G. Carvalho

Máquinas Elétricas

1ª Edição

EDITORA ÉRICA

www.editoraerica.com.br

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Carvalho, G.
Máquinas elétricas / G. Carvalho. -- 1. ed. -- São Paulo : Érica, 2014.

Bibliografia
ISBN 978-85-365-0709-5

1. Máquinas elétricas I. Título.

14-00069 CDD-621.31042

Índices para catálogo sistemático:
1. Máquinas elétricas : Engenharia eletrodinâmica 621.31042

Copyright © 2014 da Editora Érica Ltda.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer meio ou forma sem prévia autorização da Editora Érica. A violação dos direitos autorais é crime estabelecido na Lei nº 9.610/98 e punido pelo Artigo 184 do Código Penal.

Coordenação Editorial:	Rosana Arruda da Silva
Capa:	Maurício S. de França
Edição de Texto:	Beatriz M. Carneiro, Bruna Gomes Cordeiro, Carla de Oliveira Morais Tureta, Juliana Ferreira Favoretto, Nathalia Ferrarezi, Silvia Campos
Preparação e revisão de texto:	Beatriz M. Carneiro
Produção Editorial:	Adriana Aguiar Santoro, Alline Bullara, Dalete Oliveira, Graziele Liborni, Laudemir Marinho dos Santos, Rosana Aparecida Alves dos Santos, Rosemeire Cavalheiro
Editoração:	Conexão Editorial

O Autor e a Editora acreditam que todas as informações aqui apresentadas estão corretas e podem ser utilizadas para qualquer fim legal. Entretanto, não existe qualquer garantia, explícita ou implícita, de que o uso de tais informações conduzirá sempre ao resultado desejado. Os nomes de sites e empresas, porventura mencionados, foram utilizados apenas para ilustrar os exemplos, não tendo vínculo nenhum com o livro, não garantindo a sua existência nem divulgação. Eventuais erratas estarão disponíveis para download no site da Editora Érica.

Conteúdo adaptado ao Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa, em execução desde 1º de janeiro de 2009.

A ilustração de capa e algumas imagens de miolo foram retiradas de <www.shutterstock.com>, empresa com a qual se mantém contrato ativo na data de publicação do livro. Outras foram obtidas da Coleção MasterClips/MasterPhotos© da IMSI, 100 Rowland Way, 3rd floor Novato, CA 94945, USA, e do CorelDRAW X5 e X6, Corel Gallery e Corel Corporation Samples. Copyright© 2013 Editora Érica, Corel Corporation e seus licenciadores. Todos os direitos reservados.

Todos os esforços foram feitos para creditar devidamente os detentores dos direitos das imagens utilizadas neste livro. Eventuais omissões de crédito e copyright não são intencionais e serão devidamente solucionadas nas próximas edições, bastando que seus proprietários contatem os editores.

Seu cadastro é muito importante para nós

Ao preencher e remeter a ficha de cadastro constante no site da Editora Érica, você passará a receber informações sobre nossos lançamentos em sua área de preferência.

Conhecendo melhor os leitores e suas preferências, vamos produzir títulos que atendam suas necessidades.

Contato com o editorial: editorial@editoraerica.com.br

Editora Érica Ltda. | Uma Empresa do Grupo Saraiva
Rua São Gil, 159 - Tatuapé
CEP: 03401-030 - São Paulo - SP
Fone: (11) 2295-3066 - Fax: (11) 2097-4060
www.editoraerica.com.br

Agradecimentos

A Deus por ter concedido saúde e vontade de escrever sobre o mundo à minha volta;

À minha família por termos iniciado o caminho juntos e estarmos unidos até hoje;

Aos amigos e colegas de trabalho pelo incentivo e companheirismo, particularmente ao amigo professor engenheiro Antonio Costa por compartilhar seus conhecimentos e sua vivência prática em máquinas elétricas, contribuindo positivamente com este trabalho;

Especialmente à minha esposa Bruna e ao meu filho Gabriel, que dividiram parte do nosso tempo com estas páginas que trazem muitos pensamentos impressos.

Sumário

Capítulo 1 - Transformador Monofásico 11

1.1 Visão geral 11
1.2 Transformador elementar 12
1.3 Funcionamento do transformador 12
1.4 Tipos de núcleo 14
1.5 Correntes parasitas 15
1.6 Perdas no transformador 15
1.7 Cálculo de pequenos transformadores 16
1.8 Considerações sobre isolantes e impregnação 19
1.9 Circuito equivalente 20
1.10 Considerações sobre ensaios 20
1.11 Perdas no ferro 21
1.12 Perdas no cobre 21
1.13 Impedância percentual 22
1.14 Rendimento do transformador 23
1.15 Ensaios 24
1.15.1 Teste de continuidade e isolação do transformador 24
1.15.2 Relação de transformação 24
1.15.3 Ensaio a vazio 25
1.15.4 Ensaio em curto-circuito 26
1.16 Noções de enrolamento de transformadores 28
1.17 Micrômetro 29
Agora é com você! 30

Capítulo 2 - Transformador Trifásico 31

2.1 Visão geral 31
2.2 Aspectos construtivos 31
2.3 Classes de proteção 33
2.4 Transformadores trifásicos em paralelo 34
2.5 Grupos de transformadores 34
2.6 Polarização do transformador 34
2.7 Ensaios físico-químicos 36
2.8 Ligações em transformadores trifásicos 36

2.9 Execução de medidas em transformadores trifásicos 38
2.10 Ensaio: transformador trifásico 38
2.10.1 Ensaio de polarização por tensão CA 38
2.10.2 Testar ligações e relações de transformação 44
2.10.3 Ensaio de polarização por golpe indutivo 45
2.11 Banco de transformadores monofásicos 45
Agora é com você! 46

Capítulo 3 - Outros Transformadores 47
3.1 Autotransformador 47
3.2 Autotransformador ajustável 49
3.3 Transformador de potencial 50
3.4 Transformador de corrente 50
3.5 Ensaio: regulação de tensão em transformadores 52
Agora é com você! 56

Capítulo 4 - Motor CC 57
4.1 Visão geral 57
4.2 Princípio de funcionamento 58
4.3 Aspectos construtivos 60
4.4 Tipos de ligação e características de funcionamento de motores CC 61
4.5 Comutador 67
4.6 Escovas e o ajuste da linha neutra 67
4.7 Identificação dos terminais das máquinas CC 67
4.8 Eletrodinamômetro 68
4.9 Ensaios: motor CC 68
4.9.1 Ajuste da linha neutra 69
4.9.2 Determinação de parâmetros do motor 70
4.9.3 Motor série 71
4.9.4 Motor shunt 73
4.9.5 Motor compound 76
Agora é com você! 79

Capítulo 5 - Gerador CC 81
5.1 Visão geral 81
5.2 Princípio de funcionamento 82
5.3 Excitação de campo shunt 84
5.4 Gerador CC série 85

5.5 Tipos de geradores CC autoexcitados 85
5.6 Aplicações dos geradores CC 87
5.7 Ensaio: gerador CC 89
5.7.1 Gerador com excitação shunt independente 90
5.7.2 Gerador shunt autoexcitado 93
5.7.3 Gerador compound autoexcitado 95
5.7.4 Gerador CC série 97
Agora é com você! 100

Capítulo 6 - Outros Motores 101
6.1 Visão geral 101
6.2 Motor universal: aplicações 102
6.3 Motor universal: princípio de funcionamento 102
6.4 Motor de repulsão: aplicações 103
6.5 Motor de repulsão: funcionamento 103
6.6 Motor de campo distorcido 104
6.7 Ensaio: motor universal 105
6.8 Ensaio: motor de repulsão de partida 109
Agora é com você! 112

Capítulo 7 - Geradores Síncronos 113
7.1 Visão geral 113
7.2 Aspectos construtivos 114
7.3 Funcionamento 114
7.4 Sincronização 117
7.5 Disponibilização de potência 119
7.6 Ensaio: gerador trifásico CA 121
7.7 Ensaio: sincronização com a rede 126
Agora é com você! 129

Bibliografia 131

Apêndice A - Instrumentos de Medição 133
A.1 Amperímetro 133
A.2 Voltímetro 134
A.3 Wattímetro 135
A.3.1 Wattímetro monofásico 136
A.3.2 Indicador de sequência de fase 138
A.3.3 Medidor de fator de potência 140

Apêndice B - Formulário e Conversão de Unidades 141
B.1 Nomenclaturas da tensão elétrica 141
B.2 Magnetismo e eletromagnetismo 142
B.3 Transformador monofásico 142
B.4 Transformador trifásico 142
B.5 Motores em geral 143
B.6 Conversão de unidades 143

Apresentação

O objetivo deste trabalho é fundamentar uma sequência de ensaios e conhecimentos relacionados a máquinas elétricas para estudantes de cursos técnicos.

Existem ótimos livros sobre máquinas elétricas com análises matemáticas, equacionamentos e que são excelentes para o desenvolvimento do conteúdo científico nesta área. A dificuldade de encontrar um exemplar com conteúdo básico, como descrição de funcionamento e ensaios comprobatórios, foi a grande motivação para escrever este volume. É fundamental iniciar o estudo de uma máquina com os aspectos básicos de funcionamento e características elétricas. O estudo embasado num conhecimento prévio e sólido de uma máquina pode levar a resultados práticos excelentes.

Por estes e outros motivos apresento ao colega leitor uma série de ensaios preparados com análises teóricas do funcionamento complexo das máquinas elétricas fundamentais. Transformadores, motores e geradores são estudados nos capítulos seguintes de forma simples e direta, sem cálculos complexos, dando ênfase à análise construtiva e aos ensaios elétricos para observação de características fundamentais.

Espero que aprecie a leitura e se envolva com a complexidade construtiva de uma máquina elétrica, apaixone-se por essa área fascinante, dê continuação aos seus estudos e futuramente desenvolva suas próprias teorias, projetos e máquinas. Afinal, tudo é possível se acreditarmos em nós e valorizarmos o conhecimento.

Bom estudo!

O autor

1

Transformador Monofásico

Para começar

Neste capítulo você conhecerá a mais simples das máquinas elétricas: o transformador monofásico. O transformador é uma máquina elétrica estática, isto é, não possui partes girantes. Sua finalidade é alterar as grandezas elétricas tensão e corrente entre a sua entrada (primário) e saída (secundário).

Serão explicados o princípio de funcionamento, os aspectos construtivos e as relações entre as grandezas elétricas de entrada e saída. Você aprenderá um método empírico para projetos de pequenos transformadores.

Também será visto que qualquer transformador pode ser representado por meio de um circuito elétrico equivalente. Os parâmetros elétricos desse circuito são obtidos mediante ensaios em laboratório. Os conceitos sobre o transformador monofásico servem de base para o entendimento de outros tipos de transformador.

1.1 Visão geral

O primeiro equipamento a ser estudado, largamente empregado na vida moderna, tanto nas indústrias como no comércio, distribuição de energia e nas residências, é o transformador. Muitas vezes a aplicação a que ele se destina acompanha o nome, como transformador de medição, transformador de corrente, transformador de RF, transformador de pulso etc. Além disso, o transformador pode ser isolador ou não.

Este capítulo concentra-se no transformador monofásico, com ênfase no de dois enrolamentos. Os capítulos seguintes abordam outros tipos de transformador e aplicações fundamentais num curso que estude máquinas.

1.2 Transformador elementar

Um transformador é um equipamento utilizado para redução ou aumento de tensão. Segundo esta aplicabilidade, ele pode ser definido como transformador abaixador ou elevador (de tensão). Um transformador é constituído normalmente de um enrolamento primário (em que aplicamos a tensão de entrada), um enrolamento secundário (em que obtemos a tensão de saída desejada) e um caminho otimizado para o fluxo magnético, que é o grande responsável pela transformação, Figura 1.1.

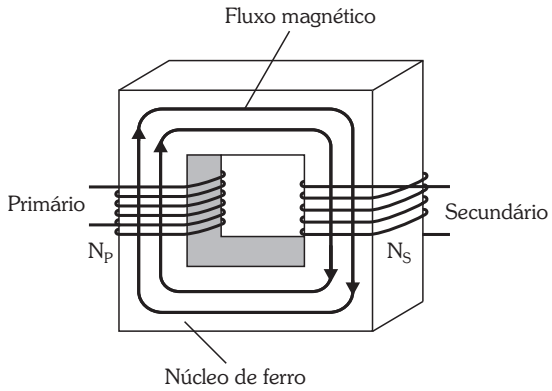


Figura 1.1 - Representação básica de um transformador.

O fluxo magnético Φ na figura foi representado com apenas um sentido, mas ele sempre acompanha o sentido imposto pela tensão aplicada ao primário e isso é muito importante, como veremos a seguir.

1.3 Funcionamento do transformador

O funcionamento do transformador baseia-se nos fundamentos do eletromagnetismo, especialmente os estudados por Faraday e Lenz. Constata-se que, ao movimentar um campo magnético diante de uma espira, surge uma corrente induzida. Em outras palavras, um campo magnético variável produz um fluxo magnético variável, que é responsável pela corrente induzida.

De imediato não conseguimos ligar o fundamento eletromagnético ao transformador da Figura 1.1, mas se fizermos algumas observações, chegaremos a uma conclusão satisfatória. Primeiramente observe que o primário e o secundário são duas bobinas com núcleo comum. Se são bobinas, se alimentarmos o primário ou o secundário com sua respectiva tensão nominal, teremos um fluxo magnético no núcleo de ferro. Se a fonte utilizada para a alimentação do primário, por exemplo, for de corrente contínua, não teremos uma transformação de tensão constante no secundário, pois o fluxo magnético gerado pela corrente contínua não é variável ao longo do tempo.

Se alimentarmos o primário com tensão alternada, ele produz um fluxo magnético variável, já que a corrente alternada oscila em 60 Hz. Esse fluxo magnético variável, ao agir no interior do núcleo, atinge o secundário, provocando o aparecimento de uma tensão alternada nesse enrolamento por conta da indução magnética. A tensão que aparece no secundário por conta do fluxo magnético variável gerado pelo primário recebe o nome de tensão induzida.

A tensão induzida é sempre proporcional ao número de espiras da bobina e de acordo com a indução magnética que a provocou, podendo ser calculada pela relação de transformação a seguir:

$$\frac{Uprim}{Usec} = \frac{Nprim}{Nsec}$$

Sendo:

- Uprim = tensão no primário
- N sec = número de espiras do secundário

Analisando a equação, podemos concluir que quanto maior o número de espiras, maior a tensão. Se não temos o número de espiras dos enrolamentos, podemos calcular o número de espiras do primário com a equação:

$$Np = \frac{Up \times 10^8}{4{,}44 \times f \times SL \times B}$$

Sendo:

- Up = tensão no primário (v)
- f = frequência (Hz)
- SL = seção líquida do núcleo (cm^2)
- B = densidade magnética do núcleo (gauss)

As densidades mais aplicadas a núcleos de ferro são:

- 8.000 = 2% de silício
- 10.000 = 3% de silício
- 12.000 = 4% de silício

A relação entre o número de espiras e a corrente que circula no enrolamento é inversamente proporcional, isto é, quanto menor o número de espiras, maior a corrente. A equação a seguir pode confirmar isso:

$$\frac{Iprim}{Isec} = \frac{Nsec}{Nprim}$$

Fique de olho!

A equação está adaptada para receber gauss e cm^2, que são as unidades encontradas em tabelas de chapas para núcleos, por isso o 10^8.

Podemos concluir que o transformador não funciona em corrente contínua, pois precisamos de um fluxo magnético variável, portanto é preciso alimentá-lo com CA. A relação entre número de espiras e tensão é diretamente proporcional e a relação entre número de espiras e corrente é inversamente proporcional. A relação entre corrente e tensão está associada à potência aparente do transformador, S = U × I, que deve ser aproximadamente a mesma para primário e secundário (desconsiderando as perdas).

Uma forma de ligar o transformador adequadamente pode ser vista na Figura 1.2.

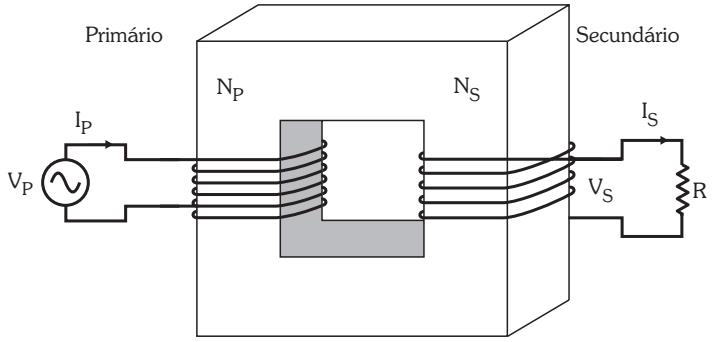


Figura 1.2 - Ligação básica de um transformador.

1.4 Tipos de núcleo

Os dois tipos de núcleo mais utilizados em transformadores monofásicos são: núcleo envolvido em anel, "core", Figura 1.2, e núcleo envolvente, "shell" ou blindado, Figura 1.3.

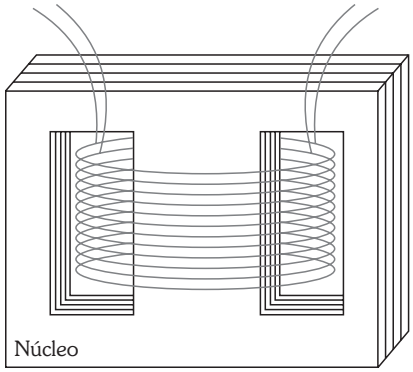
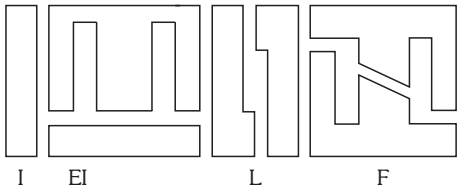


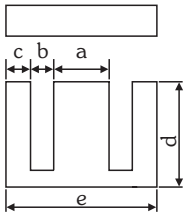
Figura 1.3 - Ilustração das chapas de aço constituintes do núcleo de um transformador.

Observe o núcleo seccionado, o que representa que ele foi construído com várias chapas finas de ferrossilício, o que é explicado a seguir.

Existem transformadores especiais com outras formas de núcleo, por exemplo, transformadores de isolação com núcleo em toroide, mas para construção dos transformadores de núcleo envolvido ou envolvente normalmente são utilizadas as chapas representadas na Figura 1.4.



Formatos das chapas



As chapas geralmente são fabricadas segundo as dimensões apresentadas na figura ao lado, cujos valores estão na tabela a seguir em centímetros. A espessura dessas chapas normalmente é de 0,3556 mm.

Nº	a	b	c	d	e	VA
2	2,3	1,3	1,3	3,8	7,5	50
3	3,0	1,5	1,3	4,5	9,0	100
4	3,5	1,8	1,8	5,3	10,7	150
5	4,0	2,0	2,0	6,0	12,0	250
6	4,8	2,5	2,5	7,5	14,8	500
7	6,0	3,0	3,0	9,0	18,0	1.000

Figura 1.4 - Chapas para transformadores.

Os valores constantes na tabela são importantes no projeto de um transformador por constituírem a seção do núcleo do transformador, consequentemente com participação direta na sua potência, como veremos.

1.5 Correntes parasitas

Nem tudo são flores no funcionamento de um transformador. O mesmo fluxo magnético variável, responsável pela tensão induzida no secundário, traz com ele efeitos indesejados nesse tipo de máquina. O núcleo do transformador monofásico normalmente é constituído de material ferromagnético. Se construirmos um núcleo maciço com esse material, teremos um enorme problema.

O fluxo magnético variável, responsável pela indução magnética, age também sobre o núcleo de ferro maciço e produz correntes induzidas nesse ferro, que produzem campos magnéticos contrários ao campo que deu origem a essas correntes. Quanto menor a resistência elétrica desse núcleo, maiores os efeitos provocados pelas correntes parasitas, que são perda de rendimento e aquecimento.

Essa característica da corrente induzida foi descoberta pelo físico russo Heinrich Lenz e pode ser aproveitada em alguns equipamentos, como, por exemplo, medidores de energia. Quando úteis, chamamos essas correntes de correntes de Foucault, afinal não ficaria bem chamar o fundamento de trabalho de um equipamento de "correntes parasitas".

Para minimizar os efeitos das correntes parasitas, não se utiliza um núcleo maciço para o transformador. São utilizadas chapas de ferro magnético, de espessura reduzida, isoladas eletricamente uma da outra e montadas em forma de núcleo. Por estarem isoladas eletricamente, não facilitam a circulação das correntes parasitas, reduzindo o aquecimento e a influência negativa do campo magnético dessa origem. Isso explica, de forma simples, por que o núcleo dos transformadores e o interior dos motores não são fabricados com material maciço.

1.6 Perdas no transformador

Um transformador, além das perdas devido às correntes parasitas, possui outras perdas. A primeira que veremos é em função do enrolamento das bobinas. Como as bobinas são feitas de fio de cobre esmaltado e esse fio possui certa resistência, é justo assumir que a resistência total de uma bobina, sob influência de uma corrente elétrica, provoque aquecimento, e aquecimento significa potência desperdiçada. Essas perdas são chamadas de perdas no cobre.

Outra perda no transformador está relacionada à histerese magnética. Ela provoca o atraso entre o campo magnético e a indução magnética. Como essa perda está relacionada com a qualidade do material utilizado na montagem do núcleo, é parte das perdas no ferro.

O total das perdas deve ser considerado no projeto de transformadores. Quando isso não é feito, temos um transformador que na teoria fornece uma potência e na prática a potência que ele é capaz de suprir é bem menor. Alguns chegam a ter rendimentos absurdos de apenas 60%.

1.7 Cálculo de pequenos transformadores

Agora que temos o conhecimento básico necessário sobre o transformador, vamos utilizar um método de cálculo para o projeto de pequenos transformadores. Não é um cálculo científico de precisão indiscutida, mas um cálculo prático que permite construir transformadores até 1000 VA, baixa tensão, sem problemas. Para projetar um transformador, é preciso definir sua aplicação, regime de trabalho e potência máxima fornecida. Para exemplificar, suponha que necessitamos de um transformador para reduzir a tensão de 220 V para 24 V com I = 5A. Adotando cosφ = 1, temos como potência ativa e aparente no secundário:

$$Ps = Us \times Is \times \cos\varphi = 24\ V \times 5 \times 1 = 120\ W \quad e \quad Ss = 120\ VA$$

Em seguida calculamos a potência no primário, com base na do secundário, acrescentando 10% devido a perdas no transformador, considerando um rendimento de 90%. Esse valor de rendimento pode aumentar conforme a qualidade da chapa utilizada. Vamos utilizar chapa com densidade magnética de 10.000 gauss.

$$Pp = Ps \times 1{,}1 = 132\ W \quad e \quad Sp = 132\ VA$$

Pela potência do primário determinamos a seção líquida do núcleo do transformador, isto é, a seção teórica necessária para que ele atinja a potência desejada para o secundário.

$$SL = 7{,}5\sqrt{\frac{S_p}{f}} \approx \sqrt{S_p}\ (p/\ 60\ Hz) = \sqrt{132} = 11{,}489\ cm^2$$

Para construir o núcleo do transformador, aplicamos um fator de 20% sobre a seção líquida, para compensar o fator de empacotamento na construção do núcleo com as chapas comerciais disponíveis, chegando a uma seção bruta:

$$SB = SL \times 1{,}2 = 13{,}787\ cm^2, \text{ aproximadamente } 14\ cm^2$$

Para construir esse núcleo, utilizamos um conjunto de chapas E I, cujas dimensões devem ser capazes de formar a seção necessária para o transformador. Na tabela de chapas para transformadores citada anteriormente, encontramos uma coluna em que temos a potência aparente ligada a um determinado número de chapa. Pode-se selecionar a chapa a partir dos dados obtidos ou aplicar um cosφ < 1 (por exemplo, 0,9) à unidade transformadora, como segue:

$$Sp = 132\ W / \cos\varphi \Rightarrow Sp = 132\ W / 0{,}9 = 146{,}6\ VA$$

A linha que atende a esta potência é a de 150 VA, chapa nº 4. Agora precisamos calcular o número de chapas necessárias para construção do núcleo que será retangular e com a medida "a" em um dos lados; "a" da chapa nº 4 é igual a 3,5 cm. Com o seguinte cálculo determinamos a medida do outro lado do núcleo:

$$14 / 3{,}5 = 4\ cm$$

Para atingirmos 4 cm, necessitamos de uma quantidade "x" de chapas com espessura igual a 0,3556 mm:

$$4\ cm / 0{,}03556\ cm = 113 \text{ chapas E e } 113 \text{ chapas I para o conjunto E I.}$$

Agora vamos calcular o número de espiras para o enrolamento primário utilizando a fórmula dada anteriormente:

$$Np = \frac{Up \times 10^8}{4{,}44 \times BxfxSL} = \frac{220 \times 10^8}{4{,}44 \times 10.000 \times 60 \times 11{,}489} = 718{,}79 = 719 \text{ espiras no primário}$$

Para o secundário pode ser utilizada a relação de igualdade:

$$\frac{Uprim}{Usec} = \frac{Nprim}{Nsec} = \frac{220V}{24V} = \frac{719}{Nsec} \qquad Nsec = 78{,}436 = 79 \text{ espiras}$$

Calculado o número de espiras, o próximo passo é determinar a seção do fio magnético esmaltado (fme) a ser utilizado para cada enrolamento. Para efetuar esse cálculo, necessitamos da corrente disponível dos dois enrolamentos e a densidade de corrente do condutor a ser utilizado. A densidade de corrente trata da condução de corrente por seção do condutor de acordo com a condição de trabalho do transformador. Quanto mais ventilado e limpo o ambiente, maior a densidade de corrente desse fio magnético.

Tabela 1.1 - Densidade de corrente para projeto de transformadores de baixa potência

Tabela de densidades de corrente D	
Sem ventilação	2 A/mm^2
Má ventilação	4 A/mm^2
Ventilação regular	6 A/mm^2
Boa ventilação	8 A/mm^2

Para o projeto aplicaremos uma densidade de 4 A/mm^2.

A seção do fio do enrolamento primário pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Ip = \frac{Pp}{Up} = \frac{132\ W}{220\ V} = 0{,}6\ A \qquad \text{Seção Primário} = \frac{Ip}{D} = \frac{0{,}6\ A}{4} = 0{,}15\ mm^2$$

O condutor que possui seção igual ou superior a 0,15 mm^2 é o de 25 AWG, segundo a tabela de condutores dada adiante.

Os mesmos cálculos devem ser efetuados para determinar a seção do fme para o enrolamento secundário:

$$Is = \frac{Ps}{Us} = \frac{120\ W}{24\ V} = 5\ A \qquad \text{seção secundário} = \frac{Is}{D} = \frac{5\ A}{4} = 1{,}25\ mm^2$$

O condutor que possui seção igual ou superior a 1,25 mm^2 é o de 16 AWG.

Precisamos determinar se há possibilidade de enrolamento ou teremos de alterar a forma prevista para o núcleo do transformador. Verificar a possibilidade de enrolamento significa calcular a área ocupada pelas bobinas sobrepostas e conferir se o espaço em volta do núcleo montado comporta as bobinas. O espaço em volta do núcleo é estabelecido em cumplicidade com a medida "b" da chapa. O empilhamento máximo de espiras não deve atingir esse valor em nenhuma hipótese. O enfileiramento de espiras não deve exceder a altura do núcleo que é determinada pela subtração ("d" – "c").

Colocando no papel:

"b" = 1,8 cm

("d"–"c") = (5,3 – 1,8) = 3,5 cm

Área disponível = 6,3 cm^2

Da tabela de fios podemos extrair os diâmetros dos condutores utilizados:

25 AWG = 0,45 mm = 0,045 cm 16 AWG = 1,29 mm = 0,129 cm

Multiplicando os respectivos diâmetros pelas quantidades de espiras calculadas e depois novamente pelos mesmos diâmetros, temos, aproximadamente, a área ocupada pelo enrolamento:

$Aep = 0{,}045 \times 719 \times 0{,}045 = 1{,}456\ cm^2$

$Aes = 0{,}129 \times 79 \times 0{,}129 = 1{,}315\ cm^2$

$Atotal = 2{,}77\ cm^2$

2,77 cm^2 cabem em 6,3 cm^2; agora temos de nos preocupar apenas com o espaço ocupado pelos materiais isolantes utilizados durante o enrolamento.

