagas podem ser usadas para realizar o mesmo cálculo, com alguma alteração na programação indicada a seguir.

Os dados abaixo foram enviados pelo cliente e representam a indutância de um dispositivo de armazenamento de energia magnética, em função do deslocamento ***x*** causado pela interação do campo magnético e o material magnético do dispositivo em si.

$x[cm]$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$L[mH]$	2,8	2,26	1,78	1,52	1,34	1,26	1,2	1,16	1,13	1,11	1,10

Considerando que pelo dispositivo passa uma corrente de 0,75A, podemos considerar a força magnética do sistema em função da posição em que o material magnético se encontra como:

Considerando a força magnética determinada pela relação entre a corrente e a indutância em função da posição do dispositivo móvel, se adotarmos um polinômio de quinta ordem para representar a indutância em função do deslocamento x, teremos:

$$f_{cmp} = \frac{i^2}{2}\frac{dL(x)}{dx} = \frac{i^2}{2}\frac{d}{dx}\left(a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x + a_5\right) = \frac{i^2}{2}\left(4a_1x^3 + 3a_2x^2 + 2a_3x + a_4\right)$$

A modelagem matemática por meio de ajuste polinomial dessa equação no MATLAB® deve ser feita da seguinte forma:

```
>> clc
>> clear
>> % Aqui estão declaradas as variáveis estáticas xdata e Ldata
(tabela)
>> xdata = [0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0];
>> Ldata = [2.8 2.26 1.78 1.52 1.34 1.26 1.20 1.16 1.13 1.11 1.10];
>> % Convertendo os valores da tabela para unidade SI
>> x = xdata*1.e-2;
>> L = Ldata*1.e-3;
>> len = length(x);
>> xmax = x(len);
>> % A função polyfit declara uma equação de variáveis x e L, ordem 4
>> a = polyfit(x,L,4);
>> % Ajustes da equação em função classe do MATLAB®
>> n = 1:101;
>> xfit = xmax*(n-1)/100;
>> Lfit = a(1)*xfit.^4 + a(2)*xfit.^3 + a(3)*xfit.^2 + a(4)*xfit + a(5);
>> % Acrescentando valores do enunciado e ajustando a equação, ordem
4
>> I = 0.75;
>> n = 1:101;
>> xfit = 0.002 + .016*(n-1)/100;
>> F = 4*a(1)*xfit.^3 + 3*a(2)*xfit.^2 + 2*a(3)*xfit + a(4);
>> % Aplicação da equação que define a força magnética
>> F = (I^2/2)*F;
>> plot(xfit*100,F)
>> xLabel('x [cm]')
>> yLabel('L [mH]')
```

Agora, você está pronto para compilar os resultados obtidos em sua análise e apresentar ao cliente nas datas acordadas.

Nota: exercício adaptado da referência UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas:** de FITZGERALD E KINGSLEY. 7. ed. Porto Alegre: Amgh. 2014. p 134 p.

Avançando na prática

Acionamento de válvula mecânica com utilização de um relé

Descrição da situação-problema

Sistemas de geração de energia podem ser modelados matematicamente separando-se o sistema em módulos, por exemplo, módulo de geração, controle, cogeração, exaustão, mecânico, hidráulico, comunicação entre os dispositivos, entre outro, em que cada módulo deve ser modelado tendo como entrada e saída parâmetros de interação direta com outros módulos do sistema.

Com base em tudo o que já estudamos até o momento, qual seria um sistema que poderia ser utilizado como acionamento de uma válvula de admissão de combustível? É importante relembrar que essa questão não envolve o circuito elétrico de controle da válvula em si, conforme vimos nas seções anteriores.

Suponha que você foi chamado para uma reunião em que será discutida a solução de como deverá ser feito o acionamento da válvula de nosso projeto de um sistema de controle de velocidade em geração de energia. Qual seria a sua opinião durante a reunião?

Resolução da situação-problema

Se olharmos para um sistema de controle de corrente que atua sobre um relé, podemos fazer a seguinte associação: a tensão aplicada aos terminais do relé é o parâmetro de entrada do módulo "relé de controle", em que é calculada a energia armazenada nesse dispositivo e transformada em energia mecânica, que resulta em uma força magnética, que movimenta o contato interno do relé. Essa força do campo magnético é a saída desse módulo.

Por sua vez, o fato de o contato do relé ser fechado pode ser considerado como entrada de um segundo módulo "acionamento da abertura da válvula de admissão de combustível no gerador", que altera a quantidade de combustível injetada no gerador, aumentando a rotação desse elemento. Ao aumentar a rotação, o pick-up magnético sentirá o aumento da rotação pelo movimento da roda dentada acoplada ao sistema. O regulador de velocidade, dispositivo que detém toda a lógica programável do sistema, conectado ao pick-up magnético, percebe a elevada rotação do sistema e retira o sinal que chega até o relé de acionamento da válvula. Nesse momento, a bobina interna da válvula não recebe mais excitação, o relé abre seu contato (popularmente conhecido na indústria como "o relé desarma") novamente e a válvula cessa sua abertura, fazendo com

que o gerador pare de receber mais combustível. Recebendo a mesma quantidade de combustível, o gerador mantém sua velocidade constante.

Portanto, uma opinião interessante a ser expressada na reunião é que podemos fazer o acionamento do sistema com a utilização de um Relé, conectado diretamente ao regulador de velocidade que recebe o sinal do pick-up magnético e decide se a válvula deve ser aberta ou fechada.

Faça valer a pena

1. Circuito de conversão eletromecânica de energia pode ser apresentado de forma muito complexa, com a presença de muitos elementos que determinam a força mecânica resultante produzida pelo campo magnético nesse sistema, também em função do fluxo magnético e do deslocamento mecânico ocasionado por essa força.

Em um sistema de conversão de energia elétrica em energia mecânica, um dispositivo móvel é deslocado até o seu ponto de deslocamento máximo. Considerando que a corrente que passa pelo circuito é de 6A e que a indutância do enrolamento presente nesse sistema corresponde a 0,5H, encontre a força mecânica.

a) 5N

b) 6N

c) 7N

d) 8N

e) 9N

2. Alguns dos cálculos realizados para circuitos magnéticos podem ser feitos através de artifícios teóricos que funcionam como ferramenta para facilitar nosso modelamento matemático, como o enrolamento fictício em um sistema com ímãs permanentes, o artifício para resolução de cálculos complexos com o auxílio do MATLAB®, ou ainda, como um terceiro artifício matemático, para cálculo da energia armazenada em um sistema de conversão eletromecânica, denominado como coenergia.

Considerando a relação entre energia e coenergia para um sistema linear, determine o fluxo magnético para um sistema com indutância 100mH e força magnética 0,2N.

a) $0,1Wb$

b) $0,2Wb$

c) $0,3Wb$

d) $0,4Wb$

e) $0,5Wb$

3. Para o modelamento de um sistema mais próximo de um sistema real, é importante considerarmos algumas formas de dissipação de energia em um sistema de conversão eletromecânica, onde, além do dispositivo referente a conversão em si, existem outros componentes básicos que podem compor o sistema, considerando que todo sistema de conversão eletromecânica possui uma fonte de alimentação, um circuito converso, em que a energia fornecida pela fonte é dissipada, e uma saída onde parte dessa energia é aproveitada em forma de movimento.

Considerando o circuito de alimentação de um sistema de conversão eletromecânica de energia, com tensão de entrada 127V, indutância 38,5H e resistência 50Ω, podemos considerar a corrente de alimentação desse circuito como sendo:

a) 1A

b) 2A

c) 3A

d) 4A

e) 5A

Referências

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR., C. E KUSKO, A. **Máquinas elétricas**. Nova Iorque. McGraw-Hill, 1975, 621 p .

SIMONE, G. A.; CREPPE, R. C. **Conversão eletromecânica de energia**: Uma introdução ao estudo. São Paulo: Érica, 201. 324 p.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**: de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: Amgh, 2014. 708 p.

Indutores, circuitos trifásicos e transformadores de tensão e corrente

Convite ao estudo

A presente unidade de estudo tem como objetivo apresentar as características e o comportamento de um indutor em um circuito, abordando: suas variáveis de estado; a energia nele armazenada; os tipos linear e não linear; o indutor polarizado e linearizado. Isso permitirá a você, estudante, ser capaz de projetar e analisar criticamente o uso de tais dispositivos.

Na Seção 3.1 estudaremos os dispositivos e circuitos indutores, analisando seu comportamento em um circuito elétrico. Na Seção 3.2 avançaremos, compreendendo os transformadores e a teoria envolvida no seu princípio de funcionamento. Por fim, na Seção 3.3, estudaremos os circuitos trifásicos e os transformadores de tensão, ou Transformadores de Potencial, os TPs e os Transformadores de Corrente, os TCs.

Vamos iniciar essa nova unidade de estudo pensando na seguinte situação: imagine que você trabalha em uma empresa distribuidora de energia elétrica como engenheiro. Essa concessionária está preocupada com o aumento da demanda de energia e a falta de usinas geradoras de energia no Brasil, que sejam suficientes para suprir a atual demanda de energia elétrica do país. Você foi recrutado para fazer parte da equipe responsável pelos projetos de desenvolvimento e implantação de uma pequena central hidrelétrica, tecnicamente chamada de PCH. Uma vez que a PCH pode ser instalada bem perto dos consumidores e não precisa de uma grande área inundada para ter seu reservatório priorizando as épocas de mais seca no país, como, por exemplo, as grandes centrais hidrelétricas, a distribuidora de energia vê vantagens em investir no ramo de geração de energia elétrica. Por estar mais próxima do centro consu-

midor, a PCH reduz a necessidade de um longo sistema de transmissão de energia tornando-se economicamente viável.

Como seu gestor solicitou o projeto de desenvolvimento e implantação de uma PCH, na primeira etapa você precisará dimensionar e escolher o tipo de gerador a ser utilizado. Para escolher o gerador, você tem a necessidade de conhecer as características dos indutores e dos circuitos indutores. Depois, numa segunda etapa do projeto, você precisará conhecer as características fundamentais dos transformadores, para que a energia gerada pela PCH possa ser levada até os centros consumidores e, por último, você irá dimensionar o sistema de medição de corrente e tensão elétrica do sistema de distribuição dessa energia gerada pela PCH, visando a garantia da qualidade da energia que será recebida pelo centro consumidor. Esse sistema de medição de energia é composto por Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs). Para cumprir essa importante tarefa, você precisa de novos conhecimentos, que serão aqui apresentados.

Seção 3.1

Dispositivos e Circuitos Indutores

Diálogo aberto

Os indutores fazem parte de vários equipamentos presentes nas usinas geradoras de energia elétrica e nas subestações responsáveis pela elevação ou rebaixamento da tensão elétrica, bem como da proteção de todo o sistema. Pode-se citar, como exemplo, os transformadores, os quais são compostos pelos enrolamentos primários e secundários. Esses enrolamentos são bobinas, isto é, indutores que transformam a energia em diferentes valores de tensão para que o consumidor possa utilizá-la. Nesse contexto, o nosso estudo se inicia justamente com esse componente elétrico, o indutor. É de suma importância que você entenda os fundamentos envolvidos no comportamento de um indutor em um circuito elétrico.

Voltando para nossa história, para que você consiga proceder o desenvolvimento e a implantação de uma PCH com a característica de injeção direta na rede, primeiramente de transmissão e depois no sistema de distribuição, é de suma importância ter uma visão clara do sistema elétrico envolvido no assunto. A energia elétrica será gerada na PCH pelos geradores elétricos. Esses grupos geradores são constituídos por uma turbina hidráulica acoplada a um gerador através de um eixo.

A geração da energia se dá num nível de tensão não apropriado para a transmissão dela, por isso é necessária sua elevação para ser injetada no sistema de transmissão e, depois, seu rebaixamento, para ser injetada no sistema de distribuição de energia, esse último localizado próximo do centro consumidor. O nível da tensão elétrica da geração é de 2kV, aproximadamente, mas depende do tipo de gerador escolhido, da disponibilidade de água e do desnível do local da implantação da PCH.

Na localidade escolhida, o desnível do local é de 20m. A velocidade de giro da turbina requerida pela concessionária é de 450 rpm e, devido às condições topográficas do local, a turbina precisa ser de reação e veloz, ou seja, irá trabalhar imersa na água a ser turbinada. A Tabela 3.1 apresenta alguns tipos de turbina e suas velocidades específicas.

Tabela 3.1 | Características de turbinas hidráulicas

MODO DE OPERAR	VELOCIDADE ESPECÍFICA (RPM)	TIPO DE TURBINA	ALTURA DISPONÍVEL
A (turbina de ação)	Até 18 rpm	Pelton	Até 800 m
A	18 a 25 rpm	Pelton	400 a 800 m
A	26 a 35 rpm	Pelton	100 a 400 m
R(turbina de reação)	55 a 70 rpm	Francis lentíssima	200 a 400 m
R	200 a 300 rpm	Francis veloz	25 a 50 m
R	300 a 450 rpm	Francis ultra veloz	15 a 25 m
R	400 a 500 rpm	Hélice veloz	Até 15 m
R	270 a 500 rpm	Kaplan lenta	15 a 50 m

Fonte: adaptada de Simone, G. A. (2010).

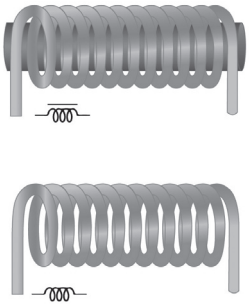
Um gerador síncrono de 60Hz, 2kV foi indicado pela empresa. Da lista acima, qual seria a turbina mais interessante para uso?

Com a seleção do gerador, a energia gerada precisará ser transmitida, após uma elevação da tensão de 2kV para 34,5kV por meio de transformadores elevadores de tensão. Para isso, a empresa solicitou alguns cálculos, entre eles o da energia inicial e final armazenada no enrolamento primário do transformador elevador de tensão, dentro da base de tempo considerada. Porém, antes de proceder com os cálculos necessários, precisamos estudar alguns componentes do transformador, como os enrolamentos, ou seja, os indutores.

Não pode faltar

Segundo as **características dos indutores,** são componentes elétricos que armazenam energia na forma de campo magnético. Eles são compostos de várias espiras, como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 | Indutor com e sem núcleo ferromagnético e respectiva simbologia



Fonte: DEDMD (2017).

As correntes e as tensões calculadas nos indutores dos circuitos são denominadas de **variáveis de estado** do indutor.

A facilidade com que esse indutor armazena energia em forma de campo magnético se chama indutância, é representada pela letra *L* e é medida em henry (H). Uma corrente elétrica *i* circulando por um indutor produz uma força magnetomotriz que é o resultado da diferença de potencial estabelecida na bobina de *N* espiras, e é dada por:

$$\mathfrak{I} = N \cdot i(t)$$

Em que: $\mathfrak{I}$ = força magnetomotriz [Ae] = ampere espira;

N = número de espiras;

i(t) = corrente elétrica [A] = ampere.

Lembrando da Lei de Ohm, em circuitos elétricos, pode-se relacionar um fluxo ϕ, de um circuito magnético produzido pela força magnetomotriz, com a relutância dada por: $\phi = \mathfrak{I}(t) / \mathfrak{R}(t)$,

em que: $\phi(t)$ = fluxo magnético [Wb] = weber;

$\mathfrak{I}(t)$ = força magnetomotriz [Ae] = ampere espira;

$\mathfrak{R}(t)$ = relutância magnética total (relutância que o núcleo oferece ao fluxo magnético) [Ae/wb]

Dessa forma, como o fluxo total enlaçado pela bobina é $\lambda(t) = N \cdot \phi(t)$ [wb], a indutância própria de uma bobina ou um indutor pode ser calculada por: $L = \lambda(t)/i(t)$

em que: L = indutância [H] (henry).

A indutância de um indutor pode, também, ser determinada segundo suas características físicas. Acompanhe a seguinte dedução: se $L = \lambda(t)/i(t)$ e ainda, $\lambda(t) = N \cdot \phi(t)$, podemos substituir $\lambda(t)$ na primeira equação, resultando em: $L = N \cdot \phi(t) / i(t)$

mas sabemos que: $\phi(t) = \Im(t) / \Re(t)$.

Substituindo-se, então $\phi(t)$ nessa terceira equação, tem-se: $L = \dfrac{N \cdot \Im(t)}{\Re(t) \cdot i(t)}$

Mas temos ainda que: $\Im(t) = N \cdot i(t)$ e fazendo-se a substituição na equação anterior resulta em:

$L = N^2 / \Re(t)$.

Comentando esta última fórmula, temos que a relutância magnética, aqui simbolizada por $\Re$, pode ser definida como a medida da oposição oferecida por um material ao estabelecimento e à concentração de linhas de campo magnético. Ela é influenciada pela permeabilidade absoluta $\propto$ dada por: $\mu = \mu_{MATERIAL} \cdot \mu_0$, sendo $\propto_{MATERIAL}$ a permeabilidade do material [adimensional] e $\propto_0$ a permeabilidade absoluta do vácuo = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}\ wb\ A/m$

Como a relutância magnética é inversamente proporcional à permeabilidade do material, pode-se escrever que:

$$\Re(t) = \frac{1}{\mu_{MATERIAL}} \cdot \frac{\ell}{A},$$

em que: ℓ = comprimento médio do percurso magnético [m]

A = Área da seção transversal do indutor [m^2]

Substituindo a equação da relutância magnética na equação da indutância temos:

$$L = \frac{N^2}{\dfrac{1}{\mu_{MATERIAL}} \cdot \dfrac{\ell}{A}}$$

e assim podemos escrever: $L = \mu_{MATERIAL} \cdot N^2 \cdot A / \ell$. Nota-se, portanto, que a indutância depende das características construtivas do indutor. Alguns valores de permeabilidade relativa de materiais podem ser observados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 | Permeabilidade relativa de alguns materiais

MATERIAL	PERMEABILIDADE RELATIVA
Cobre	0,999991
Alumínio	1,000022
Ferro	Até 5500
Ferro-silício	Até 7000

Fonte: adaptada de Simone (2012).

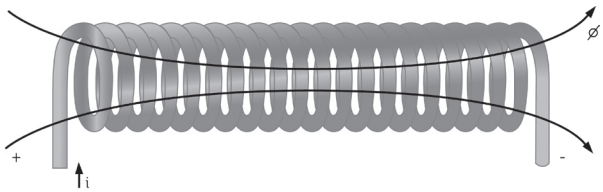
Assimile

A permeabilidade magnética relativa de um material indica a facilidade com que esse material conduz um campo magnético.

A indutância depende de características construtivas do indutor, como a permeabilidade magnética do material, o comprimento médio do indutor, o número de espiras e a área da sua seção transversal. A equação a seguir mostra essa relação: $L = \mu_{MATERIAL} \cdot N^2 \cdot A / \ell$, em que L é a indutância, $\propto_{MATERIAL}$ é a permeabilidade do material, N o número de espiras da bobina e ℓ o comprimento do indutor.

Iniciamos nosso estudo de indutores tratando dos **indutores lineares,** ou seja, aqueles que apresentam uma relação linear quando caracterizados em termos de tensão e corrente. Para estudar a relação entre o indutor, a corrente elétrica e a tensão elétrica vamos, primeiramente, considerar que o indutor seja um condutor enrolado e que vamos aplicar uma corrente elétrica nos seus terminais. Com o auxílio da regra da mão direita envolvente, percebemos que, ao aplicar uma corrente no terminal da esquerda do indutor, aparece no seu interior um fluxo ϕ na direção indicada na Figura 3.2.

Figura 3.2 | Indutor percorrido por corrente elétrica e fluxo de indução magnética



Fonte: DEDMD (2017).

Se houver uma variação da corrente aplicada ao indutor, acontecerá uma variação no fluxo magnético e, de acordo com a Lei de Faraday, surgirá nos terminais desse indutor uma força eletromotriz dada por: $e(t) = -N\frac{d\phi}{dt}$ e, como já vimos, $\lambda = N \cdot \phi$, fazendo a substituição dessa última equação na anterior, temos: $e(t) = -\frac{d\lambda}{dt}$.

Em circuitos magnéticos nos quais existe uma relação linear entre B (densidade de fluxo magnético [T]) e H (intensidade do campo magnético [H/m]), como já estudado nas Unidades 1 e 2 a permeabilidade magnética do material é constante, relaciona-se o fluxo magnético concatenado com a corrente elétrica, através da indutância *L*, por meio da equação: $\lambda = N \cdot \phi = L \cdot i$

e sendo *L* constante, pode-se expressar a força eletromotriz pela equação: $e(t) = L \cdot \frac{di}{dt}$

ou $v(t) = L \cdot \frac{di}{dt}$ (que mostra uma relação linear entre a corrente e a tensão) .

Quando a indutância *L* pode variar, a equação que representa esse comportamento é: $e(t) = L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{dt}$. O indutor com esse comportamento é um **indutor linear variante no tempo.**

Já os **indutores não lineares** são aqueles que apresentam saturação de acordo com o aumento da corrente aplicada. Assim, nesses indutores, quando aplicadas correntes de baixo valor, eles costumam ter comportamento linear, mas com o aumento da corrente eles se saturam, o que pode ser observado nas curvas de saturação de materiais magnéticos ou, como são conhecidas, curva de histerese, como já estudado por você na Unidade 2.

Reflita

Você já parou para pensar no motivo de se construir o transformador com núcleo de ferro-silício?

Tratando-se da **energia magnética armazenada** nos indutores, pode-se dizer que ela é armazenada pelo indutor no campo magnético criado por ele quando circulado por uma corrente elétrica. Assim, a energia armazenada num indutor pode ser calculada por: $\Delta w = \int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt$

em que: Δw = variação da energia no indutor [J] = joule;

p = potência no indutor [W] = watt

Temos também que a potência pode ser dada por: $p = i \cdot e$ e como: $e(t) = \frac{d\lambda}{dt}$, podemos escrever: $p = i \cdot \frac{d\lambda}{dt}$ e, ainda, $p \cdot d(t) = id\lambda$

Analisando novamente a fórmula da energia, temos: $\Delta w = \int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt \Rightarrow \Delta w = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i \cdot d\lambda$

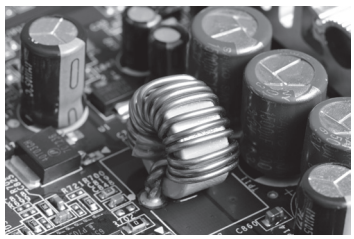
Mas temos ainda que: $\lambda = L \cdot i \Rightarrow i = \frac{\lambda}{L}$ o que leva a: $\Delta w = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{L} \cdot d\lambda$.

Resolvendo essa equação em termos de λ, temos: $\Delta w = \frac{\lambda^2}{2L} I_{\lambda_1}^{\lambda_2}$, e como $i = \lambda / L \Rightarrow w = \frac{\lambda}{L} \cdot \frac{\lambda}{2L} \cdot L \Rightarrow w = \frac{Li^2}{2}$.

Exemplificando

Supondo que o núcleo toroidal mostrado a seguir tenha como raio externo 2 cm e como raio interno 1cm.

Figura 3.3 | Indutor toroidal



Fonte: DEDMD (2017).

Nota: Um indutor de núcleo toroidal é um indutor enrolado ao redor de um núcleo em forma de anel, geralmente de material magnético.

No indutor, que tem 20 espiras, é aplicada uma corrente contínua de 250mA e o núcleo é feito de aço-silício. Calcule o fluxo magnético produzido pelo indutor.

Solução: queremos calcular o fluxo magnético produzido pelo toróide e a equação para esse cálculo é: $\phi = \frac{\Im(t)}{\Re(t)}$ Em que $\Im = N \cdot i$, assim, substituindo os valores de N=20 espiras e i = 250mA, temos: $\Im = 20 \cdot 250 \cdot 10^{-3} = 5V$.

A relutância é calculada pela fórmula: $\Re(t) = \frac{1}{\mu_{MATERIAL}} \cdot \frac{\ell}{A}$.

Para utilizarmos essa fórmula, nos faltam os valores de $\mu_{material}$, de l, que é o comprimento médio do indutor e da área da seção transversal do mesmo, A. Pesquisando no livro Conversão Eletromecânica de Energia, de Simone e Creppe (2012), encontramos a permeabilidade relativa do aço-silício de 3000,00. Então, podemos calcular a permeabilidade do aço silício como segue.

$$\mu = \mu_{relativa} \cdot \mu_0 \Rightarrow 3000,00 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \Rightarrow$$

$$\mu_{material} = 3,77 \cdot 10^{-3} H/m$$

Sendo r_M o raio médio e ℓ_M o comprimento médio do toróide, eles podem ser calculados da seguinte forma:

$$r_M = \frac{r_{externo} - r_{interno}}{2} \Rightarrow r_M = \frac{2-1}{2} = 0,5cm = 0,5 \cdot 10^{-2} m$$

$$\ell_M = 2 \cdot \pi \cdot r_M \Rightarrow \ell_M = 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 31,41 \cdot 10^{-3} m$$

A área da seção transversal é

$$A = \pi \cdot r_M^2 \Rightarrow A = \pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-2})^2 \Rightarrow A = 78,54 \cdot 10^{-6} m^2$$

Calcula-se, então, a relutância do toróide:

$$\Re = \frac{1}{3,77 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{31,41 \cdot 10^{-3}}{78,54 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow 106,08 \cdot 10^3 Ae/wb$$

Finalmente, podemos calcular o fluxo por

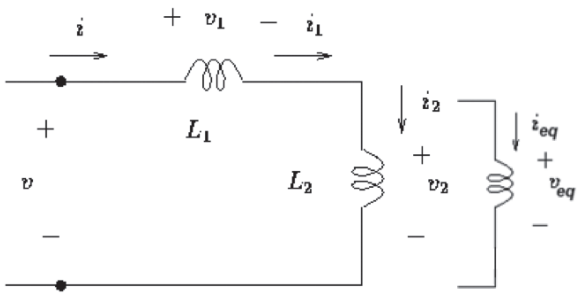
$$\phi = \frac{\Im}{\Re} = \frac{5}{106,08 \cdot 10^3} \Rightarrow \phi = 47.13 \cdot 10^{-6} wb$$

Faça você mesmo

Como você determinaria a indutância do indutor de núcleo toroidal do exemplo anterior?