Além do enrolamento, há também o espaço ocupado pelo material isolante instalado no carretel antes de iniciarmos o enrolamento e o material isolante normalmente colocado entre camadas. Deve ser uma preocupação se a área ocupada pelos enrolamentos estiver muito próxima da área disponível entre o ferro e o carretel.

Fique de olho!

Quanto mais elevada for a frequência de operação de um transformador, menor será o seu tamanho para um mesmo nível de potência. Esse é um "truque" muito utilizado em fontes chaveadas que fazem a alimentação de vários aparelhos eletrônicos, como microcomputadores e TVs.

Tabela 1.2 - Bitola de fio magnético esmaltado

Bitola do fio AWG nº	Diâmetro em mm	Seção em mm^2	Resistência em Ω/km a 20 °C	Correntes admissíveis para as densidades				
				1 A/mm^2	2 A/mm^2	3 A/mm^2	4 A/mm^2	5 A/mm^2
6	3,21	8,37	2,07	8,37	16,74	25,11	33,48	41,85
9	2,91	6,63	2,59	6,63	13,26	19,89	26,52	33,15
10	2,59	5,26	3,27	5,26	10,52	15,72	21,04	26,30
11	2,30	4,17	4,15	4,17	8,34	12,51	16,06	20,85
12	2,05	3,31	5,22	3,31	6,62	9,93	13,24	16,55
13	1,83	2,62	6,56	2,62	5,24	7,86	10,46	13,10
14	1,63	2,06	8,26	2,06	4,16	6,24	8,32	10,40
15	1,45	1,65	10,40	1,65	3,30	4,95	6,60	8,25
16	1,29	1,31	13,20	1,31	2,62	3,93	5,24	6,55
17	1,15	1,04	16,60	1,04	2,08	3,12	4,16	5,20
18	1,02	0,82	21,10	0,82	1,64	2,46	3,28	4,10
19	0,91	0,653	26,50	0,653	1,306	1,959	2,612	3,265

Bitola do fio AWG nº	Diâmetro em mm	Seção em mm²	Resistência em Ω/km a 20 ºC	Correntes admissíveis para as densidades				
				1 A/mm²	2 A/mm²	3 A/mm²	4 A/mm²	5 A/mm²
20	0,81	0,518	33,50	0,518	1,036	1,554	2,072	2,590
21	0,72	0,40	42,30	0,410	0,620	1,230	1,640	2,050
22	0,64	0,326	53,60	0,326	0,652	0,978	1,250	1,630
23	0,57	0,2552	57,60	0,2552	0,5104	0,7658	1,0206	1,2760
24	0,51	0,2043	84,40	0,2043	0,4086	0,6129	0,8172	1,0215
25	0,45	0,1590	108,40	0,1509	0,3180	0,4770	0,6360	0,7950
26	0,40	0,1258	137,0	0,1258	0,2512	0,3768	0,5024	0,6280
27	0,38	0,1018	169,0	0,1018	0,2036	0,3054	0,4072	0,5090
28	0,32	0,0604	214,0	0,0804	0,1608	0,2412	0,3216	0,4020
29	0,29	0,0660	261,0	0,0660	0,1320	0,1980	0,2640	0,330
30	0,25	0,0491	351,0	0,0491	0,0982	0,1473	0,1964	0,2455
31	0,23	0,0415	415,0	0,0415	0,0830	0,1245	0,1660	0,2075
32	0,20	0,0314	549,0	0,0314	0,0628	0,0942	0,1256	0,1570
33	0,18	0,0254	679,0	0,0254	0,0508	0,0762	0,1016	0,1270
34	0,16	0,0201	858,0	0,0201	0,0402	0,0603	0,0804	0,1005
35	0,14	0,0154	1119,0	0,0154	0,0308	0,0462	0,0616	0,0770
36	0,13	0,0132	1306,0	0,0132	0,0261	0,0396	0,0528	0,0660
37	0,11	0,0095	1815,0	0,0095	0,0190	0,0285	0,0360	0,0475
38	0,10	0,0078	2210,0	0,0078	0,0156	0,0234	0,0312	0,0390
39	0,09	0,0063	2737,0	0,0063	0,0126	0,0189	0,0252	0,0315
40	0,08	0,0050	3446,0	0,0050	0,0100	0,0150	0,0200	0,0250

1.8 Considerações sobre isolantes e impregnação

Para enrolar um transformador, não basta apenas fio magnético esmaltado, centenas de espiras, chapas de ferro e um carretel para enrolamento das bobinas e montagem das chapas. Outros materiais se fazem necessários para viabilizar seu uso e melhorar a resistência de isolação. O próprio fme deve ser escolhido, tendo como critérios as condições de trabalho do transformador, temperatura máxima etc.

Pelos menos dois tipos de papel isolante serão utilizados para construir o enrolamento. O papel "cinza" (kraft) de maior espessura serve para forrar o carretel e cobrir o enrolamento todo quando tudo estiver pronto. Um papel mais fino (cristal) deve ser utilizado como isolante entre as camadas de espiras.

Espaguetes podem ser necessários para dar proteção mecânica aos fios que ligarem o enrolamento às conexões externas, se eles não forem soldados a cabos flexíveis ao terminar a última camada. Se isso ocorrer, a solda deve ser bem feita e isolada da camada de espiras elétrica e mecanicamente.

Após realizar todas as ligações e fechar o transformador, um banho de verniz pode ser aplicado para a completa impregnação do transformador. Geralmente esse banho é feito mergulhando o transformador em verniz aquecido a uma temperatura que melhore sua impregnação ao enrolamento.

1.9 Circuito equivalente

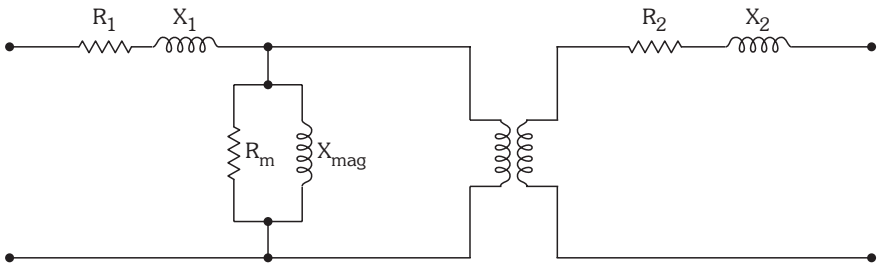


Figura 1.5 - Circuito equivalente do transformador real.

Um transformador, visto pelos profissionais da área de máquinas, não se resume a apenas duas bobinas e um núcleo de ferro. Existem parâmetros "escondidos", que muitas vezes necessitam ser mapeados, e o controle desses parâmetros determina o funcionamento adequado de uma máquina. O transformador real está longe do modelo ideal, como mostra a Figura 1.5. Todas as variáveis expostas têm uma razão de existir e para iniciar precisamos conhecer cada uma delas pelo nome:

- R_1 = resistência do enrolamento primário;
- X_1 = reatância indutiva do enrolamento primário;
- R_m = resistência de magnetização, que retrata as perdas no ferro;
- X_m = reatância indutiva de magnetização;
- R_2 = resistência do enrolamento secundário;
- X_2 = reatância indutiva do enrolamento secundário.

Com o nome das variáveis em mãos precisamos utilizar os métodos (ensaios) para determinação de cada uma delas.

1.10 Considerações sobre ensaios

Os ensaios e testes em transformadores estão previstos em normas, como, por exemplo, NBR 5356: Transformadores de Potência – Parte 1 – Generalidades.

Por meio de ensaios e testes verifica-se se os parâmetros reais do transformador não estão fora do escopo do projeto ou se algum parâmetro vai comprometer a sua vida útil quando em funcionamento. Além disso, os ensaios permitem dar dimensões às variáveis definidas no modelo do transformador real, Figura 1.5, possibilitando a utilização do modelo em simulações.

O primeiro teste normalmente realizado é medir a resistência de isolação com um megôhmetro. A medição deve ser feita entre as bobinas do primário e do secundário e entre as bobinas e o núcleo de ferro. Em seguida, medimos a resistência ôhmica dos enrolamentos, marcando nesse momento o lado de maior resistência como primário.

Rendimento, perdas e parâmetros para o modelo do transformador são obtidos por meio de ensaios específicos, os quais veremos a seguir.

1.11 Perdas no ferro

Ao realizar ensaio para determinar as perdas no ferro, ensaio em vazio, além de mensurarmos as perdas em si, conseguimos calcular os parâmetros magnéticos para a construção do circuito equivalente do transformador. Esses parâmetros são:

- R_m = resistência do circuito magnético;
- X_m = indutância do circuito magnético;
- Z_m = impedância do circuito magnético;
- $C_{os\varphi}$ = fator de potência do transformador.

Serão medidos no ensaio:

- P_o = potência ativa em vazio;
- U_o = tensão de alimentação em vazio;
- I_o = corrente em vazio.

Equações utilizadas:

$$Zm = \frac{Vo}{Io} \qquad Cos\varphi = \frac{Po}{Vo \times Io} \qquad Rm = \frac{Vo^2}{Po} \qquad Xm = \frac{Vo^2}{Qo} \qquad Qo = So \times sen\varphi$$

1.12 Perdas no cobre

Como perdas no cobre, entenda as perdas por ocasião da resistividade do cobre utilizado para a fabricação do fio magnético esmaltado. Com o ensaio em curto-circuito determinamos o valor da resistência, a impedância e a reatância indutiva do enrolamento primário e do secundário com cálculos e auxílio da leitura dos instrumentos, além do fator de potência dos enrolamentos.

As equações utilizadas são as seguintes:

$$Rcc = \frac{Pcc}{Icc^2} \qquad Zcc = \frac{Ucc}{Icc} \qquad Xcc = \sqrt{Zcc^2 - Rcc^2} \qquad Cos\varphi = \frac{Pcc}{Ucc \times Icc}$$

Quando são conhecidos os valores precisos de r1, r2, x1 e x2, pode-se utilizar o conceito de impedância refletida para determinar os valores Rcc e Xcc:

$$\alpha = \frac{N1}{N2} \quad e \quad \frac{N1}{N2} = \frac{U1}{U2} = \frac{I2}{I1}, \; U1 = \alpha \times U2, \; I1 = \frac{I2}{\alpha}$$

Como $Z1 = V1/I1$, podemos fazer $Z1 = \frac{\alpha \times U2}{I2/\alpha} = \alpha^2 \times \frac{U2}{I2} = \alpha^2 \times Z2$, em que $\alpha^2 \times Z2$ é a impedância do secundário refletida no primário, conforme mostrado nas Figuras 1.6 e 1.7.

A partir dessa dedução temos: $Rcc = r1 + \alpha^2 \times r2$ e $Xcc = x1 + \alpha^2 \times x2$

Como nessa aproximação não estão previstos métodos para separação de r1 e $\alpha^2 \times r2$, se obtivermos Rcc, podemos separar os termos usando dois métodos conhecidos:

No primeiro, em que $Rcc = r1 + r2$, sendo $r2 = r1/\alpha$ e $r1 = \frac{Rcc}{\frac{\alpha+1}{\alpha}}$, é levada em consideração a relação de transformação α. Desta maneira obtemos a separação dos valores embutidos em Rcc e Xcc mais facilmente e essa aproximação se adapta melhor a determinadas condições de ensaio, mostrando valores mais próximos a medições efetuadas com instrumentos de baixa precisão ou que, por exemplo, não levem em consideração o efeito pelicular da CA.

No segundo método encontrado, Rcc é dividido igualmente entre primário e secundário, refletindo ao primário ou secundário, conforme a necessidade.

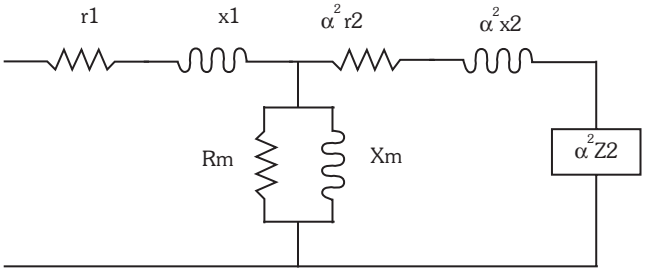


Figura 1.6 - Circuito equivalente aproximado refletido no primário com separação das bobinas.

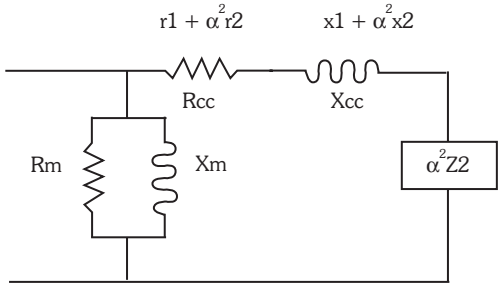


Figura 1.7 - Circuito equivalente aproximado refletido no primário sem separação das bobinas.

1.13 Impedância percentual

Outro dado de extrema importância nos transformadores e que também pode ser determinado no ensaio de curto-circuito é a impedância percentual ou tensão de curto-circuito percentual. Essa impedância está relacionada com a tensão aplicada ao primário para fazer circular a corrente nominal secundária, com o secundário em curto. Esse valor vem como dado de placa do transformador, pois é extremamente importante e deve ser considerado na associação paralela de transformadores. O valor fica em torno de 3% a 9%.

Olhando de outro modo, com o secundário em curto, se não houvesse resistividade do cobre e reatância indutiva da bobina, a tensão de curto-circuito seria 0 V, resultando uma impedância percentual de 0%. Como existe resistividade do cobre e reatância indutiva por parte da bobina,

podemos esperar que, em curto, a soma vetorial da resistência do enrolamento e da reatância resulte uma impedância e seja parte da carga encontrada para o nível de tensão de curto-circuito que aplicamos ao primário do transformador.

Como o secundário está em curto e seu enrolamento foi calculado com base em uma máxima potência fornecida, deve-se iniciar a inserção da tensão no primário em 0 V e ir aumentando até que a In do transformador seja atingida. É óbvio que há necessidade de instrumentos conectados o tempo todo ao secundário e, principalmente, ao primário do transformador, como veremos na seção de ensaios.

Se tivermos a tensão de curto-circuito e a tensão nominal do primário, podemos calcular a impedância percentual, que é uma relação entre as duas:

$$Z\% = \frac{Ucc}{Up} \times 100$$

- Ucc = tensão de curto-circuito para atingir In no primário
- Up = tensão nominal do primário

Podemos utilizar a impedância percentual para determinar a corrente de curto-circuito do transformador:

$$Icc = \frac{100}{Z\%} \times In$$

In = corrente nominal atingida no ensaio de curto-circuito

1.14 Rendimento do transformador

Rendimento sempre foi uma relação entre resultado e gasto. Em um transformador dimensionamos o rendimento estabelecendo uma relação entre a potência fornecida pelo secundário e a potência absorvida pelo primário para fornecer a potência no secundário.

A equação primária do rendimento, isto é, a 20°C, é apresentada a seguir:

$$Rend = \frac{Ps}{Ps + Pcu + Pfe}$$

Sendo:

- Ps = Potência do secundário
- Pcu = Perdas no cobre
- Pfe = Perdas no ferro

Fique de olho!

A carga no secundário de um transformador pode ser variável com o tempo. As perdas no ferro são praticamente constantes. Já as perdas no cobre dependem da corrente que circula pelo transformador. Dessa forma, o rendimento do transformador com baixo carregamento, isto é, com baixa carga no secundário, tende a ser menor que o rendimento a plena carga. Se o transformador estiver ligado sem carga, há desperdício de energia. Transformador a vazio também aumenta muito a reatância do circuito que o alimenta, prejudicando o fator de potência da instalação.

1.15 Ensaios

Fique de olho!

As atividades seguintes devem ser realizadas sob a orientação e supervisão de um profissional habilitado, seguindo as normas de segurança com relação a equipamentos de proteção individual, como calçados e óculos de proteção, entre outros, e respeitando as normas técnicas e os limites dos equipamentos. Um procedimento altamente profissional é recomendado, pois ao trabalhar com eletricidade, o risco de morte é real e constante.

Instrumentos e equipamentos: megôhmetro, multímetro, voltímetro, amperímetro e wattímetro. A escala dos instrumentos depende do equipamento ensaiado.

Anote os dados de placa do transformador monofásico a ser ensaiado.

1.15.1 Teste de continuidade e isolação do transformador

Objetivo: Verificar se o transformador está em condições de uso e pode ser utilizado para realização dos ensaios elétricos. É necessário o cálculo da resistência de isolação mínima do transformador utilizando a seguinte equação:

$$Risol = Un + 1 \text{ (equação adotada da NBR 5383 - Máquinas Girantes)}$$

Sendo: Risol em MΩ, Un em KV

Fique de olho!

Consulte as normas NBR5356 e NBR10295 para obter equações e tabelas de correção normatizadas para o respectivo transformador ensaiado.

1) Com um megôhmetro meça a resistência de isolação entre os enrolamentos primário e secundário e registre.
2) Meça a resistência de isolação entre o primário e a carcaça e registre.
3) Meça a resistência de isolação entre o secundário e a carcaça e registre.
4) Calcule a resistência de isolação mínima para um transformador de 220 V/110 V e compare com os valores encontrados. Qual a sua avaliação técnica do transformador testado?

1.15.2 Relação de transformação

Objetivo: Determinar a relação de transformação e verificar o funcionamento do transformador. Serão efetuados cálculos aproximados dos valores mecânicos e elétricos do transformador.

1) Anote os dados de placa do transformador.
2) Meça com o ohmímetro a resistência dos enrolamentos e identifique o primário e o secundário.
3) Alimente o primário com baixa tensão e anote a tensão medida no secundário. Qual a relação de transformação?

4) Meça a seção do núcleo de ferro com uma régua e anote.

5) Calcule a potência do primário e do secundário do transformador a partir da seção medida.

6) Calcule a corrente nominal do primário e a corrente nominal do secundário a partir do valor da potência calculada no item 5.

7) Qual a quantidade aproximada de chapas utilizadas no transformador?

8) Com o valor da seção, para uma densidade magnética na chapa de 12.000 gauss, calcule o número de espiras do enrolamento primário.

9) Calcule o número de espiras do enrolamento secundário.

10) Calcule a bitola do condutor utilizado no primário e a bitola do condutor utilizado no secundário.

11) Meça o ângulo de defasagem entre a tensão no primário e a tensão no secundário do transformador com um osciloscópio.

1.15.3 Ensaio a vazio

Objetivo: Determinar as perdas no ferro e obter parâmetros elétricos para a construção do circuito equivalente do transformador real.

Fique de olho!

O ensaio seguinte, devido à complexidade por utilizar muitos instrumentos, tem uma conotação demonstrativa. Ele foi realizado com um determinado transformador e os resultados registrados. Foram efetuados os cálculos e anotados os resultados, portanto repita o ensaio com outro transformador e refaça os passos. Elabore um relatório com os resultados encontrados e suas observações.

Características do transformador utilizado: 220 V/110 + 110 V 2 A 440 VA, Figura 1.8.

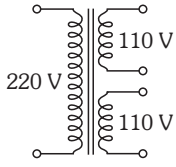


Figura 1.8 - Terminais do transformador.

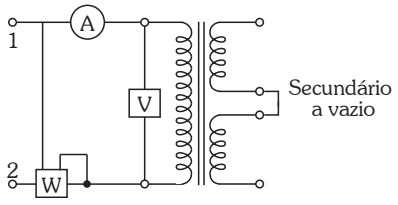


Figura 1.9 - Ligação para ensaio a vazio.

Monte o circuito da Figura 1.9. Preocupe-se em ligar os instrumentos corretamente, principalmente o wattímetro. Com o secundário aberto, a vazio, execute os seguintes procedimentos:

1) Conecte os terminais 1 e 2 a uma fonte CA ajustável.

2) Arrume a fonte CA ajustável para tensão nominal, neste caso 220 V.

3) Meça a potência ativa absorvida com a leitura do wattímeto e registre.

$$Po = 20\ W$$

4) Meça a tensão no primário com a ajuda do voltímetro e registre.

$$Upo = 220\ V$$

5) Meça a corrente no primário com o amperímetro e anote.

$$Ipo = 160\ mA$$

6) Calcule a potência aparente absorvida pelo primário com os valores:

$$So = Uo \times Io = 35{,}2\ VA$$

7) Utilize as equações seguintes para calcular os parâmetros de magnetização do transformador:

$$Cos\varphi = \frac{Po}{Vo \times Io} \qquad IRm = Io \times Cos\varphi \qquad Imag = Io \times Sen\varphi$$

$$Zm = \frac{Vo}{Io} \qquad Rm = \frac{Vo}{IRm} \qquad Xmag = \frac{Vo}{Imag} \qquad Qvar = \frac{Vo^2}{Xmag}$$

» IRm = corrente através da resistência de magnetização do ferro

» Imag = corrente através da reatância de magnetização

Calculando os valores:

$Cos\varphi = 0{,}57$ $\quad$ $Irm = 91{,}2\ mA$ $\quad$ $Imag = 132\ mA$

$Xm = 1666{,}7\ \Omega$ $\quad$ $Rm = 2412{,}3\ \Omega$ $\quad$ $Zm = 1375\ \Omega$

8) Calcule a potência reativa do transformador:

$$Qvar = 29\ VAr$$

1.15.4 Ensaio em curto-circuito

Objetivo: Determinar as perdas no cobre nos enrolamentos primário e secundário pelo ensaio em curto-circuito, Figura 1.10.

Fique de olho!

É possível conectar um amperímetro também no secundário. A tensão inicial no primário deve ser 0 V. Desligue a fonte de tensão no primário antes de posicionar o amperímetro para medir a Icc no secundário.

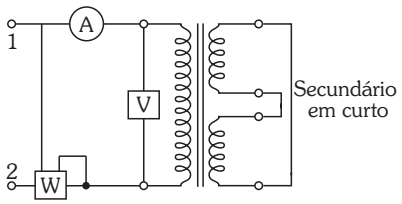


Figura 1.10 - Ligação para ensaio em curto-circuito.

1) Com uma fonte de tensão alternada ajustável, alimente o primário do transformador como na figura. Certifique-se de que a tensão de saída inicial da fonte seja 0 V.

2) Aumente gradativamente a tensão aplicada ao primário através da fonte até que a corrente indicada no amperímetro seja a corrente nominal do transformador.

3) Anote os valores da Pcc, Vccp e In medidos.

$$Pcc = 12\ W \quad Vccp = 12\ V \quad In = 2\ A$$

Fique de olho!

In é a corrente de curto nesta condição.

4) Calcule os dados do circuito equivalente com os valores registrados anteriormente utilizando as equações:

$$Rcc = \frac{Pcc}{Icc^2} \quad Zcc = \frac{Ucc}{Icc} \quad Xcc = \sqrt{Zcc^2 - Rcc^2} \quad Cos\varphi = \frac{Pcc}{Ucc \times Icc}$$

$$Rcc = r1 + r2 \quad r1 = r2 \times \frac{Np}{Ns}$$

Fique de olho!

$\frac{Np}{Ns}$ relação de transformação.

Cálculo: $Rcc = 3\ \Omega \quad Zcc = 6\ \Omega \quad Xcc = 5{,}2\ \Omega \quad Cos\varphi = 0{,}5$

$$r1 = r2 \times \frac{220\ V}{220\ V} \quad r1 = r2 \quad \text{como } Rcc = r1 + r2 \text{ e } r1 = r2 \text{ então} \quad r1 = \frac{Rcc}{2}$$

$$r1 = r2 = 1{,}5\ \Omega$$

O mesmo raciocínio aplicamos para a reatância: $x1 = x2 = \frac{Xcc}{2} = 2{,}6\ \Omega$.

5) Calcule o total de perdas no cobre:

O total das perdas no cobre, a 20°C, pode ser calculado pela equação:

$$Pcu = r1 \times I1^2 + r2 \times I2^2 \quad Pcu = 12\ W$$

Fique de olho!

Considerar I1 e I2 iguais à corrente nominal de curto-circuito no ensaio 2A.

Note que a relação de transformação é de 1:1, isolador, o que facilitou os cálculos.

1) Com os dados encontrados com os cálculos, desenhe o circuito equivalente do transformador com os valores das respectivas resistências e reatâncias anotadas.

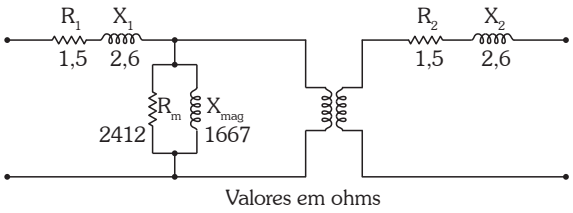


Figura 1.11 - Circuito equivalente real com parâmetros obtidos do ensaio.

2) Observe o cálculo da impedância percentual do transformador e da corrente em um eventual curto-circuito no secundário.

$$Z\% = \frac{Ucc}{Up} \times 100 \quad Icc = \frac{100}{Z\%} \times In$$

$$Z\% = 5{,}45 \quad Icc = 36{,}7\ A$$

3) Cálculo do rendimento da unidade transformadora a 20°C (adotar cosφ = 1 para rendimento máximo):

$$Rend = \frac{Ps}{Ps + Pcu + Pfe} = \frac{440}{440 + 12 + 20} = 0{,}932 \Rightarrow 93\%$$

1.16 Noções de enrolamento de transformadores

Objetivo: Fornecer noções de como é executado o enrolamento amador de transformadores de baixa tensão, os chamados pequenos transformadores.

Fique de olho!

É recomendável que procure uma escola especializada em enrolamento de máquinas, se este for um assunto de seu interesse. Essas escolas possuem professores com longa experiência nesta arte que podem lhe passar algumas técnicas.

Para enrolar um transformador, alguns materiais e ferramentas precisam estar disponíveis e em quantidade suficiente. A lista seguinte traz as ferramentas e materiais básicos que podem ser utilizados no enrolamento de um transformador.

1) FME com as seções calculadas para o primário e secundário em quantidade suficiente. Normalmente para estabelecer essa quantidade, ao desenrolar um transformador queimado, os profissionais pesam o fio magnético descartado para ter uma base de quanto vão gastar.

2) Papel kraft e papel cristal para isolação externa e entre camadas respectivamente.

3) Barbante ou cadarço para enrolamento para travar as terminações das bobinas no carretel.

4) Ferramentas: alicate, canivete, ferro de solda, bobinadeira com conta-voltas.

Para enrolar o transformador, acompanhe os seguintes passos:

a) Primeiramente devemos preparar o carretel para o enrolamento, cobrindo a base interna com papel isolante cinza.

b) Em seguida instalamos o carretel na bobinadeira e preparamos o rolo de fio magnético esmaltado nº 25, para enrolarmos as camadas das bobinas do primário. Deixe uma sobra de fio para realizar as conexões elétricas posteriores com a bobina.

c) Não se esqueça de colocar uma camada de papel isolante mais fino entre as camadas de espiras do primário, aumentando a isolação.

d) Terminado o primário, deixamos uma sobra de fio para ligação externa e cobrimos o primário com papel isolante cinza.

e) Preparamos o rolo de fio nº 19 para enrolarmos o secundário.

f) Novamente é necessário colocar uma camada de papel cristal entre as camadas de fio no secundário.

g) Terminado o secundário, cobrimos com papel kraft, soldamos cabos flexíveis às pontas de FME de saída e entrada do transformador.

h) A última etapa inclui testes mínimos para verificar se seu transformador pode receber tensão e realizar a função a que ele se destina. Para isso realizamos testes como isolação, continuidade, resistência ôhmica das bobinas e ensaio de relação de transformação.

1.17 Micrômetro

Você deve ter notado que a seção dos condutores utilizados para enrolamento de motores e transformadores é dada em fração de milímetro. Para executar medidas nesses condutores e determinar sua seção, utilizamos um instrumento chamado micrômetro. Com o micrômetro podemos medir o diâmetro de finíssimos fios magnéticos esmaltados, consultar a tabela do fabricante e determinar sua seção em AWG.

Existem micrômetros mecânicos e os mais modernos, que são digitais, os quais agilizam extremamente a medição em produção, pois têm o resultado indicado diretamente no display.

Vamos recapitular?

Como qualquer máquina elétrica, o princípio de funcionamento do transformador está baseado na indução magnética (Lei de Faraday). Esta máquina serve para transformar tensão e corrente entre uma bobina de entrada (primário) e uma bobina de saída (secundário). Entre as bobinas existe um núcleo de material magnético que serve para acoplar o fluxo magnético entre elas.

As relações entre tensão e corrente do primário e secundário dependem do número de espiras das respectivas bobinas.