Você pode precisar associar indutores. Essa associação poderá ser **em paralelo ou em série:** considere um circuito com dois indutores em paralelo, como na Figura 3.4, L_1 e L_2, e que você quer encontrar o indutor equivalente.

Figura 3.4 | Indutores em paralelo



Fonte: elaborada pela autora.

A corrente equivalente é calculada por: $i_{eq} = i_1 + i_2$. Substituindo os valores diferenciais:

$\frac{di_{eq}}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt}$ e como já visto nessa unidade, $v_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$, assim podemos escrever que: $\frac{di(t)}{d(t)} = \frac{v_L(t)}{L}$. Portanto, se substituirmos essa última equação na equação com os valores diferenciais, teremos: $\frac{v(t)}{L_{eq}} = \frac{v(t)}{L_1} + \frac{v(t)}{L_2}$. Como em ramos em paralelo de circuitos temos a mesma tensão, podemos dividir toda a equação acima por *v(t)*, o que resulta em: $\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$, assim, $L_{eq} = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right)^{-1}$.

Exemplificando

Para ajudar você a fixar o conceito de associação em paralelo de indutores, considere dois deles, com indutâncias iguais a 18μH e 20μH. Qual é o indutor equivalente da associação desses dois em paralelo?

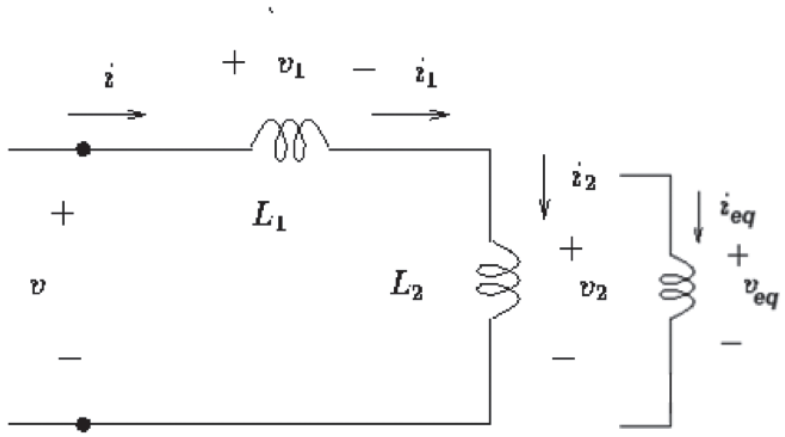
Resolução: Para associá-los em paralelo, basta fazer:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{18 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{20 \cdot 10^{-6}} = \frac{20 \cdot 10^{-6} + 18 \cdot 10^{-6}}{360 \cdot 10^{-6}},$$

$$L_{eq} = \frac{360 \cdot 10^{-6}}{38 \cdot 10^{-6}} = 9{,}47F$$

Considere, agora, dois indutores em série, como na Figura 3.5.

Figura 3.5 | Circuito indutivo em série



Fonte: elaborada pela autora.

Para o caso do circuito com indutores em série, a soma das tensões é: $v_{eq}(t) = v_1(t) + v_2(t)$.

Substituindo v(t) por $L \cdot \frac{di(t)}{dt}$, temos: $L_{eq}\frac{di(t)}{dt} = L_1\frac{di(t)}{dt} + L_2\frac{di(t)}{dt}$. Como $\frac{di(t)}{dt}$ é igual para todos os termos, a equação pode ser escrita da seguinte forma: $L_{eq} = L_1 + L_2$.

Exemplificando

Para que você possa visualizar mais claramente o assunto de associação de indutores, vamos associar dois indutores com indutâncias iguais a 18μH e 20μH. Qual é o indutor equivalente da associação desses dois em série?

Resolução: Para associá-los em série, basta fazer:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 = 18 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 10^{-6}$$

$$L_{eq} = 38\mu H$$

Pesquise mais

Para saber mais sobre permeabilidade do núcleo do transformador, veja as páginas de 7 a 10 e a tabela de permeabilidade magnética de diversos materiais na página 12 do livro de Simone e Creppe (2012) sobre Conversão Eletromecânica de Energia. Lembre-se: você tem acesso gratuito ao livro fazendo login em sua área do estudante e depois utilizando o link: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518299/cfi/0!/4/2@100:0.00>. Acesso em: 9 fev. 2017.

Para saber mais sobre curva de histerese, veja as páginas 11 a 13 do livro Fundamentos de Máquinas Elétricas, de Del Toro.

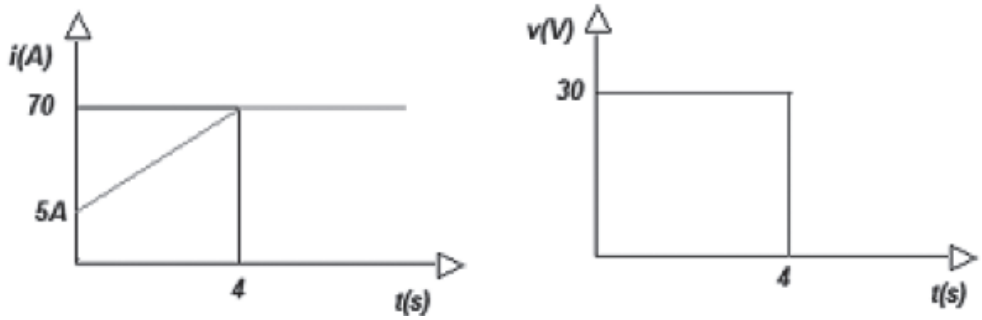
Temos ainda que o indutor fica **polarizado magneticamente** pelo sentido das linhas do campo magnético nele produzido, como indica a Figura 3.2, ou seja, o norte se localiza no lado em que as linhas saem e o sul no lado em que elas entram. Quando um indutor se encontra nessa condição, ele está se comportando como um ímã artificial ou como um eletroímã.

Sem medo de errar

Para a implantação da PCH, o seu gestor solicitou que você, primeiramente, escolha a turbina a ser utilizada, de acordo com os seguintes dados fornecidos do local de instalação: a tensão de geração é 2kV, o desnível do local (altura topográfica) é de 20m e a velocidade de giro da turbina precisa ser de 450 rpm. A turbina deve ser de reação, o que significa que irá trabalhar imersa na água. Com esses dados e consultando a Tabela 3.1, que apresenta as características de turbinas e suas velocidades específicas, você irá, com certeza, indicar a turbina Francis!

A concessionária de energia também forneceu alguns dados relacionados com um transformador que foi dimensionado para fazer parte da subestação elevadora de tensão, a fim de se proceder a conexão da PCH com o sistema de transmissão de energia. Alguns testes e cálculos foram solicitados, entre eles você precisa calcular a energia inicial e a final armazenada no enrolamento primário do transformador em questão, no intervalo de tempo fornecido. Para isso, a distribuidora de energia forneceu os seguintes gráficos mostrados na Figura 3.6:

Figura 3.6 | Corrente e tensão do transformador elevador de tensão, considerando a indutância de 0,15H para o enrolamento primário:



Fonte: elaborada pela autora.

Para calcular a energia armazenada no enrolamento primário do transformador, você deve utilizar a fórmula já citada nesta unidade: $w = L \cdot \frac{i^2}{2}$ Assim, teremos:

$$w(t_0,t_1) = \frac{1}{2}Li_{t_1}^2 - \frac{1}{2}Li_{t_0}^2 = \frac{1}{2}\cdot 0{,}15\cdot(70)^2 - \frac{1}{2}\cdot 0{,}15\cdot(5)^2 ; \quad w(t_0,t_1) = 365{,}63J .$$

Com esse resultado e sabendo que a potência é a energia gasta em um determinado tempo, ou seja: $\Delta P = \frac{w(t_0,t_1)}{\Delta t}[W]$, e ainda que, segundo os gráficos, o tempo de análise fornecido é de 4 segundos, notamos que uma potência de $\Delta P = \frac{365{,}63}{4} = 91{,}41W$ está sendo perdida no enrolamento primário do transformador em teste. Como se pode diminuir essa perda?

Examinando a fórmula da energia, percebe-se que a indutância é diretamente proporcional à energia e, da mesma forma, à corrente elétrica. Assim, se você conseguir diminuir a indutância do enrolamento primário desse indutor, ou se conseguir diminuir a corrente que vai circular por esse enrolamento, conseguirá diminuir essa potência de perdas de 91,41W.

A indutância é dada por: $L = \mu_{MATERIAL} \cdot \frac{N^2 \cdot A}{\ell}$.

Vê-se que a permeabilidade do material influencia no cálculo da indutância, assim, você pode pedir para que os enrolamentos sejam trocados por um outro, de material com permeabilidade mais adequada. Como esse procedimento envolveria alterações nas características físicas do transformador, e isso com certeza envolve um enorme custo, você poderia, ainda, incluir uma corrente de projeto mais baixa para a entrada desse transformador.

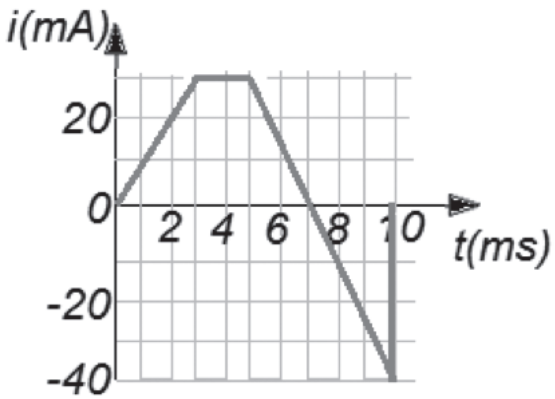
Avançando na prática

Tensão induzida numa bobina

Descrição da situação-problema

Geralmente, em projetos de implantação de sistemas elétricos, tem-se a presença de tensões induzidas em bobinas, que muitas vezes são indesejáveis, pois podem provocar falhas nos sistemas elétricos e até mesmo "apagões", como você já deve ter presenciado no seu dia a dia. Nesse contexto, a distribuidora de energia solicitou que você calcule a tensão induzida nos terminais do enrolamento primário do transformador no caso de um transitório de corrente como o apresentado na Figura 3.7. Esse transitório foi provocado por uma descarga atmosférica no transformador. O cálculo da tensão induzida é necessário para que você possa, posteriormente, dimensionar o sistema de proteção necessário para o transformador. Com os dados do gráfico de corrente versus tempo, calcule a tensão induzida nessa bobina de 800mH durante os 10 milissegundos indicados no gráfico. Construa um gráfico da tensão *v(V)* versus *t (ms)*.

Figura 3.7 | Gráfico da corrente versus tempo de uma bobina.



Fonte: elaborada pela autora.

Resolução da situação-problema

Através da fórmula: $v(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$, notamos que a parcela $\frac{di(t)}{dt}$ corresponde à inclinação do gráfico da corrente *i (mA)* versus o tempo *t (ms)*.

Assim, para determinarmos a tensão induzida por essa corrente na bobina, basta separar o cálculo por intervalos de tempo:

$$v_{3ms} = L \cdot \frac{di}{dt} = 800 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(30-0) \cdot 10^{-3}}{(3-0) \cdot 10^{-3}} = 8V$$

Já para o intervalo entre 3 e 5 ms, temos:

$$v_{3ms \to 5ms} = L \frac{di}{dt} = 800 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(30-30) \cdot 10^{-3}}{(5-3) \cdot 10^{-3}} = 0V .$$

Para o intervalo de 5 a 10 ms, temos:

$$v_{5ms \to 10ms} = L \frac{di}{dt} = 800 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(-40-30) \cdot 10^{-3}}{(10-5) \cdot 10^{-3}} = -11,2V .$$

Note que mesmo com um valor muito pequeno da indutância e de corrente, a tensão induzida nos terminais do enrolamento primário de um transformador, no caso de um transitório, podem ter tensões de até -11,2V na bobina primária do transformador.

Faça valer a pena

1. Existem algumas situações em que é requisitada a nossa opinião sobre a condição de atuação de um componente elétrico de proteção de um circuito elétrico. Para que você saiba responder perguntas como essa, é de suma importância conhecer a ordem de grandeza dos parâmetros envolvidos em todo o circuito.

Calcule o fluxo magnético produzido por uma bobina com enrolamento de 80 espiras, de núcleo toroidal de $15cm$ de raio externo e $10cm$ de raio interno, construído com aço-silício, percorrido por uma corrente de $5A$, sabendo que a densidade do campo magnético nesse núcleo é equivalente a 10600 Gauss. Calcule também a relutância magnética do núcleo, sendo a permeabilidade magnética relativa do aço-silício de 10200.

a) O fluxo calculado é de $\phi = 34,81kWb$ e a relutância do núcleo é de $\Re = 1,86mA \cdot \text{espira}/Wb$

b) O fluxo calculado é de $\phi = 2,08mWb$ e a relutância do núcleo é de $\Re = 31,21kA \cdot \text{espira}/Wb$

c) O fluxo calculado é de $\phi = 81,34kWb$ e a relutância do núcleo é de $\Re = 6,81mA \cdot \text{espira}/Wb$

d) O fluxo calculado é de $\phi = 38,41mWb$ e a relutância do núcleo é de $\Re = 8,16kA \cdot \text{espira}/Wb$

e) O fluxo calculado é de $\phi = 1mWb$ e a relutância do núcleo é de $\Re = 20mA \cdot \text{espira}/Wb$

2. Quando se estuda circuitos magnéticos e componentes magnéticos, é de suma importância saber como se determina a energia armazenada em um indutor. Isso porque essa energia está relacionada aos aspectos construtivos de vários componentes elétricos e eletrônicos, como disjuntores e sensores. O valor da energia armazenada num indutor vai determinar a força magnética responsável por vários acionamentos em circuitos elétricos, como no caso dos disjuntores acima citados. Assim sendo, apresenta-se a seguir um exercício de cálculo da energia armazenada em um indutor.

Quando um defeito acontece em um circuito elétrico ou em uma parte dele, é necessário que algum tipo de proteção atue, extinguindo a falha e impedindo que ela danifique outras partes do circuito elétrico. Um disjuntor de proteção desse circuito será acionado quando a energia armazenada no indutor que o compõe excede 1J durante 3 segundos, no mínimo. Numa certa situação de falha, o indutor de 250mH é percorrido por uma corrente elétrica de 0,80t A, durante 4 segundos. Nesse caso, a proteção irá atuar, ou seja, o disjuntor irá ter energia suficiente para abrir seus contatos e isolar o circuito? Qual o valor da energia nessas condições?

a) O disjuntor vai atuar, pois a energia armazenada no indutor é de 1J.

b) O disjuntor não vai atuar, pois a energia armazenada no indutor será de 0,5J.

c) O disjuntor não vai atuar, pois a energia armazenada no indutor não excede o valor de 1J.

d) O disjuntor vai atuar, pois a energia armazenada no indutor será de 1,28J.

e) O disjuntor vai atuar, pois a energia armazenada no indutor será de 0,9J.

3. Muitas vezes, quando se vai desenvolver um projeto e montar um circuito elétrico, seja ele composto de indutores, resistores ou capacitores, não encontramos os componentes com os valores comerciais exatamente como foi dimensionado no projeto. A saída é associar os componentes, seja em série ou paralelo, para se conseguir o valor de indutância, resistência ou de capacitância desejados.

Como devo proceder para obter o valor de 1,95mH de indutância, se tenho disponível indutores de 20 mH e de 80mH?

a) Devo associar dez indutores de 20mH e um de 80mH em paralelo.

b) Devo associar um indutor de 20mH e dez de 80mH em série.

c) Devo associar dois indutores de 20mH em paralelo.

d) Devo associar dois indutores de 80mH em série.

e) Devo associar dez indutores de 20mH em série.

Seção 3.2

Dispositivos e Circuitos Transformadores

Diálogo aberto

Vamos começar nossa nova seção de estudos, na qual você irá analisar o princípio de funcionamento de um transformador trifásico, seu modelo representado por um circuito elétrico, além das relações existentes nesse equipamento e seu funcionamento em um sistema trifásico de energia elétrica, bem como sua aplicação em sistemas elétricos em geral.

Lembre-se que, na seção anterior, foi proposta uma situação em que você foi recrutado para compor uma equipe de engenheiros que estão trabalhando para uma empresa de distribuição de energia elétrica. Foi solicitado que vocês desenvolvam um projeto de implantação de uma PCH – pequena central hidrelétrica – para que a empresa ingresse no mercado de geração de energia. Depois de pesquisas de mercado e estudos técnicos realizados, a conclusão é que há muitos ganhos em se gerar energia próximo dos centros de consumo e em empreendimentos de menor porte, com consequências menores para o meio ambiente.

Após a seleção do gerador e sua análise detalhada, agora você irá dimensionar o transformador a ser utilizado na subestação elevadora de tensão do sistema de transmissão de energia elétrica. Para isso, você precisa conhecer os fundamentos teóricos necessários para dimensionar adequadamente os transformadores da subestação elevadora de energia, necessária no sistema elétrico para que a energia gerada na PCH possa ser levada aos consumidores, com o mínimo de perdas.

Não pode faltar

Iniciamos nosso estudo de transformadores pelas suas **variáveis de estado** e por suas **características** de funcionamento.

Os transformadores têm seu princípio de funcionamento baseado na Lei de Faraday a qual diz que, ao se posicionar uma bobina dentro de um campo magnético variável, irá aparecer nessa bobina uma corrente elétrica e uma tensão induzida nos seus terminais. A corrente induzida na bobina é proporcional ao fluxo que atravessa a bobina. Para estudarmos os transformadores, temos que lançar mão das suas variáveis de estado, que são um conjunto de variáveis, como, por exemplo: corrente primária, tensão primária etc. Elas descrevem o comportamento dinâmico do transformador no domínio do tempo.

O transformador é um equipamento de elevada importância no Sistema Elétrico de Potência, pois é responsável pela transferência de energia entre dois sistemas ou parte deles. Podemos dividi-los em tipos, dependendo de sua utilização. Essa divisão ocorre da seguinte forma: transformadores de **potência,** que podem ser aplicados em sistemas de transmissão ou distribuição de energia elétrica, podendo ser trifásicos ou monofásicos, transformadores de **instrumentação,** que consistem em equipamentos utilizados para medição e proteção de sistemas elétricos de potência, Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs) e transformadores de **baixa potência** que são utilizados para fins eletrônicos e de comando.

Pode-se citar como função do transformador o ajuste de tensão de duas partes de um sistema, o isolamento elétrico de circuitos e a adequação de impedâncias entre duas partes de um sistema de comunicação, o que comumente se chama de "casamento de impedâncias" e é responsável pela máxima transferência de potência entre os circuitos de entrada e acoplados. O transformador torna possível, por exemplo, em um sistema de geração de energia elétrica, que a energia gerada entre 10kV e 20kV seja convertida para valores de transmissão, ou seja, de 380kV a 750kV ou em valores de distribuição primária, entre 13,8Kv e 34,5Kv, ou sistemas de distribuição secundária, envolvendo tensões entre 13,8kV e 440V, 380V, 220V e 127V.

Sobre os **aspectos construtivos dos transformadores**, temos que eles são constituídos por dois ou mais enrolamentos conectados por um fluxo magnético, o que os torna mutuamente acoplados. Se esses enrolamentos estão dispostos em um núcleo de material ferromagnético, ele é chamado de **transformador com núcleo de ferro**; por outro lado, se esse acoplamento é realizado pelo ar, o transformador é chamado de **transformador de núcleo de ar**. Uma vez que os transformadores presentes nos sistemas de distribuição e transmissão de energia

elétrica são sempre os de núcleo de ferro, vamos concentrar nossa atenção nesse tipo de transformador.

Você também já estudou que o núcleo dos transformadores (do tipo núcleo ferromagnético) são construídos por chapas de aço silício, com ciclo de histerese adequado priorizando a baixa perda por histerese e a proteção contra as correntes parasitas de Foucault.

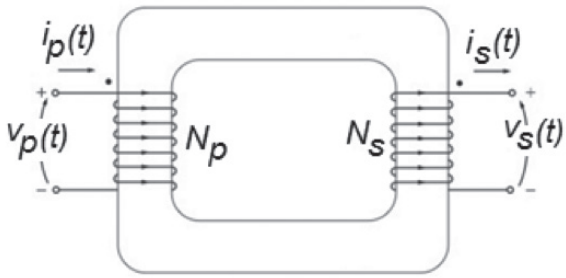
Costuma-se denominar os enrolamentos dos transformadores de enrolamento de baixa tensão como **BT** e de alta tensão **AT.** Isso para facilitar a análise do sistema.

Na figura abaixo pode-se observar as entradas dos enrolamentos de AT e as saídas em BT, como dito no parágrafo anterior.

Figura 3.8 | Transformador de potência

Fonte: <https://pixabay.com/pt/cabo-circuito-distribui%C3%A7%C3%A3o-el%C3%A9trica-20541/> Acesso em: 12 jan. 2017.

Figura 3.9 | Circuito representativo de um transformador monofásico de dois enrolamentos



Fonte: adaptada de Chapman (2013).

Na Figura 3.8 temos um transformador abaixador de tensão. Pode-se observar a alta tensão ligada às buchas de entrada nos terminais superiores (enrolamentos de AT) e à saída, já num nível de tensão mais baixo, pelos terminais localizados na parte frontal do transformador, se encaminhando para um possível circuito subterrâneo. Já na Figura 3.9 temos um esquema de um transformador monofásico, que possibilitará o estudo e modelamento desse equipamento, uma vez que podemos lançar mão do "circuito por fase", através de suas variáveis de estado.

Na Figura 3.9, as siglas representam:

$i_p(t)$ = corrente do primário do transformador (A);

$i_s(t)$ = corrente do secundário do transformador (A);

N_P = número de espiras do enrolamento primário do transformador;

N_S = número de espiras do enrolamento secundário do transformador;

$V_P(t)$ = tensão aplicada ao enrolamento primário do transformador;

$V_S(t)$ = tensão de saída, no enrolamento secundário do transformador.

Suponha que o transformador apresentado na figura acima seja **ideal.** Em um transformador ideal, as perdas são nulas, já no transformador real, existem várias perdas, como, por exemplo, as provocadas pelas correntes de Foucault, pelo efeito Joule (perdas no cobre), além das perdas no núcleo, como as perdas provocadas pela sua relutância magnética.

Considere que o fluxo magnético é produzido no enrolamento N_P e é concatenado pelo enrolamento N_S. Ele é chamado de fluxo magnético mútuo, representado por ϕ_M.

Uma vez que a tensão de alimentação V_1 é alternada, o fluxo magnético produzido por ela também terá essa característica, de modo que: $\phi_M(t) = \phi_{MÁX} \cdot \cos \omega t$

Quando esse fluxo magnético é enlaçado pelo enrolamento secundário, N_S segundo a Lei de Faraday, irá aparecer uma tensão induzida, para a qual daremos o nome de e_S, que pode ser representada pela expressão abaixo, segundo a lei de Faraday: $e(t) = -N\frac{d\phi}{dt}$.

Substituindo os valores atuais dos dois enrolamentos do transformador temos:

$$v_P = e_P = N_P \frac{d\phi}{dt} \text{ e } v_S = e_S = N_S \frac{d\phi}{dt}$$

Dividindo: $\frac{e_P}{e_S}$, temos: $\frac{e_P}{e_S} = \frac{v_P}{v_S} = \frac{N_P}{N_S} = a$

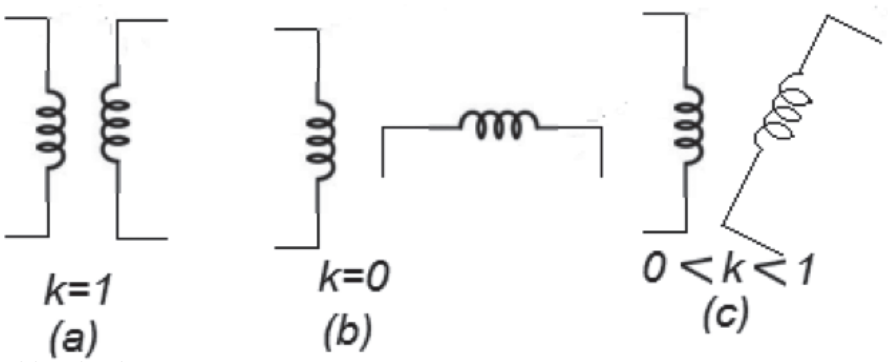
Assim, a representa a relação de transformação do transformador ideal.

Conectando-se uma carga ao terminal de saída do transformador, ou seja, no enrolamento N_S, a tensão induzida e_S que está aplicada a essa carga fará circular em N_S uma corrente i_S. Essa corrente i_S produzirá em N_S um fluxo magnético ϕ_S que se opõe ao fluxo magnético inicial ϕ_P, chamado de *contrafluxo magnético*. Dessa maneira, percebe-se que o fluxo magnético mútuo é $\phi_M = \phi_P + \phi_S$, sendo ϕ_P o fluxo mútuo concatenado por N_S, produzido por i_P e ϕ_S o fluxo magnético mútuo produzido por i_S e concatenado por N_P

Mas o fluxo magnético mútuo tem uma compensação para não ser diminuído, pois o fluxo ϕ_S produz em N_P uma outra corrente chamada de corrente do enrolamento secundário, referida no enrolamento primário, que faz com que a diferença do fluxo magnético mútuo seja compensada. Resumindo, a corrente induzida em N_P por ϕ_S irá provocar a soma dos fluxos que formam o fluxo mútuo e não a diferença, compensando o contrafluxo que, segundo a Lei de Lenz, se opõe ao fluxo que o produziu.