Foi mostrado que a potência fornecida ao transformador no primário é maior que a potência que ele disponibiliza no secundário. Como qualquer máquina, o transformador também tem perdas dentro dele. Existem basicamente dois tipos de perdas. São perdas no ferro, isto é, no núcleo magnético (correntes parasitas e histerese magnética) e no cobre, que são perdas por efeito Joule nas bobinas.

Você também conheceu um método empírico para projetar pequenos transformadores.

Um transformador pode ser representado por meio de um circuito elétrico, conhecido como circuito equivalente do transformador. Os parâmetros desse circuito podem ser obtidos por meio de ensaios em laboratório. O ensaio de curto-circuito permite estimar as perdas no cobre. O ensaio a vazio, também conhecido como de circuito aberto, fornece informações sobre as perdas no ferro. O ensaio de curto-circuito também permite a determinação da impedância percentual do transformador.

Agora é com você!

1) Descreva o funcionamento do transformador.

2) Por que o transformador não funciona se alimentado com tensão contínua?

3) Por que o núcleo dos transformadores não é de ferro maciço?

4) Qual a finalidade dos ensaios a vazio e em curto-circuito?

5) O que influencia a densidade de corrente do fme e qual componente do transformador será afetado por essa escolha?

6) Projete um transformador com as seguintes especificações: potência do secundário = 100 VA, primário = 220 V e secundário 24 V.

7) Repita o projeto desenvolvido no item 1.7, mas considere uma frequência de 180 Hz.

8) No ensaio de um transformador monofásico (220 V/110 V-2A) foram coletados os seguintes dados: Uo = 220 V, Po = 20 W, Io = 160 mA, Ucc = 6,2 V, Icc = 2A e Pcc = 10 W. Determine os parâmetros do circuito equivalente do transformador, o fator de potência em vazio e no ensaio de curto-circuito.

9) Um transformador 220/127 Volts – 1 kVA tem uma carga no secundário de 0,70 kW e apresentou os seguintes resultados nos ensaios:

   - Curto-circuito: P_{CC} = 30 W; Q_{CC} = 15 VAr;
   - Circuito aberto: P_{CA} = 40 W; Q_{CA} = 60 VAr.

   Determine os parâmetros dos circuitos equivalentes aproximados, conforme as Figuras 1.6 e 1.7. Calcule a corrente no primário e o fator de potência para o circuito sem separação das bobinas.

10) Um transformador monofásico de 15 kVA apresentou perdas no cobre iguais as 340 W e perdas no ferro 120 W a plena carga. Considere para a carga uma resistência (FP = 1,0). Calcule o rendimento. Se a carga for de apenas 10% da carga nominal (1,5 kW), estime o rendimento nessa condição.

2

Transformador Trifásico

Para começar

Este capítulo apresenta uma visão geral de transformadores trifásicos. Esse tipo de transformador pode ser analisado como uma associação de três transformadores monofásicos compartilhando um único núcleo de ferro. Toda a modelagem vista no Capítulo 1 pode ser aplicada considerando os parâmetros de uma única fase do transformador.

São apresentados os aspectos construtivos básicos e tipos de ligações mais comuns desse tipo de transformador. Você vai perceber que a questão da polaridade das bobinas do transformador é muito importante.

A prática em laboratório é considerada como uma atividade essencial para a familiarização com as ligações dos transformadores trifásicos. Para isso são propostas experiências com o objetivo de complementar o aprendizado.

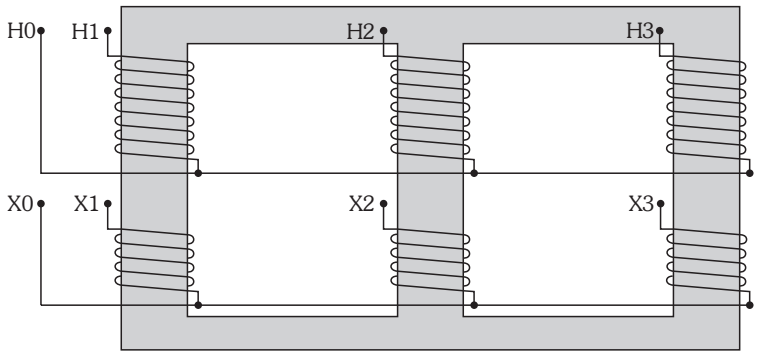
2.1 Visão geral

Largamente empregado na indústria e em sistemas de distribuição, o transformador trifásico merece um capítulo especial. Vamos estudar os aspectos construtivos mais importantes, polarização do transformador, ligações e aplicações.

2.2 Aspectos construtivos

Os transformadores trifásicos podem ser vistos como um conjunto de três transformadores monofásicos, Figura 2.1. Temos então três primários e ao menos três secundários que devem trabalhar

juntos. Para trabalharem juntos, existem alguns cuidados a serem tomados e observações a serem feitas, e a partir destas podemos estabelecer padrões de ligação para o transformador trifásico e chamá-los de ligação estrela, ligação triângulo etc.



Três enrolamentos primários e três secundários, cada qual em uma coluna do núcleo do transformador. Os terminais do primário foram identificados com a letra H (alta tensão), o secundário com a letra X (baixa tensão).

Figura 2.1- Representação básica do transformador trifásico.

Sendo o transformador trifásico um conjunto de três transformadores monofásicos, inseridos no mesmo núcleo de ferro, é correto presumir que esses transformadores deveriam ter as mesmas características construtivas, número de espiras, seção dos condutores, potência e principalmente a impedância percentual, que deve ser igual para os três. Em conjunto eles formam um único transformador trifásico.

Para calcular a potência de uma unidade trifásica formada por três transformadores de potência nominal Sn, utilizamos a seguinte equação:

$$Sn3F = 3 \cdot Sn$$

Um transformador trifásico pode apresentar-se de diversas formas, Figura 2.2, mas sempre teremos o cuidado de dissipar, de alguma maneira, o calor desenvolvido pelo equipamento em trabalho. Para dissipação de calor em transformadores de grande e médio portes, geralmente o enrolamento permanece mergulhado em óleo isolante que está em contato com as aletas externas, melhorando a dissipação de calor. Transformadores menores têm seus enrolamentos em contato com o ar, que é suficiente para dissipar o calor gerado.

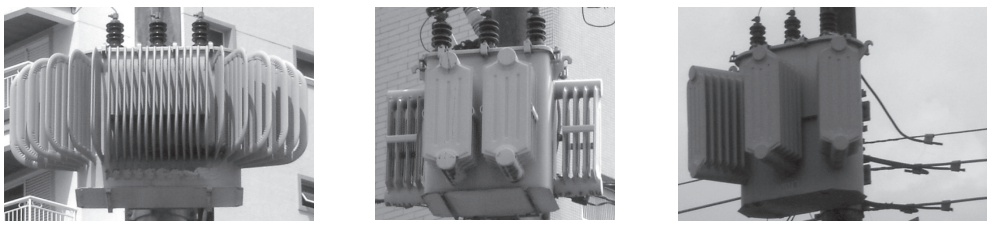


Figura 2.2 - Transformadores trifásicos de distribuição.

Normalmente os transformadores trifásicos possuem uma caixa de ligações ou bornes em que podemos efetuar as conexões e ligações. Para identificar os terminais do primário, é utilizada a letra H seguida do número do terminal e para identificar os terminais secundários, é utilizada a letra X, também seguida do número do terminal. Em transformadores de alta e média tensões, os bornes de ligação são sustentados por isoladores que os mantêm a uma distância adequada da carcaça do transformador.

Fique de olho!

Transformadores que você vê nos postes da rede elétrica, como os da Figura 2.2, são denominados transformadores de distribuição. São transformadores para redução da média tensão de distribuição (primário) para baixa tensão de distribuição (secundário) para atendimento de várias pequenas unidades consumidoras. Esses transformadores ficam expostos ao tempo, sujeitos a "sol e chuva". Transformadores que desempenham a mesma função em grandes unidades consumidoras de energia, como indústrias e grandes estabelecimentos de comércio e serviços, ficam abrigados no interior de edificações, nas cabines primárias. Eles costumam ser denominados transformadores de força.

2.3 Classes de proteção

É importante salientar que, além das características elétricas, os transformadores devem ser projetados ou escolhidos de acordo com uma classe de proteção. O que vem a ser classe de proteção? As características de trabalho do transformador são importantíssimas, mas de igual importância é o ambiente em que esse transformador vai desenvolver esse trabalho e as proteções operacionais que deve possuir.

Para mensurar essas características temos as classes de proteção indicadas pelo índice de proteção IP, que é construído com dois algarismos, o primeiro da Tabela 2.1 e o segundo da Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Graus de proteção contra a penetração de objetos sólidos estranhos indicados pelo primeiro numeral característico

Numeral	Descrição sucinta do grau de proteção
0	Não protegido
1	Protegido contra objetos sólidos de Ø 50 mm e mais
2	Protegido contra objetos sólidos de Ø 12 mm e mais
3	Protegido contra objetos sólidos de Ø 2,5 mm e mais
4	Protegido contra objetos sólidos de Ø 1,0 mm e mais
5	Protegido contra poeira
6	Totalmente protegido contra poeira

Tabela 2.2 - Graus de proteção contra a penetração de água indicados pelo segundo numeral característico

Numeral	Descrição sucinta do grau de proteção
0	Não protegido
1	Protegido contra gotas d'água caindo verticalmente
2	Protegido contra queda de gotas d'água caindo verticalmente com invólucro inclinado até 15°
3	Protegido contra aspersão de água
4	Protegido contra projeção de água
5	Protegido contra jatos de água
6	Protegido contra jatos potentes de água
7	Protegido contra efeitos de imersão temporária em água
8	Protegido contra efeitos de imersão contínua em água

2.4 Transformadores trifásicos em paralelo

Existem situações, geralmente em sistemas de potência para fornecimento de energia, em que são associados dois ou mais transformadores em paralelo, para aumentar a potência fornecida. Para que isso seja possível, é necessário que os projetistas, técnicos e engenheiros tenham um profundo conhecimento de máquinas elétricas e de sistemas de potência.

Algumas regras devem ser seguidas. Para associarmos dois transformadores em paralelo, eles devem ter a mesma impedância percentual e a mesma defasagem angular. Quando duas fases R de dois transformadores não têm a mesma defasagem angular, há uma diferença de potencial entre elas e isso ocasiona um curto-circuito. Se dois transformadores possuem impedâncias percentuais diferentes, um enxerga o outro como carga e há desperdício de potência.

2.5 Grupos de transformadores

Os dois grupos mais conhecidos de transformadores são o A e o B. A defasagem angular do transformador determina a que grupo ele pertence. Os transformadores do grupo A possuem defasagem angular 0° e os do grupo B possuem defasagem angular 30°.

Como visto anteriormente, não podemos ligar transformadores com defasagens angulares diferentes em paralelo, portanto não podemos ligar transformadores de grupos diferentes em paralelo. A defasagem depende de como foi enrolado o transformador e do tipo de ligação do primário e do secundário. O fabricante determina as ligações para o transformador de acordo com o grupo.

Além das defasagens de 0° e 30°, são encontrados no mercado transformadores com defasagem angular de 180° e 210°.

2.6 Polarização do transformador

Polarizar o transformador é organizar todas as suas bobinas, tanto as do primário quanto do secundário, de forma que elas tenham polaridade definida e conhecida, evitando que, ao executarmos uma ligação, haja inversão de polaridade não planejada, o que provocaria subtração de tensão entre as bobinas. Existem algumas formas conhecidas de executarmos a polarização de um transformador. A primeira delas é conhecida como golpe indutivo e a outra como polarização em CA. As diferenças entre os dois métodos de polarização estão na complexidade de execução do método, necessidades de instrumentos incomuns e risco de descargas na execução do ensaio.

O golpe indutivo é o método mais simples e rápido de polarizar um transformador e é aplicado separadamente em cada um dos três enrolamentos que formam o transformador trifásico. Se o secundário tiver mais de um enrolamento, esse ensaio deve ser executado para cada um dos enrolamentos do secundário. O golpe indutivo consiste em aplicar uma tensão CC no primário e observar a resposta em um galvanômetro conectado no secundário. O mesmo padrão de resposta deve ser considerado para os três enrolamentos que são marcados de acordo com esta resposta.

A polarização em CA é mais complexa e trabalhosa, mas exige menos instrumentos e recursos de bancada, bastando uma fonte CA ajustável para sua realização. Deve-se ter extremo cuidado, pois trabalhamos

com o transformador energizado a maior parte do tempo. Esse método consiste em alimentar um dos enrolamentos com tensão reduzida e ligar os outros enrolamentos em série até que tenhamos a soma das tensões de cada enrolamento. A cada etapa marcamos os terminais dos enrolamentos já polarizados.

Felizmente, os transformadores vêm de fábrica com todos os enrolamentos organizados e com polaridade definida. Os terminais são marcados e basta seguir as orientações do fabricante para efetuar a ligação desejada. Apenas em situações especiais, fábricas, ensaios e em transformadores sem identificação, realiza-se a polarização do transformador.

Para auxiliá-lo no ensaio que está por vir, vamos fazer algumas reflexões teóricas com relação à polaridade, que é a base do ensaio por golpe indutivo. Consideremos o transformador monofásico das Figuras 2.3 e 2.4:

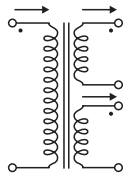


Figura 2.3 - Bobinas do transformador.

Os pequenos pontos nos enrolamentos indicam a polaridade do enrolamento. Um transformador com a polaridade indicada reagiria como na figura, se aplicada uma corrente no sentido indicado. Supondo que esse transformador tivesse um primário com Un = 110 V e as bobinas do secundário com Un = 55 V cada, poderíamos obter vários níveis de tensão a partir de uma fonte 110 V. Exemplo: 55 V, 110 V e 220.

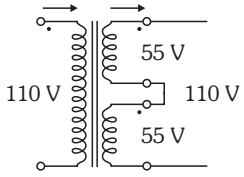


Figura 2.4 - Bobinas do secundário em série.

Para obter 110 volts, é relativamente simples. Basta seguir os sinais de polaridade das bobinas do primário e ligar a entrada de uma na saída da outra. Considerando o lado marcado como a entrada da bobina ou lado "positivo", igualmente simples é perceber quando ligamos erradamente o secundário, pois se ligarmos entrada com entrada, teremos 0 V de tensão resultante.

Até agora pode não ser novidade, mas como fazer para obter 220 V de um transformador 110/55+55 V?

Se observada a montagem de um transformador, percebe-se que temos enrolamentos de primário e de secundário compartilhando um mesmo núcleo magnético. Pelo desenho notamos que estão em posição oposta, portanto, para conseguir 220 V, é preciso associar os potenciais dos dois enrolamentos.

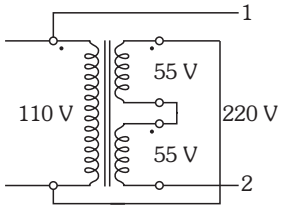


Figura 2.5 - Secundário constituído por três bobinas em série.

Observe a ligação para conseguirmos 220 V nos terminais do transformador. As colunas de tensão do primário e do secundário foram somadas de maneira a obter o nível de tensão desejado. Na prática obteríamos a soma das duas colunas ou a subtração delas (leitura próxima de zero). Se a marcação de polaridade foi feita sem inversão (0º), conectando saída do primário (sem ponto) com entrada do secundário (ponto), temos 220 V entre os terminais 1 e 2.

Este raciocínio é usado constantemente na polarização e identificação dos terminais do transformador.

2.7 Ensaios físico-químicos

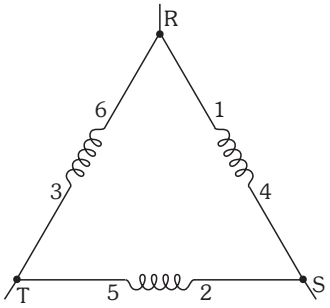
Os transformadores imersos em óleo isolante passam periodicamente por ensaios incomuns para os estudantes de máquinas elétricas, que são os ensaios físico-químicos. Com certa frequência a rigidez dielétrica do óleo isolante deve ser testada, pois esse óleo tem um tempo de vida útil. O teste geralmente é executado por empresas especializadas em testes de laboratório em que são verificadas as condições do óleo isolante para determinar uma possível troca.

Normalmente as empresas retiram uma amostra do óleo por um dreno, com o transformador desligado, e enviam para análise. De acordo com os resultados, o óleo deve ou não ser substituído.

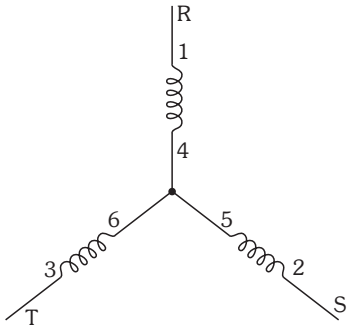
2.8 Ligações em transformadores trifásicos

Os transformadores trifásicos possuem enrolamentos primário e secundário preparados para serem ligados de acordo com o esquema de ligações fornecido pelo fabricante. Os esquemas de ligações do fabricante geralmente trazem a identificação dos terminais de alta e baixa tensões com as letras H e X, respectivamente, mas além disso, as bobinas componentes das fases são identificadas com a numeração normalizada. Para fase R:(1;4),(7;10); fase S:(2;5),(8;11); fase T:(3;6),(9;12).

Para reequilibrar as correntes desequilibradas no secundário, os transformadores trifásicos de distribuição têm o enrolamento primário conectado em triângulo. De acordo com a defasagem angular, o fabricante recomenda um grupo de ligações para o transformador. Nos esquemas seguintes temos uma ligação típica, triângulo/estrela, para transformadores do grupo B.



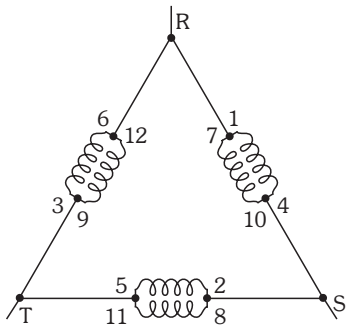
Triângulo 6 terminais



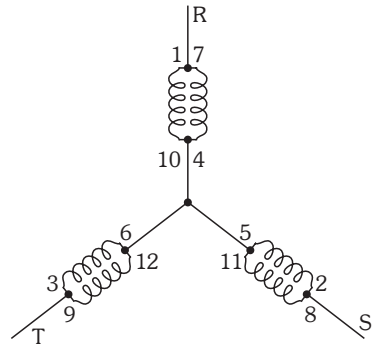
Estrela 6 terminais

Figura 2.6 - Esquemas de ligações estrela e triângulo com seis terminais.

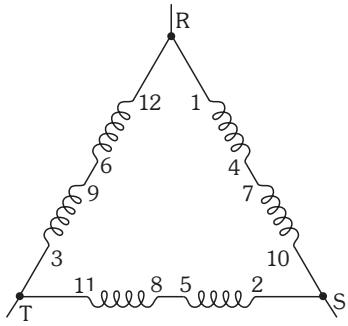
As ligações devem ser efetuadas de acordo com os padrões de ligação e respeitar a numeração nos terminais das bobinas. Seguem os esquemas de ligação para transformadores com mais de seis terminais:



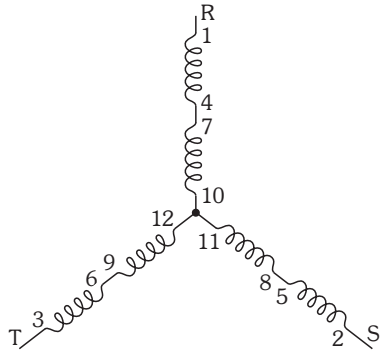
Duplo triângulo 12 terminais



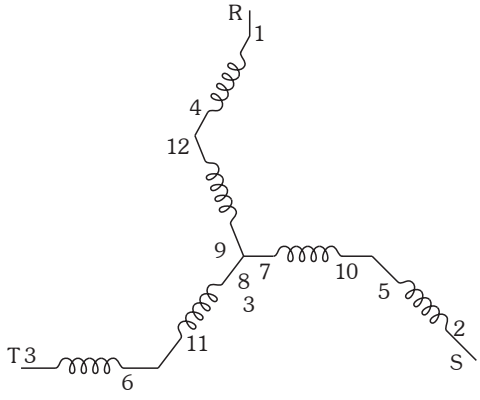
Dupla estrela 12 terminais



Triângulo 12 terminais



Estrela 12 terminais



Ligação zigue-zague 12 terminais

Figura 2.7 - Esquema de ligações estrela, triângulo e zigue-zague com 12 terminais.

Amplie seus conhecimentos

Transformadores trifásicos de média/baixa tensão geralmente possuem “taps” no primário que permitem a variação do número de espiras mediante comutação. Por exemplo, transformadores da classe 15 kV podem ser alimentados no primário com tensões de 13,8 kV; 13,2 kV; 12,6 kV; 12,0 kV ou 11,4 kV, enquanto no secundário a tensão nominal é de 220 V/127 V. Para manter a tensão constante no secundário, o número de espiras do primário deve ser comutado de acordo com a tensão de alimentação do primário.

2.9 Execução de medidas em transformadores trifásicos

Qualquer máquina elétrica industrial, antes de ser conectada à rede de energia, deve passar primeiramente por um teste de isolação elétrica. O transformador não é diferente e devemos executar o teste medindo a isolação entre bobinas e entre bobinas e carcaça. Deve-se também verificar a continuidade das bobinas e sua resistência ôhmica, procurando anomalias ou diferenças entre enrolamentos.

Se passar pela fase de testes de isolação e resistência, em ensaios de laboratório, devemos testar o transformador para todas as possibilidades de ligação indicadas pelo fabricante. Na atividade industrial, após ensaios de isolação, testa-se o transformador no futuro ambiente de trabalho, ligando-o conforme a necessidade e para as condições previstas.

Isolação mínima a 75°C de transformadores trifásicos a óleo:

$$R_{iSOL} = \frac{2{,}65 \cdot U}{\sqrt{\frac{kVA}{F}}}$$

Sendo:

- R em MΩ
- U em kV
- F em Hz

Uma consulta à NBR 5356 deve ser realizada para obtenção dos fatores de ajuste de temperatura e para detalhes na determinação da resistência de isolação de transformadores a óleo e a seco.

2.10 Ensaio: transformador trifásico

Fique de olho!

Este ensaio deve ser executado sob a supervisão de um profissional experiente e habilitado, pois os riscos estão presentes. Se você já é um profissional habilitado, deve entender o que tentamos esclarecer e tomar todas as medidas preventivas necessárias para redução de risco, evitando acidentes.

2.10.1 Ensaio de polarização por tensão CA

Objetivo: Organizar as bobinas do transformador trifásico de modo que possam ser executadas as ligações previstas, mantendo o equilíbrio entre as tensões e correntes do primário e do secundário, em que acontecem as respostas de tensões desejadas. Novamente este ensaio é um exemplo de aplicação, devendo o aluno tomá-lo como base para seu ensaio e reflexões. Anote seus resultados; não copie os do livro.

Dados iniciais: Para polarização por tensão CA, o único dado de que necessitamos é a tensão nominal de cada bobina no primário. Sabendo que a tensão de alimentação do primário para ligação triângulo é de 220 V, podemos concluir que cada bobina primária suporta no máximo 220 V. A relação de transformação individual das colunas do transformador em teste é aproximadamente 3/1 (1V no secundário para cada 3 V aplicado à bobina do primário).

Fórmula para o ensaio: $UL = UF \times \sqrt{3}$

As Figuras 2.8 e 2.9 mostram, respectivamente, o transformador experimental e o esquema elétrico do transformador depois da polarização. Note que após a polarização temos todos os enrolamentos com sentido marcado por ponto e números nos terminais.

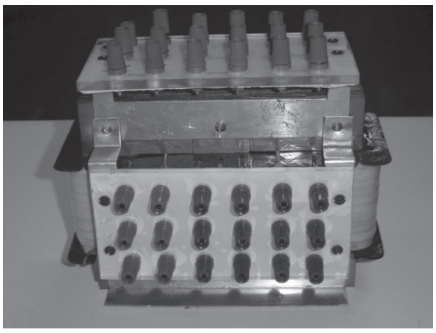


Figura 2.8 - Transformador experimental.

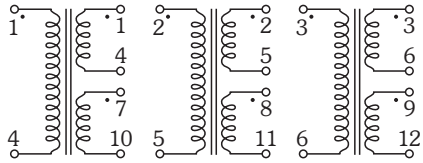


Figura 2.9 - Esquema elétrico do transformador.

1) Desenhe a vista frontal dos bornes de ligação do transformador trifásico, Figura 2.10. Com o auxílio de um multímetro, identifique todas as bobinas do enrolamento primário e as do enrolamento secundário e marque no desenho. Anote o valor da resistência ôhmica das bobinas. No exemplo foram encontradas uma bobina secundária e três bobinas primárias. Registre todas as etapas de identificação e, se for necessário, faça vários desenhos como na Figura 2.10.

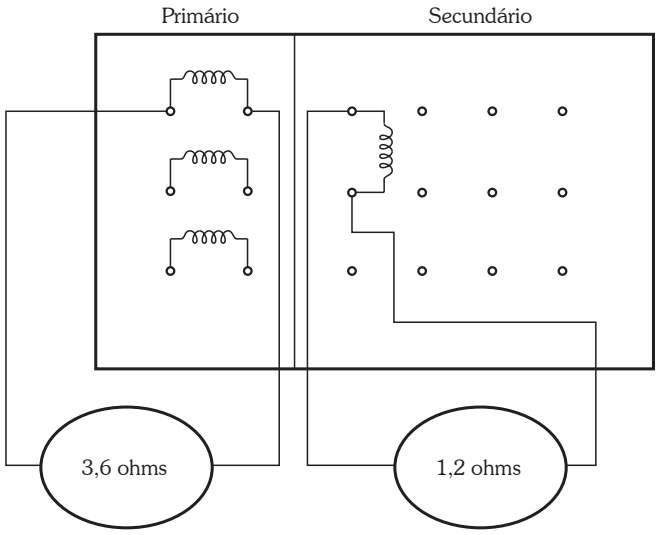


Figura 2.10 - Identificação de bobinas.

No exemplo observamos a medição e a identificação de algumas bobinas do primário e do secundário. As bobinas do lado de maior tensão têm maior resistência. Como a resistência das bobinas é muito baixa, podemos esperar erros de medição, portanto o valor medido aproxima-se do real. O transformador ensaiado tem relação 220 V/36+36 V.

2) Se não for possível saber quais são as bobinas do enrolamento central, coluna 2, você precisa fazer esse teste antes de continuar. Alimente um dos enrolamentos primários com tensão aproximada de 60 V (30% de 220 V). Meça a tensão nas seis bobinas do secundário. Se o enrolamento primário energizado for o enrolamento central, as tensões medidas terão a seguinte configuração:

- Bobina 1:8,9 V
- Bobina 2:9 V
- Bobina 3:9 V
- Bobina 4:18 V
- Bobina 5:8,9 V
- Bobina 6:18 V

Temos duas bobinas com valores iguais e superiores ao valor das outras quatro bobinas que também são aproximadamente iguais. Isso configura que alimentamos o enrolamento primário central e o fluxo magnético variável atinge primeiro o secundário central, por isso a maior tensão é encontrada nas bobinas do secundário desse enrolamento.

O fluxo variável atinge as outras colunas com a mesma intensidade, pois elas têm praticamente a mesma distância do centro, por isso os valores são iguais nas outras bobinas. O mesmo procedimento pode ser utilizado para achar as bobinas das colunas direita e esquerda. Se alimentar o primário dessas colunas com 60 V, encontram-se 18 V apenas no secundário das bobinas das respectivas colunas. Apenas tenha o cuidado de alimentar e testar uma coluna de cada vez.

Organizando:

» Bobinas da coluna 2 central: bobinas 4 e 6 ⇒ 18 V

» Bobinas da coluna 3 direita: bobinas 2 e 3 ⇒ 9 V

» Bobinas da coluna 1 esquerda: bobinas 1 e 5 ⇒ 8,9 V

Fique de olho!

Considere o núcleo da figura ao lado. A bobina primária na coluna central produz um fluxo que se divide igualmente entre as duas colunas da extremidade. Portanto, o fluxo nessas colunas será metade do fluxo na coluna central. Uma bobina secundária na coluna central terá uma tensão induzida duas vezes maior que a tensão induzida numa bobina localizada nas colunas externas.