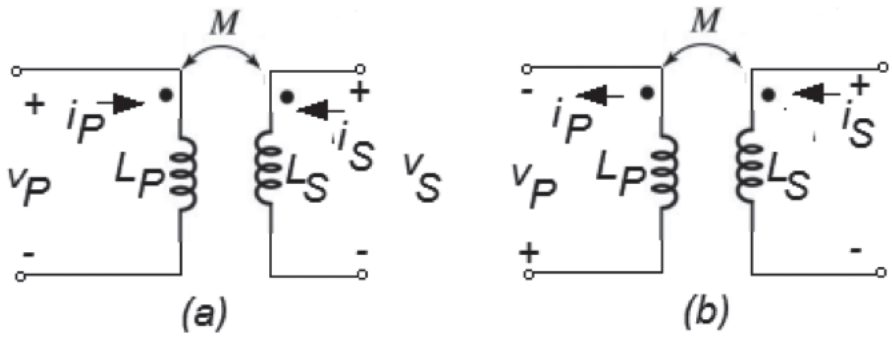
Quando falamos em **indutância mútua**, você deve ter em mente que se trata do fluxo magnético que é produzido por uma bobina, mas que atravessa uma outra bobina, produzindo uma indutância mútua entre esses dois enrolamentos. Se dois enrolamentos estiverem acoplados magneticamente, a indutância mútua dependerá de um coeficiente "k" de acoplamento que tem os seguintes valores, de acordo com a disposição dos enrolamentos:

Figura 3.10 | Valores do coeficiente de acoplamento "k"



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 3.11 | Circuitos representativos da indutância mútua entre bobinas



Fonte: elaborada pela autora.

Note que, na figura anterior, existem pontos marcando os enrolamentos L_P e L_S. Se o sentido da corrente no ponto for o mesmo, então os fluxos gerados são concordantes (a), mas se o sentido de uma corrente no ponto estiver ao contrário da outra, os fluxos gerados por elas serão discordantes (b).

Aplicando i_P no enrolamento N_P surge um fluxo magnético variável em N_S, dado por: $\frac{d\phi_{SP}}{dt}$ e, pela lei de Faraday, uma força eletromotriz induzida e_S dada por:

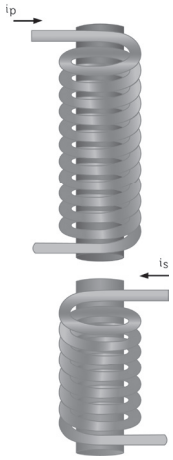
$$e_S = -\frac{d\phi_{SP}}{dt}.$$

Note que ϕ_{SP} é o fluxo magnético produzido por i_P em N_S.

Mas a variação do fluxo do campo magnético depende da variação da corrente i_P, assim podemos escrever: $\frac{d\phi_{SP}}{dt} \alpha \frac{di_P}{dt}$. Substituindo, agora, essa proporcionalidade por uma igualdade, por meio da definição de indutância mútua, temos: $\frac{d\phi_{SP}}{dt} = M_{SP} \cdot \frac{di_P}{dt}$, em que M_{SP} representa a indutância mútua entre N_P e N_S, resultado do fluxo magnético concatenado em N_S, mas produzido por i_P. Temos que o valor da indutância mútua depende da geometria das espiras e da distância entre elas, assim pode-se escrever: $M_{SP} = M_{PS} = M$, que é a indutância mútua entre as bobinas, medida em H (henry).

A polaridade da tensão induzida é influenciada pela indutância mútua. Para determinar essa influência, vamos analisar a figura a seguir:

Figura 3.12 | Circuito de dois enrolamentos



Fonte: DEDMD (2017).

Pesquise mais

Como leitura complementar, você pode acessar o link abaixo, que trata de uma reportagem da revista eletrônica *O Setor Elétrico*, sobre *Redes Sobrecarregadas*.

MOREIRA, Bruno. Rede sobrecarregada. **O setor elétrico**, v. 11, n. 126, p. 46-47, jul. 2016. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/2016/2016/09/05/julho-de-2016/> . Acesso em: 7 fev. 2017.

Para determinar o sentido dos fluxos produzidos pelas correntes i_P e i_S devemos utilizar a regra da mão direita, na qual os dedos envolvem o enrolamento no sentido da corrente e o polegar irá indicar o sentido do fluxo magnético produzido por essa corrente. Dessa maneira percebemos que as duas correntes produzem fluxos magnéticos voltados para baixo, assim podemos equacionar:

$$e_P(t) = L_P \cdot \frac{di_P}{dt} + M \cdot \frac{di_S}{dt}, \quad e_S = L_S \cdot \frac{di_S}{dt} + M \cdot \frac{di_P}{dt}$$, L_S e L_P denominada de autoindutância.

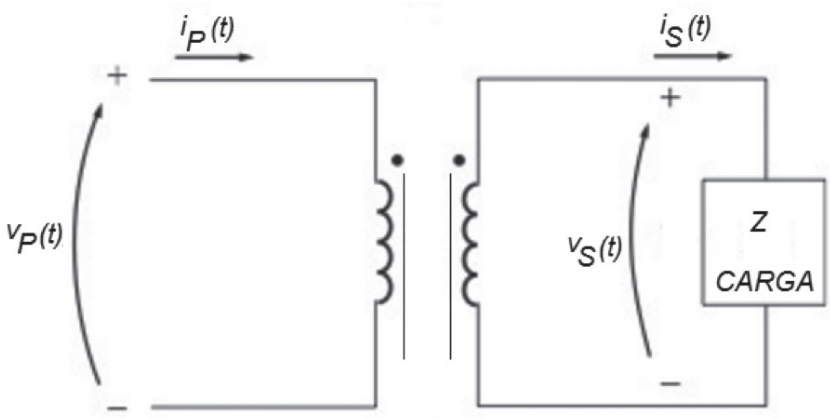
Reflita

Você já parou para pensar o porquê dos transformadores presentes nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica serem sempre os do tipo "núcleo de material ferromagnético"?

Essas duas equações nos mostram a tensão induzida devido à corrente do próprio enrolamento e a parte que se refere à indutância mútua entre os enrolamentos.

Tratando-se, agora, de **impedância referida**, temos no transformador ideal uma carga Z sendo conectada aos terminais do enrolamento secundário N_S, como já citado acima para o cálculo da relação de transformação do transformador, relacionada com as correntes primária e secundária. Pode-se observar esse esquema na figura abaixo.

Figura 3.13 | Circuito para representação de impedância referida ao primário.



Fonte: adaptada de Chapman (2013).

Como o transformador é ideal, podemos considerar que:

$Z = \frac{v_S}{i_S}$ e ainda, $\frac{v_P}{v_S} = \frac{i_S}{i_P} = a$ e temos também: $Z_{referida} = \frac{v_P}{i_P}$

Substituindo os valores de: $v_P = a \cdot v_S$ e $i_P = \frac{i_S}{a}$ na equação de $Z_{referida}$, temos:

$$Z_{referida} = \frac{a \cdot v_S}{\frac{i_S}{a}} = \frac{a \cdot v_S \cdot a}{i_S} = a^2 \cdot \frac{v_S}{i_S} \quad \Rightarrow \quad Z_{referida} = a^2 \cdot Z$$

Observe que existem duas barras entre os enrolamentos primário e secundário do transformador. Isso representa o núcleo ferromagnético do transformador.

Assim, se precisarmos calcular qual deve ser a tensão de alimentação de um transformador, de acordo com a carga que será a ele conectada, podemos lançar mão, em um transformador ideal, da equação da impedância do secundário, referida ao primário.

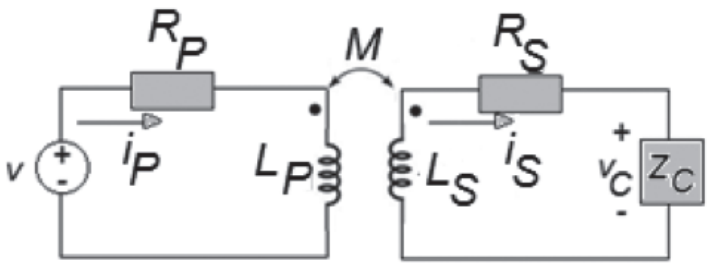
Assimile

Um transformador ideal é um transformador teórico, no qual as perdas não são consideradas para efeito de cálculo.

Impedância referida é a impedância que teria o mesmo efeito no transformador se fosse trocada de lado, ou seja, se fosse conectada no lado oposto ao que se encontra conectada.

Já o **transformador linear** é definido como o transformador com núcleo de material não magnético, o que produz uma relação linear entre a corrente da bobina e o fluxo magnético.

Figura 3.14 | Desenho esquemático de um transformador linear



Fonte: elaborada pela autora.

Em que: R_P e R_S representam as resistências dos condutores dos enrolamentos;

i_P e i_S representam as corrente dos enrolamentos primário e secundário;

L_P e L_S, as indutâncias dos enrolamentos primário e secundário;

v e v_C as tensões de alimentação do circuito e da carga, respectivamente e Z_C a impedância da carga = $R_C + jX_C$

Podemos escrever as seguintes equações para esse circuito:

$$\begin{cases} v = i_P \cdot R_P - j\omega \cdot M \cdot i_S \\ 0 = -j\omega \cdot M \cdot i_P + Z_C \cdot i_S \end{cases}$$

em que temos que: $Z_{ENTRADA} = \dfrac{v}{i_P} = \dfrac{i_P \cdot R_P - j\omega \cdot M \cdot i_S}{i_P}$ e ainda,

$$0 = -j\omega \cdot M \cdot i_P + Z_S \cdot i_S \Rightarrow i_P = \frac{Z_S \cdot i_S}{j\omega \cdot M}.$$

Substituindo o valor de i_P na equação da impedância de entrada, temos:

$$Z_{ENTRADA} = \frac{i_P \cdot R_P - j\omega \cdot M \cdot i_S}{i_P} \Rightarrow \frac{i_P \cdot R_P - j\omega \cdot M \cdot i_S}{\dfrac{Z_S \cdot i_S}{j\omega \cdot M}} = \frac{i_P \cdot R_P - j\omega \cdot M \cdot i_S}{Z_S \cdot i_S} \cdot j\omega \cdot M$$

resultando em:

$$Z_{ENTRADA} = Z_P + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_S}.$$

Nesse tipo de transformador, o fluxo magnético do enrolamento primário é enlaçado pelo enrolamento secundário sem o auxílio de um material magnético, como no ferro silício do núcleo dos transformadores.

Exemplificando

Considere um transformador monofásico ligado a um sistema de distribuição de energia elétrica. No lado de alta tensão, temos 2,3kV e do lado de baixa, 220V. Como você deve proceder para quantificar Z no lado da AT, com uma carga de 100Ω conectada no lado da BT?

Solução: para encontrarmos a impedância do lado de baixa tensão, referida ao lado de alta, devemos lançar mão da equação: $Z_{AT} = a^2 \cdot Z_{BT}$

Mas precisamos, inicialmente, calcular a relação de transformação desse transformador, ou seja:

$a = \frac{v_P}{v_S} = \frac{v_{AT}}{v_{BT}} = \frac{2,3 \cdot 10^3}{220} = 10,45$ Portanto, podemos calcular a ZAT :

$Z_{AT} = (10,45)^2 \cdot 100 = 10,92k\Omega$

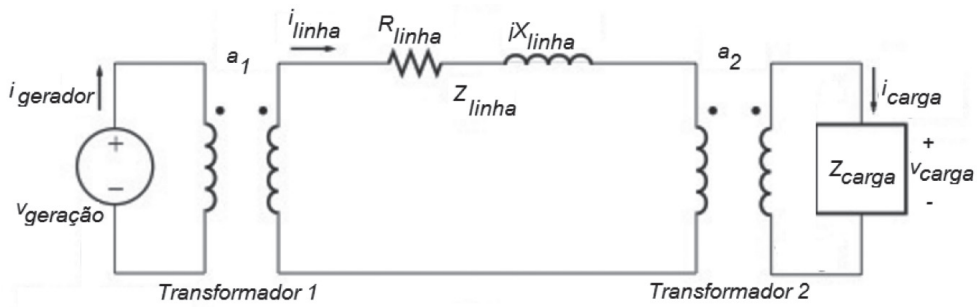
Como esperado, do lado de alta tensão (AT), a impedância tem um valor bem maior do que do lado de BT.

Sem medo de errar

Segundo a distribuidora de energia para a qual você trabalha, é necessário calcular a tensão disponível no final do sistema de distribuição primária que irá alimentar um bairro de uma cidade localizada próxima à PCH. Esse sistema é composto de um gerador síncrono, que faz parte da PCH, de uma linha de transmissão e de dois transformadores, um elevador de tensão, localizado logo na saída do gerador e o outro, ao final da linha de transmissão, com o intuito de promover o rebaixamento da tensão de transmissão para o nível de distribuição primária.

A empresa distribuidora de energia elétrica disponibilizou para você e sua equipe o seguinte circuito elétrico que representa o sistema, conforme Figura 3.15.

Figura 3.15 | Sistema de distribuição



Fonte: adaptada de Chapman (2013).

Para simplificar os cálculos, vamos considerar a representação "por fase".

A distribuidora de energia também solicitou que não sejam incluídas as perdas intrínsecas dos transformadores nesse cálculo, mas ela precisa do cálculo da perda de energia na linha de transmissão do sistema.

Com os dados fornecidos pela distribuidora de energia, juntamente com o circuito elétrico, una-se à sua equipe de trabalho e calcule a tensão que é disponibilizada para a carga V_{carga}, lembrando que a integração da geração com a transmissão da energia elétrica devem ser acopladas com transformadores elevadores de tensão.

Dados fornecidos pela distribuidora de energia elétrica:

$v_g = 13 \cdot 8 \angle 0^o kV$	$Z_{linha} = 0 \cdot 11 + j0 \cdot 15\Omega$	$Z_{carga} = 10 + j5\Omega$

$a_1 = 1:27,5$	$a_2 = 27,5:1$

Analisando o sistema, percebe-se que um gerador está alimentando uma carga por meio de uma linha de transmissão e que nessa linha existem dois transformadores.

Para que você possa calcular a tensão recebida pela carga Z , terá que trazer os valores de carga e da linha de transmissão para o primário do transformador 1, pois é somente aí que se tem disponível o valor da tensão que é gerada pelo gerador síncrono.

Resolvendo por etapas, vamos referir a impedância da carga para o lado da linha de transmissão, simplificando o sistema com a eliminação do transformador T_2.

$$Z'_{carga} = a^2 \cdot Z_{carga} = \left(\frac{27,5}{1}\right)^2 \cdot (10 + j5) = 756,25 \cdot (11,18\angle 26,56^o) = 8454,87\angle 26,56^o \Omega .$$

Dessa maneira, com a impedância da carga referida na linha de transmissão, a impedância total da linha de transmissão é:

$$Z_{totalLT} = Z_{linha} + Z'_{carga} = (0,11 + j0,15) + (8454,87\angle 26,56^o) = 8455,39\angle 26,56^o \Omega .$$

Levando, agora, essa impedância total da linha de transmissão para o circuito da geração, ou seja, referindo-a ao primário de T_1, temos:

$$Z'_{totalLT} = a^2 \cdot Z_{totalLT} \left(\frac{1}{27,5}\right)^2 \cdot (8455,39\angle 26,56^o) = 11,18\angle 26,56^o \Omega .$$

Dessa maneira podemos calcular a corrente $i_{gerador}$:

$$i_{gerador} = \frac{v_{gerador}}{Z'_{totalLT}} = \frac{13,8 \cdot 10^3 \angle 0^o}{11,18\angle 26,56^o} = 1234,35\angle -26,56^o A .$$

Tendo o valor da corrente do gerador, através da relação de transformação de T_1, pode-se calcular a corrente da linha de transmissão, da seguinte forma:

$$N_{P_{T1}} \cdot i_{gerador} = N_{S_{T1}} \cdot i_{linha}$$

$$i_{linha} = \frac{N_{P_{T1}}}{N_{S_{T1}}} \cdot i_{gerador} = \left(\frac{1}{27,5}\right) \cdot (1234,35\angle -26,56^o) = 44,88\angle -26,56^o A .$$

Tendo agora a corrente de linha, podemos referi-la ao primário do transformador T_2 e calcular a corrente que alimenta a carga Z:

$$N_{P_{T2}} \cdot i_{linha} = N_{S_{T2}} \cdot i_{carga}$$

$$i_{carga} = \frac{N_{P_{T2}}}{N_{S_{T2}}} \cdot i_{linha} = \left(\frac{27,5}{1}\right) \cdot (44,88\angle -26,56^o) = 1234,20\angle -26,56^o A .$$

Como a tensão na carga é dada pela multiplicação da corrente de carga pela impedância de carga, temos:

$$v_{carga} = i_{carga} \cdot Z_{carga} = (1234,20\angle -26,56^o) \cdot (11,18\angle 26,56^o) = 13,80\angle 0^o kV .$$

Foi também solicitado que sua equipe calcule as perdas na linha de transmissão, assim, vocês podem lançar mão da equação:

$$Perdas = (i_{linha})^2 \cdot R_{linha} = (1234,20)^2 \cdot 0,11 = 167,56kW .$$

Dessa maneira, você conseguiu calcular a tensão que chega na carga e as perdas na linha de transmissão, mesmo com dois transformadores presentes no sistema elétrico.

Atenção

Para responder ao pedido da empresa de distribuição de energia, você precisa, primeiramente, olhar o sistema como um todo e imaginar quais grandezas você terá que referir para quais partes do sistema. Geralmente você refere para o lugar do sistema em que você tem disponível valores de corrente e de tensão, pois constituem as variáveis de estado do transformador e, de posse desses valores, você pode utilizar as relações de transformação e calcular outras grandezas envolvidas no sistema elétrico.

Avançando na prática

Calculando a regulação de tensão de um transformador.

Descrição da situação-problema

A análise de desempenho de um transformador, ou seja, a forma com que se deve analisar a sua eficiência, depende de sua aplicação. Quando se tem um transformador conectado a um sistema de comunicação, por exemplo, a variável mais importante é a frequência, pois está relacionada com a máxima transferência de potência do sistema. Para esse tipo de sistema, o assunto "*regulação de tensão*" não tem tanto significado, mas nos sistemas de potência, como no caso de sistemas elétricos de distribuição e transmissão de energia, temos que ter uma outra visão.

A regulação de tensão, priorizando os sistemas de distribuição de energia como no nosso caso de estudo, é definida como "a medida do quanto varia a tensão de um sistema, comparada com a tensão contratada da concessionária para esse sistema".

Escrevendo de uma maneira mais prática, um transformador instalado num sistema de distribuição de energia elétrica é responsável pela alimentação de equipamentos, como, por exemplo, lâmpadas, geladeiras etc, que têm seu funcionamento dependente de tensão constante. Quanto mais equipamentos são ligados ao secundário de um transformador, maior é a corrente exigida desse transformador para alimentar esses equipamentos.

Não se pode ter uma queda de tensão no secundário do transformador, pois os problemas causados por uma queda de tensão mantida por muito tempo vão desde o aquecimento de equipamentos até a sua queima.

Nesse contexto, a "regulação de tensão" é utilizada justamente para se medir o quanto vai variar a tensão de saída de um transformador, segundo a variação da carga a ele conectada.

A equação utilizada é:

$$\mathrm{Re}g_t = 1 - \left[\frac{(v_m - v_c)}{v_c}\right] \cdot 100\%,$$

em que: $\mathrm{Re}g_t$ =regulação de tensão (%) ; v_m =tensão medida (V) ; v_C =tensão contratada (V).

Assim, no nosso estudo de caso, temos um sistema no qual a distribuidora de energia elétrica foi contratada para fornecer, no secundário do transformador que alimenta a rede primária de distribuição, a tensão de 13,8kV.

Como a carga conectada ao secundário desse transformador teve um aumento de demanda, ou seja, o bairro alimentado por esse sistema elétrico aumentou, novas casas foram construídas, a tensão medida no secundário desse transformador foi de 12,6kV.

Calcule a regulação de tensão para esse sistema.

Resolução da situação-problema

Aplicando-se a equação da regulação de tensão e substituindo os valores obtidos, temos:

$$\mathrm{Re}g_t = 1 - \left[\frac{(v_c - v_m)}{v_c}\right] \cdot 100\% \Rightarrow 1 - \left[\frac{\left(13{,}8 \cdot 10^3 - 12{,}6 \cdot 10^3\right)}{13{,}8 \cdot 10^3}\right] \cdot 100\% = 91{,}31\%$$

Como as empresas distribuidoras de energia elétrica precisam seguir uma regulamentação para trabalhar, a regulação de tensão é um dado de suma importância para qualificar o serviço prestado pela empresa, segundo o nível de fornecimento em regime permanente.

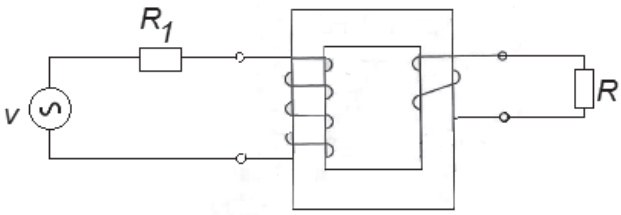
Existe uma qualificação do serviço dado pelo valor da regulação de tensão. Assim, com o valor calculado de 91,31% o serviço é classificado como "tensão adequada".

Faça valer a pena

1. Pensando na relação de transformação do transformador, dada por $a = \frac{N_P}{N_S} = \frac{v_P}{v_S} = \frac{i_S}{i_P}$, na aplicação de transformadores para garantir a máxima transferência de potência nos sistemas de comunicação e de posse dos dados fornecidos no enunciado da questão, resolva o problema.

A partir do circuito abaixo, calcule o valor de *R* para que se tenha uma potência máxima sendo consumida pelo circuito.

Figura 3.16 | Circuito do problema



Fonte: elaborada pela autora.

Dados: $R_1 = 20\Omega$ e v=110V. Assinale a alternativa que indica o verdadeiro valor de *R*.

a) $3\,\Omega$

b) $50\,\Omega$

c) $5\,\Omega$

d) $15\,\Omega$

e) $20\,\Omega$

2. Quando estudamos os transformadores, vimos que existe uma relação de transformação particular para cada transformador, de acordo com sua utilização e com suas características físicas. Essa relação de transformação está relacionada com o número de espiras dos seus enrolamentos, com as tensões e correntes de cada um deles.

Um transformador tem seu enrolamento primário alimentado por uma corrente alternada de 15A. O número de espiras desse enrolamento é de 700 espiras. Calcule a corrente no enrolamento secundário do transformador, considerando que o enrolamento secundário tem 200 espiras.

a) 100ª

b) 50A

c) 5,5A

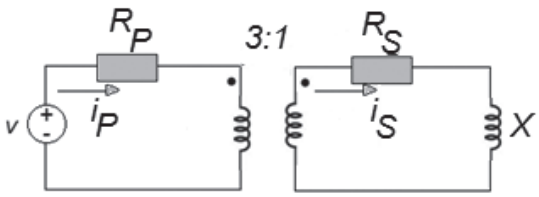
d) 2,5A

e) 52,5ª

3. Quando estudamos os transformadores, é comum representarmos o equipamento por meio de um circuito elétrico. Esse fato apresenta várias vantagens, entre elas, a possibilidade da realização de um modelamento do circuito, através de equações que descrevem seu funcionamento e os fenômenos envolvidos no equipamento.

A partir do circuito apresentado a seguir, o qual representa um transformador, calcule os valores de i_P e de i_S.

Figura 3.17 | Transformador



Fonte: elaborada pela autora.

Dados: $v = 110\angle 120^o V$, $R_P = 5\Omega$, $a = 3:1$, $R_S = 1\Omega$ e $X = j3\Omega$.

Indique qual alternativa mostra os valores de I_P e I_S, respectivamente.

a) $i_P = 1{,}93\angle 91{,}63^o A$ e $i_S = 5{,}79\angle 91{,}63^o A$

b) $i_P = 1{,}93\angle 9{,}63^o A$ e $i_S = 5{,}79\angle 9{,}63^o A$

c) $i_P = 5{,}79\angle 91{,}63^o A$ e $i_S = 1{,}93\angle 91{,}63^o A$

d) $i_P = 19{,}3\angle 91{,}63^o A$ e $i_S = 57{,}9\angle 91{,}63^o A$

e) $i_P = 0$ e $i_S = 10A$

Seção 3.3

Circuitos trifásicos e transformadores de tensão e corrente

Diálogo aberto

Para iniciar essa nova seção de estudos é importante que você se lembre da proposta na qual você foi convocado para integrar uma equipe de engenheiros que é responsável pelo desenvolvimento e implantação de uma PCH - pequena central hidrelétrica – para uma distribuidora que deseja entrar no mercado de geração de energia. Nesse contexto, você já escolheu o grupo gerador a ser utilizado (gerador síncrono e turbina Francis), já estudou as características dos indutores que compõem os transformadores de tensão e já dimensionou o transformador a ser utilizado na subestação elevadora de tensão. O transformador que você indicou para fazer a conexão entre o sistema de geração e o sistema de transmissão de energia foi um transformador elevador de tensão de 2 kV para 34,5 kV. Você realizou também os cálculos das perdas nas linhas de transmissão de energia, disponibilizando, assim, os níveis de tensão adequados para que a carga, que no caso é um bairro da cidade pelo qual a concessionária é responsável por abastecer de energia elétrica, seja adequadamente suprido de energia elétrica com uma regulação de tensão aceitável.

O que falta para completar o sistema geração-transmissão-distribuição de energia elétrica é dimensionar os Transformadores de Potencial, TPs, e os Transformadores de Corrente, TCs, que farão parte do sistema de transmissão de energia elétrica, mais precisamente, da subestação elevadora de energia. Esses dois equipamentos são responsáveis pela correta medição dos níveis de corrente e tensão elétricas disponíveis no sistema e, por consequência, responsáveis pela eficiência do sistema de proteção dessa linha de transmissão, uma vez que essas informações são de suma importância para o acionamento ou não dos relés de proteção.