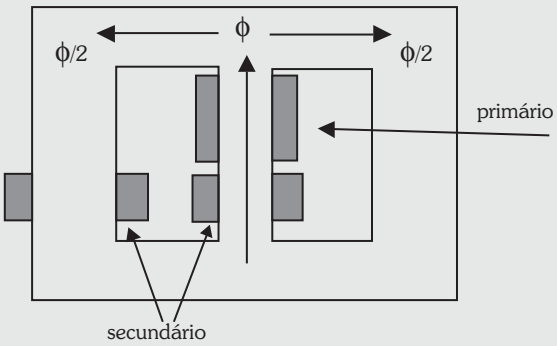


Figura 2.11 - Divisão do fluxo no núcleo do transformador.

3) Com o auxílio dos desenhos faça as conexões entre os enrolamentos primários das colunas 2 e 3 do seu transformador, conforme a Figura 2.12. Alimente o primário da coluna 1 à esquerda com uma tensão equivalente a 30% da tensão nominal.

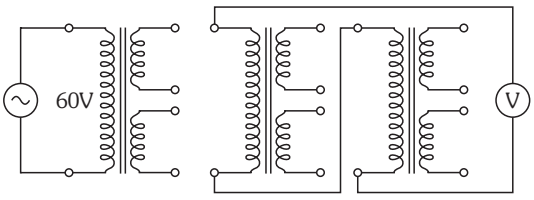


Figura 2.12 - Esquema de ligações do ensaio.

Conecte um voltímetro entre as bobinas das colunas 2 e 3. Se a polaridade estiver correta, o valor da tensão medida deve ser próximo à tensão aplicada. Se o valor medido for muito menor, inverta as pontas da terceira coluna e refaça a medição.

Vaplicada = 60 V

Vmedida = 60 V

4) Se a tensão medida ficou próxima da tensão aplicada, então marque os enrolamentos conforme a Figura 2.13.

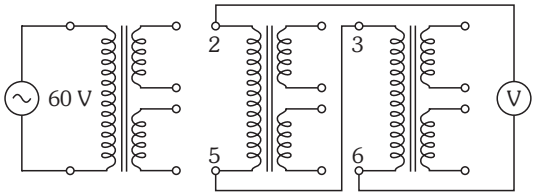


Figura 2.13 - Numeração dos terminais.

As colunas seguem a numeração padrão para as bobinas das fases, considerando coluna 2 - fase 2, coluna 3 - fase 3. Lembre-se de que é um exemplo. No seu caso uma das pontas do voltímetro estará conectada ao 2 (entrada da coluna 2) e a outra ao 6 (saída da coluna 3).

5) O mesmo procedimento deve ser seguido com relação ao enrolamento da coluna 1. Conforme a Figura 2.14, alimente o enrolamento da coluna 3 com tensão de 30% da tensão nominal e meça a tensão entre os enrolamentos das colunas 1 e 2.

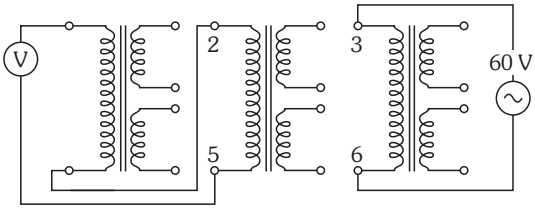


Figura 2.14 - Esquema de ligações.

Ligue os enrolamentos dos primários das colunas 1 e 2 conforme o desenho. A tensão no voltímetro deve estar próxima da tensão indicada. Se for muito menor, inverta as bobinas da coluna 1. Anote o valor da tensão medida:

$$Vmedida = 60\ V$$

6) Se a tensão medida ficou próxima da tensão aplicada, então marque os enrolamentos conforme a Figura 2.15.

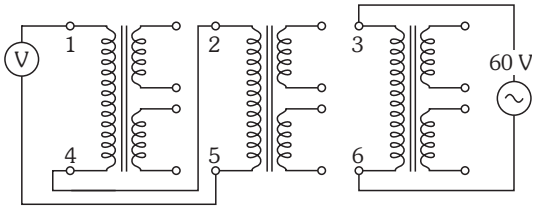


Figura 2.15 - Numeração dos terminais.

O enrolamento primário está todo identificado com a numeração das bobinas de acordo com as fases. Execute o teste 6.a para ter certeza de que está tudo corretamente polarizado no primário antes de passarmos ao secundário.

a) Para ter certeza de que o primário está polarizado e numerado corretamente, feche-o em estrela, com o secundário sem ligação nenhuma. Aplique 220 V trifásico no primário e meça as tensões de fase e de linha. Se o primário estiver corretamente polarizado e numerado, a relação das tensões deve ser a seguinte:

» UF = 127 V das três fases para o neutro

» UL = 220 V entre as três fases

Se algo estiver errado, isto é, alguma bobina estiver invertida (S, por exemplo), você encontra as seguintes tensões de fase e de linha:

$$UF_R = 190\ V,\ UF_S = 318\ V,\ UF_T = 190\ V$$

Nota-se 1,5xUF em duas fases e 2,5xUF na fase invertida. Quando uma fase está invertida no primário, é assim que as tensões se apresentam. Na linha temos:

$$U_RS = 220\ V,\ U_ST = 220\ V,\ U_RT = 220\ V$$

Se a maior tensão se apresenta na fase S, a bobina invertida é a da fase S. Reverta a bobina da fase e normalize a situação.

Registre nos desenhos a mudança.

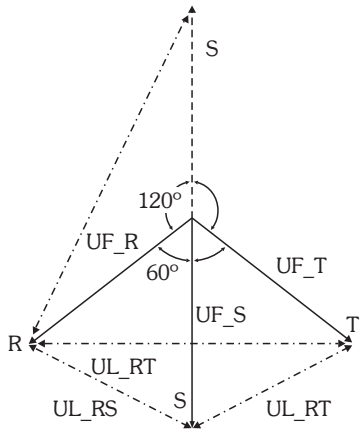


Figura 2.16 - Diagrama das tensões.

Como o primário está ligado à fonte, é difícil enxergar a soma das tensões de fase (que deveria ser zero) com uma fase invertida.

Do ponto de vista do secundário, fica mais fácil entender o que ocorre quando há uma fase invertida.

Se estiverem corretamente polarizadas, as três fases aplicadas ficam 120° defasadas entre si. Como a fase S está invertida, a defasagem entre R e S, S e T fica menor, 60°. Consequentemente, a tensão de linha entre essa fase é menor.

7) Alimente o enrolamento central, com tensão reduzida, como na Figura 2.17:

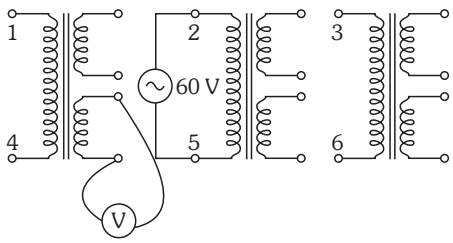


Figura 2.17 - Medição da tensão.

Meça a tensão em cada uma das bobinas do secundário, com o enrolamento primário da coluna central alimentado com tensão reduzida, e anote os valores no formato:

- *Coluna 1*
- *Bobina secundária 1: 8,9 Volts*
- *Bobina secundária 2: 8,9 Volts*
- *Coluna 2*
- *Bobina secundária 1: 18 Volts*
- *Bobina secundária 2: 18 Volts*
- *Coluna 3*
- *Bobina secundária 1: 9 Volts*
- *Bobina secundária 2: 9 Volts*

8) Ligue as bobinas do secundário em série, conforme a Figura 2.18, e meça a tensão no secundário de cada coluna.

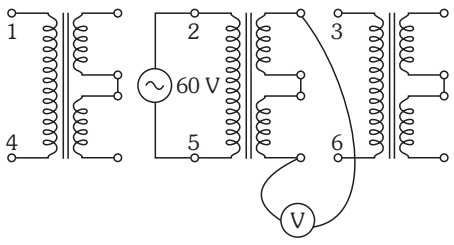


Figura 2.18 - Medição da tensão.

A tensão indicada no voltímetro deve ser superior às tensões individuais das bobinas. Se isso não ocorrer, inverta a ligação das bobinas, ligue entrada com entrada ou saída com saída e meça novamente. Anote o valor medido.

$$Coluna\ 1 \Rightarrow Vmed = 17\ V$$

9) Repita o procedimento anterior para as bobinas do secundário das colunas 2 e 3, anotando os valores encontrados.

   » Coluna 2 ⇒ Vmed = 36 V

   » Coluna 3 ⇒ Vmed = 18,3 V

10) Ligue em série os conjuntos de bobinas do secundário da primeira e segunda colunas de acordo com a Figura 2.19.

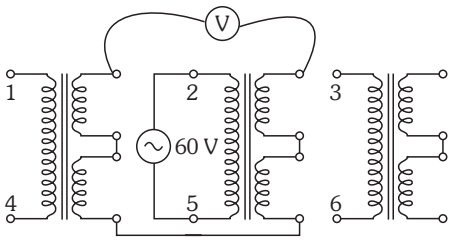


Figura 2.19 - Medição da tensão.

Meça a tensão nas extremidades das colunas conforme indicado. A tensão indicada deve ser próxima da soma das tensões medidas nos secundários das colunas separadamente. Se não for, inverta a ligação entre as colunas.

Anote o valor da tensão medida.

Vmedida = 53 V

Fique de olho!

Nesse momento numere as pontas dos secundários, tendo em mente que, como estamos interligando colunas, devemos ligar saída com saída, pois há defasagem de 120° de uma coluna para a outra.

11) Interligue as colunas 1 e 2 já polarizadas com a coluna 3, como demonstra a Figura 2.20.

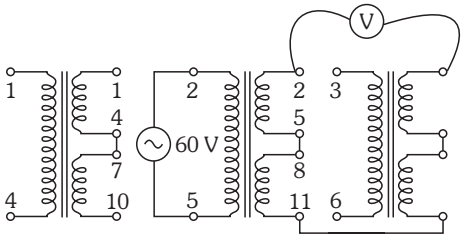


Figura 2.20 - Medição da tensão.

Meça a tensão entre as colunas 2 e 3, conforme a figura ao lado. Obviamente o resultado deve aproximar-se da soma das tensões individuais das duas colunas. Se houver uma diferença significativa, inverta os terminais do conjunto da coluna 3.

Anote o valor da tensão medida.

Vmedida = 54,3 V

12) Numere os enrolamentos em sequência de acordo com o resultado obtido e como exemplificado na Figura 2.21.

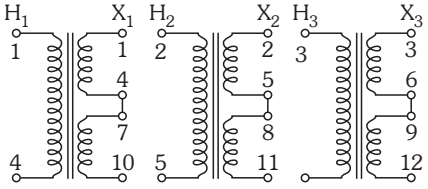


Figura 2.21- Indicação final dos terminais.

Após marcadas todas as bobinas com os respectivos números, é hora de testar os esquemas de ligações para o transformador. Não se esqueça de que, após realizada a ligação no primário, os terminais passarão a ser identificados como H1, H2 e H3. O secundário como X1, X2 e X3.

Para verificar se está tudo ligado corretamente, utilize a ligação estrela 12 pontas para o secundário, ligue o primário em estrela e alimente com 220 V. Meça as tensões de fase e de linha no secundário.

Se houver diferenças, proceda como exemplificado no item 6, Figura 2.16, aplicando ao secundário. Os resultados dos testes no secundário podem ser vistos a seguir:

$$UF_R = 72\ V,\ UF_S = 72\ V,\ UF_T = 72\ V$$

$$U_RS = 124\ V,\ U_ST = 124\ V,\ U_RT = 124\ V$$

Fique de olho!

Para transformadores de distribuição ou de força, ligados em Δ/Y, reserva-se o terminal X0 para o neutro. Esse ponto deve ser aterrado.

2.10.2 Testar ligações e relações de transformação

Objetivo: Verificar as possibilidades de ligações para o transformador trifásico disponível. Anotar todos os valores de tensão de fase e de linha possíveis.

Fique de olho!

Sempre que for realizar alteração nas ligações do transformador, desligue a alimentação. Mantenha o transformador energizado apenas enquanto estiver realizando medições.

1) Teste cada um dos esquemas de ligação, anote a tensão de linha medida para as ligações triângulo e as tensões de linha e de fase para as ligações estrela no secundário.

Tabela 2.3 - Medição de tensões no secundário (primário em Δ)

Primário	Δ	Δ	Δ	Δ
Secundário	Y	YY	Δ	ZZ
Tensões de linha e de fase medidas nas fases R, S e T respectivamente em volts	UL = 220 UF = 127 UL = 220 UF = 127 UL = 220 UF = 127	UL = 111 UF = 63 UL = 111V UF = 63V UL = 111 UF = 63	UL = 127 UF = 127/63 UL = 127 UF = 127/63 UL = 127 UF = 127/63	UL = 190 UF = 111/64 UL = 190 UF = 111/64 UL = 190 UF = 111/64

Tabela 2.4 - Medição de tensões no secundário (primário em Y)

Primário	Y	Y	Y	Y	Y
Secundário	Δ	ΔΔ	YY	ZZ	Y
Tensões de linha e de fase medidas nas fases R, S e T respectivamente em volts	UL = 74 UF = 74/37 UL = 74 UF = 74/37 UL = 74 UF = 74/37	UL = 36 UF = 36 UL = 36 UF = 36 UL = 36 UF = 36	UL = 63 UF = 36 UL = 63 UF = 36 UL = 63 UF = 36	UL = 111 UF = 62/37 UL = 111 UF = 62/37 UL = 111 UF = 62/37	UL = 128 UF = 74 UL = 128 UF = 74 UL = 128 UF = 74

2) Construa duas tabelas semelhantes às anteriores e anote os valores calculados para as ligações. Utilize a relação de transformação encontrada e considere para ligação triângulo UF = UL e

para ligação estrela $UL = UF \times \sqrt{3}$. Para ligação ZZ considerar $UL = UF \times \sqrt{3}$ nas extremidades e $UL = UF \times 3$ no joelho. Compare seus cálculos com os valores medidos.

2.10.3 Ensaio de polarização por golpe indutivo

Objetivo: Determinar a polaridade das bobinas do transformador através de golpe indutivo aplicado no lado de tensão mais alta.

Fique de olho!

O golpe indutivo deve ser aplicado do lado de alta para o lado de baixa tensão. Desobedecida esta regra, o risco de descarga elétrica é altíssimo.

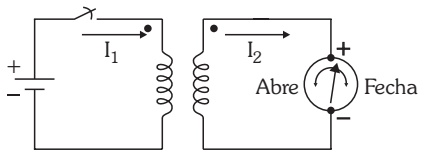


Figura 2.22 - Esquema elétrico para ensaio por golpe indutivo.

O ensaio de polaridade por golpe indutivo é mais simples de ser realizado, mas exige um instrumento não convencional para indicar o sentido da corrente do golpe, o galvanômetro. Além disso, são necessários uma fonte de corrente contínua e um botão de pulso em série para comandar o pulso de tensão aplicado no primário.

O galvanômetro deve suportar o golpe refletido no secundário e o pulso de tensão deve ser aplicado sempre no enrolamento de tensão mais alta com tensão contínua calculada. O procedimento desse ensaio é ligar o positivo da bateria a determinado terminal do enrolamento e marcar esse terminal com um ponto (como na figura anterior).

Aplicado o golpe, o sentido da corrente refletida no galvanômetro deve ser positivo e o mesmo para todos os enrolamentos do lado de tensão mais baixa, sendo marcado com ponto também.

2.11 Banco de transformadores monofásicos

Aplicando os conhecimentos adquiridos, é possível montar uma unidade transformadora trifásica com três transformadores monofásicos. O aspecto geral da montagem fica como representado na Figura 2.23.

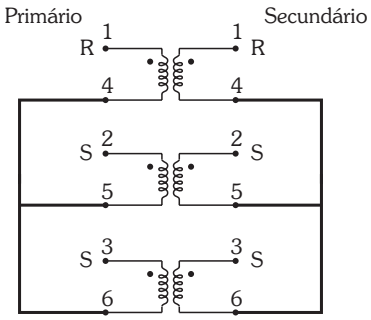


Figura 2.23 - Banco de transformadores monofásicos.

Temos três transformadores monofásicos com polaridades iguais trabalhando juntos em um sistema trifásico. O primário e o secundário foram fechados em estrela no exemplo.

Se houver disponibilidade de três transformadores monofásicos com relação de transformação, impedância percentual e defasagem angular semelhantes, é possível realizar o experimento. No exemplo citado temos três transformadores monofásicos 220/127 V fechados em estrela e ligados a uma rede de 380 V. Na saída temos uma rede trifásica de 220 V com tensão de fase 127 V.

Vamos recapitular?

Os transformadores trifásicos podem ser considerados como três transformadores monofásicos idênticos acoplados por um mesmo núcleo magnético. As bobinas do primário e do secundário desses três transformadores podem ser ligadas em estrela ou triângulo para obtenção de um transformador trifásico.

Para a correta ligação das bobinas do transformador é preciso estar atento à polaridade delas. No item 2.6. foi discutido como se determina essa polaridade.

Também foi apresentado um roteiro de laboratório bastante detalhado para identificação da polarização e para a correta ligação das bobinas de transformadores trifásicos.

Agora é com você!

1) Cite algumas aplicações do transformador trifásico.
2) Utilize as tabelas de classe de proteção e defina que tipo de proteção possui um transformador com IP 62.
3) Para que serve o óleo no transformador?
4) Quais os testes de rotina que devem ser realizados em um transformador trifásico?
5) Descreva brevemente o ensaio de polarização por CA.
6) Qual o valor da tensão de fase no secundário de um transformador fechado em estrela se medirmos 127 V de tensão de linha no secundário?
7) Quais as condições para que seja possível ligar dois transformadores trifásicos em paralelo?
8) Descreva o ensaio por golpe indutivo.
9) Um transformador trifásico 13,8 kV/220 V está ligado em Δ/Y e tem capacidade nominal de 75 kVA (máxima potência aparente no secundário). Calcule a corrente de linha no secundário. Estime a corrente no primário admitindo perdas totais de 3%.
10) Qual é a relação de espiras N_P/N_S para o caso do exercício anterior?
11) Considere que existam 22 espiras no secundário do transformador do exercício anterior. Qual seria o número de espiras do primário?
12) Se a tensão de alimentação do primário do exercício 1 fosse de 11, 4 kV, qual seria o número de espiras necessárias no primário para manter a tensão no secundário igual a 220 V?

3

Outros Transformadores

Para começar

Neste capítulo são apresentados alguns tipos particulares de transformadores para instalações elétricas. Geralmente são transformadores para realização de funções especiais. Embora tenham aplicações bastante específicas, possuem os mesmos princípios do transformador monofásico visto no Capítulo 1.

Inicialmente são apresentados os autotransformadores de bobinas fixas, comutáveis e ajustáveis.

Em seguida se oferece uma visão geral sobre transformadores de potencial, chamados de TPs, e os de corrente, conhecidos como TCs. A função dos TPs e TCs é reduzir a tensão e a corrente para que elas possam ser medidas por instrumentos convencionais ou para acionamento de dispositivos de proteção e controle.

Por fim, você aprenderá sobre uma importante característica dos transformadores em geral, que é a regulação de tensão. Um roteiro de medição dessa característica em laboratório é desenvolvido para transformadores de isolação.

3.1 Autotransformador

Para reduzir custos ou em situações específicas, pode-se optar pela utilização ou construção de um autotransformador. Ele não difere muito de um transformador monofásico no que diz respeito ao ferromagnético desse equipamento. A grande diferença e, consequentemente, o segredo está no sistema de bobinas. No autotransformador não há mais primário e secundário como dois enrolamentos distintos, na verdade temos apenas um enrolamento que serve como primário e como secundário ao mesmo tempo, Figura 3.1.

Com isso se esperam menos perdas no cobre e consequente aumento no rendimento. O aspecto comercial de um autotransformador para uso domiciliar pode ser visto na Figura 3.2.

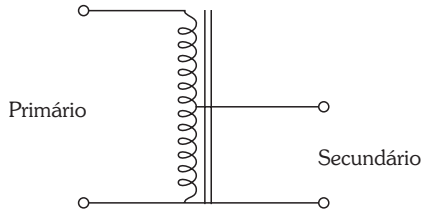


Figura 3.1 - Esquema de um autotransformador.



Figura 3.2 - Ilustração de um autotransformador.

Obviamente há uma economia, já que não temos mais dois enrolamentos, mas tudo tem um preço. Perdemos a isolação elétrica entre entrada e saída, pois o mesmo caminho elétrico que constitui a entrada constitui a saída. Outro fator importantíssimo que deve ser levado em consideração antes da opção por um autotransformador é a potência do equipamento.

Pode-se observar que não circula a mesma corrente nas duas seções do enrolamento; por exemplo, um autotransformador de 210 V/70 V fornece uma corrente de 10 A para uma determinada carga com 70 V através do secundário, então temos 700 VA e 10 A fornecidos à carga. Se há uma carga de 700 VA, o primário deve garantir esses 700 VA; a 210 V temos uma corrente fornecida de 3,33 A.

Faça as contas:

$$3{,}33\ \text{A} \times 210\ \text{V} = 700\ \text{VA}$$

$$10\ \text{A} \times 70\ \text{A} = 700\ \text{VA}$$

Parte da corrente da carga é gerada por indução no segmento secundário não vem da rede diretamente. Condutores são escolhidos primeiramente em função da corrente, portanto o condutor para o autotransformador deverá suportar no mínimo 6,66 A.

A corrente fornecida percorre o segmento do enrolamento superior primário, descendo, encontrando-se com os 6,66 A produzidos por indução no segmento do secundário e suprindo a necessidade da carga. Passando pela carga, esse total de 10 A retorna a fonte pelo fio comum da forma apresentada na Figura 3.3.

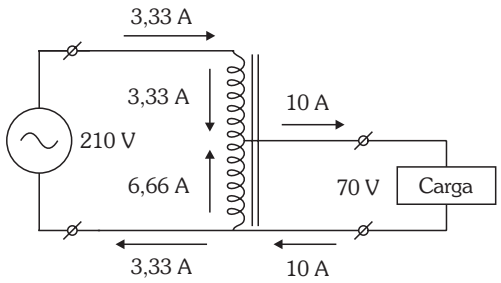


Figura 3.3 - Correntes e tensões no autotransformador.

Em outro exemplo, se desejamos uma potência de 300 VA na saída, a entrada deve suprir a futura demanda. Portanto, para um transformador de 300 VA/110 V no primário e 48 V no secundário, temos Iprimária = 2,73 A. Para o secundário, de mesma potência, desconsiderando perdas, temos uma corrente Isecundário = 300 VA/48 V = 6,25 A.

Conclusão: Se fabricarmos o autotransformador com o condutor dimensionado segundo a corrente primária, ocorrem perdas enormes, aquecimento e possível queima (S = 48 V × 2,73 A = 131,4 VA) se ultrapassada a potência máxima com esse condutor, o que não é raro de ser observado em transformadores e autotransformadores de procedência duvidosa.

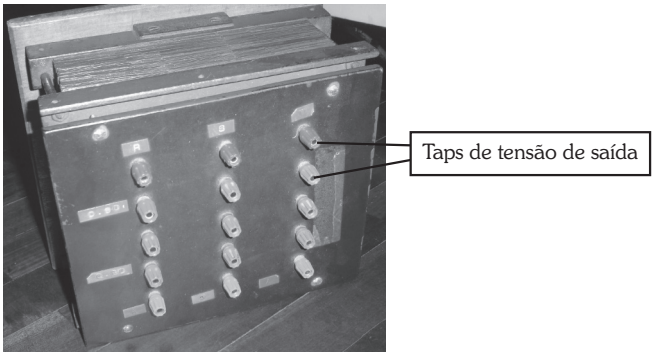


Figura 3.4 - Taps de saída de um autotransformador experimental.

A aplicação de autotransformadores é indicada quando não há necessidade de isolação elétrica entre primário e secundário e a redução de tensão não ultrapassa 50% da tensão primária, como, por exemplo, o autotransformador trifásico para sistemas de compensação de partida de motores (chave compensadora), que possui taps de 50%, 65% e 85% da tensão de entrada, Figura 3.4.

Existem situações em que encontramos a filosofia do autotransformador aplicada em outros dispositivos. Em aplicações CC em que se deseja uma elevada tensão CC de saída a partir de pulsos de entrada, pode-se utilizar autotransformadores desenhados e projetados para esse fim. Exemplos: bobinas de ignição, flybacks etc.

3.2 Autotransformador ajustável

Em equipamentos industriais, em que existe uma fonte de CA ajustável, é comum encontrar como elemento ativo dessa fonte um simples autotransformador ajustável. Como dito anteriormente, uma razão forte para isso é a economia, outra a simplicidade de um autotransformador ajustável, Figura 3.5. Normalmente, por questão física do equipamento, o enrolamento é bobinado sobre um núcleo em forma de toroide.

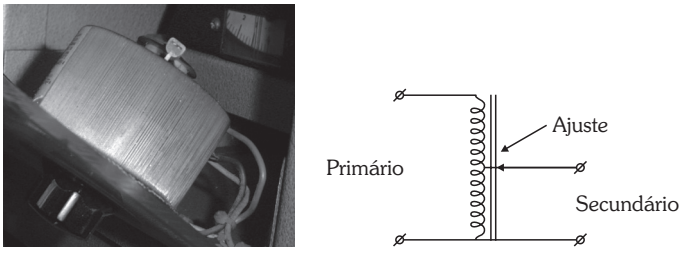


Figura 3.5 - Autotransformador ajustável.

Aproveita-se o mesmo enrolamento primário como secundário, mas desta vez a saída funciona selecionando o número de espiras necessárias para produzir determinada tensão na saída do transformador. Em laboratórios encontramos autotransformadores ajustáveis que operam em

equipamentos como o VARIAC. Um ponto importante e que mesmo em equipamentos comercializados não se leva em consideração é que o fusível de proteção nesses equipamentos, por ser indutivo, não deveria ser de ação rápida.

3.3 Transformador de potencial

As aplicações para transformadores são muitas, mas em alguns casos esses equipamentos têm papel tão importante em uma aplicação que recebem um sobrenome. O transformador de potencial, Figura 3.6, por exemplo, é utilizado em sistemas de proteção para sistemas de potência.

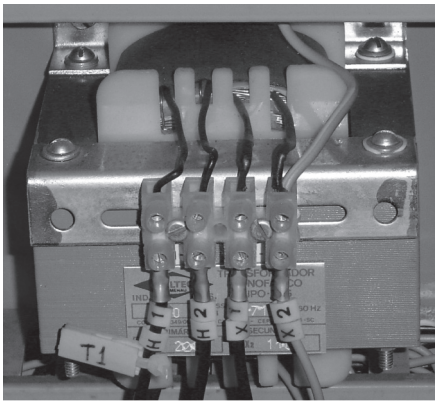


Figura 3.6 - Ilustração de um transformador de potencial (TP).

Suponhamos um sistema de potência em 13,8 KV que necessite de sinalização de nível de tensão na porta do seu painel de comando. É óbvio que não podemos instalar um voltímetro de painel que meça diretamente os 13,8 KV. O transformador de potencial, neste caso, participa do sistema de medição, abaixando o nível de tensão para ser aplicado ao voltímetro. O voltímetro possui escala de 0 a 13,8 KV proporcional à baixa tensão aplicada.

O transformador de potencial também pode ser usado para acionar as bobinas de gatilho de disjuntores de alta tensão, pois seria inviável comandá-las em alta tensão, sendo aplicados em sistemas de proteção.

3.4 Transformador de corrente

O transformador de corrente também é um equipamento de extrema importância em sistemas de potência. Assim como o transformador de potencial, podemos encontrar transformadores de corrente para medição, Figura 3.7, e para proteção, Figura 3.8. Sua aplicação pode ser deduzida da necessidade de indicação da corrente de linha em um sistema cuja corrente instantânea é 2000 A.

Como podemos ter essa indicação de corrente em um painel de comando? É neste caso que entra o transformador de corrente. Com relação de 2.000 A para 5 A temos uma corrente reduzida em sua saída, mas equivalente à corrente real medida. Existem outras relações de transformação. Para ter acesso a elas consulte os diversos fabricantes de TCs presentes no mercado.

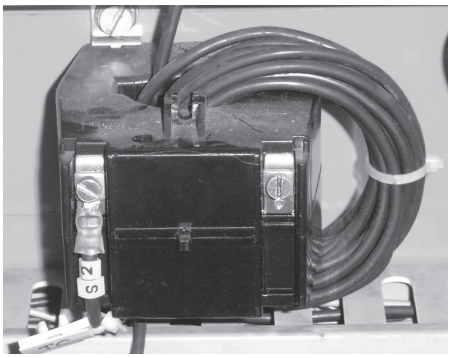


Figura 3.7 - TC para medição.