A energia elétrica do sistema de transmissão será entregue para a distribuição, em uma outra subestação, porém, abaixadora, transformando os 34,5kV em 13,8kV para a distribuição primária e, ainda, será transformada, de 13,8kV para 220/110V, em outro sistema, a distribuição secundária.

Como nessa etapa do projeto você já realizou todas as tarefas solicitadas pela distribuidora de energia, como a escolha do grupo gerador da PCH, a escolha do transformador elevador de tensão, agora, para que sua equipe possa finalizar o projeto, falta apenas o correto dimensionamento do TP e TC. Para fazer isso, você precisa de novos conhecimentos, apresentados a seguir.

Não pode faltar

Vamos concentrar nossos estudos no sistema de transmissão de energia, pois essa é a parte do Sistema Elétrico de Potência (SEP) que demanda uma atenção enorme dos engenheiros e técnicos das empresas responsáveis por esses sistemas. Esse fato se dá por causa das dimensões das redes de transmissão, muitas vezes bem mais longas do que as de distribuição e também pelo fato da energia envolvida nesse sistema ter um valor muito maior do que nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

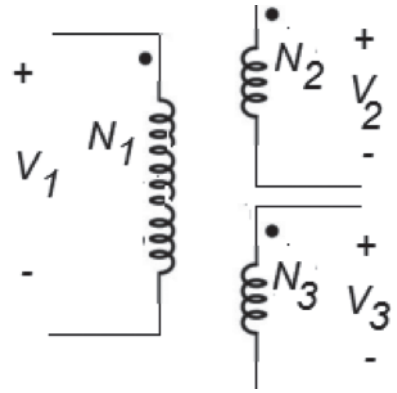
Para que você possa dimensionar corretamente os TPs e TCs do sistema de transmissão de energia, primeiramente você precisa estudar alguns conceitos sobre transformadores, como, por exemplo, os **transformadores de múltiplos enrolamentos.**

Existe um tipo de transformador que, no momento de sua construção, é montado com mais de um enrolamento, no primário ou no secundário, porém, acoplado por um núcleo comum, de material magnético, como mostrado na Figura 3.18 abaixo.

Nesses transformadores, o secundário pode ser conectado a dois ou mais circuitos isolados entre si e alimentar cargas distintas.

Com essa configuração, tem-se vantagens econômicas, comparando com a utilização de dois transformadores, no caso de se substituir o transformador em questão.

Figura 3.18 | Circuito representativo de um transformador de múltiplos enrolamentos



Fonte: elaborada pela autora.

Nesse caso, temos que:

$$V_3 = \frac{N_3}{N_1} \cdot V_1(V) \text{ e } V_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_1(V) \text{ e ainda, } S_1 = S_2 + S_3(VA).$$

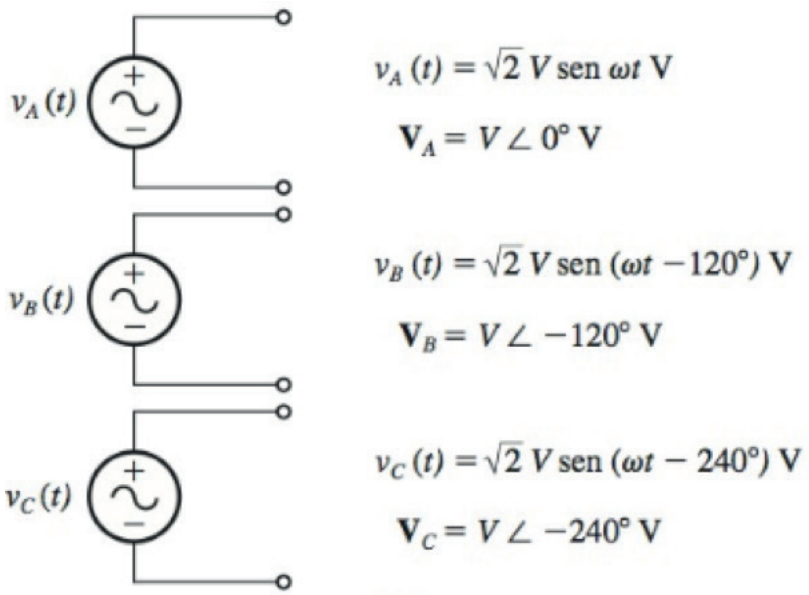
Vamos tratar agora de **transformadores em circuitos trifásicos.** Como o sistema de geração-transmissão-distribuição de energia elétrica é trifásico, ou seja, é composto por três fases, os transformadores a serem utilizados nesses sistemas também precisam ser trifásicos. É utilizado o sistema trifásico por razões de economia no uso do cobre e, principalmente, por esse sistema apresentar um melhor rendimento do que o monofásico.

Pode-se também utilizar três transformadores monofásicos, o que não constitui um esquema comumente utilizado devido ao fato desse arranjo ser mais pesado, mais caro e menos eficiente.

Uma vez que o SEP, que compreende a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica é trifásico, ou seja, tem três fases, os transformadores utilizados nas subestações e nos sistemas de distribuição primários e secundários de energia também são trifásicos. Eles têm três enrolamentos primários e, no mínimo, três enrolamentos secundários.

Para que nosso estudo aconteça de maneira mais prática, vamos representar apenas uma das fases do sistema trifásico nos nossos circuitos de estudo, facilitando sobremaneira nossos cálculos. Uma característica do sistema trifásico "equilibrado" é o fato de que as três tensões de fase têm o mesmo valor máximo, mas são defasadas de 120 graus elétricos umas das outras. A Figura 3.19 mostra as três tensões citadas anteriormente.

Figura 3.19 | Sistema trifásico



Fonte: Chapman (2013).

Uma outra característica do sistema trifásico é a sequência de fases, ou seja, a ordem em que os picos das tensões das fases aparecem no sistema, quando representados graficamente. A sequência de fases pode ser abc (positiva) ou acb (negativa). Definindo melhor, a sequência de fases constitui um trio de fasores representados por uma matriz coluna, com os elementos da 1^a, 2^a e 3^a linhas correspondendo, respectivamente, ao 1^a, 2^a e 3^a fasor desse trio. Abaixo, segue a representação matricial do trio de fasores, nas sequências positiva e negativa:

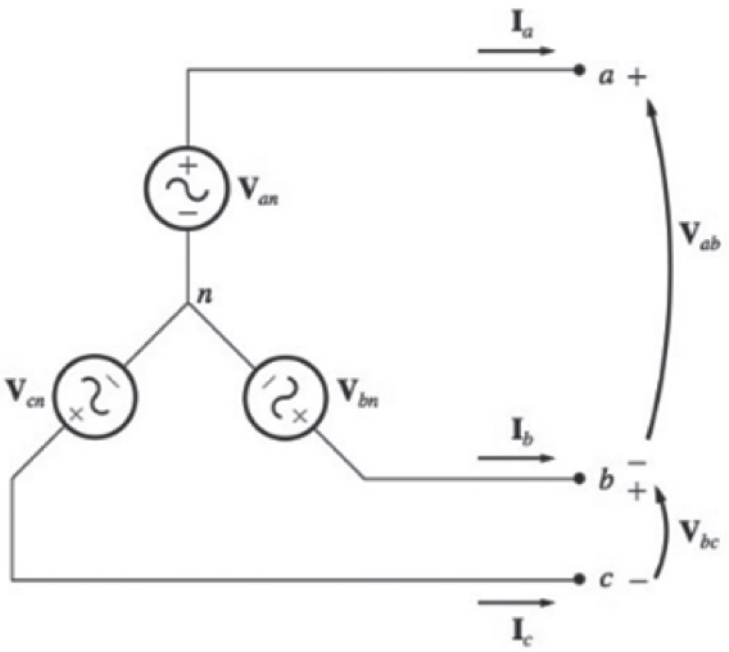
$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V \\ \alpha^2 V \\ \alpha V \end{bmatrix} \text{ ou } V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \angle 0^o \\ V_b \angle -120^o \\ V_c \angle 120^o \end{bmatrix}$$, correspondendo à sequência positiva de fases e

$$V_{acb} = \begin{bmatrix} V \\ \alpha V \\ \alpha^2 V \end{bmatrix} \text{ ou } V_{acb} = \begin{bmatrix} V_a \angle 0^o \\ V_c \angle -120^o \\ V_b \angle 120^o \end{bmatrix}$$, correspondendo à sequência negativa de fases.

É a sequência de fases que irá, por exemplo, definir o sentido de rotação de um motor de indução.

Os três enrolamentos primários deste transformador são alimentados pelas tensões trifásicas primárias, que podem estar agrupadas em estrela ou triângulo. O agrupamento em estrela tem um ponto em comum e algumas características de tensões e correntes de linha e de fase, como mostra a Figura 3.20.

Figura 3.20 | Ligação em estrela:



Fonte: Chapman (2013).

em que: V_{cn}, V_{bn} e V_{an} são tensões de fase;

V_{ab}, V_{bc} e V_{ca} são tensões de linha

n é o ponto comum

No agrupamento em estrela, com sequência de fase positiva, as correntes de linha e de fase são iguais, ou seja: $I_{an} = I_a(A)$. Já as tensões de fase e de linha são diferentes e, aplicando a Lei de Kirchhoff para tensões:

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = (V + j0) - \left[V\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right]$$

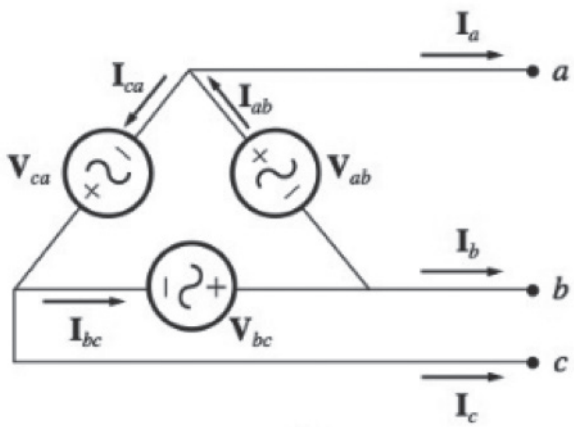
$$V_{ab} = V + \frac{V}{2} + j\frac{\sqrt{3}V}{2} = \frac{3V}{2} + j\frac{\sqrt{3}V}{2}$$

$V_{ab} = V\left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ e multiplicando essa última equação por $\sqrt{3}$, temos:

$V_{ab} = \sqrt{3} \cdot V$ e o ângulo de defasagem entre elas é de 30^o. Portanto, para o agrupamento em estrela, as tensões de linha são $\sqrt{3}$ vezes maiores do que as de fase.

Já para o agrupamento em delta ou triângulo mostrado na Figura 3.21, temos:

Figura 3.21 | Agrupamento em delta ou triângulo



Fonte: Chapman (2013).

em que: I_{ca}, I_{ab} e I_{bc} são correntes de fase;

I_a, I_b e I_c são correntes de linha;

V_{ab}, V_{bc} e V_{ca} são tensões de fase e de linha.

Para esse agrupamento temos as seguintes relações: as tensões de linha e de fase são iguais.

Já as correntes, aplicando a Lei de Kirchhoff para correntes no nó a, temos:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} = I(1 + j0) - I\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$I_a = I\left(1 + \frac{1}{2}\right) - j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = I\left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$I_a = \sqrt{3} \cdot I$ e o ângulo de defasagem entre as duas correntes é de -30^o. Assim sendo, para o agrupamento em delta, a corrente de linha é $\sqrt{3}$ vezes maior do que a corrente de fase (I).

Assimile

Tabela 3.3 | Ligações em estrela (Y) e delta (Δ): relações matemáticas

	Y	Δ
CORRENTE	$I_{fase} = I_{linha}$	$I_{linha} = \sqrt{3} \cdot I_{fase}$
TENSÃO	$V_{linha} = \sqrt{3} \cdot V_{fase}$	$V_{fase} = V_{linha}$
SEQUÊNCIA DE FASE ABC	V_{fase} está adiantada de 30^o em relação à V_{linha}	I_{linha} está atrasada de 30^o em relação à I_{fase}
SEQUÊNCIA DE FASE ACB	V_{fase} está atrasada de 30^o em relação à V_{linha}	I_{linha} está adiantada em relação à I_{fase} de 30^o

Fonte: elaborada pela autora.

Depois de entender os tipos de ligações disponíveis para sistemas trifásicos, precisamos estudar os tipos de ligações disponíveis nos enrolamentos dos transformadores trifásicos.

Pesquise mais

Para você ter conhecimento de novas tecnologias que estão sendo empregadas em transformadores de distribuição de energia, pode ler o artigo que está indicado no *link* a seguir. Esse artigo apresenta um equipamento de baixo custo, sem necessidade de técnico especializado para a instalação e de alta eficácia. Ele foi chamado de "Indicador de sobrecarga de longa duração" .

Manutenção de transformadores. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/2016/2015/01/19/manutencao-de-transformadores/>. Acesso em: 12 jan. 2017.

Representando as ligações pelos símbolos Y (estrela) e ∅ (delta), temos as possibilidades indicadas abaixo na Tabela 3.4, para os enrolamentos primário e secundário dos transformadores trifásicos:

Tabela 3.4 | Agrupamentos possíveis para os enrolamentos do transformador trifásico

ENROLAMENTO PRIMÁRIO	ENROLAMENTO SECUNDÁRIO
Y	Y
Y	Δ
Δ	Y
Δ	Δ

Fonte: elaborada pela autora.

Para o cálculo das potências útil, aparente e reativa do transformador trifásico, é preciso levar em consideração o tipo de ligação a que está submetido, pois ocorrerão mudanças entre as grandezas de fase e de linha, para correntes e tensões desse equipamento.

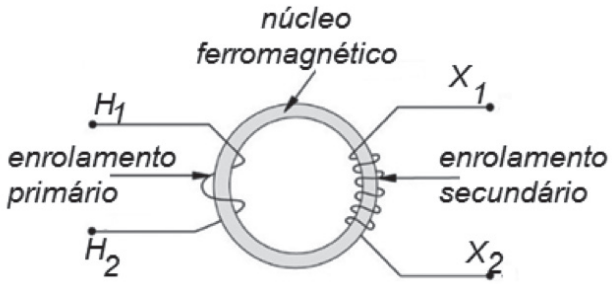
A potência útil, por fase, pode ser calculada por: $P_{fase} = V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos\phi$ em watts (W), sendo ϕ o ângulo entre a corrente e a tensão do sistema. A potência reativa, por fase, pode ser calculada por: $Q_{fase} = V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot sen\phi$, em volt-ampere-reativo (VAR) sendo o ângulo ϕ tomado entre a corrente e a tensão do sistema. Já a potência aparente, que é a soma das outras duas, pode ser calculada por: $S_{fase} = V_{fase} \cdot I_{fase}$, em volt-ampere (VA).

Reflita

Como se forma o campo girante que dará origem às tensões induzidas no enrolamento secundário do transformador trifásico?

Vamos, agora, analisar os **transformadores de tensão,** ou **Transformadores de Potencial (TP)** e os **Transformadores de Corrente (TC).** Esses dois instrumentos são utilizados para medição de tensão e corrente elétricas em sistemas em que o valor dessas grandezas elétricas são diferentes dos valores nominais de leitura dos equipamentos constituintes dos sistemas de medição de energia e de proteção. Existem alguns tipos de TPs e TCs, de acordo com sua construção e utilização. A Figura 3.22 mostra uma representação de um TP indutivo.

Figura 3.22 | Esquema elétrico de um TP indutivo

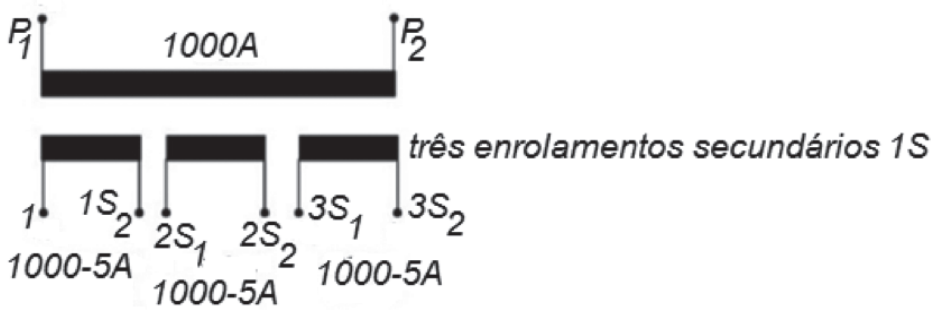


Fonte: Mamede (2015).

No caso do sistema de geração de energia da PCH em questão, temos o seguinte cenário: a energia gerada em 2kV é elevada para 34,5kV, para transmissão, e depois abaixada para 13,8kV para distribuição primária. Os TPs e os TCs mostram as condições reais do Sistema Elétrico de Potência e você irá dimensioná-los para que estejam conectados à tensão de 34,5kV, ou seja, na saída da subestação elevadora de tensão, para a linha de transmissão dessa energia. Assim, os terminais H_1 e H_2 são conectados à alta tensão, no caso, os 34,5kV e os terminais X_1 e X_2 correspondem às saídas, em 115V ou $\frac{115V}{\sqrt{3}}$, para os equipamentos de medição e proteção do sistema, sendo essas tensões de saída padronizadas por norma. O TP normalmente apresenta um pequeno erro, ε_{TP}, na sua relação de transformação e ele pode ser calculado por: $\varepsilon_{TP} = \frac{R_{TP} \cdot V_S - V_P}{V_P} \cdot 100\%$, em que: R_{TP} nada mais é do que a relação de transformação do TP, V_S e V_P as tensões nos terminais dos enrolamentos secundário e primário, respectivamente. Para a correção desse erro devemos incorporar, nos valores medidos, um fator chamado de **fator de correção da R_{TP}.** Ele é dado por: $f_{TP} = \frac{R_{TP_real}}{R_{TP_nominal}}$. Outro erro presente no TP é o erro do ângulo de fase, representado por β. Ele é definido como a diferença de fase entre as tensões vetoriais primárias e secundárias do TP. Ele pode ser calculado por: $\beta = 26 \cdot (f'_{TP} - f_{TP})$ em que: f_{TP} é o fator de correção da relação de transformação do TP $\left(f_{TP} = \frac{R_{TP_real}}{R_{TP_nominal}} \right)$ e f'_{TP} o fator de correção de transformação que considera tanto a relação de transformação, como o erro do ângulo de fase, e ele é dado pela NBR 6855 – Transformador de Potencial Indutivo.

Já o transformador de corrente (TC) pode ter um ou mais enrolamentos no seu secundário, como mostrado na Figura 3.23.

Figura 3.23 | Exemplo de ligação de TC



Fonte: Mamede (2015).

No seu enrolamento secundário a intensidade da corrente nominal disponível é de 5A, valor de corrente elétrica padronizada por norma regulamentadora, e o TC é dimensionado segundo a carga que será conectada no seu secundário (se for para medição ou para proteção de circuitos), com relação à sua classe de exatidão, que é fornecida pelo fabricante.

Existe também, no TC, um erro percentual na relação de transformação. Esse erro pode ser determinado pela equação: $\varepsilon_{TC} = \frac{R_{TC_nominal} \cdot i_S - i_P}{i_P} \cdot 100\%$, em que $R_{TC_nominal}$ é a relação de transformação nominal do TC, se i_S e i_P são as correntes que circulam nos enrolamentos secundário e primário, respectivamente.

E, para corrigir a leitura dos equipamentos de medição, existe um fator de correção de transformação, f_{TC}, que é dado por: $f_{TC} = \frac{R_{TC_real}}{R_{TC_nominal}}$, em que R_{TC_real} e $R_{TC_nominal}$ são as relações de transformação real e nominal do TC, respectivamente. A seguir apresenta-se uma tabela com a classe de exatidão requerida para sistemas de medição e proteção, segundo ABNT – NBR 6856 – Transformador de Corrente.

Tabela 3.5 | Classe de exatidão de TCs

PARA MEDIÇÃO (%)	PARA PROTEÇÃO (%)
0,3	
0,6	5,0
1,2	10
3,0	

Fonte: adaptada de Brasil (1992).

Perceba que as classes de exatidão para fins de medição e proteção são diferentes, isso se dá porque, no caso da proteção de sistemas de potência, não pode ocorrer saturação do TC.

Exemplificando

Um transformador de corrente tem a relação: 160/5A e está conectado a um amperímetro que tem a escala de medição indo de 0 a 10A e está indicando uma corrente de 4,25A. Calcule a corrente que circula no enrolamento primário do TC.

Solução: Para calcular a corrente primária do TC, primeiro você precisa calcular a relação de transformação do equipamento:

$R_{TC_nominal} = \frac{160A}{5A} = 32$, em seguida é só multiplicar essa relação de transformação pela leitura do amperímetro e teremos a corrente primária do TC: $32 \cdot 4.25A = 136A$. Portanto, a corrente do enrolamento primário do TC é de 136A.

Sem medo de errar

Lembre-se, você é um engenheiro trabalhando para uma distribuidora de energia e está, com o restante da equipe, projetando uma PCH juntamente com sua conexão no SEP. Vamos, agora, dimensionar o TC e o TP para a subestação elevadora de tensão, que faz parte do Sistema Elétrico de Potência para interligação da PCH, com a cidade que será alimentada por ela. A concessionária de energia lhe forneceu os seguintes dados, disponibilizados na Tabela 3.6:

Quadro 3.1 | Dados do SEP – Sistema Elétrico de Potência

TENSÃO DE GERAÇÃO = 2kV	TP deve ser do tipo indutivo, por razão de custos inferiores ao do tipo capacitivo e poder ser utilizado em tensões de até 138kV.
TENSÃO DE TRANSMISSÃO = 34,5kV	Erro admissível do TP = -0,6%
Dimensionar TC para medição	Variação da tensão primária do TP = $\pm 2\%$
Dimensionar TP para medição	Corrente máxima do sistema de transmissão, ou do secundário do transformador elevador de tensão é de $600A$
	A corrente do secundário do TC é de $5A$
	Classe de exatidão requerida para o TP= 0,3, de acordo com a Tabela 3.5

Fonte: elaborada pela autora.

Primeiramente, vamos dimensionar o TP para medição. A empresa distribuidora de energia comprou, para poder medir a tensão do secundário do TP, voltímetros com escala de 0 a 120V. Qual é a relação de transformação nominal desse TP?

Se o erro admissível para o TP for de -0,6% (dado pelo fator de correção dele, que é de 100,6%) e a tensão aplicada ao enrolamento primário do TP puder sofrer variação de até $\pm 2\%$, qual escala de medição dos voltímetros será adequada para a medição solicitada? De acordo com a classe de exatidão selecionada pela concessionária de energia (0,3), calcule o ângulo de defasagem entre as tensões vetoriais primária e secundária do TP.

Solução (TP):

A relação de transformação nominal do TP é:

$$R_{TP_nominal} = \frac{V_{P_nominal}}{V_{S_nominal}} = \frac{34500}{115} = 300$$

Para um fator de correção de 100,6%, o erro do TP é de: $\varepsilon_{TP} = 100 - 100,6 = -0,6\%$

A tensão conectada ao enrolamento primário do TP pode variar de 34500V $\pm 2\%$, o que significa uma faixa de variação de:

$34500 \cdot 0,02 = 690V$, ou seja, pode variar de:

$34500 + 690 = 35190V$ a $34500 - 690 = 33810V$.

Com essa variação, podemos calcular a faixa de tensão do secundário do TP, fazendo:

Para $V_P = 35190V$, $\varepsilon_{TP} = \dfrac{R_{TP} \cdot V_S - V_P}{V_P} \cdot 100\%$ ou seja:

$$-0,6\% = \frac{300 \cdot V_S - 35190}{35190} \Rightarrow -21114 = 300 \cdot V_S - 35190 \Rightarrow V_S = 116,59V$$

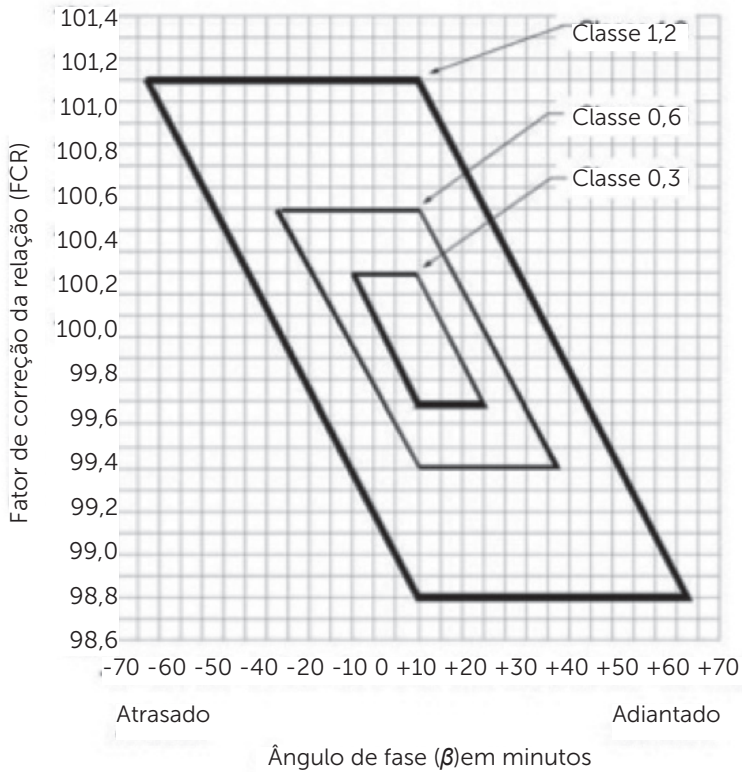
Para $V_P = 33810V$

$$-0,6\% = \frac{300 \cdot V_S - 33810}{33810} \Rightarrow -20286 = 300 \cdot V_S - 33810 \Rightarrow V_S = 112,02V$$

Assim sendo, como a leitura do voltímetro pode variar de 112,02V a 116,59V, a escala dos voltímetros comprados pela concessionária (de 0 a 120V) podem, tranquilamente, realizar essas medições.