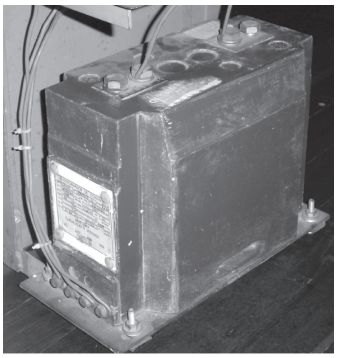


Figura 3.8 - TC para proteção.

Há uma diferença entre os transformadores de corrente para medição e os transformadores de corrente para proteção, principalmente no aspecto construtivo. Primeiramente veremos a máxima corrente de secundário em regime permanente, que deve ser igual à nominal descrita no manual do transformador, por exemplo, 5 A. Em regime transitório, isto é, em situações em que a corrente ultrapassa a nominal por algum tempo, deve-se consultar o fabricante a respeito do tempo que o transformador pode suportar uma determinada sobrecorrente.

Em transformadores para proteção, a tensão de isolação do TC é maior e a corrente transitória suportada mais ampla. Os manuais de fabricante geralmente vêm com todas as especificações necessárias ao projeto e é possível notar isso.

Alguns aspectos importantes com relação ao TC só são entendidos com uma pequena análise matemática do dispositivo. A Figura 3.9 mostra o modelo matemático do TC.

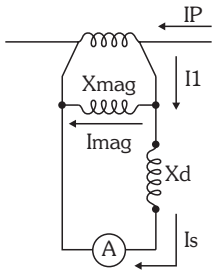


Figura 3.9 - Esquema de um TC.

Sendo:

- IP = corrente primária
- I1 = corrente secundária total
- Is = corrente secundária
- Xmag = reatância de magnetização
- Xd = reatância do amperímetro
- E = tensão nos terminais do TC

Supondo um TC com relação 500/5 A, instalado em um sistema com Ip = 500 A e corrente secundária = 5 A, temos a seguinte situação: I1 = 5 A, E = 10 V, Imag = 0,1 A, Is = 4,9 A, lido no amperímetro.

Calculando, temos:

$$Xt = Xd \,//\, Xmag = E / Is = 2{,}04\ \Omega$$

Se o transformador de corrente for aberto, isto é, o amperímetro for retirado dos terminais de medição, a tensão nesses terminais sobe consideravelmente, pois a reatância de magnetização, que é alta, é o único caminho para a corrente de 5 A:

$$Xt = Xmag$$

Aplicando essa corrente à curva de magnetização do TC, Figura 3.10, temos uma tensão de 800 V. O TC pode não resistir a essa tensão e haverá uma ruptura dielétrica.

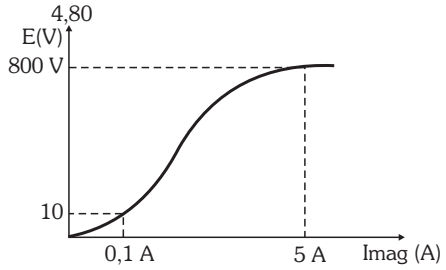


Figura 3.10 - Curva de magnetização do TC.

Observe a tensão nos terminais do TC de acordo com a corrente de magnetização. Fica claro que essa corrente deve ser mantida baixa, portanto nada de abrir os terminais do TC enquanto ele trabalha. A curva de magnetização é fornecida pelo fabricante.

A instalação correta de um instrumento de medição de corrente eventual ligado a um TC pode ser observada na Figura 3.11.

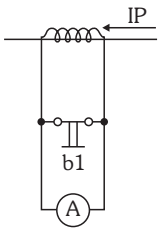


Figura 3.11- Esquema de um TC de medição.

Sendo b1 um botão de leitura que, ao ser pressionado, permite que a corrente do secundário do TC chegue ao amperímetro, possibilitando a leitura. Para instrumentos que realizam medidas constantes, deve-se ligar o amperímetro direto ao TC, com o cuidado de realizar a conexão com o sistema desligado. Se não for possível, feche os terminais do TC em curto, conecte o amperímetro e então retire o curto.

Amplie seus conhecimentos

O amperímetro de alicate é um tipo de TC. Transformadores para instrumentos de medição requerem grande precisão entre as grandezas do primário e secundário.

3.5 Ensaio: regulação de tensão em transformadores

Objetivo: Estudar o comportamento da tensão de saída do transformador com o aumento de corrente para os três principais tipos de carga: resistiva, indutiva e capacitiva.

Equipamentos utilizados: transformador isolador 120/120 V, fonte CA ajustável de 0 a 220 VCA, conjunto de capacitores, conjunto de indutores e conjunto de resistências, todos com reatância equivalente às indicadas nas tabelas de ensaio e dissipação de potência adequada. São necessários dois amperímetros CA e dois voltímetros CA que façam a leitura dos níveis de tensão utilizados com segurança.

Fique de olho!

Transformador de isolação tem relação de tensão 1:1. Ele serve para promover a isolação galvânica entre a rede e a carga. São aplicados em equipamentos e instalações sensíveis ou críticas, aumentando a segurança contra sobretensões e contra faltas para terra. Protege contra choques elétricos.

Fique de olho!

Podem ser utilizados outros transformadores com valores diferentes e reatâncias também diferentes como carga. Apenas refaça as tabelas e os gráficos de acordo com seus equipamentos. A análise final deve levá-lo às mesmas conclusões.

Procedimentos

1) Monte o circuito representado na Figura 3.12. Mantenha a fonte CA desligada.

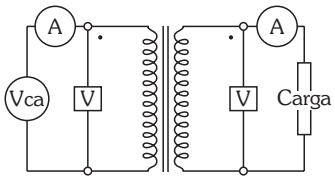


Figura 3.12 - Esquema de ligação para o ensaio.

2) Monte inicialmente a tabela para cargas puramente resistivas, Tabela 3.1. Com o secundário aberto, sem carga, ligue a fonte e ajuste-a para 120 VCA. Anote os valores lidos no voltímetro, no amperímetro do secundário e no amperímetro do primário na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Medições para cargas resistivas

ZL (ohms)	I primário (mA)	I secundário (mA)	V secundário (V)
Sem carga	20	0	120
1200	100	100	119
600	200	190	117
400	290	285	115
300	395	380	112,5
240	480	475	110

Desligue a fonte, aplique a carga de 1200 Ω, religue a fonte, execute as medições e preencha a tabela como foi feito na Tabela 3.1. Repita o procedimento para os outros valores de impedância de carga constantes na tabela. Ao terminar, desligue a fonte.

3) Construa um gráfico que expresse a variação de corrente e tensão no secundário em função da carga puramente resistiva aplicada.

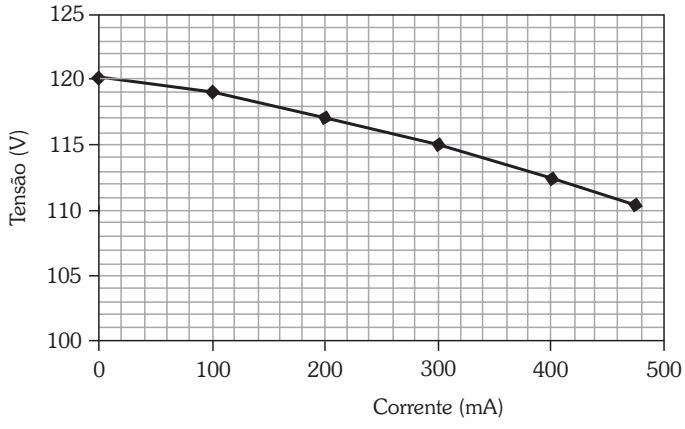


Figura 3.13 - Curva de regulação para cargas resistivas.

4) Repita os procedimentos dos itens 2 e 3, agora para cargas indutivas, e preencha a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Medições para cargas indutivas

ZL (ohms)	I primário (mA)	I secundário (mA)	V secundário (V)
Sem carga	20	0	120
1200	105	100	118
600	202	197	115
400	300	290	112
300	375	370	110
240	460	450	108

5) Construa um gráfico que expresse a variação de corrente e tensão no secundário em função da carga indutiva aplicada.

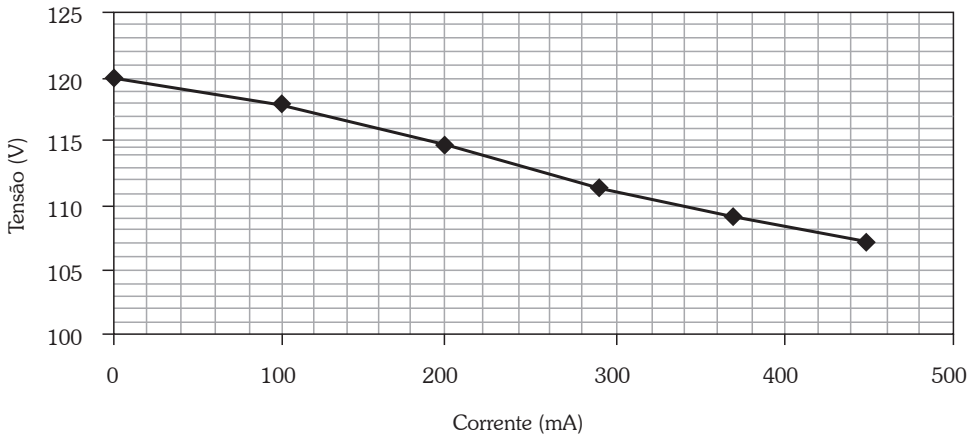


Figura 3.14 - Curva de regulação para cargas indutivas.

6) Repita os procedimentos constantes nos itens 2 e 3, agora para cargas capacitivas, e preencha a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Medições para cargas capacitivas

ZL (ohms)	I primário (mA)	I secundário (mA)	V secundário (V)
Sem carga	20	0	120
1200	105	100	122
600	202	230	125
400	300	330	127
300	375	445	130
240	460	530	132

7) Construa um gráfico que expresse a variação de corrente e tensão no secundário em função da carga capacitiva aplicada.

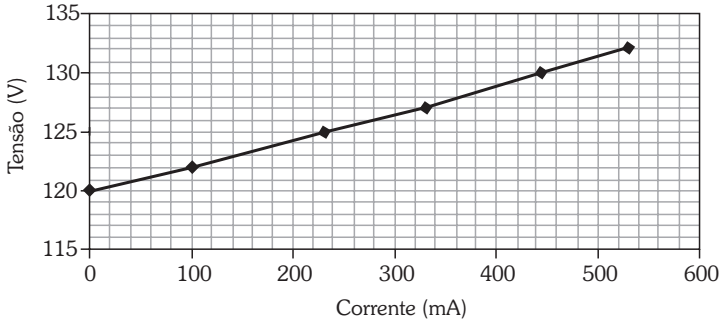


Figura 3.15 - Curva de regulação para cargas capacitivas.

8) Analise os dados obtidos e os gráficos construídos e responda às questões a seguir com relação ao ensaio:

a) Calcule a regulação de tensão em % do transformador para cada tipo de carga, utilizando os dados do ensaio com carga puramente resistiva, puramente indutiva e puramente capacitiva. Utilize a fórmula:

$$R\% = \frac{UsaídaSC - UsaídaCC}{UsaídaCC} \times 100$$

Sendo:

» UsaídaSC = tensão de saída sem carga

» UsaídaCC = tensão de saída com carga

b) Por que a tensão na carga elevou-se com a elevação da impedância da carga capacitiva?

c) Pense bem! Se tivermos as mesmas condições de carga em potência (VA) para carga resistiva, indutiva e capacitiva, qual desses tipos de carga produziria menos aquecimento do transformador? Por quê?

Vamos recapitular?

O autotransformador utiliza uma única bobina como primário e secundário. Em geral, existe uma derivação da bobina para alimentação do secundário. Por meio de comutação é possível alterar a relação de espiras de forma discreta. Também existem autotransformadores que permitem um ajuste contínuo da relação de espiras. Este tipo de transformador pode ser mais compacto e mais econômico que um transformador monofásico convencional. Sua desvantagem reside na menor capacidade de isolamento elétrico entre primário e secundário. Ele é mais aplicado para baixas potências.

Você também aprendeu sobre transformadores utilizados para medição de grandes intensidades de tensão e corrente. Os TPs e TCs são apropriados para alimentação de voltímetros e amperímetros, respectivamente. Eles também servem para fornecer baixa tensão e corrente para dispositivos de proteção e controle. Esses valores são proporcionais aos presentes no primário. Foram destacados os cuidados necessários para evitar danos nos TCs.

No final do capítulo foi apresentada uma importante característica elétrica dos transformadores, ou seja, a regulação de tensão. Essa característica indica o comportamento da tensão de saída com a variação da carga.

Agora é com você!

1) Quais as vantagens e desvantagens de um transformador comum com relação a um autotransformador?

2) Cite um exemplo de aplicação de autotransformador ajustável.

3) O que é transformador de potencial e qual a sua aplicação?

4) Qual a aplicabilidade de um transformador de corrente?

5) Quais as diferenças entre transformadores de corrente para medição e transformadores de corrente para proteção?

6) Por que não podemos deixar o secundário aberto em um transformador de corrente?

7) Descreva o procedimento básico para troca ou instalação de amperímetro ligado a um TC com o sistema energizado e com o sistema desenergizado.

8) Monte um experimento, ao menos teórico, para levantar a curva de magnetização de um TC.

9) TCs para medição em sistemas de potência costumam ser projetados para corrente máxima do secundário de 1 A ou 5 A. Considere um TC 1000/5, isto é, corrente máxima no primário de 1000 A e no secundário de 5 A. Qual seria a corrente no secundário se a corrente no primário fosse de 600 A?

10) Um TP para medição de tensão em cabine primária apresenta uma relação entre as tensões de primário e secundário de 13.800/220 V. Qual seria a tensão no secundário para uma tensão no primário de 11.400 V?

4

Motor CC

Para começar

Neste capítulo você terá um primeiro contato com motores alimentados por corrente contínua, ou simplesmente, motores CC. Motores transformam energia elétrica em mecânica para acionamento de cargas. Serão apresentados o princípio de funcionamento, os aspectos construtivos básicos e suas aplicações principais.

Os motores CC podem se apresentar com diferentes tipos de configurações. As características eletromecânicas do motor, isto é, o seu comportamento, depende do tipo de configuração.

Por meio de ensaios em laboratório você vai aprender sobre esses comportamentos.

4.1 Visão geral

O motor de corrente contínua não deveria ser um mistério para ninguém, pois quase todos, conscientemente ou não, manipulavam um brinquedo quando criança, cuja força motora era exemplo desses motores. Quando nos referimos a um motor, levamos em consideração o seu tipo de alimentação. Obviamente, os motores CC são alimentados por corrente contínua. Essa tensão aplicada ao motor tem por finalidade energizar os enrolamentos no motor, produzindo polos eletromagnéticos que formam a força magnetomotriz.

Há alguns anos pesquisadores e cientistas da área de engenharia elétrica desenvolvem equipamentos e novos motores que podem, em muitos casos, substituir os motores de CC. Em outras situações, ainda é compensadora a utilização desse tipo de máquina. A principal aplicação do

motor CC está ligada ao controle de velocidade com necessidade crítica de torque, isto é, motores de corrente contínua são excelentes escolhas quando necessitamos manter um torque considerável, mesmo variando a velocidade.

Atualmente é possível variar a velocidade de motores CA com inversores de frequência, mas em algumas situações esse tipo de conjunto simplesmente não atende às condições de torque exigidas e traz outros problemas, como a poluição da rede, que talvez o futuro resolva.

Podemos encontrar motores CC ao abrir e fechar vidros, partir motores, no metrô, em trólebus, enfim, em uma infinidade de aplicações.

4.2 Princípio de funcionamento

Para demonstrar o princípio de funcionamento do motor CC, vamos reduzi-lo a três componentes básicos, que são bobina, campo magnético fixo e comutador, Figura 4.1.

Podemos apontar quatro estágios fundamentais para analisar o funcionamento do motor CC. Além disso, vamos utilizar uma variante da regra dos três dedos da mão direita, a regra da mão direita para motores, Figura 4.2, para determinar o sentido de rotação do motor.

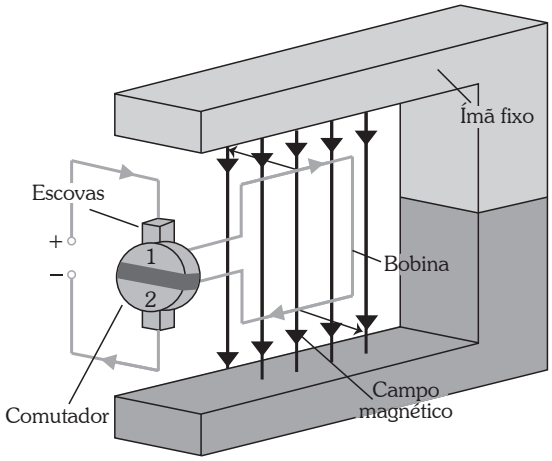


Figura 4.1 - Primeiro estágio.

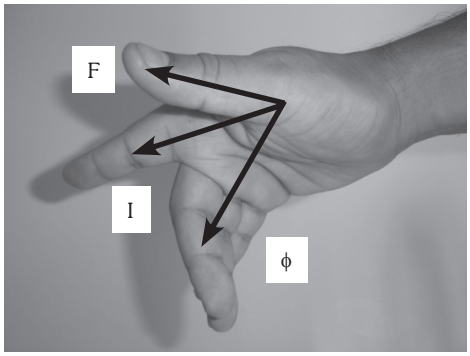
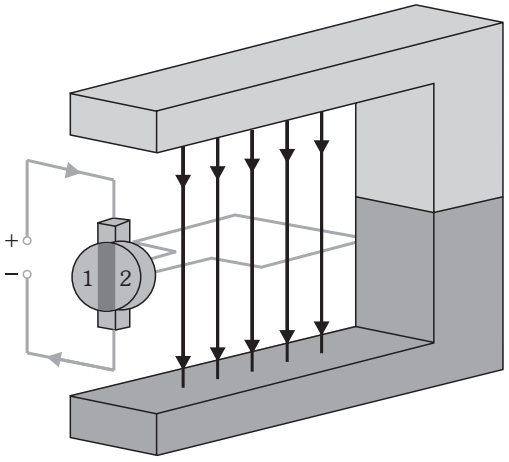


Figura 4.2 - Regra da mão direita para motores.

O polegar indica o sentido da força, o indicador o sentido da corrente e o restante o sentido do campo.

1) No primeiro estágio temos a bobina de uma espira posicionada paralelamente ao campo, totalmente atingida pelo campo magnético criado pelo ímã fixo. A bobina está sendo alimentada pelo comutador com polaridade mostrada. Sabemos que pelas leis do eletromagnetismo, essa espira percorrida por uma corrente elétrica produz outro campo magnético em torno da espira que causa uma reação da bobina dentro das linhas de força do campo fixo, determinada pela regra da mão direita para motores. O dedo indicador aponta o sentido da corrente, o polegar a direção do movimento e os dedos restantes o sentido do fluxo.

2) No segundo estágio a bobina girou no sentido determinado e está em uma posição em que é pouco atingida pelas linhas de força, portanto não há reação entre o campo fixo e o da bobina, mas esta continua a girar por ação da força anterior, até atingir o próximo estágio.



A bobina girou no sentido indicado pelo polegar, de acordo com a regra da mão direita. Observe a marcação no comutador (1,2). No segundo estágio a bobina sofre pouca ação do campo, mas passa para o próximo estágio por conta da ação anterior.

Figura 4.3 - Segundo estágio.

3) No terceiro estágio há uma inversão da posição da bobina, mas neste caso é que entrou o comutador. Sua função é manter a corrente circulando sempre em um sentido. Se você observar, o comutador inverteu as pontas da bobina, fazendo com que o polo positivo fosse aplicado na extremidade superior, como no estágio 1. Com isso temos uma repetição do estágio 1, em que a corrente aplicada à bobina cria um campo magnético ao seu redor que age com o campo magnético fixo, produzindo uma ação física da bobina na direção indicada pelo polegar.

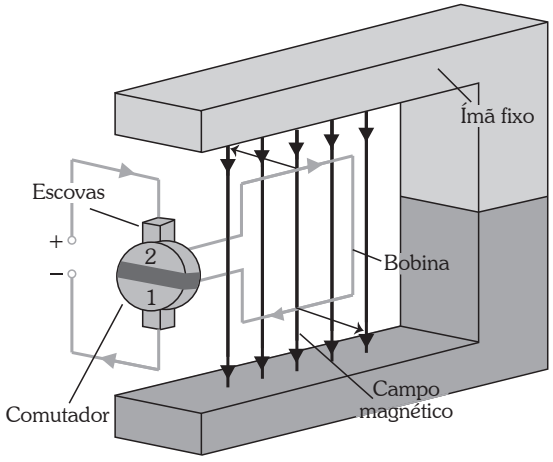


Figura 4.4 - Terceiro estágio.

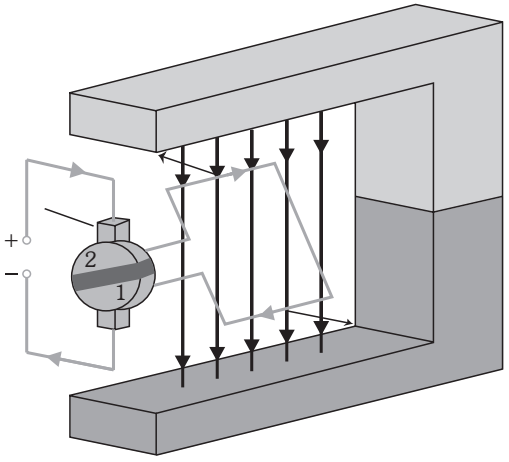


Figura 4.5 - Quarto estágio.

4) No quarto estágio temos uma posição intermediária em que a bobina está inclinada com relação ao campo em um ângulo de aproximadamente 30°. Esse estágio serve para comentarmos a ação contínua sofrida pela bobina com a interação dos campos. Essa ação tem seu máximo no estágio 1 ou 3, e até que atinja o estágio 2, tem sua força reduzida conforme o aumento do ângulo, sendo 0 no estágio 2. O motor passa do estágio 2 ao 3, ou do 2 ao 1, pois a força produzida no estágio 1 ou 3 é suficiente para que ele tenha um deslocamento maior que 90°.

Este é o funcionamento, descrito de forma simples, para os motores de corrente contínua de um modo genérico. Mais à frente vai notar que não é tão simples assim, mas é uma base estruturada para aplicar nos desafios que vão surgir, pois teremos de lidar com termos mais técnicos e fenômenos um pouco mais complexos, como a força contra-eletromotriz (FCEM).

4.3 Aspectos construtivos

Os motores de corrente contínua, em termos de manutenção e peças, são bastante complexos. Eles exigem conhecimento, habilidade e um programa de manutenção eficiente. Sua aplicação em sistemas de controle de velocidade em que o torque é um item importantíssimo, em alguns casos, ainda não encontrou substituto tão eficiente, como o caso de pontes rolantes em indústrias siderúrgicas. A eficiência tem um preço. Os sistemas eletrônicos de controle de velocidade e o próprio motor CC devem ter um plano de manutenção específico, pois o desgaste de algumas peças pertencentes ao motor e a saturação de alguns componentes eletrônicos são evidentes e proporcionais à utilização dos sistemas.

A melhor maneira de conhecer as partes componentes de uma máquina CC é visualizando-as, Figuras 4.6 e 4.7.

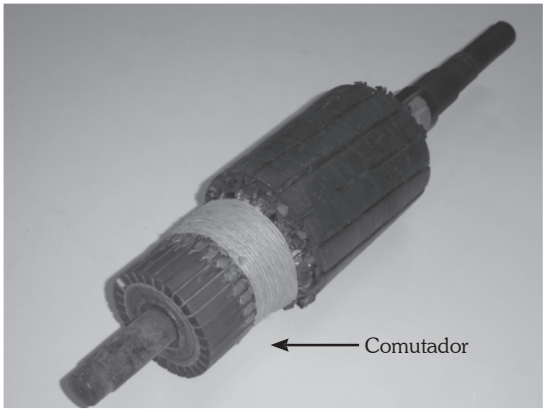


Figura 4.6 - Armadura.

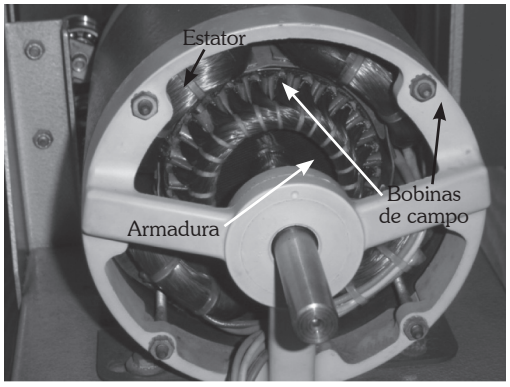


Figura 4.7 - Armadura dentro do estator.

Uma descrição mínima das partes envolvidas completa de forma sucinta a apresentação do motor:

1. Estator: este é o nome dado à parte fixa do motor, que pode conter um ou mais enrolamentos por polo, todos prontos para receber corrente contínua e produzir o campo

magnético fixo. O enrolamento no estator pode ser chamado de enrolamento de campo. Cada enrolamento por polo no estator pode conter um enrolamento de campo paralelo (shunt), construído com fio de menor seção e muitas espiras e no interior do enrolamento shunt, podemos encontrar o enrolamento campo série, construído com fio de maior seção e poucas espiras.

2. Armadura: é um rotor bobinado cujas bobinas também recebem corrente contínua e produzem campo magnético.

3. Comutador: garante que o sentido da corrente que circula nas bobinas da armadura seja sempre o mesmo, garantindo a repulsão contínua entre os campos do estator e do rotor, o que mantém o motor girando.

4. Escovas: geralmente feitas de liga de carbono, estão em constante atrito com o comutador, sendo responsáveis pelo contato elétrico da parte fixa do motor com a parte girante. Pode-se deduzir que as escovas sofrem desgaste natural com o tempo, necessitando de inspeções regulares e trocas periódicas.

5. Interpolos e compensação: enrolamentos inseridos no estator, entre os polos e na sapata polar respectivamente, ligados em série com a armadura, que reduzem os efeitos da reação da armadura (deslocamento da linha neutra) quando ela é percorrida por uma corrente significativa.

4.4 Tipos de ligação e características de funcionamento de motores CC

Ligar um motor de corrente contínua envolve bom conhecimento da aplicação que ele vai acionar e do próprio motor. Até agora temos os enrolamentos de campo no estator (shunt e série), que podem ser excitados com tensão externa, e o enrolamento da armadura, Figura 4.8. A questão é como conectá-los e com qual objetivo? O que acontece internamente em se tratando de campo magnético?

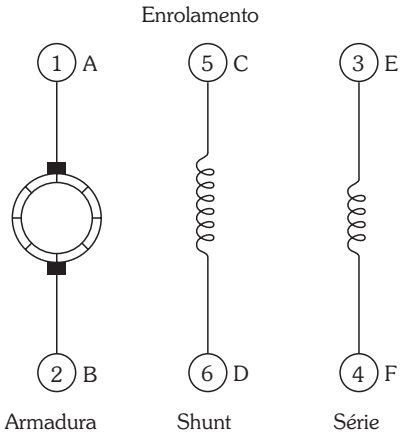


Figura 4.8 - Terminais de um motor CC.

Note os terminais 1 e 2 ligados às escovas e em contato com o comutador da armadura. O enrolamento shunt do estator possui a numeração 5 e 6, e o série a numeração 3 e 4. Lembre-se sempre de que o enrolamento shunt é formado por muitas espiras de fio de menor seção, enquanto o enrolamento série é formado por poucas espiras de um fio de seção maior.

As bobinas de campo do estator alimentadas produzem campo magnético no estator cujas linhas cortaram a armadura. Se houver uma força eletromotriz (FEM) na armadura, ela gira e suas bobinas atravessam constantemente as linhas de campo do estator, criando na armadura uma força contraeletromotriz (FCEM). No que isso é importante?

Medindo a resistência ôhmica do enrolamento da armadura, podemos facilmente calcular, com o auxílio da lei de Ohm, a corrente que atravessaria esse enrolamento se fosse alimentado, isoladamente, com determinada tensão:

$$I = FEM / R$$

Para que o motor gire, devemos fazer com que o enrolamento da armadura seja atravessado por uma corrente. Essa corrente calculada não condiz com a condição da máquina em funcionamento, pois graças à força contraeletromotriz temos a equação:

$$I = (FEM - FCEM) / R$$

Se aplicarmos mais FEM, a corrente e a velocidade aumentam. Se diminuirmos a FCEM, a velocidade do motor também aumenta, podendo disparar. Quanto maior a ação da FEM na armadura, maior a velocidade.