Para calcular o ângulo de defasagem entre as tensões vetoriais, primária e secundária do TP, é preciso olhar o gráfico de classe de exatidão fornecido pela NBR6855, mostrado na Figura 3.24 .

Figura 3.24 | Classe de exatidão de TPs



Fonte: Mamede (2011).

De acordo com o gráfico da Figura 3.23, para uma classe de exatidão de 0,3 (você deve olhar a parte superior do paralelogramo) temos $f_{TP}^{'} = 100,3$ e na parte inferior do mesmo paralelogramo, $f_{TP} = 99,7$. Assim, o ângulo β vale: $\beta = 26(100,3 - 99,7) = 15,6°$. Dessa maneira sabe-se a defasagem entre os vetores de tensão do enrolamento primário e secundário do TP.

Vamos agora, dimensionar o TC adequado para a medição de corrente no secundário desse sistema de transmissão de energia. Qual a relação de transformação do TC?

Solução (TC):

Sabendo que a corrente do secundário do TC, de fábrica, é de 5A, a relação de transformação do TC é calculada por: $R_{TC} = \frac{i_S}{i_P} = \frac{600}{5} = \frac{120}{1} = 120:1$

Como você e sua equipe conseguiram elaborar o projeto da PCH, bem como do SEP, para levar a energia gerada até o centro consumidor, a tarefa está concluída e vocês estão de parabéns!

Avançando na prática

Ensaio de um TP para utilização em cabine primária de um hospital

Descrição da situação-problema

Imagine, agora, que você é um engenheiro contratado para analisar e elaborar um laudo técnico a respeito de três TPs que serão instalados na cabine primária de um hospital. Como o hospital tem sala de cirurgia e maternidade, bem como Unidade de Tratamento Intensivo (UTI) e Unidade Coronariana (UCO), é preciso que a qualidade e a regularidade da energia sejam mantidas dentro dos padrões necessários.

Você precisa analisar o resultado de um ensaio realizado nos TPs no qual obteve-se como tensão do enrolamento primário e secundário, entre fase e neutro, $\frac{13,8kV}{\sqrt{3}}$ e $\frac{114,5V}{\sqrt{3}}$, respectivamente, uma vez que a ligação do sistema é em estrela e o TP está conectado na tensão de fase do sistema. Com esses resultados, determine se a classe de exatidão desse TP permanece nos 0,3, e o erro do ângulo de fase em $\beta = 15,6°$, que são os requisitos necessários para que o TP possa ser instalado na cabine primária do hospital.

Resolução da situação-problema

Como no gráfico da classe de exatidão, mostrado na Figura 3.23, você precisa do erro do ângulo de fase e do fator de correção da relação de transformação do TP para determinar sua classe de exatidão, primeiro você precisa calcular as relações de transformação real e nominal desse TP, como calculado no item *Sem medo de errar*:

$$R_{TP_nominal} = \frac{13800}{115} = 120 \quad \text{e} \quad R_{TP_real} = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{\frac{114,5}{\sqrt{3}}} = 120,52$$

O fator de correção da relação de transformação é calculado da seguinte maneira:

$f_{TP} = \frac{R_{TP_real}}{R_{TP_nominal}} = \frac{120,52}{120} = 1,0043$. Com o valor do fator de correção da relação de transformação, basta multiplicamos por 100, para termos o percentual dele e, assim, podermos, através do gráfico da exatidão do TP, encontrarmos a classe de exatidão a que ele pertence.

Assim: $1,0044 \cdot 100 = 100,44$ e, através da Figura 3.23, cruzando os pontos, 100,4 e $15,6^{o}$ percebemos que a junção deles cai no paralelogramo de classe de exatidão 0,6. Esse valor está acima do exigido pelo hospital para os TPs da cabine primária de tensão, de 13,8Kv. Portanto, deve ser substituído por outro que tenha a classe de exatidão exigida, ou seja, 0,3!

Faça valer a pena

1. Os Transformadores de Potencial (TPs) são equipamentos muito utilizados tanto para medição de grandezas elétricas como para a proteção de Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

Para cada um dos casos, existem classes de exatidão adequadas e, ainda, no enrolamento secundário, o nível de tensão é padrão, de 115V.

Dentro do assunto de Transformadores de Potencial (TPs), indique qual das alternativas abaixo é verdadeira.

a) Os Transformadores de Potencial (Tps) somente podem ser utilizados em SEPs de baixa tensão.

b) A relação de transformação do TP serve para nos informar se o TP é trifásico ou monofásico.

c) Os TPs são equipamentos que, quando conectados ao SEP, permitem que instrumentos de medição e de proteção funcionem adequadamente e forneçam leituras confiáveis da tensão elétrica sem a necessidade de possuírem tensão de isolamento da rede.

d) A classe de exatidão dos TPs indica somente a defasagem entre as tensões primárias e secundárias do TP.

e) Os TPs transformam correntes de alto valor para valores em níveis aceitáveis pelos instrumentos de medição.

2. Se um Transformador de Corrente (TC) é um equipamento que possui seu enrolamento primário conectado diretamente ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) e o seu enrolamento secundário conectado aos instrumentos de medição e proteção, pode-se afirmar que:

Entre as cinco alternativas abaixo descritas, indique qual delas corresponde à única que está correta.

a) Os TCs transformam correntes elevadas que circulam no seu primário em correntes menores, de acordo com sua relação de transformação.

b) Os TCs transformam correntes de valores menores, provindas dos medidores, em correntes com valores maiores, para serem inseridas no SEP.

c) No SEP os TCs transformam tensões elevadas em níveis aceitáveis para os voltímetros conectados ao seu enrolamento secundário.

d) Um TC não tem uma relação de transformação fixa, isto é, ela varia de acordo com o nível de corrente a ser transformada nos seus enrolamentos.

e) Um TC pode ter somente um enrolamento secundário.

3. Um transformador, com seus enrolamentos ligados em delta (∅) no primário e estrela (Y) no secundário, é considerado o equipamento típico para ser utilizado na extremidade de uma linha de distribuição, fazendo a transformação da energia em um nível mais alto, para um nível a ser utilizado pelos consumidores.

Identifique a alternativa correta, que relaciona corretamente os fundamentos sobre transformadores trifásicos.

a) As corrente de fase e de linha do enrolamento secundário são diferentes em seus valores.

b) Nesse tipo de ligação, a tensão de linha do enrolamento secundário é $\frac{V_{fase}}{\sqrt{3}}$

c) Pode-se afirmar que no enrolamento secundário desse transformador $V_{fase} = V_{linha}$

d) No enrolamento secundário, pode-se afirmar que: $i_{fase} = \frac{i_{linha}}{\sqrt{3}}$

e) Nesse tipo de agrupamento, a tensão de fase do secundário do transformador é $\frac{V_{linha}}{\sqrt{3}}$

Referências

BRASIL. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6856 - Transformador de Corrente**. Brasília: ABNT, 1992.

CHAPMAN, S.J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5. ed. Porto Alegre: MC Graw Hill, 2013.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MAMEDE FILHO, J., MAMEDE, D.R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC.

SIMONE, G.A. **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos: uma introdução ao estudo**. São Paulo: Érica, 2010.

SIMONE, G.A. e CREPPE, R.C., **Conversão Eletromecânica de Energia: Uma introdução ao estudo**. São paulo: Érica, 2012.

Conversores de corrente alternada, corrente contínua e introdução a máquinas elétricas

Convite ao estudo

Nesta nova unidade de ensino você irá se familiarizar com alguns equipamentos que fazem parte de um modelo de sistema elétrico de potência que pode alimentar uma indústria ou mesmo um empreendimento como um condomínio ou um hospital, por exemplo. São os conversores de energia elétrica. Fazem parte desse grupo de equipamentos os geradores e os motores elétricos.

Imagine, então, a seguinte situação: na Unidade 3 você trabalhou no dimensionamento de todos os equipamentos necessários para a implantação de uma PCH, incluindo os transformadores de tensão e de corrente. Porém, quando se tratou do tipo de gerador elétrico a ser utilizado, apesar de ter sido indicado por você, faltavam, ainda, conceitos técnicos para a escolha de um ou outro tipo, por exemplo, o conversor síncrono ou o assíncrono.

Dessa maneira, na Unidade 4, você irá compreender a teoria dos circuitos magnéticos, dispositivos de armazenamento e transferência de energia e suas principais aplicações em dispositivos de conversão eletromecânica de energia, aplicando conceitos de indutores e transformadores de tensão, corrente, consolidando o aprendizado em uma introdução a máquinas elétricas.

Na Seção 1 você estudará os conversores de corrente alternada. Na Seção 2 os conversores de corrente contínua e, finalmente, na última seção do livro, você terá uma introdução ao assunto "máquinas elétricas".

Para iniciarmos nosso estudo, imagine a seguinte situação: você continua trabalhando para a concessionária de energia elétrica que fez a implantação da PCH, indicada na unidade anterior. Porém, agora você foi indicado pelo seu gestor para acompanhar o dimensionamento de um grupo gerador de emergência, para alimentar um hotel no caso de falta de energia na rede da concessionária (queda de energia) e nos horários de pico de consumo de energia. Como esse hotel faz parte de uma grande rede internacional, é de suma importância que o conforto dos hóspedes seja garantido. Para isso, a escolha do tipo de suprimento de energia de emergência a ser utilizado deve ser cuidadosa e a eficiência do grupo gerador de emergência deve ser um dos principais focos desse novo projeto.

Assim, ao término dessa seção de estudo, você poderá responder, por exemplo, qual o tipo de conversor de corrente alternada pode ser utilizado para nosso estudo de caso.

Seção 4.1

Conversores de corrente alternada

Diálogo aberto

Pensando na teoria de circuitos magnéticos, dispositivos de armazenamento e transferência de energia e suas principais aplicações em dispositivos de conversão, propõe-se, nesse início de capítulo, um desafio: entender os fundamentos dos conversores de energia e, dentro dos parâmetros fornecidos pelo estudo de caso, selecionar um conversor de energia para operação em casos de emergência e horários de ponta para suprir a demanda de um hotel!

Existem duas grandes famílias de conversores eletromecânicos de energia, os que trabalham em corrente alternada (CA) e os que operam em corrente contínua (CC). Dentre os conversores de CA, encontram-se os síncronos e os assíncronos, que serão objeto de estudo nesta primeira seção da Unidade 4. Já os conversores que trabalham estritamente em corrente contínua serão estudados na Seção 2 desta unidade. Na Seção 3 serão apresentadas a topologia e as características fundamentais das máquinas elétricas.

Imagine, então, que a concessionária em que você trabalha como engenheiro requisitou, via gestor, que você acompanhe a elaboração de um projeto de seleção e instalação de um grupo gerador (*standby* – à disposição). Esse grupo gerador deve entrar em operação em caso de emergência (interrupção do fornecimento de energia pela concessionária) e em horários de pico, visando uma economia de energia devido à tarifação mais elevada nesses horários. A entrada em operação deve ser automática e deve atender à demanda de um hotel com as seguintes características: 120 apartamentos, 12 salas de eventos, restaurante, loja de conveniência, academia, *business center* (centro de negócios). Como você pode observar, trata-se de um hotel de grande porte e, sendo o seu principal objetivo o conforto, segurança e qualidade durante a estada do hóspede no hotel, é de suma importância que a elaboração desse novo projeto seja realizada de maneira séria e com competência técnica para que o objetivo seja alcançado com sucesso.

Iniciamos com o estudo minucioso dos tipos de conversores de corrente alternada existentes e disponíveis para atender à demanda do hotel, calculada em

255kVA. A energia deve ser disponibilizada em 380V e 220V e com a frequência do Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, ou seja, 60Hz.

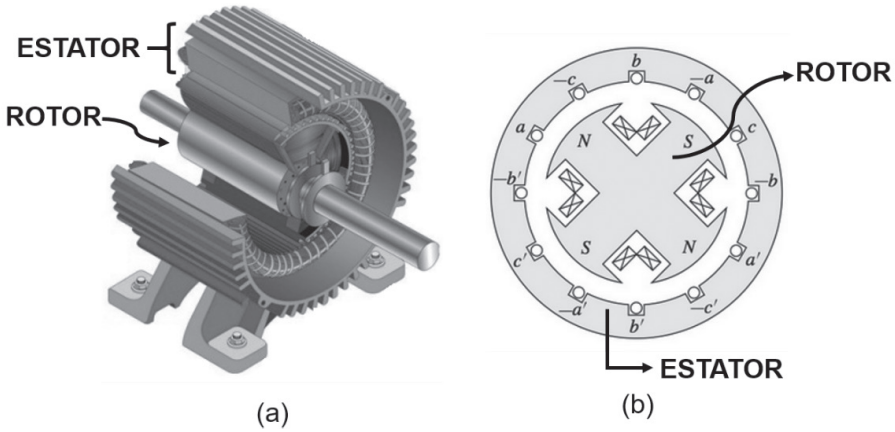
Esse grupo gerador deve entrar em funcionamento em caso de falta de energia da concessionária e nos horários de pico de energia, entre 18:00h e 21:00h, em que o consumo de energia elétrica é muito maior do que nos outros horários, devido ao funcionamento concomitante das fábricas, da iluminação pública e residencial, além dos eletrodomésticos e chuveiros. Nesses horários a tarifação chega a ser 30% maior do que nas demais horas do dia.

Não pode faltar

Os **conversores síncronos**, também chamados de máquinas síncronas, podem funcionar como geradores de energia elétrica (convertem energia mecânica em elétrica) ou como motores elétricos (convertem energia elétrica em mecânica) e a essa característica se dá o nome de reversibilidade. A máquina síncrona possui duas partes principais: uma fixa, denominada de **estator**, sendo um bloco cilíndrico e com ranhuras e uma parte móvel, o **rotor**, como pode ser visto na Figura 4.1.

Figura 4.1 | Estator e rotor de uma máquina síncrona

(a) aspecto construtivo **(b)** esquemático de uma máquina síncrona trifásica de quatro polos



Fonte: (a) adaptada de <https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Sinkroni_motor.jpg>. Acesso em: 2 mar. 2017. (b) Umans (2014, p. 198).

Na máquina síncrona uma corrente alternada flui pelo enrolamento de armadura e um fluxo CC de rotor é produzido por uma excitação no enrolamento de campo ou por ímãs. A interação dos dois campos magnéticos dessa máquina faz com que sua velocidade de rotação (angular) seja constante e igual ao campo magnético presente no entreferro. Quando a máquina síncrona funciona como motor, existe o problema de necessitar de uma máquina auxiliar para levá-lo à rotação síncrona. Quando empregada como gerador, no entanto, a rotação constante do rotor garante uma frequência constante na energia elétrica gerada, por isso esse tipo de máquina é geralmente empregada como gerador.

Para entender o funcionamento do gerador podemos aplicar um dos fundamentos do eletromagnetismo em que temos uma bobina se movimentando dentro de um campo magnético. Portanto, o rotor bobinado gira dentro de um campo magnético produzido no estator.

Assimile

A máquina síncrona funcionando como gerador é utilizada na maioria dos sistemas de geração de energia, pois a velocidade de rotação do eixo do rotor é constante e a essa velocidade se dá o nome de **velocidade síncrona**. Essa característica garante uma frequência constante da tensão gerada. Você pode assistir ao vídeo sobre o funcionamento da máquina síncrona em: LEARN Engineering. **How does an Alternator work?** 28 fev. 2014. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=tiKH48EMgKE>. Acesso em: 2 mar. 2017.

Uma espira dentro de um campo magnético variável terá nos seus terminais uma tensão induzida dependente do fluxo ϕ da máquina, da frequência ou velocidade de rotação e do número de espiras no enrolamento de campo N_c, segundo a seguinte relação:

$$e = \sqrt{2} N_c \phi f \, .$$

A velocidade síncrona do rotor se relaciona com a frequência da tensão gerada de acordo com

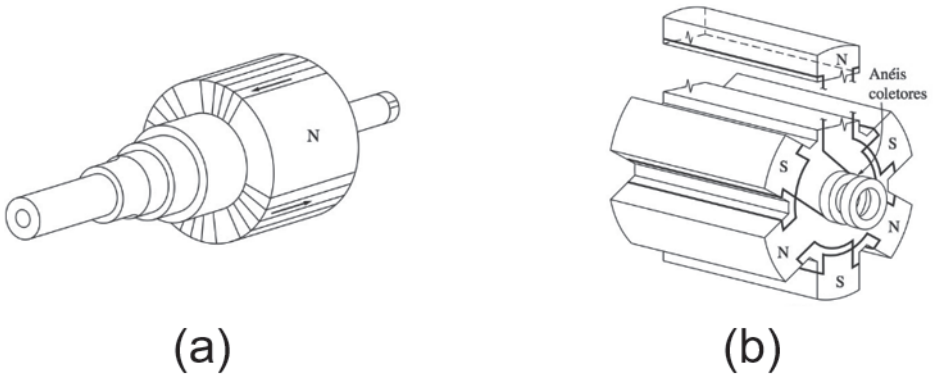
$$n_s = \frac{f \cdot 120}{p} \, ,$$

em que, "n_s" é a velocidade síncrona em rpm, "f" a frequência do sistema em Hz e "p" o número de polos da máquina.

Em geral o rotor de um gerador síncrono pode ser *cilíndrico* ou *liso*, como ilustrado na Figura 4.2(a) a seguir, ou com polos *salientes*, como na Figura 4.2(b).

Figura 4.2 | Aspectos construtivos do rotor de um gerador síncrono

(a) polos cilíndricos ou lisos **(b)** polos salientes



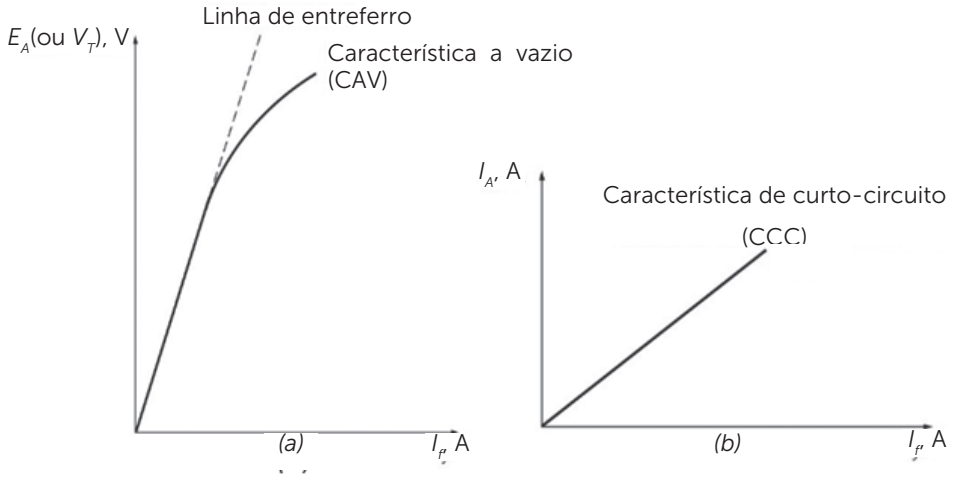
Fonte: (a) Chapman (2013, p. 192); (b) Chapman (2013, p. 193).

A relação entre a frequência elétrica e a velocidade do rotor é o motivo pelo qual alguns geradores síncronos têm rotores com polos salientes, enquanto outros têm rotores cilíndricos. A maioria dos sistemas de potência do mundo operam com frequência de 50 ou 60 Hz (no Brasil a energia é fornecida em 60 Hz). Os sistemas geradores hidrelétricos, por exemplo, operam em velocidades relativamente baixas e, portanto, é necessário um número elevado de polos para produzir a frequência desejada; a estrutura de polos salientes é mecanicamente mais adaptada para essa situação. Por outro lado, turbinas a vapor ou a gás operam em velocidades mais elevadas e, como consequência, são empregados geradores com rotor cilíndrico com poucos polos, em geral dois ou quatro.

Em termos práticos é bastante útil modelar um gerador síncrono através de um circuito elétrico equivalente. Para a construção desse modelo, dois ensaios são fundamentais para fornecer as principais informações da máquina. São eles o ensaio **a vazio** e o **de curto-circuito**. No **ensaio a vazio** o rotor é levado à rotação nominal (rotação síncrona "n_s") por um motor acoplado ao eixo, sem carga nos terminais do estator, para que a frequência seja de 60Hz. A corrente de excitação do enrolamento de campo deve ser nula, nesse primeiro momento. Com esse procedimento, já é possível notar se existe alguma vibração indesejável na máquina. O próximo passo é aumentar a corrente de excitação (corrente contínua que alimenta o enrolamento de campo "I_f") aos poucos e registrar a tensão gerada em um dos terminais trifásicos do estator ("E_A" ou "V_T"). Com esses dados constrói-se o gráfico denominado "característica a vazio" do gerador, como mostrado na Figura 4.3 (a).

Figura 4.3 | Ensaios elétricos em um gerador síncrono

(a) característica a vazio (b) ensaio de curto-circuito.



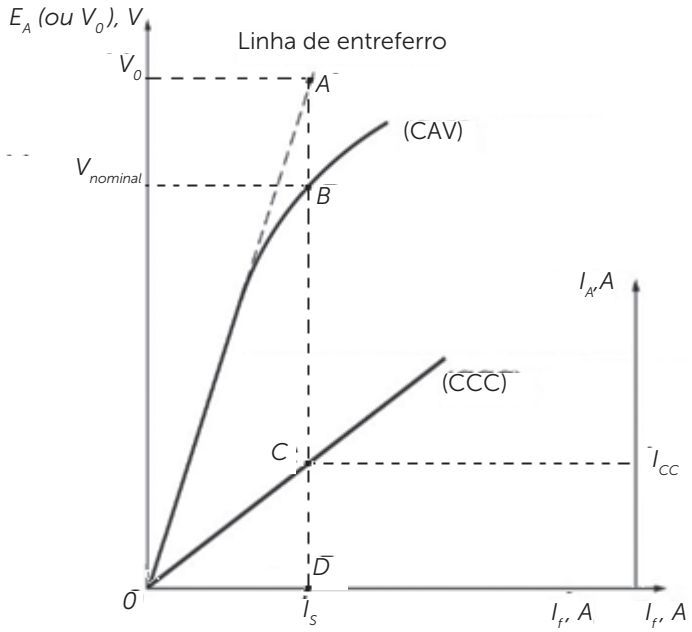
Fonte: Chapman (2013, p. 209).

Do gráfico na Figura 4.3 (a) identifica-se a tensão nominal de trabalho do gerador síncrono, que corresponde à tensão "$V_{nominal}$". No início da curva ela é linear, ou seja, para o incremento da corrente de campo "I_f" tem-se também um incremento da tensão terminal ou nominal "$V_{nominal}$". A partir de certo ponto se percebe uma saturação com as correntes de campo elevadas. É justamente nesse ponto que se tem a tensão nominal do gerador. A linha pontilhada indica como seria o sistema sem a saturação. No **ensaio de curto-circuito,** Figura 4.3(b), é medida a corrente de curto-circuito do estator, a medida em que a corrente do enrolamento de campo é incrementada enquanto o rotor é mantido girando na velocidade síncrona. O gráfico gerado por esse ensaio está representado na Figura 4.3(b) em que a corrente "I_f" do enrolamento de campo é incrementada e a corrente "I_A" da armadura, ou corrente de saída do gerador, é medida obtendo-se uma reta que representa a característica de curto-circuito do gerador. Esse ensaio é de extrema importância para a verificação de aquecimento dos enrolamentos do gerador, na velocidade síncrona, uma vez que não se pode exceder a temperatura limite para que as características dos materiais isolantes desses enrolamentos sejam mantidas na íntegra.

Ao se sobrepor os gráficos resultantes dos dois ensaios é possível obter a **reatância síncrona**, que tem o mesmo sentido que a resistência interna no gerador de corrente contínua. O ponto "A" do gráfico indica a tensão (V_0) nos terminais do gerador, caso não acontecesse a saturação do material, ou seja, caso o sistema fosse linear. O ponto "B" indica a tensão nominal ($V_{nominal}$) nos terminais de saída

do gerador com a presença da saturação. Já o ponto "C" indica a corrente de curto-circuito para a tensão nominal de gerador. E, por último, o ponto "D" indica a corrente de excitação "I_s" síncrona do gerador.

Figura 4.4 | Sobreposição das curvas em vazio e de curto-circuito do gerador síncrono



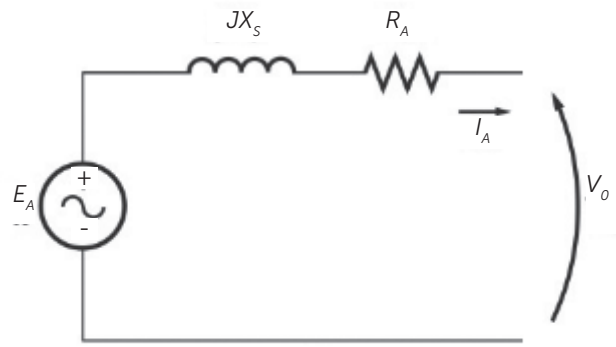
Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 209).

A reatância síncrona, por fase do gerador, é obtida como:

$$X_S = \frac{V_0}{\sqrt{3} \cdot I_{CC}},$$

em que: X_S = reatância síncrona dada em Ω ; V_0 = tensão não saturada do gerador síncrono, dada em V (ponto A); I_{CC} = corrente de curto-circuito (ponto C) dada em A e $\sqrt{3}$ aparece na equação devido ao sistema ser trifásico. R_A representa a resistência ôhmica dos enrolamentos do gerador, normalmente fornecida pelo fabricante. Dessa maneira é possível construir o circuito que representa uma fase do gerador síncrono, como mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 | Circuito equivalente por fase, do gerador síncrono



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 210).

Reflita

Você já pensou qual seria a rotação das turbinas do lado paraguaio da hidrelétrica de Itaipu Binacional? Leve em consideração que a frequência elétrica do Paraguai é 50Hz.

Uma vez que, na prática, o que realmente é levado em consideração são as condições normais de funcionamento do gerador, a reatância síncrona $x_s = \frac{V_0}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}}$, que leva em consideração a tensão de saída V_o, não saturada, precisa ser corrigida para que essas condições sejam válidas. Essa correção irá representar a não linearidade, ou seja, a saturação do sistema. A nova reatância é chamada de reatância síncrona saturada e é obtida pela equação: $x_{ss} = K_S \cdot x_S = \left(\frac{V_{nominal}}{V_o}\right) \cdot x_S$

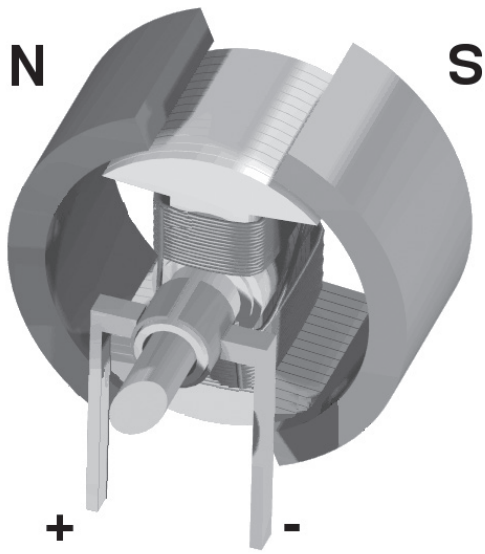
em que K_S é o fator de correção da não linearidade. O valor $V_{nominal}$ no gráfico da Figura 4.3 se refere à tensão nos terminais da máquina síncrona para o estado de saturação e V_o é a tensão dessa máquina se ela não estiver saturada.

Pesquise mais

Você poderá ver, com detalhes, todas as características da máquina síncrona funcionando como gerador e como motor, nos capítulos 4 (da página 192 à página 270) e 5 (da página 272 a 306) do livro: Chapman, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2013.

Os **conversores síncronos** a **ímã permanente** não possuem enrolamento de campo, ou seja, eles são construídos com ímãs permanentes de alta capacidade de geração de campo magnético, localizado no rotor da máquina. Essa configuração tem como vantagem a eliminação dos anéis coletores e escovas, que podem constituir uma fonte de defeitos nos conversores nos quais estão presentes. A Figura 4.6 apresenta uma máquina síncrona de ímã permanente.

Figura 4.6 | Gerador síncrono a ímã permanente



Fonte: adaptada de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/04/Electric_motor_cycle_2.png>.Acesso em: 2 mar. 2017.

Dessa maneira, no caso dos motores, por exemplo, não se tem corrente elétrica circulando no rotor da máquina, reduzindo-se as perdas por efeitos Joule, aumentando a vida útil da máquina e também o seu tamanho.

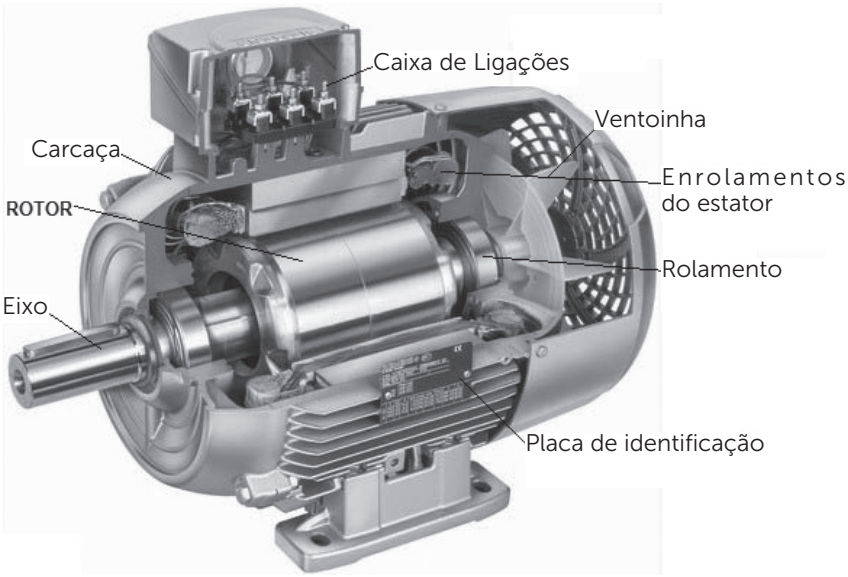
Exemplificando

Imagine a Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Os geradores síncronos que a compõem têm tensão terminal de 15kV e, do lado brasileiro, a frequência de 60Hz. Como os estatores têm 96 polos cada, calcule a rotação, em rpm, de cada turbina da hidrelétrica do lado brasileiro.

Solução: A equação para cálculo da rotação em rpm é: $n_s = \frac{f \cdot 120}{p}$, então temos: $n_s = \frac{60 \cdot 120}{96} = 75rpm$, portanto, as turbinas da Itaipu binacional, do lado brasileiro, giram a 75 rpm.

Diferente dos conversores síncronos, os **conversores assíncronos**, ou **máquinas assíncronas** são geralmente empregadas no papel de motor elétrico. O motor de indução é composto de duas partes principais, o *estator* e o *rotor*, como pode ser visto na Figura 4.7.

Figura 4.7 | Motor de indução trifásico

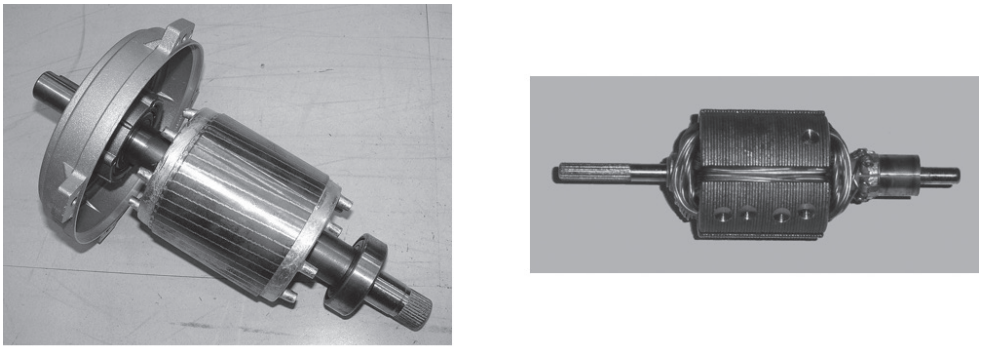


Fonte: <http://www.paranaequip.com.br/imagens/informacoes/motor-inducao-trifasico-weg-03.jpg >. Acesso em: 2 mar. 2017.

O rotor de uma máquina de indução pode ser de dois tipos. Rotor *gaiola de esquilo*, Figura 4.8(a), no qual o enrolamento consiste em barras condutora encaixadas em ranhura no ferro do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores, ou rotor *bobinado*, Figura 4.8(b), construído na forma de um enrolamento polifásico conectado a anéis deslizantes isolados montados sobre o eixo, sendo esse último menos utilizado, por ser mais caro e por ter a manutenção mais trabalhosa, ficando restrito a um número limitado de aplicações especializadas.

Figura 4.8 | Tipos de rotores em um motor assíncrono

(a) gaiola de esquilo (b) bobinado



(a) (b)

Fonte: (a) <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wirnik_by_Zureks.jpg>. Acesso em: 2 mar. 2017. (b) <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dc_armature.jpg>. Acesso em 2 mar. 2017.

No motor de indução, uma corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, enquanto o rotor recebe a corrente por indução, como em um transformador a partir do estator. O enrolamento do estator é trifásico com ligação dos terminais em estrela ou em triângulo. Quando a excitação é feita por uma fonte equilibrada, um campo magnético é produzido no entreferro girando na velocidade síncrona. Essa velocidade é determinada pelo número de polos do estator e pela frequência aplicada ao estator, como vimos anteriormente por $n_s = \frac{f \cdot 120}{p}$.

Suponha agora que o rotor esteja girando a uma velocidade constante n rpm no mesmo sentido do campo girante do estator. A diferença entre a velocidade síncrona do campo do estator e a velocidade do rotor e referida como *escorregamento* do rotor, dada por $n_s - n$. No entanto, em geral o escorregamento é expresso como uma fração da velocidade síncrona:

$$s = \frac{n_S - n}{n_S}.$$

O escorregamento caracteriza o desempenho das máquinas de indução. A velocidade do rotor em rpm pode ser expressa em termos do escorregamento e da velocidade síncrona como $n = (1 - s)n_s$.

É justamente o escorregamento que produz o conjugado necessário para que o motor de indução tenha o giro do rotor. Dessa maneira, o sentido de rotação do motor é o mesmo sentido de giro do campo magnético rotativo.

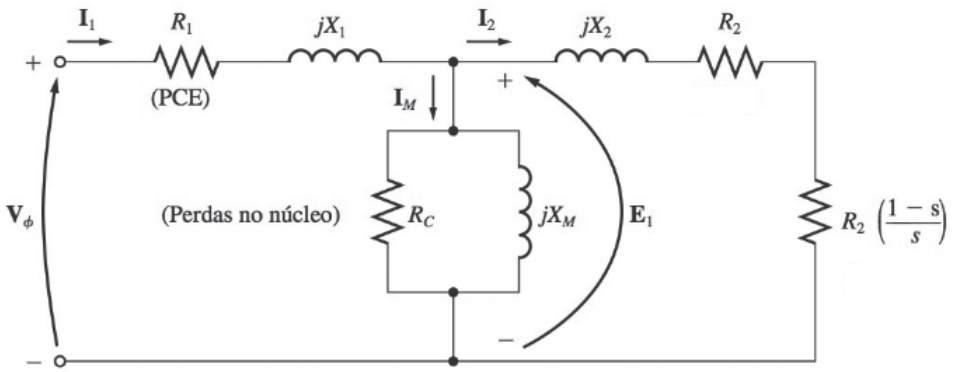
Pesquise mais

Você pode observar um exemplo de campo girante de um motor elétrico, no vídeo a seguir: LEARN Engineering. **How does an Induction Motor work?** 2 jul. 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSe28>. Acesso em: 2 mar. 2017.

Para ter acesso à legenda, clique no primeiro ícone da direita do vídeo, na parte inferior da tela.

Quando se trata do circuito equivalente de um motor de indução, podemos compará-lo a um transformador, uma vez que funciona induzindo correntes e tensões em um enrolamento secundário (rotor) a partir de um enrolamento primário (estator) alimentado com energia alternada, como visto na Figura 4.9.

Figura 4.9 | Circuito equivalente, por fase, de um motor de indução, com o rotor referidoao lado do estator



Fonte: Chapman (2013, p. 321).

Nesse circuito, I_1 corresponde à corrente de alimentação do motor, em A; R_1 a resistência do enrolamento do estator, em Ω ; jX_1 a reatância de dispersão do estator, em Ω ; I_2 é a corrente no rotor, em A ; jX_2 é a reatância de dispersão do rotor, referida ao estator, em Ω; V_ϕ é a tensão de fase de alimentação, em V; I_M é a corrente de magnetização, devido ao campo magnético induzido no rotor, em A ; R_C e jX_M são as perdas pela resistência do cobre e pela reatância de magnetização, dadas em Ω e, por fim, $R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right)$ é o efeito da resistência do enrolamento do rotor, segundo o escorregamento do motor referido ao estator em Ω .

O circuito equivalente do motor de indução auxilia na modelagem desse tipo de motor, uma vez que simula as condições reais de funcionamento do motor, incluindo as perdas presentes no funcionamento dele.

Quando se tem um sistema trifásico disponível para a ligação de motores assíncronos não existe nenhuma preocupação com o campo magnético girante, pois são fornecidas as três correntes para os enrolamentos trifásicos do motor (estator) e o campo magnético rotativo induz no estator outro campo, que tenta "alcançar" o primeiro, produzindo, assim, o giro do eixo do motor. Mas e no caso do sistema ser monofásico? Como se consegue o campo girante? O que se tem nesses motores é um campo magnético pulsante e a ausência de torque de partida.

Primeiramente, esse tipo de motor (monofásico) somente é concebido em baixas potências (de 1 a 2kW). Foram desenvolvidos esquemas de ligação para esses motores, com enrolamentos auxiliares, dimensionados e localizados de maneira a suprir a necessidade do campo girante para a partida do motor. Um dos esquemas desenvolvidos trata-se do motor de repulsão.

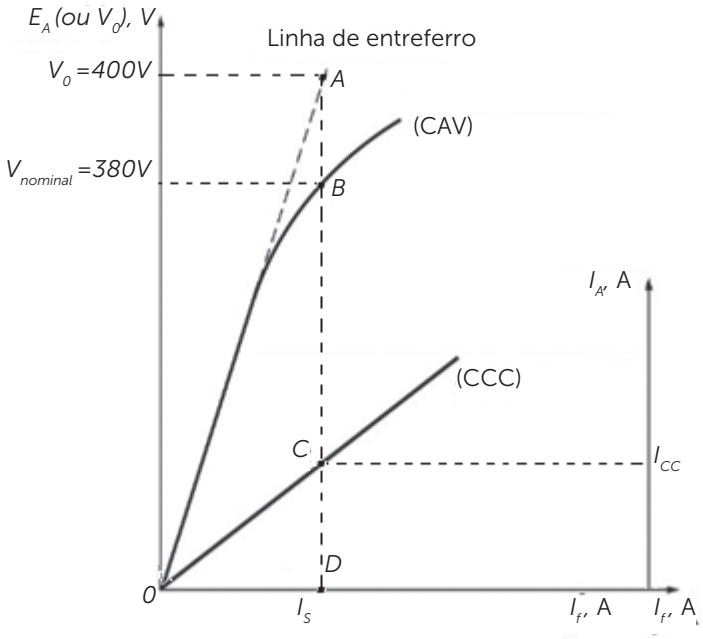
Quando se trata dos **conversores de indução** e **repulsão** falamos de motores, pois não se tem a utilização desse método em geradores. Os conversores de indução e repulsão consistem na colocação de enrolamento nos polos do rotor, que são feitos de um ímã não permanente, fazendo-os aumentar o campo magnético gerado, formando um eletroímã, percorrido por corrente alternada. Essa configuração tem a finalidade de vencer mais facilmente o torque de partida e ainda aumentar a velocidade de giro do motor quando necessário. Com essa configuração, pode-se diminuir a alimentação desses condutores, ou seja, enfraquecer o campo magnético, depois que o motor atinge sua velocidade nominal. A reversão do giro do motor também é facilitada por esse método.

Porém, a partir de 2010, passaram a ser substituídos por máquinas mais modernas, com controles mais confiáveis e de manutenção mais fácil. Sua utilização ainda é realizada nos casos em que são necessárias baixas velocidades e grande torque, como no caso dos ventiladores de teto.

Sem medo de errar

Vamos, agora, voltar ao gerador de emergência do qual você precisa acompanhar o projeto de escolha e também a implantação para o hotel. Como você estudou, para a geração de energia se utiliza o gerador do tipo síncrono, pois a frequência do sistema precisa ser mantida constante. Assim, fica somente faltando escolher qual o tipo de geração de emergência é mais adequado para se utilizar nesse caso. Em uma pesquisa de mercado, você pode descobrir facilmente que os tipos mais utilizados para esse caso são os geradores movidos a diesel e a gás. Mas, por questões de segurança, optou-se por utilizar um gerador a diesel. Assim, precisa-se, ainda, calcular a reatância síncrona saturada desse gerador. Como os dados disponíveis são: 255kVA, 60Hz, 380V, foram realizados os ensaios de curto-circuito e em vazio num gerador a diesel de 300kVA. O resultado desses ensaios foi fornecido através do gráfico da Figura 4.10.

Figura 4.10 | Resultado dos ensaios de curto-circuito e em vazio no gerador diesel



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 209).

Solução: A reatância saturada deve ser calculada pela equação:

$$X_{ss} = K_S \cdot X_S = \left(\frac{V_{nominal}}{V_o} \right) \cdot X_S ,$$

mas ainda não temos o valor da reatância síncrona não saturada (X_S), que pode ser obtida pela equação:

$$X_S = \frac{V_0}{\sqrt{3} \cdot I_{CC}} ,$$

e ainda não temos, também, o valor da corrente de curto-circuito (I_{cc}), que pode ser calculada por: $I_{cc} = I_{nominal} = \frac{S_{nominal}}{\sqrt{3} \cdot V_{linha}} = \frac{255000}{\sqrt{3} \cdot 380} \Rightarrow I_{cc} = 387,43A$

Do gráfico, tem-se a tensão $V_0 = 400V$, então é possível, agora, calcular a reatância síncrona não saturada:

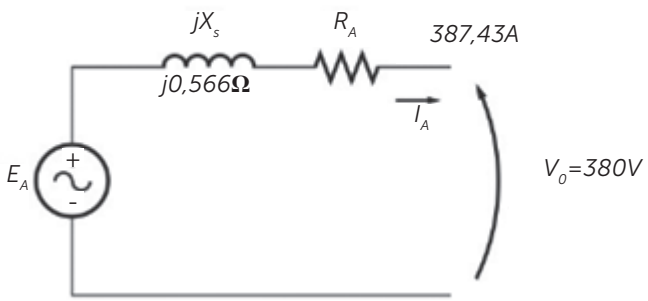
$$X_S = \frac{V_0}{\sqrt{3} \cdot I_{CC}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 387,43} \Rightarrow X_s = 0,596\Omega \cdot$$

Calcula-se, então, a reatância saturada:

$$X_{ss} = K_S \cdot X_S = \left(\frac{V_{nominal}}{V_o}\right) \cdot X_S = \left(\frac{380}{400}\right) \cdot 0{,}596 \Rightarrow X_{ss} = 0{,}566\Omega$$

Dessa maneira, você pode obter o circuito elétrico que representa o seu gerador diesel, por fase, como no esquema da Figura 4.11.

Figura 4.11 | Circuito equivalente por fase, do gerador diesel



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 210).

Atenção

Você deve se familiarizar com os gráficos obtidos como resultado dos ensaios de curto-circuito e em vazio de máquinas síncronas, isso facilitará e muito a obtenção dos parâmetros necessários para caracterizar a máquina síncrona propriamente dita.

Avançando na prática

Cálculo da rotação de um motor de indução, em regime permanente

Descrição da situação-problema

Em uma indústria de embalagens, na linha de produção, existem vários motores de indução. Foi detectado um problema no que se refere à velocidade com que as peças são elevadas de uma esteira até um *container* para a entrega no centro consumidor. Apesar da ciência do engenheiro responsável pela linha de produção de que o motor de indução não é o mais indicado para esse tipo de aplicação, por motivos econômicos, foi esse o tipo de motor utilizado. Para que ele trabalhe conectado à linha de produção, é necessário que sua velocidade de rotação seja de aproximadamente 580rpm. Faça os cálculos necessários para saber se o motor

em questão pode ser utilizado para a linha de produção ou se será preciso substituí-lo por outro mais adequado.

Segue os dados de placa do motor:

MOTOR INDUÇÃO, TIPO GAIOLA DE ESQUILO, 12 POLOS, 60Hz, 220V, s=3,0%

Resolução da situação-problema

Como foi fornecido o escorregamento do motor de indução, fica mais adequado o cálculo da rotação do eixo do motor se utilizarmos a fórmula do escorregamento: $s = \frac{n_s - n}{n_s}$

Como não foi fornecida a velocidade síncrona do campo magnético, ela deve ser calculada por:

$$n_s = \frac{f}{p} \Rightarrow n_s = \frac{60}{\left(\frac{12}{2}\right)} \Rightarrow n_s = 10rps$$

Note que nessa última equação, " p " se refere ao número de pares de polos.

Assim, substituindo-se os valores na equação do escorregamento, temos:

$s = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow 0,030 = \frac{10rps - n}{10rps} \Rightarrow 10rps - n = 0,30rps \Rightarrow n = 9,70rps$, o que em rpm é: $9,70rps \cdot 60s = 582rpm$

Embora o resultado seja bem próximo dos 580rpm necessários, a rotação do motor é maior do que a máxima exigida para a utilização na esteira. O problema pode estar surgindo desse tópico. Aconselha-se que o motor seja substituído por outro mais adequado (por exemplo, com um escorregamento maior, o que fará com que a rotação diminua).

Faça valer a pena

1. Um motor de indução de 220V, 15HP, 4 polos, frequência de 60Hz, ligado em estrela, é conectado à rede elétrica. Seu escorregamento é de 5%, segundo os dados de placa do equipamento. Esse motor está na lista de opções para ser utilizado em uma fábrica que precisa, para mover uma serra elétrica, de 1800 rpm de rotação no eixo do motor.

Segundo sua análise, indique **uma** das 5 alternativas abaixo que responde corretamente às necessidades da fábrica em questão.

a) Sim, você pode utilizar esse motor, pois a rotação no eixo é de 1800 rpm.

b) Não, você não poderá utilizar esse motor, pois a rotação do eixo é de 1710 rpm.

c) Sim, você pode utilizar esse motor, pois a rotação do campo girante é de 1710 rpm.

d) Não, você não poderá utilizar esse motor, pois a rotação do eixo é de 3600 rpm.

e) Sim, você poderá utilizar esse motor, uma vez que a rotação do campo girante é de 3600 rpm.

2.

I. Uma usina hidrelétrica localizada no Paraguai tem um grupo gerador constituído por um estator com 66 polos. Sabendo-se que a frequência do sistema elétrico do Paraguai é 50Hz, a usina poderá ser conectada ao sistema elétrico paraguaio,

desde que:

II. a velocidade de rotação da turbina hidráulica seja mantida em 90, 91 rpm.

Com base nas afirmativas, assinale a alternativa que responde corretamente ao problema.

a) A afirmativa II justifica a alternativa I, pois para que a frequência de 50Hz seja mantida constante, com um gerador de 66 polos, a velocidade de giro da turbina precisa ser de 90,91 rpm.

b) A afirmativa II não justifica a afirmativa I, pois, fazendo o cálculo, com esses dados, a frequência da corrente e a tensão gerada será de 60Hz.

c) A afirmativa II justifica a afirmativa I, mas com essa velocidade de giro da turbina hidráulica a frequência da corrente gerada será de 60Hz e não 50Hz.

d) A afirmativa II não justifica a afirmativa I, pois um gerador de 66 polos e 50 Hz não tem a rotação de 90,91 rpm e sim de 190,91 rpm.

e) A afirmativa II justifica a afirmativa I, porém o cálculo está equivocado. Para se ter 50Hz o número de polos do gerador precisa ser igual a 78 polos.

3. Se um motor de indução tem, como dados de placa, tensão de 380V, potência de 10HP, 6 polos, frequência de 60Hz, é ligado em triângulo e tem como escorregamento o valor de 3,5%. Quando ele é conectado à rede elétrica, na tensão nominal, pode-se afirmar que:

Assinale a alternativa que responde corretamente à questão solicitada a respeito do motor de indução:

a) A velocidade do motor é de 1800 rpm.

b) A frequência do rotor é de 7Hz.

c) A velocidade do eixo do motor é de 3600 rpm.

d) A velocidade do campo síncrono girante desse motor é de 1800 rpm.

e) A frequência do eixo do motor, com carga nominal, será de 2,1Hz

Seção 4.2

Conversores de corrente contínua

Diálogo aberto

Na Unidade 4 você está estudando os conversores eletromecânicos de energia, sendo considerados os geradores e motores elétricos. Você já estudou, na Seção 4.1, os conversores de corrente alternada. Nesta nova seção, você irá analisar o princípio de funcionamento e características, bem como a aplicação de conversores eletromecânicos de corrente contínua. Dentro dessa nova seção de estudos se encontram os conversores de corrente contínua com circuito de campo ligado em série, com circuito de campo ligado em paralelo, os conversores hipercompostos e os hipocompostos.

Para que possamos estudar esse novo assunto, imagine que você ainda trabalha para a concessionária de energia elétrica, e agora foi designado para compor uma equipe de engenheiros que elaboram um projeto de implantação uma malha de transporte de Veículo Leve sobre Trilhos (VLT). Esse projeto é idêntico ao projeto implantado no Rio de Janeiro, em 2016, na época da realização das Olimpíadas. Como o VLT é 100% elétrico, a emissão de poluentes não existe no seu funcionamento, sendo indicado para grandes centros urbanos. Para alimentar o sistema de energia do VLT são utilizados os trilhos dos trens, alimentados com corrente contínua que, por sua vez, vem de uma subestação de energia gerenciada pela concessionária em que você trabalha.

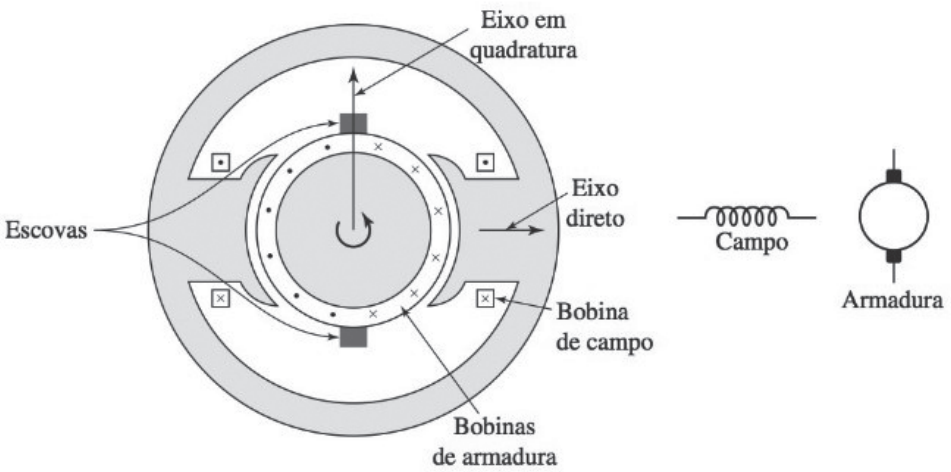
Os VLTs são movidos à energia elétrica contínua (CC), mais precisamente por motores de corrente contínua. Dessa maneira, é de suma importância que você compreenda o princípio de funcionamento de um conversor de corrente contínua, os tipos de conversores mais comuns no mercado e, ainda, os requisitos técnicos necessários para sua implantação e utilização prática, como no caso dos motores de corrente contínua utilizados no VLT.