Conclusão: A velocidade em um motor de corrente contínua está relacionada com a FEM aplicada à armadura e com a FCEM gerada na armadura pelo campo magnético do estator cortando a armadura. Anote isso!

Fique de olho!

Se um motor estiver ligado e com determinada rotação, essa rotação tem relação com a corrente que circula na armadura. Como a corrente que circula na armadura é resultado da diferença entre FEM e FCEM, se perdermos o campo do estator e, consequentemente, a FCEM, a corrente aumenta significativamente. O motor corre um grande risco de "disparar" e sofrer danos mecânicos em mancais, rolamentos, buchas, além de colocar em risco as pessoas que trabalham com ele.

Tenha em mente:

- FEM: força relacionada com a tensão aplicada à armadura responsável pela corrente que circula por ela e que resulta em força motriz.
- FCEM: tensão induzida na armadura quando esta corta o campo gerado no estator que se opõe à FEM. Essa força deve estar sempre presente no motor CC.

Para evitar acidentes e prejuízos desnecessários, vamos estudar as formas de ligação do motor de corrente contínua e suas aplicações. São três os modos de ligação:

1) Motor paralelo (shunt)

O shunt está em paralelo com a armadura e estão ligados à alimentação. Pode-se inserir um reostato em série com o shunt para diminuir o fluxo gerado e aumentar a velocidade, mas deve-se ter o cuidado de não eliminar o campo totalmente.

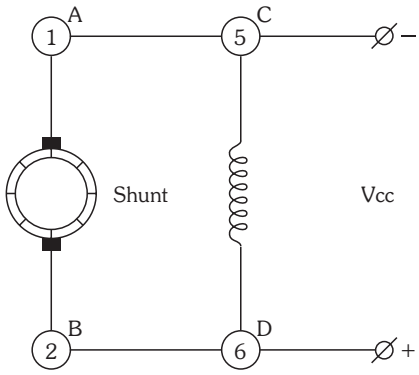


Figura 4.9 - Ligação motor CC em paralelo.

Nesse tipo de ligação, tanto a armadura quanto o enrolamento shunt do estator são ligados em paralelo com a alimentação. Como normalmente a armadura é construída com fio mais grosso e menos espiras que o enrolamento shunt do estator, a armadura consome mais corrente que o estator. O movimento de rotação e o torque são resultados da interação do campo magnético no estator com o campo magnético na armadura criado pela corrente de armadura.

Como a armadura e o enrolamento shunt estão em paralelo com a alimentação, se a tensão de alimentação não variar, podemos esperar uma rotação constante na ponta do eixo do motor, sem carga. Ao aplicarmos carga a esse motor, devido à resistência no enrolamento da armadura, há uma pequena queda na velocidade e no aquecimento. Quanto menor a resistência da armadura, menos perda em velocidade com aumento da carga. O aquecimento se dá pelo fato de impormos resistência mecânica ao eixo, o que provoca redução na FCEM e, consequentemente, aumento da corrente na armadura para manter o torque.

Conclusão: Mantendo o campo shunt, a FCEM induzida na armadura impede que o motor atinja velocidades perigosas sem carga e este é o grande atrativo desse tipo de ligação. Se reduzirmos, através de um reostato, a tensão no enrolamento shunt, temos aumento de velocidade, mas isso é extremamente perigoso. Deve-se tomar o cuidado de nunca abrir o shunt, sob o risco de o motor atingir velocidade muito alta, impondo riscos desnecessários às pessoas.

Podemos esperar também uma boa regulação de velocidade, pois com o aumento da carga, tem-se redução da FCEM e consequente aumento da corrente de armadura, o que ajuda a manter o torque.

2) Motor série

É altamente recomendável que motores série partam com carga, pois com o torque elevado na partida, sem carga, eles tendem a atingir velocidades que podem resultar na destruição do motor.

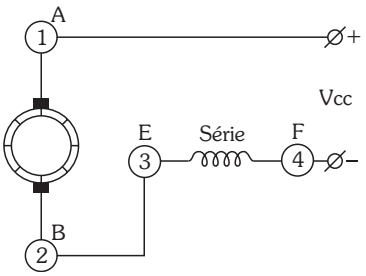


Figura 4.10 - Ligação do motor CC em série.

Nessa ligação temos o enrolamento da armadura e o enrolamento série do estator conectados em série e ligados à alimentação. Existem então dois enrolamentos com fio de certa seção circular e poucas espiras ligados em série. Estando os dois enrolamentos em série, é certo deduzir que o campo magnético criado no estator depende da mesma corrente aplicada ao enrolamento da armadura.

Se o motor é ligado sem carga, temos um campo magnético no estator que depende da corrente absorvida. Se essa corrente é baixa, o campo magnético induz uma baixa FCEM na armadura e existe uma velocidade considerável por conta da corrente e da FEM na armadura. Se aumentamos a carga, aumentamos a corrente de armadura e também o campo do estator, sofrendo uma queda considerável na velocidade.

Em comparação com o motor shunt, o motor série tem excelente torque de partida, mas uma regulação de velocidade ruim, pois todo aumento de carga resulta aumento da corrente e consequente queda de velocidade. Isso é esperado, já que os enrolamentos estão em série. Se aumentamos a corrente, o comportamento do campo nesses enrolamentos é extremamente afetado. Quanto maior a corrente, menor a velocidade, pois temos uma FCEM mais atuante. A velocidade no motor série, por observação, está intimamente ligada à corrente sob carga. Se um motor série parte sem carga, corrente e FCEM baixas, a velocidade pode ser tão alta que ele se autodestruirá, podendo causar sérios danos às pessoas.

Conclusão: O motor série é excelente em aplicações em que há alta carga de inércia, como trens e aplicações com forte tração, tomando-se o cuidado de operá-lo sempre com carga acoplada.

3) Motor série-paralelo (compound)

São dois os tipos de compound: o cumulativo e o diferencial; tudo depende da ligação do enrolamento de shunt. Para mudar de um tipo para o outro, basta inverter a bobina de shunt.

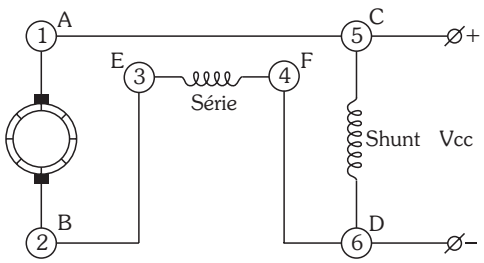


Figura 4.11 - Ligação do motor CC série-paralelo.

Com o intuito de combinar o melhor da ligação shunt com o melhor da ligação série, existe a ligação compound. Conseguimos a excelente regulação de velocidade do motor shunt com o excelente torque de partida do motor série. Os motores compound são utilizados onde há necessidade de velocidade constante com variações extremas de carga. A ideia do motor compound é tornar possível o aproveitamento do alto torque da ligação série, sem disparos de velocidade com cargas reduzidas ou nenhuma carga, em seguida usar a baixa variação de velocidade do motor shunt sob diferentes situações de carga.

O motor é inicialmente conectado como série, mas com o enrolamento shunt em paralelo com o conjunto "armadura e enrolamento série". O enrolamento shunt deve produzir campo magnético com mesma direção e sentido ao campo produzido no enrolamento série. Temos agora um motor com torque alto na partida, mas com velocidade limitada, e conseguimos também que ele tenha baixa variação de velocidade, mesmo variando a carga.

Esse tipo denomina-se motor compound cumulativo. Em algumas situações, após utilizada a característica do motor série, o enrolamento série pode ser curto-circuitado para que não interfira no trabalho de regulação do enrolamento shunt.

Algumas aplicações requerem motores que aceitem queda significativa na velocidade com o aumento da carga. Podemos adaptar o motor compound para atender a essa necessidade também, ligando o enrolamento shunt de modo que produza um campo magnético contrário ao campo magnético no enrolamento série. O enrolamento série ativo no motor produz um campo em oposição ao campo do enrolamento shunt, reduzindo o campo resultante, aumentando assim a velocidade, mas sofrendo a queda de velocidade com o aumento da carga, característica do motor série.

Essa técnica, quando utilizada, dá ao motor o nome de compound diferencial. Os motores compound diferenciais têm aplicação limitada pelo risco de instabilidade. O motor pode disparar sob certas condições, pois quando a corrente de armadura aumenta com o aumento da carga, o campo no enrolamento série também aumenta. Como o campo nesse enrolamento está em oposição ao campo shunt, o fluxo total é reduzido, consequentemente temos aumento na velocidade e o motor pode disparar. Quando é indispensável a utilização do compound diferencial, geralmente o fabricante produz motores com fraco campo do enrolamento série, reduzindo os riscos, mas ainda assim a aplicação é limitada.

Exemplo de aplicação: Um elevador de carga que utiliza motor CC opera com ligação série para subir carga, torque elevado necessário. Para descer, não havendo necessidade de torque, mas controle de velocidade, opera com ligação shunt. Quando sem carga ou carga reduzida, opera com ligação compound.

Para o estudo teórico da máquina CC usam-se equações fundamentais da máquina CC que levam em conta o fluxo magnético na máquina, a corrente na armadura, a velocidade e a constante da máquina. O torque em uma máquina CC pode ser calculado com:

$T(N.m) = K \times \Phi(Wb) \times I(A)$ em que K, a constante do motor, é definida por:

$K = \frac{P \times Z}{2 \times \pi \times a}$ Sendo: P - número de polos

Z - número de condutores na armadura

a - número de caminhos paralelos na armadura

O valor de a depende do tipo de enrolamento. Para enrolamentos imbricados, a é igual ao número de polos.

A tensão gerada na armadura (força contraeletromotriz) pode ser calculada por:

$$Eg(V) = K \times \Phi(Wb) \times w(rad/s) \text{ sendo: } w(rad/s) = 2 \times \pi \times \frac{n(rpm)}{60}$$

Fique de olho!

Qualquer desses motores pode ser visto como um circuito elétrico, conforme ilustra a figura ao lado, considerando uma ligação tipo compound.

$V1 = Eg + (Ra + Rs) \cdot Ia$

$I1 = If + Ia$

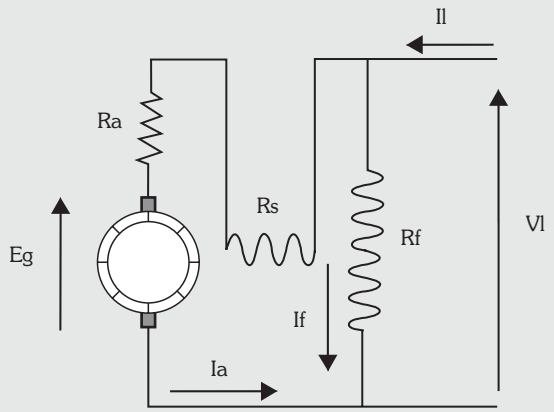


Figura 4.12 - Circuito equivalente do motor CC compound.

Fique de olho!

Todas as ligações vistas anteriormente são consideradas ligações de auto-excitação. Também existe a excitação independente, conforme mostrado na figura ao lado, na qual a bobina do estator é alimentada por uma fonte CC independente.

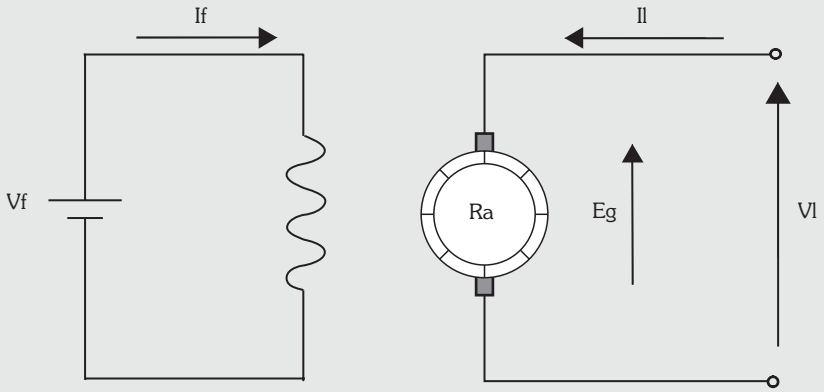


Figura 4.13 - Circuito equivalente do motor CC independente.

4.5 Comutador

Alguns profissionais simplesmente não se dão conta da importância do comutador. Esse dispositivo é um retificador mecânico dentro do motor. Isso mesmo! Por comutar constantemente os polos das bobinas, ele exerce a mesma atividade que diodos retificadores, mas de forma mecânica, que é permitir a circulação de corrente em apenas um sentido. O comutador estabelece contato entre as bobinas e o meio externo pelas escovas, geralmente de carbono, que enquanto a máquina permanece em rotação, estão em constante atrito com o comutador.

Pode-se deduzir que há um desgaste natural das escovas e do próprio comutador com o tempo. Além disso, em manutenções periódicas, precisamos limpar o comutador, eliminando resíduos depositados. As escovas possuem um período de troca que deve ser respeitado, evitando que a sua parte metálica atinja o comutador, danificando-o. Quando a manutenção periódica não é respeitada, os resíduos depositados no comutador podem aumentar a sua resistência de contato com as escovas. Os mesmos resíduos podem depositar-se entre as lâminas do comutador, causando um curto-circuito.

4.6 Escovas e o ajuste da linha neutra

Para entender o ajuste da linha neutra, precisamos voltar ao funcionamento do motor CC no item 4.2 e seus estágios. Existe um momento, quando a bobina está perpendicularmente posicionada com relação ao campo fixo, que não há ação do campo e, consequentemente, força magnetomotriz. Nesse momento devemos "desligar" a bobina, em seguida mudar seus terminais. Isso evita faíscas em excesso no comutador e desgaste desnecessário das escovas e do próprio comutador. Este é o princípio de motivação para o ajuste da chamada linha neutra, momento em que a força contraeletromotriz induzida é a menor possível, o que produz menos faíscas se realizada a comutação.

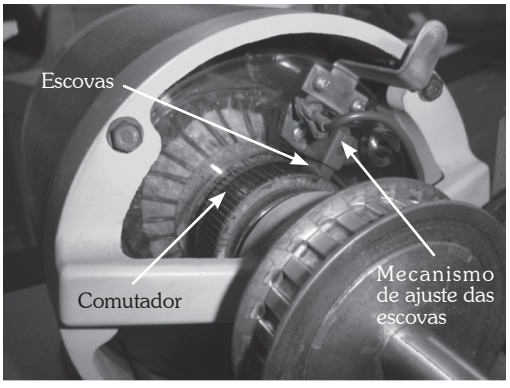


Figura 4.14 - Vista do comutador e das escovas.

4.7 Identificação dos terminais das máquinas CC

Para realizar ligações em uma máquina CC, é necessário ter conhecimento de seu conteúdo que possibilite reconhecer os terminais das bobinas internas que você conecta. Normalmente os motores CC saem de fábrica com esquemas de ligação definidos no manual do fabricante. Para executar a ligação desejada, siga à risca a recomendação do fabricante.

Se um motor antigo chegar até sua bancada para avaliação e não houver nenhum sinal de marcação de terminais com números e esquema de ligação a ser seguido, é preciso marcar os terminais e realizar os testes necessários para atestar a confiabilidade do motor. A numeração utilizada deve ser a que usamos para a armadura e para os enrolamentos do estator. Identifique os terminais de acordo com o enrolamento. Lembre-se de que o shunt têm muitas espiras e fio de menor seção, enquanto o série possui poucas espiras e fio de maior seção.

Optamos pela identificação numérica, mas podem ser utilizadas letras. Acompanhe:

» Armadura: (A;B) ou (1;2)
» Shunt: (C;D) ou (5;6)
» Série: (E;F) ou (3;4)
» Interpolos: (G;H)

4.8 Eletrodinamômetro

Para verificar o comportamento do motor CC com carga, necessita-se de equipamento auxiliar que possa fornecer e medir a carga aplicada. O equipamento utilizado é o eletrodinamômetro que possui um estator com enrolamento e um rotor gaiola de esquilo. O estator não é fixo a uma base, mas fica preso a uma mola com tensão correspondente à escala de torque de 0 a 3 N.m, também presa ao estator. Mas como ele funciona?

Observe na Figura 4.15 que o estator deve ser alimentado com tensão CC de 0 a 120 V. Quando alimentado, o estator produz um campo magnético que induz no rotor outro campo magnético. A ação do campo do estator sobre o rotor tenta segurar o rotor em uma posição fixa. Como o estator não está fixo a uma base, ele tenta acompanhar o sentido de rotação do rotor, mas é impedido por uma determinada tensão da mola que será indicada na escala. A indicação mostra a força do motor para mantê-lo girando mesmo contra a vontade do estator do dinamômetro. Pode-se encontrar dinamômetros com escala em lbf.in. A relação é 1 N.m = 8,85 lbf.in.

O estator possui uma escala na parte frontal. Suspenso, fica preso a uma mola na parte traseira que o impede de girar com o rotor. A força necessária para segurar o estator é indicada na escala.

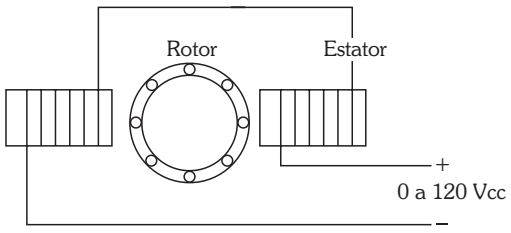


Figura 4.15 - Esquema de um eletrodinamômetro.

4.9 Ensaios: motor CC

Objetivo: Estudar as propriedades e características dos motores CC na prática. Traçar curvas torque × velocidade dos motores CC estudados. Observar na prática como realizar conexões de circuitos com motores e conexões mecânicas com equipamentos auxiliares.

Fique de olho!

Os ensaios descritos em seguida foram realizados com um determinado motor CC. Isso não quer dizer que você tenha de realizar o ensaio com uma máquina idêntica nem que precise obter os mesmos valores anotados neste ensaio. O objetivo principal é a constatação. Você leu e releu a teoria, agora vai comprovar alguns aspectos seguindo um guia de procedimentos elaborado de forma que possa comparar seus resultados com os resultados esperados e com os anotados no livro. Registre seus resultados.

Equipamentos utilizados: motor CC, fonte CC ajustável 0 a 120 V 8 A, eletrodinamômetro com capacidade de aplicar cargas até 3 N.m, tacômetro, voltímetro e amperímetro para as correntes especificadas, reostato de 500 Ω.

Fique de olho!

Estamos trabalhando com níveis de tensão que podem trazer risco à vida humana e partes mecânicas girantes que podem causar danos físicos, portanto realize os ensaios apenas sob orientação e supervisão de um profissional habilitado e siga à risca todas as orientações de segurança. Antes de ligar o equipamento para verificar o funcionamento e tomar nota dos dados, peça ao profissional citado que inspecione o circuito. Ligações e alterações devem ser feitas com todos os equipamentos completamente desligados.

Características da máquina CC: 0,25 HP 1800 rpm 120 V 2,8 A, In enrolamento shunt = 0,3 A, In enrolamento série = 3 A, In armadura = 3 A.

4.9.1 Ajuste da linha neutra

Para realizar o ajuste da linha neutra com propriedade, você precisa entender o que será feito. Na teoria definimos a necessidade de comutar as bobinas quando o campo magnético fixo tivesse pouca ação sobre elas, gerando o mínimo possível de faísca. Pretendemos encontrar essa posição para as escovas de modo simples, aplicando corrente alternada à armadura e medindo a tensão alternada induzida no enrolamento shunt.

A posição ideal é proporcionar conversão 0 de energia. Em outras palavras, a armadura funciona como primário de um transformador e o shunt como secundário. Para ajustarmos a linha neutra, posicionamos as escovas de forma que o campo magnético variável gerado na armadura tenha um ângulo tal que seu efeito sobre o shunt seja o mínimo possível. O esquema de ligação pode ser visto na Figura 4.16.

É aplicada à armadura uma tensão CA aproximadamente igual a 50% da tensão nominal no motor. Essa tensão produz campo magnético variável em algumas bobinas da armadura. Nosso trabalho é posicionar as escovas de modo a energizar as bobinas cujo campo gerado induza a menor corrente possível no enrolamento shunt.

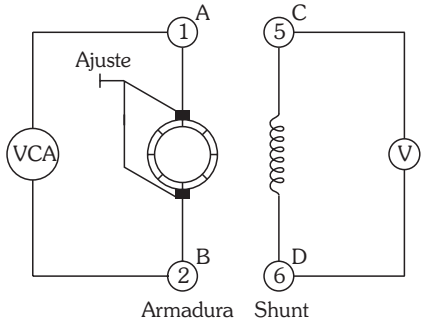


Figura 4.16 - Esquema de ligação para o ensaio.

Procedimentos

1) Monte o circuito da Figura 4.16. Aplique aproximadamente 60 VCA, ajustando lentamente a tensão da fonte na armadura. Observe a tensão no voltímetro ligado ao enrolamento shunt.
2) Com extremo cuidado movimente as escovas através do dispositivo de ajuste até que a tensão lida no voltímetro seja a menor possível.
3) Feito. A linha neutra está ajustada. Desligue a fonte CA e todo o equipamento.

Fique de olho!

Realize este ensaio com cuidado. Observe o fundo de escala dos instrumentos. Se for necessário, pare o ensaio e reavalie a situação. Cuidado ao ajustar as escovas, pois há risco de choques.

4.9.2 Determinação de parâmetros do motor

Objetivo: Neste ensaio são verificados os parâmetros elétricos do motor para cada um dos enrolamentos. São apresentadas duas maneiras de medir a resistência dos enrolamentos, uma experimental e outra instrumental. Devem ser identificadas todas as partes do motor, bem como, se for possível, efetuar a contagem de lâminas do comutador, número de escovas, número de bobinas no estator etc.

Procedimentos

1) Execute uma inspeção minuciosa no motor para ensaio e anote os seguintes dados:
   a) Número de escovas: 2
   b) Número de lâminas no comutador: 75
   c) Quantidade de grupos de bobinas no estator: 4 polos, 4 grupos com 4 enrolamentos série e 4 enrolamentos shunt
2) Identifique os enrolamentos no motor e meça, com um ohmímetro, a resistência dos enrolamentos do motor:
   a) Enrolamento série: 2 Ω
   b) Enrolamento shunt: 261 Ω
   c) Armadura: 8 Ω
3) Ligue uma fonte ajustável CC de 0 a 120 V ao enrolamento shunt, conforme indica a Figura 4.17. Certifique-se de que a fonte esteja ajustada para 0 V. Conecte o voltímetro e o amperímetro ao circuito.

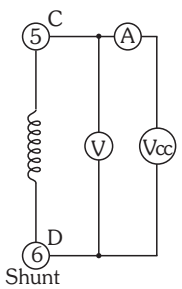


Figura 4.17 - Esquema de ligação da bobina shunt.

Note que, ao atingir a corrente nominal, temos uma tensão menor que a tensão nominal descrita nas características do motor, 120 V, porque estamos alimentando apenas o shunt e não existe FCEM para se opor à FEM que estamos aplicando.

a) Aumente vagarosa e cuidadosamente a tensão da fonte, observando o voltímetro e o amperímetro. Pare imediatamente quando a corrente indicada atingir o valor da corrente nominal do shunt que é de 0,3 A. Registre o valor da tensão:

$$Vcc = 78\ V$$

b) Desligue a fonte. Calcule o valor da resistência desse enrolamento com os valores medidos e compare com a resistência medida diretamente:

$$R = 78\ V / 0{,}3\ A = 260\ \Omega$$

c) Calcule a potência dissipada por esse enrolamento.

4) Com dados obtidos até agora calcule as potências nos enrolamentos série e armadura (utilize a resistência e a corrente nominal dos enrolamentos).

5) Some as potências individuais dos três enrolamentos. Deve-se obter um valor próximo à potência total da máquina.

6) Qual seria a corrente circulante no enrolamento da armadura se aplicássemos 120 V nesse enrolamento isoladamente? O valor ultrapassou o nominal?

7) Qual seria a corrente circulante no enrolamento shunt se aplicássemos 120 V nesse enrolamento isoladamente? O valor ultrapassou o nominal?

8) Analisando os itens 6 e 7 mais a teoria sobre força contraeletromotriz, qual a importância da FCEM com relação à corrente que circula nos enrolamentos?

9) Calcule a corrente no enrolamento série se ligado separadamente a uma tensão de 120 Vcc. O que acontece com esse enrolamento? Ele deve ser ligado sempre em série com qual outro enrolamento?

4.9.3 Motor série

Objetivo: Neste ensaio são verificadas as características do motor série quanto a velocidade, torque, respostas com carga e corrente de armadura. Como estudado em teoria, o motor série pode atingir velocidades perigosas em certas circunstâncias, portanto siga todos os procedimentos corretamente sem adaptações.

Procedimentos

1) Ligue o motor CC, o voltímetro e o amperímetro como especificado na Figura 4.18. Não ligue a fonte CC ainda:

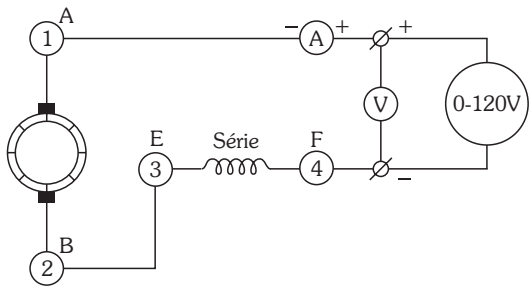


Figura 4.18 - Esquema de ligação para ensaio do motor série.

2) Acople o dinamômetro ao motor CC. Lembre-se de que o motor série não pode partir sem carga. Ajuste-o para metade de seu range ou cerca de 0,7 N.m. Como ele está desligado, apenas gire o reostato metade do curso à direita.

3) Ajuste a fonte para 0 V e ligue os terminais + e –, conforme a Figura 4.18.

4) Aumente gradualmente a tensão da fonte CC. Observe o sentido de rotação do motor que deve atender ao sentido do dinamômetro, no caso ensaiado, horário. Se estiver ao contrário, desligue a fonte e inverta o enrolamento série. Ajuste a fonte para 120 Vcc.

5) Leia e registre a corrente indicada no amperímetro para 0,7 N.m. Meça e registre a rotação do motor para estas condições, Tabela 4.1.

6) Agora vamos realizar medições de corrente e velocidade para cargas ajustadas no dinamômetro entre 0 e 1,4 N.m, segundo a Tabela 4.1. Ajuste a carga no dinamômetro, meça a corrente e a velocidade e complete a tabela. Terminado, desligue a fonte.

Tabela 4.1 - Medições do ensaio para ligação série do motor

U (volts)	Torque (N.m)	I (ampères)	Velocidade (rpm)
120	0	0,67	5275
120	0,35	1,54	2560
120	0,7	2	2031
120	1	2,45	1746
120	1,4	2,75	1524

Fique de olho!

A velocidade do motor com cargas baixas excede a velocidade nominal do motor, portanto não o deixe rodando sob estas condições.

7) Com os dados da tabela construa o gráfico que representa as características de torque e velocidade do motor ensaiado.

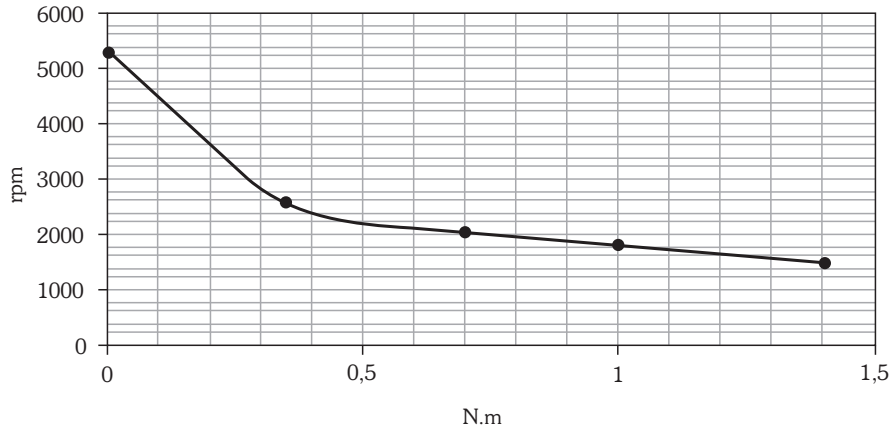


Figura 4.19 - Curva característica do motor com ligação série.