Não pode faltar

Para começar, vamos situar nossos estudos sobre teoria de circuitos magnéticos, dispositivos de armazenamento e transferência de energia e suas principais aplicações em dispositivos de conversão, mais precisamente nos conversores de corrente contínua. Muitas vezes não nos damos conta da gama de situações em que se utiliza um conversor eletromecânico de corrente contínua, como no caso dos metrôs, dos trens e trólebus. No nosso caso de estudo, ele será utilizado no VLT. A máquina de corrente contínua, quando se trata de um gerador de energia, transforma energia mecânica em energia elétrica contínua. Já no caso do motor, transforma energia elétrica contínua em energia mecânica.

Na figura 4.12 pode-se observar o esquema básico de uma máquina CC. A bobina de campo fica no estator e a da armadura, no rotor. O estator de uma máquina de corrente contínua tem polos salientes, cuja excitação é realizada por bobinas de campo. Na armadura é gerada uma tensão alternada, que será convertida em contínua pelo comutador. O acesso às bobinas da armadura é realizado pelo comutador e pelas escovas, e é justamente através desse conjunto de elementos que a tensão é convertida em contínua.

Figura 4.12 | Esquema de uma máquina CC

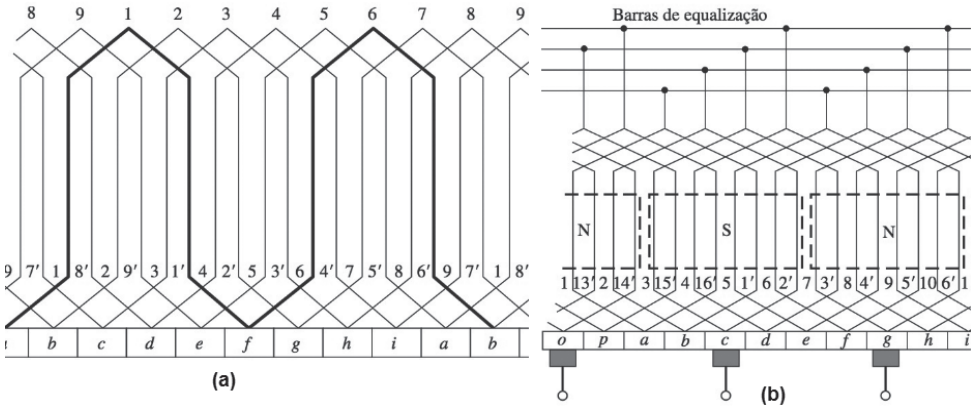


Fonte: Umans (2014, p. 404).

Os enrolamentos da armadura podem estar dispostos em dois tipos de sequências: o imbricado, Figura 4.13(a), e o ondulado, Figura 4.13(b). O enrolamento imbricado tem os terminais de suas espiras ligados a barras vizinhas; já no ondulado, os terminais das bobinas estão ligados a barras defasadas entre si de 360^{o} elétricos.

Figura 4.13 | Tipos de enrolamentos

(a) imbricado (b) ondulado



Fonte: Chapman (2013, p. 429).

Quando a armadura tem somente um enrolamento, esse conjunto de bobinas é chamado de **enrolamento simples.** O enrolamento da armadura pode também ser **duplo**. Nesse caso, o número de caminhos paralelos para a corrente percorrer é dobrado, em relação ao enrolamento simples. Essa diferença se chama **multiplicidade** e é relacionada da seguinte forma: "m" é a multiplicidade do enrolamento, "a" o número de bobinas em paralelo e "p" o número de polos da máquina. A seguinte relação pode ser escrita: $a = m \cdot p$ para o enrolamento imbricado; e $a = 2 \cdot m$ para o enrolamento ondulado. O enrolamento imbricado é indicado para máquinas que trabalham com tensões baixas e correntes de intensidade elevada, uma vez que as correntes podem ser divididas entre os enrolamentos paralelos. Já o enrolamento ondulado é adequado para máquinas que devem produzir ou consumir tensões elevadas e, por conseguinte, trabalhar com correntes de baixas intensidades, sendo a operação dessa máquina em altas velocidades.

A força eletromotriz induzida nessa máquina CC pode ser calculada segundo as equações: $E_A = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a} \cdot \phi . n$, no caso da análise ser realizada com a velocidade de rotação "n" em rpm e $E_A = \frac{Z \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \phi \cdot \omega$, no caso da velocidade de rotação "ω" ser dada em $\frac{rad}{seg}$ (radianos por segundo). A tensão induzida tem unidade "V", volts.

Em que: Z = número de condutores na armadura; ϕ = fluxo magnético por polo;

a = número de caminhos paralelos e p = o número de polos da máquina.

Assimile

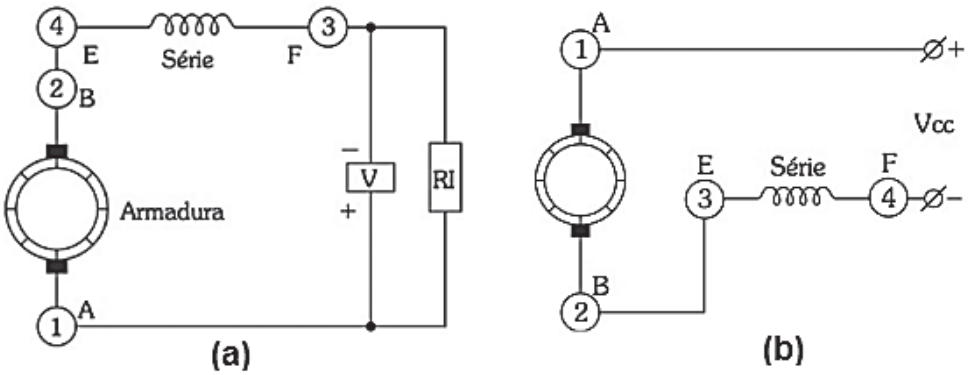
Você pode observar detalhes das máquinas de corrente contínua acessando o vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Cwe6swMCx6M>. Acesso em: 1 mar. 2017

Quanto ao circuito equivalente do gerador de corrente contínua, ele pode ser representado pelo circuito indicado na Figura 4.14. Na atuação como gerador, somente é aplicada tensão contínua na armadura. Na atuação como motor, é aplicada tensão contínua no campo e na armadura.

Dentro desse contexto, vamos iniciar com o primeiro assunto: **conversores com circuito de campo ligado em série**. A Figura 4.14, mostra como é o circuito dessa máquina, primeiro para um gerador e depois para um motor. Nos esquemas da Figura 4.14 temos os terminais 1 e 2 ligados às escovas, ficando em contato com o comutador da armadura. Os terminais 3 e 4 são do enrolamento série.

Figura 4.14 | Esquema de ligação do conversor CC com circuito de campo ligado em série

(a) Gerador CC (b) Motor CC



Fonte: (a) Nascimento Junior (2014, p. 85) ; (b) Nascimento Junior (2014, p. 64).

Quando o motor CC é ligado dessa forma, Figura 4.14(b), tendo os dois enrolamentos em série, o campo magnético criado no estator depende da mesma corrente que circula na armadura. Se a partida do motor CC-série não for realizada com carga, pode acontecer a destruição completa dele, pois, com o torque elevado da partida, o motor pode chegar a velocidades muito altas.

Pesquise mais

Para saber mais sobre as máquinas de corrente contínua, você pode encontrar um texto sobre problemas reais de comutação em CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. cap. 7, p. 433-445.

A geração de energia elétrica (pelo gerador CC) é realizada pela rotação de condutores percorridos por corrente contínua formando um campo magnético girante. Nos condutores do estator aparece tensão induzida, que pode ser aumentada de duas formas: aumentando o campo magnético fixo ou aumentando a rotação mecânica da armadura. Quando o gerador CC funciona com carga, tem-se a corrente de carga circulando e, por consequência, uma queda de tensão sendo gerada. Dessa forma, para que se possa suprir essa queda de tensão, ou a rotação da armadura deve ser aumentada ou deve-se aumentar a tensão de excitação da máquina.

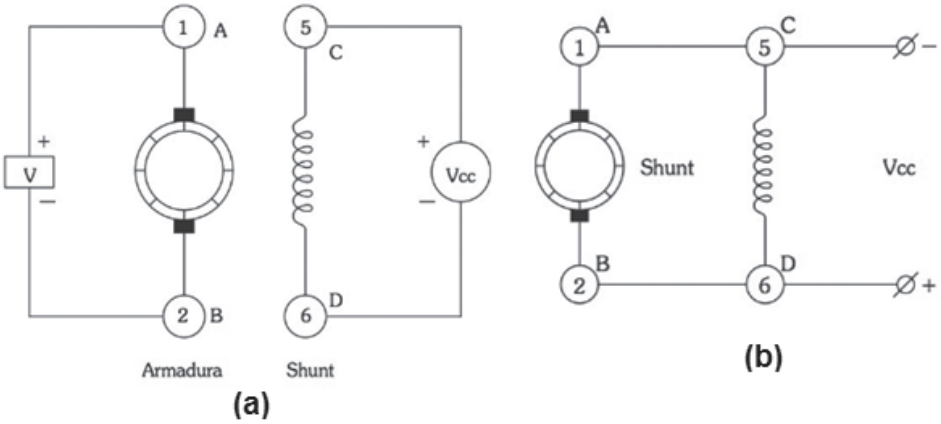
Reflita

Com o progresso ocorrido no campo da eletrônica de potência, hoje em dia, os geradores CC, em muitos casos, estão sendo substituídos por fontes eletrônicas de conversão CA-CC. Você sabe as vantagens dessa substituição?

Já os **conversores com circuito de campo ligado em paralelo** ou *shunt,* têm as configurações apresentadas na Figura 4.15(a) para o gerador CC e na Figura 4.15(b) para o motor CC, respectivamente. É possível observar na Figura 4.15 os terminais 1 e 2 ligados às escovas e, portanto, em contado com o comutador da armadura e os terminais 5 e 6 ligados ao enrolamento *shunt*. A fonte de tensão V_{cc} injeta uma corrente no enrolamento *shunt* e produz ali um campo magnético. Já o enrolamento da armadura, com o movimento de rotação (produzido por um agente externo), terá seus condutores atravessados por um campo, e assim uma tensão induzida é produzida nos terminais da armadura (terminais 1 e 2), que pode facilmente ser medida por um voltímetro "V", como no caso da Figura 4.15a.

Figura 4.15 | Esquema de ligação do conversor CC com circuito de campo ligado em paralelo, ou shunt

(a) Gerador CC (b) Motor CC.

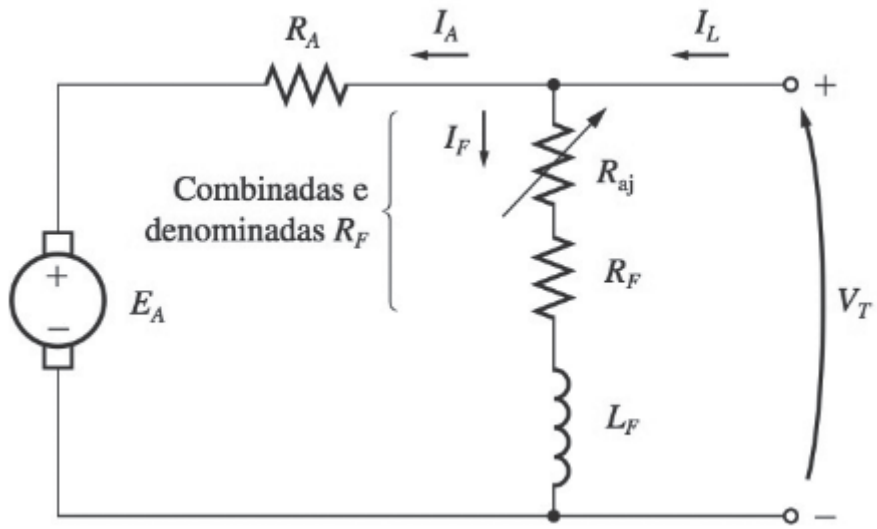


Fonte: (a) Nascimento Junior (2014, p. 84) ; (b) Nascimento Junior (2014, p. 63).

Já para essa ligação do motor CC em paralelo com o circuito de campo (Figura 4.15b), tanto o enrolamento *shunt*, como o enrolamento da armadura, estão ligados em paralelo com a alimentação. O movimento de rotação do motor é o resultado da interação entre os campos magnéticos da armadura e do campo *shunt*. É justamente o campo do enrolamento *shunt* que não deixará o motor atingir altas velocidades no caso do funcionamento em vazio, pois existe uma Força Contra Eletromotriz (FCEM) induzida na armadura que interage com o campo magnético produzido pelo enrolamento *shunt*, evitando essas altas velocidades de rotação e, por conseguinte, a avaria do motor.

Fazendo-se uma comparação entre o motor CC série e o *shunt*, percebe-se que o motor CC-série tem um torque de partida muito maior do que a do motor CC-*shunt*. Porém, em termos de regulação de velocidade, o motor CC *shunt* é mais eficiente. Assim, o motor CC-série é uma excelente opção para os casos de alta carga de inércia, como no caso de trens, por exemplo, desde que a carga sempre esteja acoplada na entrada de operação do motor. Um circuito equivalente do motor CC *shunt* pode ser representado como na Figura 4.16.

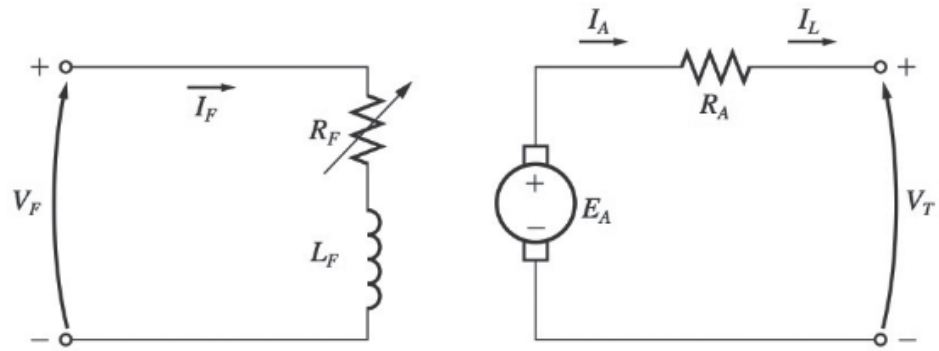
Figura 4.16 | Circuito equivalente de um motor CC, com enrolamento de campo em shunt



Fonte: Chapman (2013, p. 470).

Desse circuito podemos retirar as seguintes relações: $I_F = \frac{V_T}{R_F}$, em que I_F é a corrente de excitação de campo (medida em amperes), V_T a tensão terminal aplicada ao motor CC (em volts) e R_F a resistência ôhmica dos condutores do campo de excitação do motor CC (medida em Ω). $V_T = E_A + I_A \cdot R_A$, sendo E_A a tensão induzida na armadura (medida em volts), I_A a corrente da armadura e R_A a resistência dos condutores da armadura. Já um gerador CC *shunt* pode ser representado por um circuito como mostrado na figura 4.17.

Figura 4.17 | Circuito representativo de um gerador CC shunt



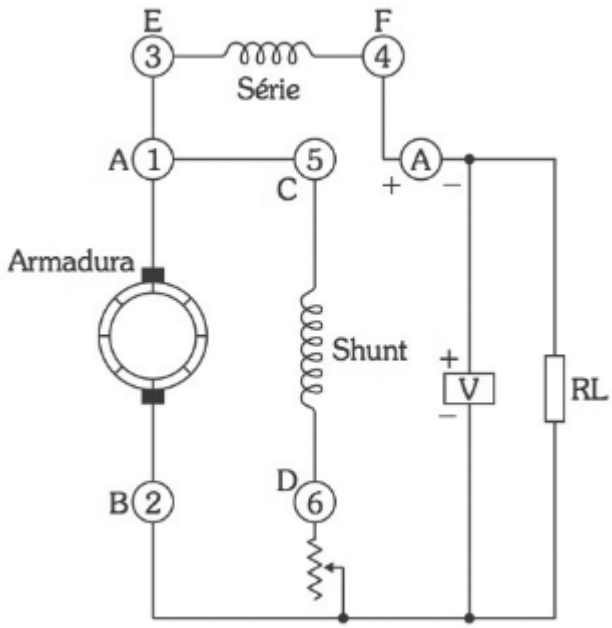
Fonte: Chapman (2013, p. 529).

Assim, as seguintes relações podem ser desenvolvidas a partir desse circuito: $I_L = I_A$, sendo I_L a corrente na carga. $V_T = E_A - I_A R_A$ e $I_F = \frac{V_F}{R_F}$, em que V_F é a tensão do campo de excitação do gerador CC.

Os **conversores hipercomposto** e **hipocomposto** tratam de configurações desenvolvidas para suprir a queda de tensão nos terminais do gerador CC, causada pela adição de cargas. Trata-se de um enrolamento auxiliar ligado em série com a armadura, que quando percorrido pela corrente de carga do gerador, irá produzir um campo magnético proporcional a essa corrente. Se esse campo magnético vier somar o campo magnético do enrolamento *shunt*, o esquema é dito **aditivo**. No caso de os campos magnéticos produzidos pelo enrolamento auxiliar e pelo enrolamento da armadura terem seus sentidos invertidos, eles irão se subtrair, compondo o chamado conversor **subtrativo.**

A Figura 4.18 apresenta um esquema do circuito citado. Apenas fique atento ao fato de que o enrolamento auxiliar também pode aparecer em paralelo com o enrolamento da armadura e o *shunt*, e ainda ser considerado composto.

Figura 4.18 | Gerador CC com circuito de campo composto



Fonte: Nascimento Junior (2014, p. 86).

Se o enrolamento auxiliar (chamado de série na Figura 4.16) possui muitas espiras, o gerador CC tem a tensão de saída a plena carga, maior do que a tensão de saída sem carga. Essa característica dá ao gerador o nome de **hipercomposto**. Já no caso de o enrolamento auxiliar ter poucas espiras, a tensão do gerador CC sem carga é maior do que a tensão a plena carga. Nesse caso o gerador leva o nome de **hipocomposto**.

Exemplificando

Você precisa selecionar um gerador CC para fornecer 1730 V_{cc} para alimentar uma rede de catenárias de um sistema de trens metropolitanos. Segue uma figura das catenárias (sistema aéreo de alimentação V_{cc} de trens metropolitanos).

Figura 4.19 | Trem regional em Dortmund, Alemanha

Fonte: <https://pixabay.com/pt/hbf-dortmund-trem-regional-1259559/>. Acesso em: 2 mar. 2017

Sabendo que esse sistema precisa ser alimentado com 1730 V_{cc} e que você tem disponíveis dois geradores CC, com as seguintes características: para o gerador 1: 8 polos,1200 rpm, enrolamento imbricado duplo, 724 condutores ativos na armadura e fluxo magnético de 40 mWb por polo. Para o gerador 2, temos: 4 polos, enrolamento ondulado simples, 1800 rpm, 724 condutores ativos na armadura e fluxo magnético de 40 mWb por polo.

Qual dos geradores CC você escolhe para alimentar esse sistema de trens?

Obs. Nesse primeiro momento, não vamos considerar as perdas envolvidas no processo de geração de energia pelo gerador CC!

Solução:

Para escolher tecnicamente um gerador, você precisa calcular a tensão gerada pelos dois geradores, para descobrir qual é o mais adequado para essa aplicação.

$E_A = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n$, calculando, então para o gerador de 4 polos, temos: $E_{A1} = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n = \frac{724 \cdot 8}{60 \cdot (2 \cdot 8)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 1200 \Rightarrow E_{A1} = 289{,}6V_{cc}$ e calculando a tensão gerada para o gerador de oito polos:

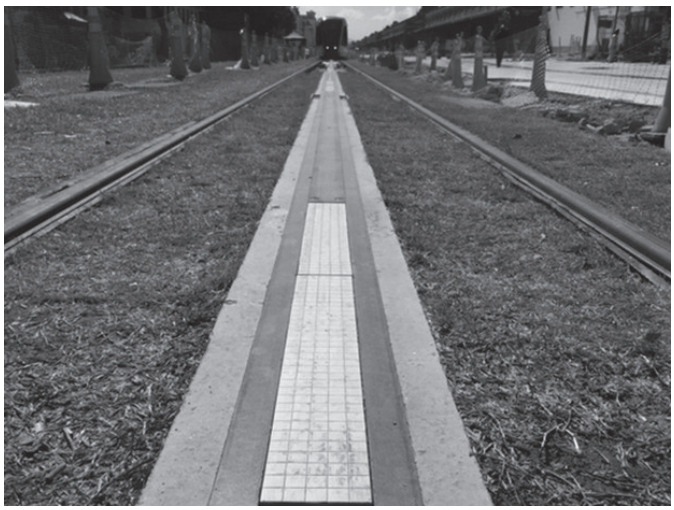
$$E_{A2} = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n = \frac{724 \cdot 4}{60 \cdot (2 \cdot 1)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 1800 \Rightarrow E_{A2} = 1737{,}6V_{cc}$$

Assim, percebe-se que o gerador de quatro polos é o mais indicado para essa aplicação!

Sem medo de errar

Voltando ao caso do VLT (Veículo Leve sobre Trilhos), vamos imaginar que você precisa dimensionar o fluxo por polo do gerador CC para ser instalado no sistema do VLT, mais precisamente na alimentação do terceiro trilho do veículo. É justamente pelo terceiro trilho que acontece a alimentação do VLT, no caso, de 500 V_{cc}. Segue uma imagem do terceiro trilho, para você visualizar o sistema.

Figura 4.20 |Terceiro trilho ou trilho de alimentação do VLT



Fonte: <http://s2.glbimg.com/Gxeu3zMd4mipRN7mUQErqSfFh9g=/620x465/s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2016/02/22/trilhos_trem_valendo_.jpg>.. Acesso em: 2 mar. 2017.

As características disponíveis do gerador CC são:

- 8 polos, 105kW; enrolamento da armadura ondulado duplo, com 16 voltas por bobina e velocidade de rotação de 1800 rpm e 64 espiras.
- No caso em estudo não levaremos em consideração as perdas no gerador CC.

Solução: para que você possa calcular o fluxo por polo, necessário para que o gerador CC produza 500 V_{cc}, para alimentar o terceiro trilho do VLT, você pode utilizar a equação da tensão da armadura, uma vez que não estamos considerando as perdas do gerador CC. Assim: $E_A = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n \Rightarrow \phi = \frac{E_A \cdot 60 \cdot a}{Z \cdot n \cdot p}$

Como o enrolamento é ondulado e duplo ($m = 2$), calcula-se o número de caminhos para a corrente, pela equação: $a = 2 \cdot m = 2 \cdot 2 = 4$.

Já o número de condutores "Z" deve ser calculado da seguinte maneira: $Z = (64 \text{ espiras}) \cdot \left(16 \frac{\text{voltas}}{\text{espira}}\right) \cdot \left(2 \frac{\text{condutores}}{\text{volta}}\right) \Rightarrow Z = 2048$ condutores

Substituindo esses valores na equação do fluxo, temos:

$E_A = \frac{Z \cdot p}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n \Rightarrow \phi = \frac{E_A \cdot 60 \cdot a}{Z \cdot n \cdot p} = \frac{500 \cdot 60 \cdot (2.2)}{2048 \cdot 1800 \cdot 8} \Rightarrow \phi = 4{,}07 \cdot 10^{-3} Wb$. Assim, o fluxo, por polo, necessário para que sejam gerados 500 V_{cc} para alimentar o terceiro trilho do VLT é de $\phi = 4{,}07 mWb$.

Avançando na prática

Cálculo da corrente de alimentação de um motor CC para mover uma esteira industrial

Descrição da situação-problema

Imagine que você trabalha numa indústria de bebidas, na qual é utilizada uma esteira para carregar as caixas de cerveja de levá-las a um depósito para armazenamento, antes de serem distribuídas para o comércio. Você precisa fazer o projeto de instalação do motor para mover essa esteira e, antes de mais nada, você deve levar em consideração que o desempenho do motor está diretamente relacionado com a produtividade dos sistemas que utilizam esteiras transportadoras. Seu gestor lhe solicitou o projeto da proteção desse motor e, para isso, você precisa saber a corrente de carga do motor. Foram fornecidas as seguintes especificações na Tabela 4.1

Tabela 4.1 | Especificações do motor CC

Velocidade de rotação	6 rpm
Potência	10hp
Número de polos	8
Tensão de alimentação	220V
Tensão na armadura	200V
Resistência da armadura	0,06 **Ω**
Resistência do circuito de campo	30**Ω**

Fonte: elaborada pela autora.

Resolução da situação-problema

Para calcular a proteção desse motor, o ponto de partida é o valor da corrente de carga "I_L", que é dada por: $I_L = I_A + I_F$, mas não temos o valor de I_F, que pode ser calculada por: $I_F = \frac{V_T}{R_F} = \frac{220}{30} \Rightarrow I_F = 7,33A$.

A corrente da armadura "I_A" pode ser calculada pela equação: $I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} = \frac{220 - 200}{0,09} \Rightarrow I_A = 222,2A$

Substituindo na equação da corrente de carga, temos: $I_L = I_A + I_F = 7,33 + 222,2 \Rightarrow I_L = 229,55A$

É justamente com o valor encontrado para a corrente de carga do motor CC que se dá o dimensionamento do seu sistema de proteção (fusíveis e relés térmicos, por exemplo). Mas esses cálculos não serão realizados aqui, pois envolvem conceitos que não foram estudados nesta unidade de ensino.

Faça valer a pena

1. Nos geradores de corrente contínua (CC) a tensão gerada é transformada em contínua pelo comutador, que pode ser classificado como um "retificador mecânico". Para se aumentar a tensão gerada existem dois caminhos, o aumento do campo magnético ou o aumento da rotação mecânica aplicada à máquina.