Fique de olho!

1. Ao aplicar 1,4 N.m ao motor, temos a In indicada no amperímetro, o que demonstra que estamos no limite de carga para o motor.

2. Mesmo ajustado 0 no dinamômetro, existe uma carga aplicada ao motor, por isso ele não dispara e mantém os 5275 rpm. Essa carga não foi considerada no ensaio.

3. Foi feita a conversão da unidade de torque indicada no dinamômetro em SI e utilizado 1N.m = 8,85 lbf.in. Você pode encontrar dinamômetros com essa unidade inglesa.

4. Calcule a regulação de velocidade do motor série com carga de 1 N.m com a equação:

$$\%reg = \frac{RPMsem_carga - RPMcarga_total}{RPMcarga_total} \times 100 = 202\%$$

5. Ajuste o dinamômetro para máxima carga.

6. Ligue a fonte CC e aumente gradativamente a tensão até que leia no amperímetro a corrente nominal da armadura. O motor pode girar lentamente ou nem girar. Anote a tensão lida no voltímetro e o valor da carga no dinamômetro. Volte a tensão a 0 e desligue a fonte. Neste momento a corrente que atravessa a armadura é limitada apenas pela resistência do circuito motor série. Podemos então calcular a resistência do circuito:

$$U = 37\ V \qquad Torque = 1{,}6\ N.m \quad R = 37\ V / 3\ A = 12\ \Omega$$

7. Com a resistência do circuito calcule a possível corrente de partida se aplicarmos 120 V ao motor nestas condições:

$$I\ partida = 120/12 = 10\ A$$

8. Calcule a potência desenvolvida pelo motor série no ensaio em W e CV a um torque de 1 N.m.

$$P(W) = rpm \times N.m \times 0{,}105 = 183\ W \Rightarrow 0{,}25\ CV$$

$$1\ CV = 736\ W$$

9. Qual a potência absorvida da rede para realizar o trabalho do item 8?

$$P\ entrada = 120\ V \times 2{,}45\ A = 294\ W$$

10. Sabendo a potência de entrada e a potência de saída, calcule a eficiência do motor.

$$Efic\% = \frac{Psaída}{Pent} \times 100 = 61\%$$

11. Compare a corrente de partida com a corrente nominal à plena carga no ensaio e determine quantas vezes ela é maior que a nominal.

    Quatro vezes maior.

4.9.4 Motor shunt

Objetivo: Neste ensaio são verificadas as características do motor shunt quanto a velocidade, torque, respostas com carga e corrente de armadura. Como estudado em teoria, o motor shunt pode atingir velocidades perigosas em certas circunstâncias, portanto siga todos os procedimentos corretamente sem adaptações.

Procedimentos

1) Execute as ligações elétricas de acordo com a Figura 4.20. Mantenha a fonte desligada por enquanto.

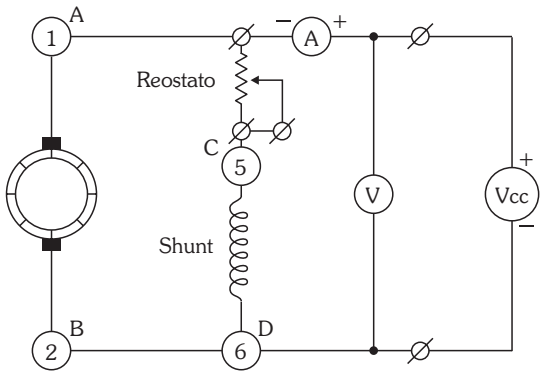


Figura 4.20 - Esquema de ligação para ensaio do motor shunt.

2) Acople o dinamômetro ao motor e ajuste o dinamômetro para carga mínima, 0 N.m.

3) Certifique-se de que o reostato esteja com resistência 0 entre os terminais conectados ao circuito, não interferindo nele.

4) Ligue a fonte CC, ajuste a tensão aplicada lentamente para 120 Vcc. Verifique o sentido de rotação; se não for o ideal, volte a 0 V, desligue a fonte, inverta a ligação do shunt e repita o passo.

5) Observe os valores indicados no amperímetro e no voltímetro, meça a rotação no motor com um tacômetro, lentamente ajuste o reostato para que obtenha uma rotação aproximada de 1.800 rpm indicada no tacômetro.

6) Registre os valores de tensão, corrente e velocidade na tabela para esta situação de carga. Repita o registro para outros valores de carga indicados na Tabela 4.2. Para isso ajuste a carga aplicada ao motor no dinamômetro, leia a corrente, a tensão e a velocidade e registre.

Tabela 4.2 - Medições do ensaio para ligação shunt do motor

U (volts)	Torque (N.m)	I (ampères)	Velocidade (rpm)
120	0	0,35	1800
120	0,35	1,05	1725
120	0,7	1,7	1664
120	1	2,35	1622
120	1,4	2,95	1585

7) Desligue a fonte. Com os dados da tabela construa o gráfico que representa as características de torque e velocidade do motor shunt ensaiado.

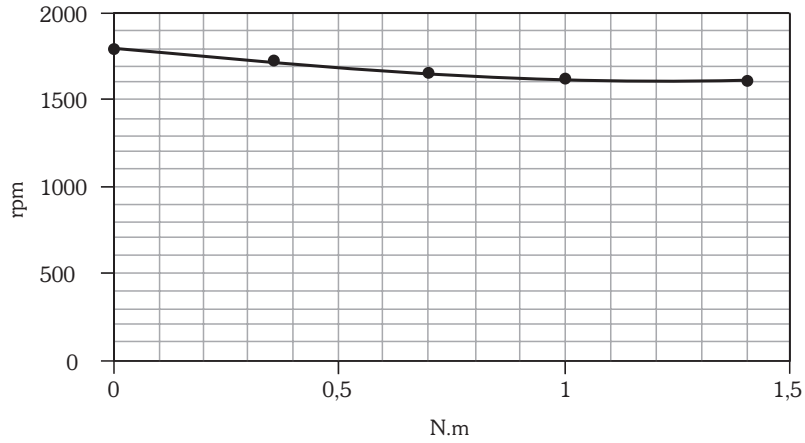


Figura 4.21 - Curva característica do motor com ligação shunt.

8) Calcule a regulação de velocidade do motor shunt com a equação (carga 1 N.m):

$$\%reg = \frac{RPMsem_carga - RPMcarga_total}{RPMcarga_total} \times 100 = 10,9\%$$

9) Ajuste o dinamômetro para máxima carga.

10) Ligue a fonte CC e aumente gradativamente a tensão até que leia no amperímetro a corrente nominal da armadura. O motor pode girar lentamente ou nem girar. Anote a tensão lida no voltímetro e o valor da carga no dinamômetro. A corrente que atravessa a armadura é limitada, nesse momento, apenas pela resistência do circuito motor shunt. Podemos, então, calcular a resistência do circuito:

U = 25 V Torque = 0,35 N.m $R = \frac{25V}{3A} = 8,3\Omega$

11) Com a resistência do circuito calcule a possível corrente de partida se aplicarmos 120V ao motor nestas condições:

I partida = 120/8,3 = 14,5 A

12) Calcule a potência desenvolvida pelo motor shunt no ensaio em W e CV a um torque de 1 N.m.

$$P(W) = rpm \times N.m \times 0,105 = 170\ W \Rightarrow 0,23\ CV$$

1 CV = 736 W

13) Qual a potência absorvida da rede para realizar o trabalho do item 12?

P entrada = 120 V × 2,35 A = 282 W

14) Sabendo a potência de entrada e a potência de saída, calcule a eficiência do motor.

$$Efic\% = \frac{Psaída}{Pent} \times 100 = 60\%$$

15) Compare a corrente de partida com a corrente nominal à plena carga no ensaio e determine quantas vezes ela é maior que a nominal.

Seis vezes maior.

4.9.5 Motor compound

Objetivo: Neste ensaio são verificadas as características do motor compound quanto a velocidade, torque, respostas com carga e corrente de armadura. Como estudado em teoria, o motor compound diferencial pode atingir velocidades perigosas em certas circunstâncias, portanto siga todos os procedimentos corretamente sem adaptações.

1) A conexão do motor compound é mostrada na Figura 4.22. Primeiramente repita os procedimentos de 1 a 4 do ensaio 4.9.3, motor série, para certificar-se da direção de rotação que deve atender à necessidade do dinamômetro.

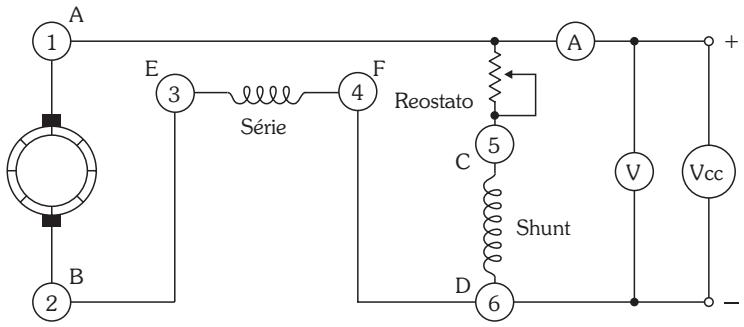


Figura 4.22 - Esquema de ligação para ensaio do motor compound.

2) Retorne a fonte a 0 e desligue-a. Monte o circuito conforme a Figura 4.22. Conecte o shunt em paralelo com o conjunto armadura e campo série.

3) Acople o dinamômetro ao motor, ajuste o dinamômetro para carga mínima, 0 N.m.

4) Certifique-se de que o reostato esteja com resistência 0 entre os terminais conectados ao circuito, não interferindo nele, com campo shunt no máximo.

5) Ligue a fonte CC, ajuste a tensão aplicada lentamente para 120 Vcc. Verifique se a rotação do motor está muito alta (não deve ultrapassar a nominal do motor). Se estiver muito alta, temos a ligação compound diferencial. Desliga a fonte, inverta a ligação do shunt, passando para cumulativo, e ligue a fonte novamente ajustando-a lentamente para 120 V.

6) Observe que os valores indicados no amperímetro e no voltímetro não devem exceder os valores nominais. Meça a rotação no motor com um tacômetro, lentamente ajuste o reostato para que obtenha uma rotação aproximada de 1.800 rpm indicada no tacômetro.

7) Registre os valores de corrente, tensão e velocidade para esta situação de carga na Tabela 4.3. Repita esse registro para outros valores de carga indicados na tabela. Para isso ajuste a carga aplicada ao motor no dinamômetro, leia a corrente, a tensão e a velocidade e registre.

Tabela 4.3 - Medições do ensaio para ligação compound do motor

U (volts)	Torque (N.m)	I (ampères)	Velocidade (rpm)
120	0	0,35	1800
120	0,35	0,95	1510
120	0,7	1,42	1400
120	1	1,79	1300
120	1,4	2,2	1210

8) Desligue a fonte CC e com os dados da tabela construa o gráfico que representa as características de torque e velocidade do motor compound ensaiado.

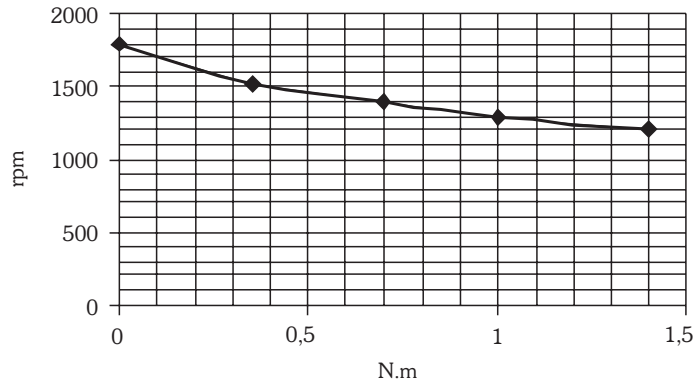


Figura 4.23 - Curva característica do motor com ligação compound.

9) Calcule a regulação de velocidade do motor compound com a equação seguinte, considerando carga de 1 N.m:

$$\%reg = \frac{rpm\ sem_carga - rpm\ carga_total}{rpm\ carga_total} \times 100 = 38\%$$

10) Ajuste o dinamômetro para máxima carga.

11) Ligue a fonte CC e aumente gradativamente a tensão até que leia no amperímetro a corrente nominal da armadura. Anote a tensão lida no voltímetro e o valor da carga no dinamômetro. Calcule a resistência oferecida pelo circuito:

V = 46 V Torque = 2,2 N.m R = 46 V / 3 A = 15 Ω

12) Com a resistência do circuito calcule a possível corrente de partida se aplicarmos 120 V ao motor nestas condições:

I partida = 120/15 = 8 A

13) Calcule a potência desenvolvida pelo motor compound no ensaio em W e CV a um torque de 1 N.m.

$$P(W) = rpm \times N.m \times 0{,}105 \ = 136\ W \Rightarrow 0{,}19\ CV$$

$$1\ CV = 736\ W$$

14) Qual a potência absorvida da rede para realizar o trabalho do item 12?

$$P\ entrada = 120\ V \times 1{,}79\ A = 215\ W$$

15) Sabendo a potência de entrada e a potência de saída, calcule a eficiência do motor.

$$Efic\% = \frac{Psaída}{Pent} \times 100 = 62\%$$

16) Compare a corrente de partida com a corrente nominal à carga de 1 N.m no ensaio e determine quantas vezes ela é maior que a nominal.

Quatro vezes maior.

17) As questões seguintes abrangem os três ensaios e levam o estudante a comparar os resultados obtidos.

a) Preencha a tabela seguinte com os resultados obtidos nos ensaios:

Tabela 4.4. - Comparação de resultados

Motor	Regulação	Torque	Eficiência	Ipartida
Série				
Shunt				
Compound				

b) Qual motor apresentou maior torque?

c) Qual motor apresentou melhor regulação de velocidade?

d) Qual motor mostrou melhor eficiência?

Vamos recapitular?

O princípio de funcionamento dos motores CC se baseia na força que é exercida sobre um fio percorrido por corrente elétrica imerso num campo magnético.

As partes principais desses motores são a armadura (rotor bobinado) e polos (bobinas no estator). Um conjunto constituído por anéis de comutação e escovas garante que as correntes nas bobinas do rotor tenham sempre o mesmo sentido.

As bobinas de campo e de armadura podem ser ligadas em paralelo (derivação ou shunt), em série ou de forma composta (série e paralela). As características eletromecânicas dependem do tipo de ligação entre essas bobinas.

A potência mecânica desenvolvida pelo motor pode ser dada por:

$$P_{mec} = Eg.Ia = T.\omega$$

A característica mecânica mais importante dos motores é a relação entre o torque e a rotação (Txω).

Sob o ponto de vista elétrico, esses motores podem ser representados por meio de circuitos elétricos equivalentes, respeitando cada tipo de ligação.

Agora é com você!

1) Descreva o princípio de funcionamento do motor CC.
2) Cite as partes principais de uma máquina CC.
3) Qual a função das escovas em uma máquina CC?
4) Qual a função do comutador em uma máquina CC?
5) Como podemos identificar o número de polos de uma máquina CC observando o estator?
6) Quais as diferenças entre os enrolamentos série e shunt de uma máquina CC?
7) Quais as principais características do motor série?
8) Quais as principais características do motor shunt?
9) Quais as principais características do motor compound?
10) Quais as diferenças entre o compound diferencial e o cumulativo?
11) Qual a motivação principal para utilizar uma máquina CC em um sistema industrial?
12) Qual o torque desenvolvido por uma máquina CC de quatro polos, 600 condutores ativos, 1800 rpm, 31,4 A aplicados à armadura (do tipo imbricado), com um fluxo magnético na máquina de 0.05 Wb? Sob as mesmas condições, qual a tensão induzida na armadura a 1800 rpm?

13) Um motor CC com excitação independente desenvolve uma potência mecânica de 30 cv a 3500 rpm. A tensão da linha de alimentação da armadura é de 290 V. A plena carga a corrente de linha é de 100 A. A tensão de alimentação independente das bobinas de campo é de 200 V e a corrente de 2 A. Calcule:

a) a força contraeletromotriz Eg;

b) a resistência total da armadura (Ra) que envolve a resistência das bobinas, das escovas e dos anéis de comutação;

c) o torque desenvolvido (N.m);

d) o rendimento do motor.

5

Gerador CC

Para começar

Este capítulo trata de geradores CC. O gerador transforma a energia mecânica fornecida por um motor em energia elétrica.

A máquina CC é uma máquina reversível, isto é, ela tanto pode operar no modo gerador, como no modo motor. Assim, os aspectos construtivos do gerador são semelhantes ao do motor. Você verá que a explicação sobre o princípio de funcionamento é um pouco diferente do motor.

Você aprenderá que as características elétricas do gerador, isto é, o seu comportamento, dependem da forma de ligação entre as bobinas do rotor (armadura) e do estator (bobinas de campo).

Essas características elétricas serão obtidas mediante uma série de ensaios propostos para laboratório.

5.1 Visão geral

Tudo que foi estudado em motor CC vale, de certa maneira, para o gerador CC, afinal os dois, mesmo tendo funções diferentes, vêm da mesma máquina CC. A máquina corrente contínua pode produzir força mecânica rotativa, motor, ou gerar energia elétrica CC a partir de uma força mecânica rotativa, gerador.

Este capítulo mostra as principais características do gerador CC, tipos de ligação, vantagens e desvantagens de cada uma, seguindo a mesma filosofia adotada, ou seja, vamos desenvolver uma teoria mínima e realizar ensaios comprobatórios.

5.2 Princípio de funcionamento

O processo de geração de energia está ligado aos fenômenos eletromagnéticos, especificamente a lei do eletromagnetismo que trata da diferença de potencial resultante nas extremidades de um condutor pela sua ação dentro de um campo magnético.

Um gerador CC, como o motor CC, possui três componentes principais: enrolamento de estator, armadura e comutador. No gerador CC, o enrolamento do estator é alimentado com tensão CC para produzir um campo magnético fixo. Pelo fato de essa tensão dar origem ao campo magnético do estator, recebe o nome de tensão de excitação. Esse campo magnético corta as espiras do enrolamento da armadura (ou vice-versa) quando ele, por ação mecânica, girar dentro do campo.

Campo magnético mais espira em movimento resultam em indução eletromagnética, que resulta em diferença de potencial (ddp) que é levada ao meio externo pelo conjunto de escovas mais comutador. A Figura 5.1 representa um gerador CC elementar. Ao aplicarmos força mecânica à manivela, rotacionamos a bobina que, cortada pelas linhas de campo, produz uma diferença de potencial em seus terminais.

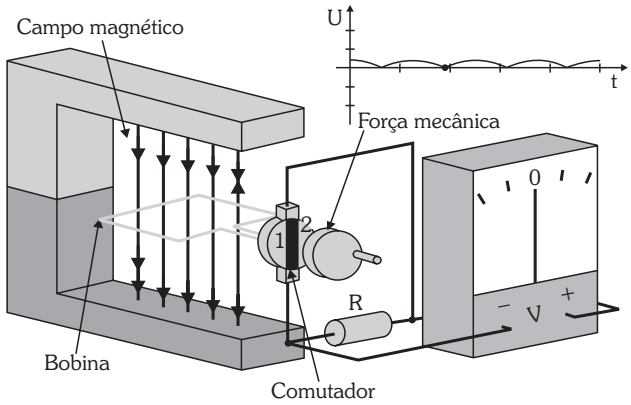


Figura 5.1 - Primeiro estágio.

A ddp gerada é aplicada a uma carga resistiva e medida com o voltímetro. Na figura podemos observar que a bobina encontra-se perpendicularmente em relação ao campo. Temos tensão gerada 0 V indicada no voltímetro e no gráfico para esse estágio.

A tensão gerada no estágio representado na figura é 0 V, mas conforme a bobina vai assumindo uma posição mais próxima ao paralelismo com as linhas do campo, maior o nível da tensão gerada. A Figura 5.2 representa a bobina, sob ação de uma força, iniciando um giro no sentido anti-horário. Note que a tensão indicada no voltímetro já não está mais em 0 e o gráfico senoidal também saiu do 0.

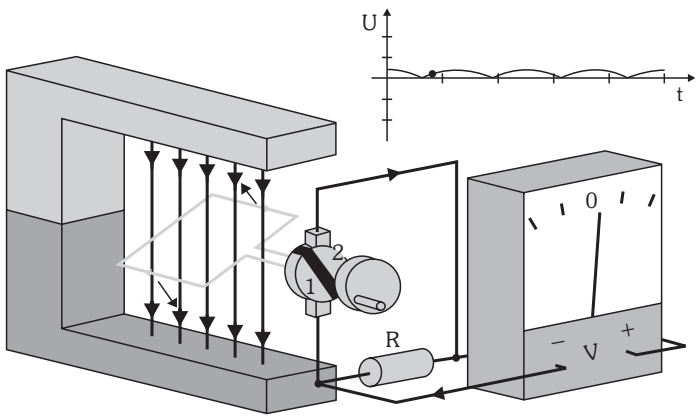


Figura 5.2 - Segundo estágio.

No momento em que passa a existir uma ddp entre as escovas e existe uma carga ligada a essas escovas, precisamos determinar o sentido da corrente que percorre a carga antes de medi-la. Para isso utilizamos a regra da mão esquerda para geradores, que é parecida com a regra para motores, o que muda é a mão.

A Figura 5.3 exibe a mão esquerda preparada para a análise. O indicador mostra o sentido da corrente, o polegar o sentido da força aplicada e o restante dos dedos acompanha o sentido do fluxo. Utilize a regra e confirme o sentido da corrente representado na figura. O sentido da força aplicada está indicado com pequenas setas pretas na bobina.

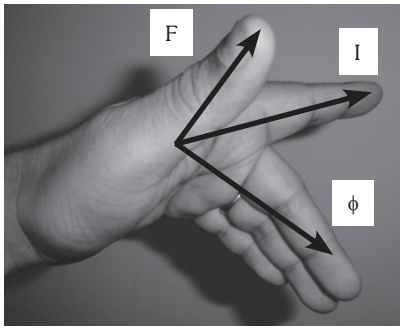


Figura 5.3 - Regra da mão esquerda para geradores.

Como terceiro estágio podemos observar o valor máximo de tensão alcançado quando a bobina está totalmente imersa no campo. No gráfico a senoide atinge o seu ápice.

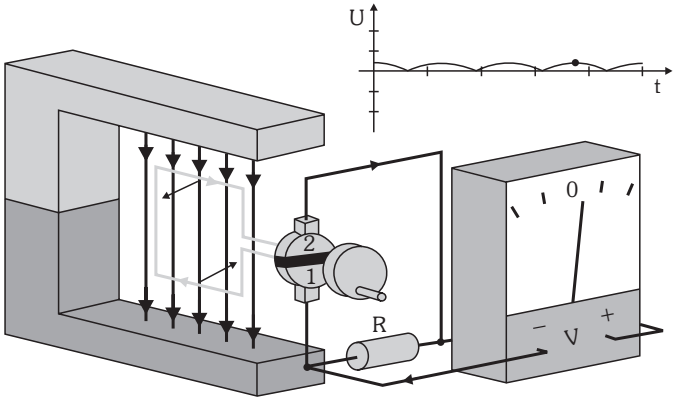


Figura 5.4 - Terceiro estágio.

Esses estágios são repetidos sucessivamente, sendo fornecida na saída uma tensão contínua pulsante. Contínua porque a corrente, apesar de oscilar entre 0 e um máximo, circula sempre em um mesmo sentido. Essa tarefa é responsabilidade do comutador, que neste caso funciona como um retificador mecânico.

Existem dois modos para aumentarmos a tensão gerada:

1) Aumentar o campo magnético fixo;

2) Aumentar a rotação mecânica aplicada à máquina, aumentando a frequência dos pulsos e a tensão média.

Se dobrarmos a velocidade, aumentamos a tensão induzida; se aumentarmos em 10% a excitação, aumentamos também a tensão induzida.

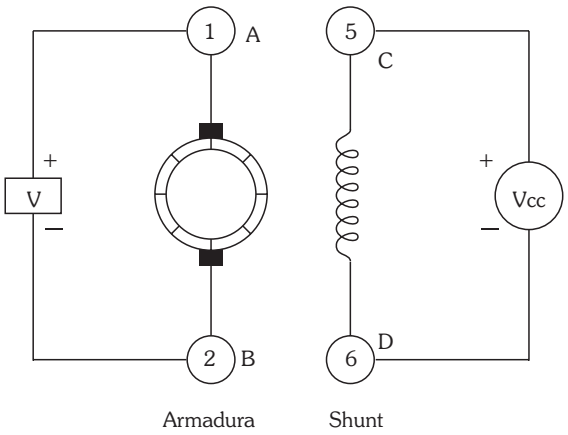
Existe diferença entre o gerador que funciona a vazio e com carga. Ao aplicar uma carga ao gerador, temos corrente circulando e, consequentemente, queda de tensão gerada. Para suprir essa queda, a máquina que fornece potência mecânica ao gerador deve aumentar o torque aplicado e/ou devemos aumentar a tensão de excitação.

Fique de olho!

Se retirar o comutador, que é o retificador mecânico, ainda assim fica nas extremidades da bobina uma tensão gerada, mas que será alternada. No Capítulo 7, que estuda alternadores, terá a oportunidade de perceber isso.

5.3 Excitação de campo shunt

Como os aspectos construtivos do gerador CC são os mesmos do motor CC, vamos direto ao estudo da excitação de campo para geradores CC. Existem dois modos de produzir o campo magnético fixo no estator, sendo excitação independente e a autoexcitação. Consideraremos excitação independente a alimentação da bobina de campo por tensão CC externa. Vamos tratar do gerador de campo shunt, Figura 5.5.



A fonte CC produz excitação no shunt. A força motora é aplicada ao eixo da armadura que, enquanto gira, tem suas bobinas frequentemente cortando o campo, induzindo uma tensão que pode ser medida com um voltímetro conectado às escovas.

Figura 5.5 - Esquema de ligação de um gerador CC independente.

O gerador de campo shunt é o que mais se aproxima do que foi estudado sobre geradores até agora. Para que ele opere adequadamente, é necessária uma fonte externa para excitar o enrolamento shunt, produzindo campo magnético fixo. As bobinas da armadura, sob ação de força mecânica externa, cortam esse campo gerado e induzem nessas bobinas uma tensão. Como dito anteriormente, essa tensão tem relação com a velocidade aplicada à armadura e a intensidade de campo fixo produzida pela excitação.

Sem carga conectada à armadura, temos tensão em seus terminais, mas nenhuma corrente flui nela, portanto nenhuma oposição à rotação impressa pela força mecânica. Se uma carga é conectada à armadura, uma corrente flui na armadura e um novo campo surge, interagindo com o campo fixo, criando uma força resistente à força mecânica externa. A máquina responsável pela força mecânica deve suprir essa nova necessidade de torque para evitar queda de tensão gerada ou deve-se aumentar a intensidade do campo fixo.

Fique de olho!

Se observarmos as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 usadas até o momento, notaremos que foi utilizado um campo magnético proveniente de um ímã. Podemos considerar este caso como excitação independente, já que o campo magnético no estator não depende da força mecânica aplicada para existir e como verá mais à frente, a própria excitação inicial de um gerador autoexcitado provém de magnetismo residual na máquina.

5.4 Gerador CC série

O gerador CC série tem uma característica peculiar: ele precisa da carga para trabalhar. Em outras palavras, se não tivermos carga conectada, não temos tensão gerada. Isso se deve ao fato de a armadura estar ligada em série com o enrolamento série e os dois em série com a carga. Se não houver carga, não há corrente circulando pelo circuito. Sem corrente no campo série não existe excitação, sem excitação não temos tensão induzida. Claro que, ao medir com o multímetro, podemos esperar uma pequena tensão de saída devido ao campo gerado pelo magnetismo residual. O gerador série pode ser visto na Figura 5.6.

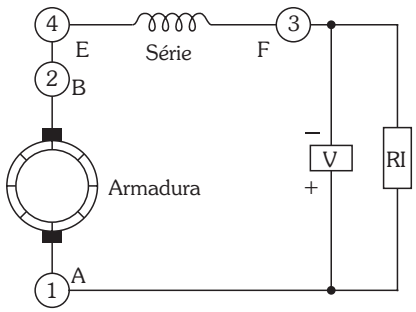


Figura 5.6 - Gerador CC com ligação série.

O gerador campo série, como pode ser observado, tem o aumento da tensão gerada ligado à carga. Quanto menor a impedância de carga, maior a corrente que circula no circuito, maior o campo série e maior a tensão gerada. Com o circuito aberto ficamos reduzidos à indução causada pelo magnetismo residual.