Imagine que você tem um gerador CC, 1800 rpm e tensão de alimentação de 120V para testes em laboratório. Assinale a alternativa, entre as cinco listadas a seguir, que é verdadeira.

a) Se você reduzir o fluxo magnético em 20%, com a velocidade de rotação permanecendo constante, a tensão gerada será reduzida para 96V.

b) Se você reduzir o fluxo magnético em 10%, com a velocidade de rotação

permanecendo constante, a tensão gerada será reduzida para 90V.

c) Se a velocidade for diminuída para 1620 rpm, mantendo-se o mesmo fluxo magnético, a tensão gerada será de 98V.

d) Se a velocidade for diminuída para 1620 rpm, mantendo-se o mesmo fluxo magnético, a tensão gerada será de 96V.

e) Se a velocidade for diminuída para 1620 rpm, mantendo-se o mesmo fluxo magnético, a tensão gerada será de 198V.

2. Na máquina de corrente contínua (CC) existem componentes essenciais ao seu funcionamento, como no caso do estator, do rotor, do comutador, escovas, enrolamento da armadura e enrolamento de campo.

Analise as afirmativas abaixo.

I. O comutador é um componente básico das máquinas de corrente contínua. Sua ação pode ser resumida em: transformar uma tensão contínua induzida em alternada, girando solidário com o eixo da armadura.

II. No motor de corrente contínua, o rotor contém o enrolamento da armadura, o qual é alimentado por corrente contínua através do comutador e das escovas.

III. No motor de corrente contínua, o estator contém o enrolamento de campo, que é alimentado com corrente contínua. Quando se trata de pequenos motores, o enrolamento de campo pode ser um ímã permanente.

Indique qual das alternativas é verdadeira.

a) As afirmativas I e II são verdadeiras, mas a III é falsa.

b) Todas as afirmativas são verdadeiras.

c) A afirmativa I é falsa e as afirmativas II e III são verdadeiras.

d) A afirmativa I é verdadeira, mas as afirmativas II e III são falsas.

e) Todas as afirmativas são falsas.

3. No contexto de conversores hipercompostos e hipocompostos, percebemos que uma modificação na configuração do enrolamento auxiliar traz mudanças no comportamento da máquina. Esse enrolamento tem sua disposição de forma que o campo magnético produzido pode se somar ou se subtrair ao campo magnético produzido por outro enrolamento da máquina.

Dentre as afirmativas, quais são verdadeiras e quais são falsas?

I. Para suprir a diminuição da tensão num gerador CC, quando da aplicação de carga, utiliza-se um enrolamento adicional, em série com a armadura. Esse enrolamento, quando é percorrido pela corrente de carga do gerador CC, produz um fluxo magnético proporcional a essa corrente de carga.

II. Se o enrolamento série é conectado à armadura, de tal maneira que o campo magnético nele formado se some com o campo magnético *shunt*, o gerador CC é chamado de composto aditivo.

III. Se o enrolamento série é conectado de maneira que a força magnetomotriz gerada nele se oponha à fmm do campo *shunt*, o gerador CC é chamado de composto subtrativo.

a) Todas as afirmativas são falsas.

b) As afirmativas I e II são verdadeiras, mas a afirmativa III é falsa.

c)As afirmativas I e III são verdadeiras , mas a afirmativa II é falsa.

d) As afirmativas II e III são verdadeiras, mas a afirmativa I é falsa.

e) Todas as afirmativas são verdadeiras.

Seção 4.3

Introdução a máquinas elétricas

Diálogo aberto

A Unidade 4 traz para você o estudo de máquinas elétricas focado na topologia aberta e fechada dessas máquinas e, ainda, o campo magnético girante e o campo magnético pulsante. Para facilitar o estudo desse novo assunto, imagine que você trabalha em uma empresa de trens urbanos que utiliza a tecnologia do motor linear de indução para promover a propulsão desses trens. Seu novo desafio é gerenciar uma equipe que está desenvolvendo um projeto de utilização de motores de indução lineares para movimentar uma nova linha de metrô na cidade de São Paulo, Brasil, como essa linha de metrô em Tokyo, mostrada na Figura 4.21.

Figura 4.21 | Metrô movimentado por motor de indução linear

Fonte: adaptada de <http://www.ee.t.u-tokyo.ac.jp/gcoe/webmart_en/imgs/KOSEKI_Takafumi_3-1.jpg>. Acesso em: 2 mar. 2017.

A propulsão de metrôs com motor linear de indução traz várias vantagens, como a transformação direta da energia elétrica em mecânica, sem contar com contatos mecânicos, suprimindo atritos interiores à máquina, ruídos e vibrações; o motor de indução linear tem construção simples e, por consequência, funcionamento simples, sem qualquer engrenagem mecânica e, por último, justamente a inexistência de partes mecânicas nesse motor faz com que a inércia do metrô , tanto de aceleração quanto de desaceleração seja diminuída.

Dessa maneira, é muito importante que você entenda o princípio de funcionamento das máquinas elétricas de topologia aberta, como no caso do motor linear de indução.

Não pode faltar

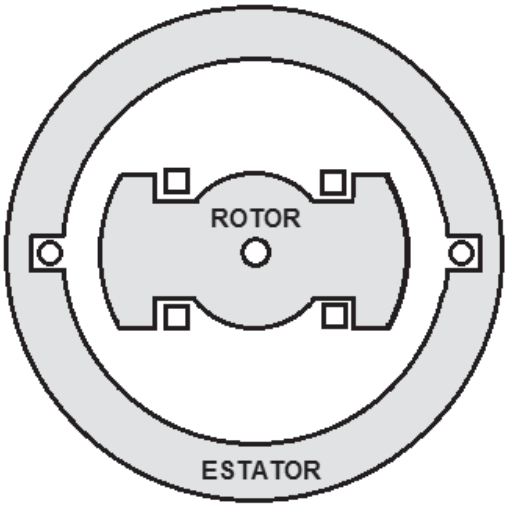
Podemos iniciar nossa introdução às máquinas elétricas lembrando que elas são conversores eletromecânicos de energia que podem operar como **motores** quando recebem energia elétrica e a convertem em energia mecânica ou como **geradores**, quando recebem energia na forma mecânica e a convertem em energia elétrica.

De fato, as máquinas elétricas são classificadas de acordo com a sua topologia, que pode ser **fechada** ou **aberta**.

As máquinas de topologia **fechada** possuem o estator, local em que está localizado o enrolamento de armadura ou do indutor, com topologia totalmente fechada. Com isso o campo magnético translada pelo entreferro do conversor a uma velocidade síncrona continuamente, isto é, o membro mecânico do conversor ou secundário não apresenta entradas e saídas no campo magnético criado no entreferro, com isso, nesses casos, não ocorre o efeito longitudinal de extremidade. Máquinas construídas com esse tipo de topologia formam o grande grupo das máquinas rotativas encontradas no comércio. As máquinas assim construídas podem ainda ser classificadas a partir da alimentação que recebem em seus respectivos enrolamentos de armadura como **máquinas de corrente contínua** ou **máquinas de corrente alternada**, sendo essas últimas ainda classificadas em **síncronas** ou **assíncronas**.

Na Figura 4.22 podemos ver o esquema de uma máquina síncrona monofásica com um único enrolamento e dois polos com exemplo de uma máquina de topologia fechada.

Figura 4.22 | Máquina de topologia fechada, o estator é fisicamente fechado



Fonte: elaborada pela autora.

Nas máquinas de topologia **aberta**, o membro primário ou indutor é um elemento finito, ou seja, possui início e fim. Com isso, o membro secundário, ao viajar em relação ao membro primário, no qual se localiza o campo magnético, fica sujeito ao efeito longitudinal de extremidade, que passa a atuar como redutor da força propulsora presente nessas máquinas. O **efeito longitudinal de extremidade** ocorre quando o elemento primário, o estator, possui algum tipo de descontinuidade física, causando um "corte" da onda viajante em cada uma das suas extremidades. Os efeitos observados nas extremidades do estator se propagam através do entreferro, distorcendo o campo magnético de translação em regiões distantes das extremidades (CREPPE, 1997).

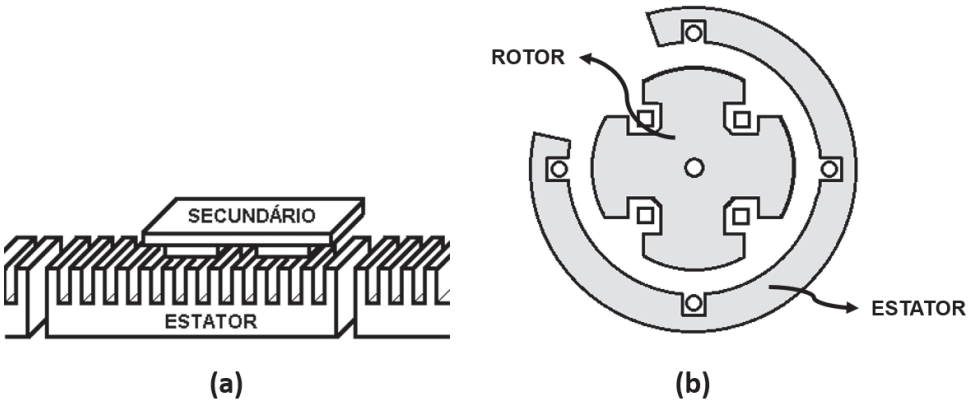
Assimile

O efeito longitudinal de extremidade é um efeito parasita que ocorre quando há extremidades no membro primário, distorcendo o campo magnético presente no primário. Essa distorção atua como redutor da força propulsora das máquinas elétricas.

As máquinas de topologia aberta podem operar como **máquinas de corrente contínua** ou como **máquinas de corrente alternada**, sendo essas divididas em síncronas e assíncronas. Dentre as máquinas assíncronas elas podem ser desenvolvidas com topologia linear, Figura 4.23 (a) ou com topologia setorial, Figura 4.23 (b).

Figura 4.23 | Máquina de topologia aberta, o estator possui início e fim

(a) máquina linear (b) máquina setorial



Fonte: elaborada pela autora.

Por terem o campo de aplicação restrito, difícil equacionamento e problemas relativos à alimentação em frequência variável, só passaram a ser economicamente acessíveis na década de 1970 com o desenvolvimento da eletrônica de potência. As máquinas de topologia aberta podem ser lineares ou rotativas, em ambas o membro secundário ou **linor**, ao viajar em relação ao estator ou indutor, encontra um início e um fim físico, causando o efeito longitudinal de extremidade. As máquinas lineares são um importante tipo de máquina de topologia aberta, tendo sua aplicação nos lançadores de aviões (*carrie*) dos porta-aviões e no sistema de metrôs pesados de algumas cidades canadenses (SIMONE, 2012).

Pesquise mais

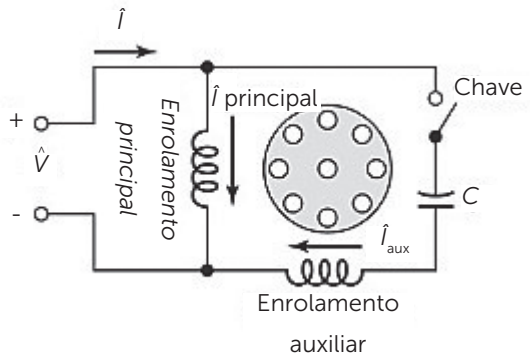
Você pode assistir a um vídeo no link indicado a seguir sobre o primeiro veículo baseado em motor linear de indução, com utilização em transporte urbano. Se trata, ainda, de um projeto experimental da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TV Brasil. **UFRJ começa a operar o trem Maglev**. 23 fev. 2016. Disponível em:<https://www.youtube.com/watch?v=uLv7sQt4Dko> Acesso em: 2 mar. 2017.

Tratando-se dos campos magnéticos existentes nas máquinas elétricas, podemos destacar o **campo magnético pulsante** e o **campo magnético girante.** Para o estudo do campo magnético pulsante, vamos focar nossa atenção nos motores de indução monofásico, que têm uma vasta utilização em residências, por exemplo. Eles têm uma peculiaridade no campo produzido no enrolamento

de campo (estator). Se o motor é monofásico, não se tem torque de partida para vencer a inércia do motor. O recurso é utilizar um circuito auxiliar, composto por um enrolamento auxiliar e por um capacitor, que, em conjunto, vão proporcionar a criação de uma "fase falsa", promovendo, assim, a criação de um campo magnético pulsante. Tem-se a corrente que percorre o enrolamento de campo e a que percorre o enrolamento auxiliar, produzindo um campo girante no estator. O capacitor tem a função de colaborar com o torque de partida e, depois que o motor de indução monofásico entra em regime permanente, esse circuito auxiliar pode ser desconectado. Quando se tem o estator de uma máquina recebendo energia monofásica, o campo magnético produzido pelo estator que atravessa o entreferro é denominado **campo magnético pulsante.** Na Figura 4.24 pode-se observar o circuito elétrico que representa o motor de indução monofásico com circuito auxiliar.

Figura 4.24 | Motor com partida a capacitor



Fonte: Umans (2014, p. 515).

O capacitor, em série com o enrolamento auxiliar, irá proporcionar uma diferença de fase de 90° entre as correntes do enrolamento principal (de campo) e o enrolamento auxiliar. É exatamente essa defasagem que irá proporcionar a criação do campo pulsante nessa máquina.

Reflita

Quais as vantagens de se utilizar o motor com partida a capacitor?

O **campo magnético girante** é produzido por sistemas de duas ou mais fases. Tendo como foco o motor de indução trifásico, consideremos que o estator está sendo alimentado com três fases (conectadas em estrela ou em triângulo), que, como vimos, têm suas tensões defasadas de 120° elétricos. O campo magnético produzido por esse conjunto também terá esse defasamento e, em cada fase,

existirá um campo magnético pulsante. Os campos combinados compõem um campo magnético girante com velocidade síncrona (n_s) de:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} ,$$

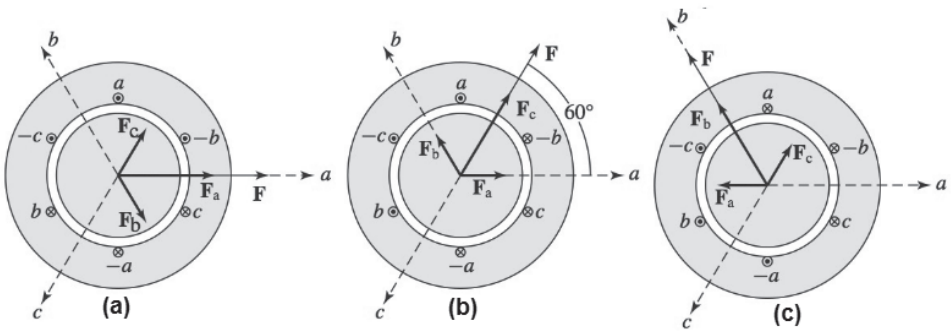
sendo p o número de polos da máquina e f a frequência da rede.

Considerando que o sistema está em equilíbrio trifásico, que a sequência de fases seja positiva e que $i_{Máximo}$ seja a corrente em seu valor máximo positivo, as correntes instantâneas nas três fases são:

$$i_a = i_{Máximo} \cdot \omega t$$
$$i_b = i_{Máximo} \cdot \cos(\omega t - 120^o)$$
$$i = i_{Máximo} \cdot \cos(\omega t + 120^o)$$

E essas correntes, quando produzem campos magnéticos também defasados de 120^o uns dos outros, forças magnetomotrizes resultantes (representadas por F) são produzidas e podem ser representadas como mostrado na Figura 4.25.

Figura 4.25 | Produção de um campo magnético girante por meio de correntes trifásicas



Fonte: Umans (2014, p. 221).

Na Figura 4.25 (a), a corrente da fase *a* é máxima e as correntes das fases *b* e *c* são $\frac{i_{Máxima}}{2}$, assim, as forças magnetomotrizes produzidas por essas correntes seguem a mesma regra, sendo F_a máxima e F_b e F_c com metade desse valor. O resultado dessa interação de forças magnetomotrizes é o aparecimento de um campo magnético senoidal que gira ao redor do entreferro, no sentido anti-horário.

A corrente solicitada pelo motor trifásico pode ser calculada pela expressão: $i = \frac{Hp \cdot 746}{\sqrt{3} \cdot v_{fase} \cdot fp \cdot \eta}$ e é dada em ampéres (A).

Em que: Hp é a potência mecânica no eixo do motor, expressa em Hp - *horse power* ou Cv - cavalo vapor;

η é o rendimento do motor que é calculado por: $\eta = \frac{\text{potência}_{\text{saída}}}{\text{potência}_{\text{entrada}}}$, dada em porcentagem e a potência de saída compreende a de entrada, subtraindo-se as perdas.

Exemplificando

Em um laboratório de testes elétricos é utilizado um motor de indução trifásico e, como ele está sob manutenção, precisamos substitui-lo temporariamente. Qual a velocidade do rotor (rotação) que o motor substituto deve ter para que o escorregamento fique em 3%? Dados do motor de indução: no estator, que tem 3 ranhuras por polo e por fase, a frequência de funcionamento é de 60Hz.

Solução:

Para que você possa encontrar a velocidade do rotor, a equação do escorregamento poderá ser utilizada: $s = \frac{n_s - n_R}{n_s}$, mas, para isso, preciso calcular a velocidade síncrona do campo girante e o número de polos da máquina:

$p = 2 \cdot N_{\text{ranhuras/polo}} = 2 \cdot 3 = 6$ e $n_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200 rpm$.

Assim, $n_R = n_s(1 - s) = 1200 \cdot (1 - 0{,}03) = 1164 rpm$. Portanto a velocidade de rotação do motor será de 1164 rpm.

Sem medo de errar

O seu novo desafio é gerenciar uma equipe que está desenvolvendo um projeto de utilização de motores de indução lineares para movimentar uma nova linha de metrô, na cidade de São Paulo, Brasil. Nesse projeto sua equipe precisa, primeiramente, listar, detalhadamente, as vantagens da utilização de um sistema baseado no motor linear de indução para a utilização em trem urbano, elaborando, dessa maneira, um laudo técnico para a empresa.

Atenção

Sua equipe pesquisou sobre o assunto acerca dos motores lineares de indução e, segundo essa pesquisa, as vantagens da utilização desse tipo de motor para propulsionar os trens urbanos são:

1. Como o motor linear de indução é um dispositivo que converte energia elétrica em mecânica, movimento de translação, diretamente, não existe a necessidade de dispositivos de adaptação de movimentos;

2. Executam o movimento linear sem a necessidade de acoplamento mecânico, o que o torna silencioso e de movimento suave;

3. Os parâmetros de referência não são mais a velocidade angular e o torque, como no caso das máquinas de topologia fechada, mas sim a força e a velocidade de translação;

4. Alta velocidade e aceleração;

5. Operação suave e precisão de posicionamento;

6. Alta gama de velocidades (até 500km/h);

7. Sem limites de deslocamento;

8. Simplicidade mecânica (não existe a necessidade de conversores de movimento);

9. Praticamente tem-se o desaparecimento do atrito, da poluição sonora e das vibrações;

10. Construção facilitada, devido à geometria plana do equipamento;

11. Há uma maior rapidez na dissipação de calor gerado, pois a máquina é de topologia aberta;

12. A propulsão e a frenagem independem da aderência da roda do trem no trilho;

13. Não requer manutenção ou lubrificação.

Com essa pesquisa, sua equipe consegue, agora, apresentar as vantagens da utilização do motor linear de indução para a propulsão do sistema de trem a ser instalado pela concessionária.

Avançando na prática

Seleção do motor linear de indução

Descrição da situação-problema

Suponha que você tem os seguintes dados de um motor linear que será utilizado para compor um sistema de uma fábrica que transporta cereais para estocagem. Esse transporte precisa ser realizado por meio de um motor linear de indução, mas será necessária uma força de propulsão de pelo menos 400N. O motor linear de indução foi escolhido por envolver o mínimo de perdas do produto e, ainda, o baixo nível de poluição sonora, uma vez que a fábrica preza por seguir as leis ambientais de poluição sonora.

Os dados do motor e do sistema são:

Tabela 4.2 | Dados do motor linear de indução (MLI) fornecidos pelo fabricante

Frequência do sistema	60Hz	EQUAÇÕES
Número de polos	4	**Velocidade do campo girante:** $v_s = 2 \cdot \tau \cdot f$ Sendo: f a frequência do sistema elétrico (Hz) e τ é o passo polar em metros
Passo polar	7 cm	
Densidade de campo (B)	0,8 Wb	**Força propulsora:** $F = \frac{c \cdot p \cdot \tau \cdot B \cdot J}{2} \cdot \cos\delta$ Sendo: c a largura do estator (m), p o número de polos, B a densidade de campo magnético (T), J é a densidade linear de corrente (A/m), τ o passo polar (m) e δ o ângulo entre a tensão aplicada e a tensão induzida no motor.
Largura do estator	5 cm	
Densidade de campo magnético necessária:	$B = 0,3T$	

Densidade linear de corrente necessária:	$J = 200 \cdot 10^3\ A/m$	
Ângulo	$\delta = 0,6^o$	

Fonte: elaborada pela autora.

Qual é a velocidade do campo girante do motor? Qual o valor da força propulsora desse sistema? Você poderá utilizar esse motor linear?

Resolução da Situação-Problema

Para descobrir a velocidade do campo girante é preciso utilizar a seguinte equação:

$$v_s = 2 \cdot \tau \cdot f ,$$

Substituindo os valores fornecidos, temos: $v_s = 2 \cdot 7 \cdot 10^{-2} \cdot 60 \Rightarrow v_s = 8,4\, m/s$

Para descobrir a força propulsora do motor de indução linear, podemos utilizar a equação: $F = \frac{c \cdot p \cdot \tau \cdot B \cdot J}{2} \cdot \cos\delta$.

Substituindo os valores fornecidos, temos:

$$F = \frac{c \cdot p \cdot \tau \cdot B \cdot J}{2} \cdot \cos\delta = \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 7 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3 \cdot 200 \cdot 10^3}{2} \cdot \cos 0,6$$

Assim, a força propulsora será de: $F = 419,98N \approx\sim 420N$, sendo assim, você poderá utilizar esse motor linear de indução para a finalidade requerida, ou seja, para o transporte de cereais.

Faça valer a pena

1. Imagine que você está trabalhando com máquinas síncronas trifásicas, das quais você precisa saber a velocidade angular do campo girante. Dessas máquinas, você tem os seguintes dados: sistema de alimentação de 60Hz e máquinas com dois, quatro e seis polos.

Calcule a velocidade do campo girante das máquinas síncronas que estão sob seus cuidados sabendo que a frequência do sistema é 60Hz e que as máquinas têm dois, quatro e seis polos e assinale a alternativa verdadeira.

a) Para a máquina de 2 polos, 1800rpm.

b) Para a máquina de 4 polos, 1200 rpm.

c) Para a máquina de 6 polos, 3600 rpm.

d) Para a máquina de 4 polos, 1800 rpm.

e) Para a máquina de 2 polos, 1200 rpm.

2. Nas máquinas elétricas os campos magnéticos constituem peças-chave para o seu funcionamento, uma vez que o movimento, seja ele rotacional ou de translação, como no caso dos motores lineares, depende diretamente do campo magnético produzido pela máquina.

Analise as afirmativas abaixo que expressam ideias sobre o assunto de campo magnético girante e campo magnético pulsante e assinale a alternativa que mostra quais ou qual delas é a verdadeira.

I. Assim como no motor de indução rotativo, o motor de indução trifásico linear produz um campo magnético de translação que por sua vez produz uma força que desloca a parte móvel do motor em linha reta;

II. A principal diferença entre os motores de indução linear e os rotativos é justamente o campo magnético. Nas máquinas rotativas o campo magnético produzido é girante, o que cria um conjugado e faz com que o secundário gire em torno do seu próprio eixo. Já nas máquinas lineares, o campo magnético é de translação, movimentando o secundário em linha reta.

III. Os motores setoriais são parecidos com os rotativos, porém apresentam um corte no estator, que permanece aberto. Por causa desse fato, o campo magnético produzido possui uma assimetria no campo do estator, mas continua sendo considerado um motor linear.

a) As afirmativas I e II são verdadeira e a III é falsa.

b) As afirmativas I, II e III são falsas.

c) As afirmativas I e III são verdadeiras, mas a II é falsa.

d) As afirmativas I, II e III são verdadeiras.

e) As afirmativas II e III são verdadeiras, mas a I é falsa.

3. O campo magnético girante constitui a base para o funcionamento dos motores de indução. Esse campo é produzido com a colocação, nas ranhuras do estator do motor, de um conjunto de três bobinas independentes entre si e espaçadas de 120^o. Analise as afirmativas a seguir e indique qual das alternativas relata somente as alternativas verdadeiras.

I. Fazendo-se circular correntes trifásicas defasadas de 120^o entre si pelas bobinas, tem-se : $i_a = i \cdot sen(\omega t)A$, $i_b = i \cdot sen(\omega t - 120^o)A$ e $i_c = i \cdot sen(\omega t + 120^o)A$.

II. O campo girante tem velocidade chamada de velocidade síncrona, que pode ser calculada por: $n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$.

III. Em cada uma das três bobinas trifásicas, acontece um campo magnético pulsante.

a) As alternativas II e III são verdadeiras, mas a I é falsa.

b) As alternativas I e III são verdadeiras, mas a II é falsa.

c) As afirmativas I, II e III são verdadeiras.

d) As alternativas I e II são verdadeiras, mas a III é falsa.

e) As afirmativas I, II e III são falsas.

Referências

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CREPPE, R. C. **Uma contribuição à modelagem de máquinas de indução lineares**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas. 1997.

NASCIMENTO JUNIOR, G. C. **Máquinas elétricas**. São Paulo: Érica, 2014.

SIMONE, G. A.; CREPPE, R. C. **Conversão eletromecânica de energia**: uma introdução ao estudo. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

UMANS, S.D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingdley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Anotações

Anotações

Anotações

Anotações

Anotações

Anotações

Anotações

ISBN 978-85-8482-826-5