Está clara a dependência desse gerador com relação à carga. Quando há uma carga com alta resistência, a corrente no circuito é baixa e o fluxo do campo magnético também é fraco, consequentemente a tensão gerada é pequena. Reduzindo a resistência de carga, elevamos a corrente e, consequentemente, a tensão de saída até o limite em que haja saturação do campo e as perdas no circuito armadura enrolamento série atinjam valores inadequados.

5.5 Tipos de geradores CC autoexcitados

Além dos geradores com excitação independente existem os geradores autoexcitados. Os geradores shunt autoexcitado e compound são exemplos. No gerador autoexcitado não necessitamos de fonte externa para gerar o campo no estator. A energia para gerar o campo vem da própria tensão gerada nos terminais de saída da armadura. Mas como é produzido o campo magnético inicial? Mesmo que as bobinas de campo do estator não tenham alimentação, como em toda máquina eletromagnética, temos um magnetismo residual no estator, produzindo um campo magnético residual fraco, mas suficiente para gerar a tensão de autoexcitação inicial.

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram o diagrama elétrico simplificado dos geradores shunt e compound autoexcitados respectivamente.

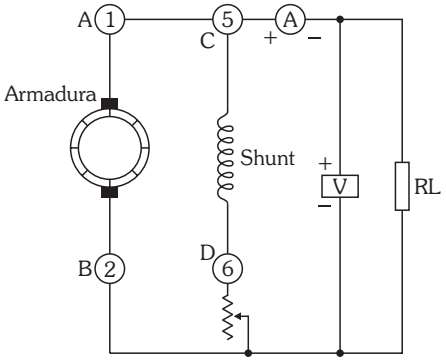


Figura 5.7 - Gerador CC com ligação shunt.

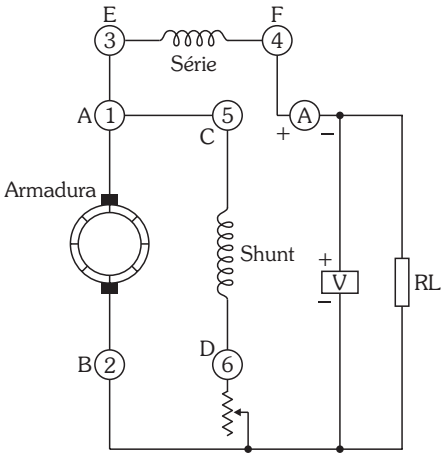


Figura 5.8 - Gerador CC com ligação compound.

Fique de olho!

No compound, o enrolamento série também pode ser ligado diretamente em série com a armadura, depois em paralelo com o shunt. São pequenas as diferenças resultantes.

O gerador shunt autoexcitado tem uma regulação de tensão deficiente por ser totalmente dependente do fluxo no campo shunt, que é realimentado pela própria tensão gerada na armadura. Se houver um aumento na corrente de carga, a tensão de armadura e na carga decrescem por dois motivos, primeiro a própria reação entre campos da armadura e o campo fixo, depois pelas perdas internas no cobre que aumentam com o aumento da corrente.

Se a tensão de saída, tensão na armadura, decresce, a excitação do campo shunt também decresce, o que favorece ainda mais a queda na tensão de saída. Pode-se compensar essa queda na tensão com ajustes no reostato do campo shunt, aumentando a tensão para o shunt, o que aumenta a tensão de saída, desde que esse valor já não esteja no máximo. Ajustes automáticos podem ser instalados, vigiando a tensão de saída e atuando no campo shunt.

O magnetismo residual, ignorado nos geradores com excitação independente, torna-se agora peça fundamental. Ele é responsável pelo pequeno fluxo inicial cortado pelas bobinas da armadura. Uma pequena tensão é induzida nas bobinas da armadura que realimentam a corrente no enrolamento shunt, produzindo um fluxo maior. Essa ação e reação são contínuas, até que a tensão atingida nos terminais da armadura seja suficiente para manter a excitação exigida para sustentação do nível desejado de tensão de saída.

Para que esse fenômeno ocorra satisfatoriamente, é necessário que o magnetismo residual seja somado ao campo magnético que será criado no enrolamento shunt, portanto depende da polaridade do campo shunt, determinada pela ligação do enrolamento à armadura. Se o campo shunt estiver em oposição ao magnetismo residual, pode anulá-lo. Uma simples inversão na ligação do shunt pode corrigir esse eventual problema.

O gerador compound autoexcitado pode ser montado como compound diferencial ou cumulativo. Tudo depende de como o enrolamento série é ligado com relação ao shunt, se em oposição ou

adição. Quando há os dois fluxos, do campo série e do campo shunt em adição, temos o compound cumulativo. Se os dois fluxos estão em sentidos opostos, temos o compound diferencial.

O número de espiras do enrolamento série dá ao gerador compound características especiais. Se o enrolamento série possui muitas espiras, temos um gerador em que a tensão de saída é maior a plena carga do que sem carga (overcompounded). Se o enrolamento série possui poucas espiras, a tensão sem carga é maior que a tensão com carga (undercompounded). A situação intermediária seria a ideal, em que o enrolamento série provê uma situação em que as tensões com carga e sem carga são iguais (flatcompounded).

Quando conectado como compound cumulativo, se a corrente de carga aumenta, a corrente através do campo shunt diminui, diminuindo o campo shunt, mas a mesma corrente de carga em aclive eleva a corrente no enrolamento série e o campo série aumenta. Essa interação garante uma variação pequena, quando não irrisória, da tensão na carga (regulação de tensão).

Fique de olho!

Qualquer gerador pode ser visto como um circuito elétrico, conforme ilustra a figura ao lado, considerando uma ligação tipo compound.

$$Vl = Eg - (Ra + Rs) \cdot Ia$$

$$Il = Ia - If$$

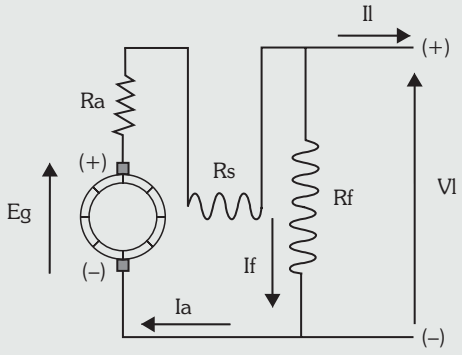


Figura 5.9 - Circuito equivalente do gerador CC compound.

5.6 Aplicações dos geradores CC

Geradores CC são utilizados quando necessitamos de corrente contínua a partir de força mecânica. Este é o caso de dínamos e geradores CC embarcados. Encontramos geradores CC em navios, barcos, bicicletas, automóveis e até em submarinos para recarregar as baterias dos motores CC de propulsão.

A questão é definir tecnicamente, com o gerador em mãos e seu manual disponível, que tipo de instalação e ligação providenciar para ele para o melhor aproveitamento dentro da aplicação. Para isso você pode seguir as orientações de um profissional experiente, sem contestação, ou argumentar com ele, tendo como base experiências pessoais com geradores CC. É necessário, portanto, que conheça o comportamento de um gerador nas formas de ligação existentes.

Os geradores de excitação independente normalmente são utilizados quando o gerador deve responder rapidamente e com certa precisão a um controle externo de aumento ou redução da tensão de saída ou quando se deseja um range considerável da tensão de saída. O inconveniente é que temos um outro dispositivo separado do motor que exige atenção: a fonte de excitação, que pode ser um conjunto de baterias.

Os geradores autoexcitados, por dependerem apenas de si mesmos, tornam-se soluções melhores em algumas aplicações. Não havendo fonte externa para excitação do campo, obtém-se redução considerável dos custos de manutenção, mas limitamos a ação sobre o gerador, pois temos apenas controle parcial do campo de excitação.

O gerador série tem aplicação extremamente técnica. Observe o sistema em que existe uma fonte alimentando uma carga, que possui uma determinada resistência interna, Figura 5.10, e somada a isso temos a impedância da linha de transmissão. Conforme o aumento da corrente de carga, observe o que acontece com a tensão na carga:

Tabela 5.1 - Regulação de tensão do circuito da Figura 5.10

RL (Ω)	I (A)	VRL (V)
Aberto	0	120
700	0,17	115,4
400	0,28	112,1
300	0,37	110
100	0,94	93,7
70	1,22	85,7

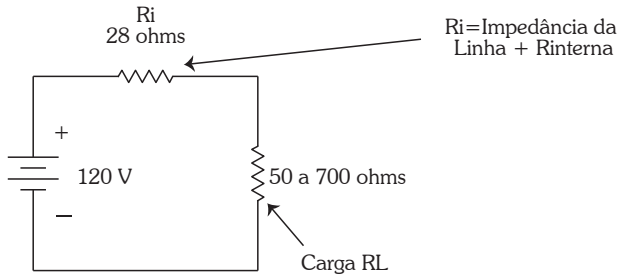


Figura 5.10 - Circuito para medição da regulação da tensão.

A regulação da tensão de saída é péssima e o gerador série pode melhorá-la:

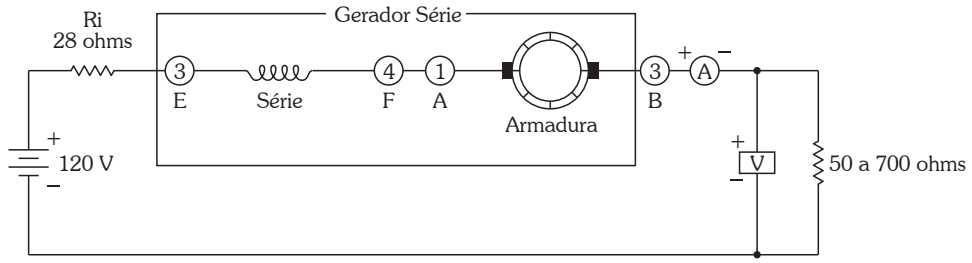


Figura 5.11 - Gerador CC em série com bateria.

Quem já estudou circuitos elétricos sabe que com o aumento da corrente solicitada pela carga há um aumento da queda de tensão na resistência interna da fonte e, consequentemente,

redução na tensão de saída. O gerador CC série pode ser utilizado para aumentar a regulação de tensão nesse circuito. Com o aumento da corrente solicitada pela carga o gerador série produz mais tensão induzida, o que compensaria as perdas na tensão transmitida à carga, Figura 5.11.

O gerador série tem sido utilizado, portanto, em sistemas de distribuição CC como um buster de tensão de linha, melhorando a regulação. Devido à dependência da carga, o gerador série é uma escolha não recomendada para servir como fonte CC por sua regulação ruim.

Veremos quatro ensaios com geradores CC com conclusões óbvias e perguntas para que você responda com suas próprias observações. Execute os ensaios a seguir com dedicação e total atenção. Anote todos os resultados e procure resposta a todas as questões que surgirem pelo caminho. Finalmente, formule seus próprios questionamentos que, com pesquisa e tempo de trabalho com essas máquinas, serão respondidos.

Amplie seus conhecimentos

Com o advento da eletrônica de potência nas últimas décadas, muitas aplicações de geradores CC têm sido substituídas por fontes eletrônicas de conversão CA – CC.

5.7 Ensaio: gerador CC

Objetivo: Estudar as propriedades e características dos geradores CC na prática. Traçar as curvas tensão × corrente de armadura com situações de carga. Observar na prática como realizar conexões de circuitos com geradores.

Fique de olho!

Os ensaios descritos em seguida foram realizados com um determinado gerador CC. Isso não quer dizer que você precise realizar seu ensaio com uma máquina idêntica nem tenha de obter os mesmos valores anotados neste ensaio. O objetivo principal é a constatação. Você leu e releu a teoria, agora vai comprovar alguns aspectos seguindo um guia de procedimentos elaborado de forma que possa comparar seus resultados com os resultados esperados e com os anotados no livro. Registre seus resultados e desenhe os gráficos.

Equipamentos utilizados: máquina CC, fonte CC ajustável 0 a 120 V 8 A, tacômetro, voltímetro e amperímetro para as correntes especificadas, reostato de 500 Ω, conjunto de resistores de potência. Motor síncrono para aplicar velocidade constante de 1800 rpm, 0,25 HP.

Fique de olho!

Trabalhamos com níveis de tensão que podem trazer riscos à vida humana e partes mecânicas girantes que podem causar danos físicos, portanto realize os ensaios apenas sob orientação e supervisão de um profissional habilitado e siga à risca todas as orientações de segurança. Antes de ligar o equipamento para verificar o funcionamento e tomar nota dos dados, peça ao profissional citado que inspecione o circuito. Ligações e alterações devem ser feitas com os equipamentos completamente desligados.

Características da máquina CC: 0,25 HP 1800 rpm 120V 2,8 A como motor, In enrolamento shunt = 0,3 A, In enrolamento série = 3 A, In armadura = 3 A. Como gerador: 120 V 1A 120 W a 1800 rpm.

5.7.1 Gerador com excitação shunt independente

Apesar de termos a mesma máquina CC, vamos trabalhar com os geradores, o que nos leva a uma operação diferente da realizada com a máquina que opera como motor. No lugar do eletrodinamômetro que servia como carga há uma máquina que deve aplicar força motriz ao gerador. Por ser um ensaio, é preciso ter a maior precisão e estabilidade possíveis em termos de rotações por minuto aplicadas ao gerador. Vamos utilizar um motor trifásico síncrono para fornecer força motriz com velocidade constante. A ligação do motor síncrono pode ser observada na Figura 5.12.

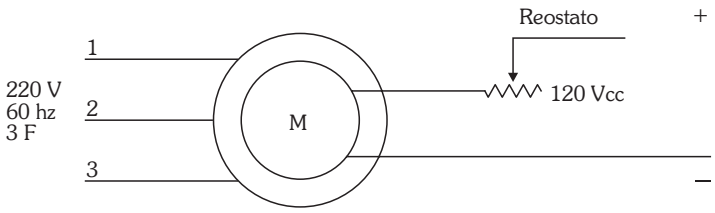


Figura 5.12 - Motor síncrono para acionamento do gerador.

O estator foi fechado em estrela e conectado à rede trifásica. O rotor bobinado foi energizado com a fonte de 120 Vcc. O reostato deve ser ajustado para máxima excitação do rotor (todo à direita).

O motor síncrono é abordado em capítulo posterior. Por enquanto é preciso dar atenção apenas às ligações para que ele funcione como força motriz no ensaio.

Além do motor síncrono, é necessário um banco de resistências capaz de atender às tabelas de registro de ensaio. Essas resistências servem de carga para o gerador, permitindo que se verifique a regulação.

Procedimentos

1) O circuito a ser montado pode ser estudado com o auxílio da Figura 5.13. A tensão de excitação é fornecida pela fonte variável. A máquina CC deve estar com o ajuste de linha neutra executado. Se não estiver, realize o ajuste conforme o ensaio do Capítulo 4.

2) Faça as conexões do circuito do gerador como na Figura 5.13, conecte o amperímetro, o voltímetro e a fonte Vcc desligada. Mantenha a carga desligada; será realizado ensaio sem carga inicialmente. Conecte um amperímetro para medir a corrente de linha na alimentação trifásica do motor síncrono.

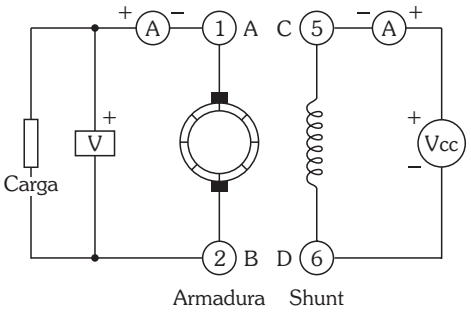


Figura 5.13 - Esquema de ligação do gerador CC independente.

3) Acople o motor síncrono ao gerador através do sistema polia correia.

4) Verifique todas as ligações antes de ligar o motor síncrono. Solicite inspeção.

5) Quando autorizado, ligue o motor síncrono que partirá com torque ajustado no reostato e velocidade constante de 1800 rpm.

6) O próximo passo é ajustar a corrente de campo shunt de acordo com a Tabela 5.2, variando a tensão da fonte de alimentação ligada ao shunt. Ajuste a corrente, meça a tensão gerada e registre o par de valores na tabela:

Tabela 5.2 - Medições do ensaio de excitação

Ishunt (mA)	Varmadura(V)
0	12
50	32
100	52
150	78
200	100
250	118
300	128
350	140
400	150

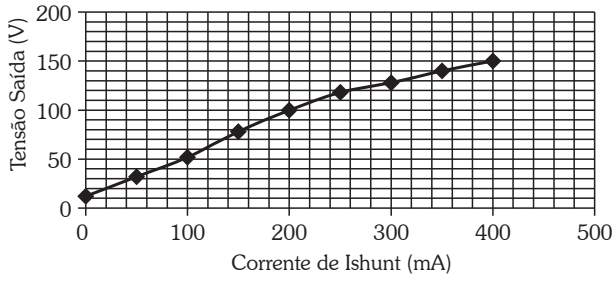


Figura 5.14 - Curva de excitação do gerador independente.

7) Com todos os dados registrados, desligue a fonte e a alimentação do motor síncrono. Com os dados da Tabela 5.2 construa um gráfico que represente a tensão gerada sem carga com o aumento da corrente de excitação de campo, Figura 5.14.

8) Inverta a ligação do enrolamento shunt, ajuste a fonte de excitação para 0 V, ligue o motor síncrono, aumente gradativamente a corrente de excitação e verifique se há inversão na polaridade da tensão gerada na armadura. Se houve, desligue o motor e a fonte, acerte as ligações do amperímetro e do voltímetro na saída, religue o motor e a fonte e meça a tensão gerada para uma corrente de excitação de 50 mA. Anote o valor.

9) Desligue o motor síncrono e a fonte de excitação. Inverta duas das três fases de alimentação do motor síncrono. Ligue o motor síncrono e verifique se houve inversão na polaridade da tensão gerada. Se houve, desligue-o, inverta o voltímetro e ligue-o novamente.

10) Desligue a fonte de excitação e o motor síncrono. Instale o módulo de carga ao circuito, como na Figura 5.13. Ajuste o módulo para uma resistência de carga de 120 ohms.

11) Ajuste lentamente, através da fonte de excitação, o campo shunt para que na saída tenhamos uma tensão de 120 V sobre a resistência de 120 Ω. A corrente na carga deve ser aproximadamente 1 A. Anote a corrente e a tensão na carga na Tabela 5.3 para carga 120 Ω.

Tabela 5.3 - Medições do ensaio do gerador com excitação independente

Rcarga (Ω)	Iarmadura (A)	Varmadura	Potência (W)	I motriz (A)
Sem carga	0	132	0	0,35
600	0,2	130	26	0,4
300	0,38	125	48	0,45
200	0,6	125	75	0,5
150	0,8	120	96	0,55
120	1	120	120	0,6
100	1,2	118	142	0,62
80	1,4	115	161	0,64
75	1,5	112	168	0,65

12) Complete a tabela para todos os valores de carga, ajustando a carga, medindo a corrente e a tensão na armadura. Procure executar as medidas o mais rápido possível, principalmente para cargas menores que 120 Ω, pois a potência desenvolvida na armadura está acima da nominal. Desligue os equipamentos após terminar.

Fique de olho!

Observe a coluna I motriz na tabela. A corrente no motor síncrono aumenta conforme aumentamos a carga. Quanto maior a carga, mais potência ele terá de desenvolver para manter a mesma velocidade. Pode-se deduzir que um gerador a diesel consumiria mais diesel conforme aumentamos o consumo de energia elétrica.

$$P(W) = \text{Varmadura} \times \text{Iarmadura}$$

13) Com os dados da Tabela 5.4 faça o desenho da curva (Varmadura × Iarmadura) característica do gerador shunt com excitação independente.

Tabela 5.4 - Varmadura e Iarmadura da Tabela 5.3

Iarmadura (A)	Varmadura(V)
0	132
0,2	130
0,38	125
0,6	125
0,8	120
1	120
1,2	118
1,4	115
1,5	112

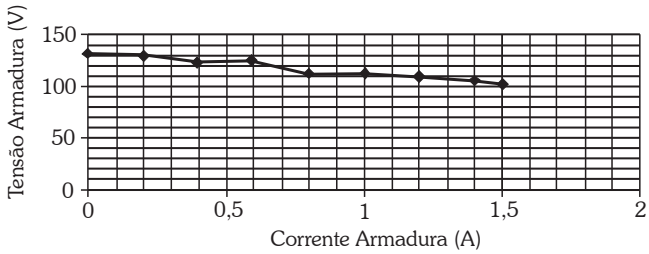


Figura 5.15 - Curva característica do gerador independente.

14) Responda às questões seguintes com base nos resultados do ensaio e no estudo da teoria:

a) Se o gerador estiver fornecendo 60 W de potência a uma determinada carga e de repente a carga solicita um aumento para 120 W, o que ocorre com o motor síncrono que movimenta o gerador?

b) Quais são as duas maneiras testadas para inverter a polaridade da tensão gerada?

c) Se o gerador pretende suprir 120 W de potência a uma carga, qual a potência mínima em CV da máquina motriz do gerador? Considere rendimento de 100% (1CV = 736 W).

d) Calcule a regulação do gerador shunt com excitação independente com a equação de regulação.

$$\%\text{Regulação} = \frac{\text{V sem carga} - \text{V com carga}}{\text{V com carga}} \times 100$$

5.7.2 Gerador shunt autoexcitado

Procedimentos

1) O circuito a ser montado pode ser estudado com o auxílio da Figura 5.16. A máquina CC deve estar com o ajuste de linha neutra executado. Se não estiver, realize o ajuste conforme ensaio do Capítulo 4.

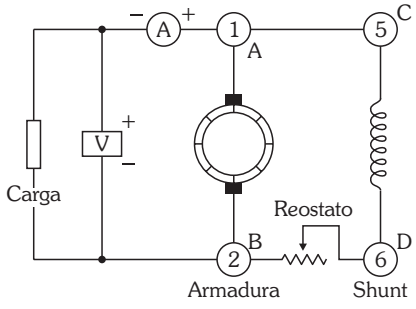


Figura 5.16 - Esquema de ligação do gerador CC shunt.

2) Faça as conexões do circuito do gerador conforme a Figura 5.16. Conecte o amperímetro, o voltímetro e o reostato em série com o enrolamento shunt (o reostato deve estar com resistência zero). Mantenha a carga desligada para testar a capacidade de geração sem carga.

3) Acople o motor síncrono ao gerador através do sistema polia correia.

4) Verifique todas as ligações antes de ligar o motor síncrono. Solicite inspeção.

5) Quando autorizado, ligue o motor síncrono que partirá com torque ajustado no reostato e velocidade constante de 1800 rpm.

6) Observe atentamente a tensão no voltímetro. Como o gerador está sem carga, a tensão de saída deve elevar-se acima da nominal. Se isso não ocorreu (o magnetismo residual pode ter sido anulado), desligue o motor síncrono, inverta o enrolamento shunt e ligue o motor síncrono novamente.

7) Anote a tensão gerada sem carga:

Varmadura: 170 V

8) Varie a corrente no enrolamento shunt através do reostato e verifique se a tensão gerada sofre alteração. Explique.

9) Ajuste 120 Ω de carga para o gerador e o reostato do campo shunt para uma tensão de saída igual a 120 V com carga. Observe o amperímetro; a corrente não deve ultrapassar 1 A. Esta é a condição nominal do gerador; não altere mais o ajuste no reostato.

10) Anote os valores Iarmadura e Varmadura da condição nominal na Tabela 5.5. Ajuste as resistências para cada situação de carga na tabela e anote os valores de Iarmadura e Varmadura.

Fique de olho!

Em algumas situações de carga (R < 120 Ω) a Iarmadura ultrapassa a nominal para o gerador. Execute suas medições o mais rápido possível nestes casos.

Tabela 5.5 - Medições do ensaio do gerador autoexcitado shunt

Rcarga (Ω)	Iarmadura (A)	Varmadura (V)	Potência (W)
Sem carga	0	156	0
600	0,25	144	35
300	0,43	135	58
200	0,6	130	78
150	0,8	125	100
120	1,0	120	120
100	1,1	115	126,5
80	1,3	107	139,1
75	1,35	105	141,8

11) Com os dados da Tabela 5.5 construa a curva de regulação do gerador:

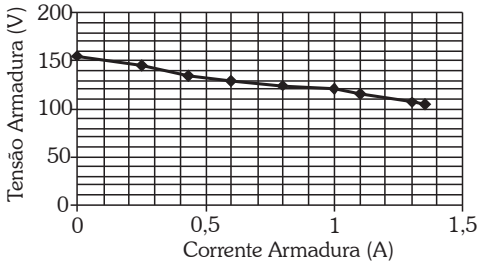


Figura 5.17 - Curva característica do gerador autoexcitado shunt.

12) Responda às questões sobre este ensaio de acordo com seus conhecimentos teóricos e práticos:

a) Se conectamos o enrolamento shunt de forma que, ao ser alimentado, o campo magnético inicial anule o residual, o que ocorre com o gerador?

b) Se o campo magnético residual for totalmente eliminado de um gerador como o ensaiado, ele vai trabalhar? Como você faria para colocar o gerador de volta em operação?

c) Calcule a regulação do gerador ensaiado.

5.7.3 Gerador compound autoexcitado

Procedimentos

1) O circuito a ser montado pode ser estudado com o auxílio da Figura 5.18. A máquina CC deve estar com o ajuste de linha neutra executado. Se não estiver, realize o ajuste conforme ensaio do Capítulo 4.

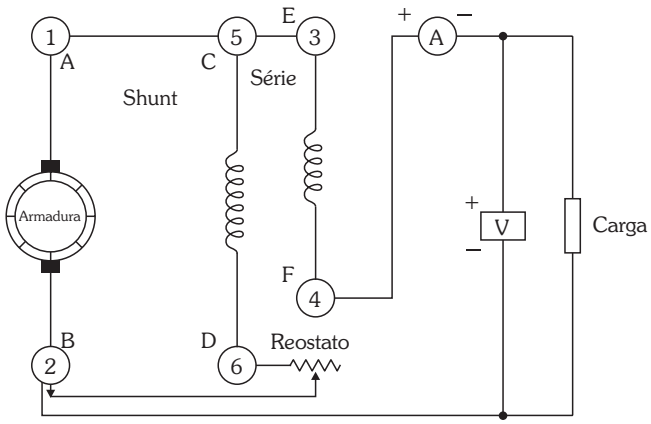


Figura 5.18 - Esquema de ligação do gerador CC compound.

2) Faça as conexões do circuito do gerador conforme a Figura 5.18, conecte o amperímetro, o voltímetro e o reostato em série com o enrolamento shunt (o reostato deve estar com resistência zero). Mantenha a carga desligada, pois será testada a capacidade de geração sem carga inicialmente.

3) Acople o motor síncrono ao gerador através do sistema polia correia.

4) Verifique todas as ligações antes de ligar o motor síncrono. Solicite inspeção.

5) Quando autorizado, ligue o motor síncrono. O motor síncrono vai partir com torque ajustado no reostato e velocidade constante de 1800 rpm.

6) Observe atentamente a tensão no voltímetro. Como o gerador está sem carga, a tensão de saída deve elevar-se acima da nominal. Anote o valor da tensão sem carga.

$$V_{armadura} = 175\ V$$

7) Varie o reostato de campo shunt e verifique se há alteração na tensão gerada. Explique por que ocorre alteração.

8) Ajuste o reostato de campo shunt para tensão de saída de 120 V. Anote os valores de I e V de armadura na Tabela 5.6, na linha sem carga.

Tabela 5.6 - Medições do ensaio do gerador autoexcitado compound

Rcarga (Ω)	Iarmadura (A)	Varmadura (V)	Potência (W)
Sem carga	0	120	0
600	0,2	120	24
300	0,35	120	42
200	0,6	120	72
150	0,75	120	90
120	1,0	120	120
100	1,2	120	144
80	1,5	120	180
75	1,6	120	192

9) Insira os diversos valores de carga constantes na Tabela 5.6, registre os valores de I e V de armadura medidos para cada valor de carga. Desligue o motor síncrono e o sistema ao terminar.

Fique de olho!

A tensão deve manter-se aproximadamente constante para os diversos valores de carga (compound cumulativo). Se isso não ocorrer, desligue o motor síncrono, inverta o enrolamento série e volte para o item 8.

Com cargas menores que 120 Ω, o gerador passa a trabalhar acima da capacidade nominal, portanto seja rápido nas medições nessa etapa.

10) Com os dados da Tabela 5.6 construa a curva de regulação do gerador compound cumulativo:

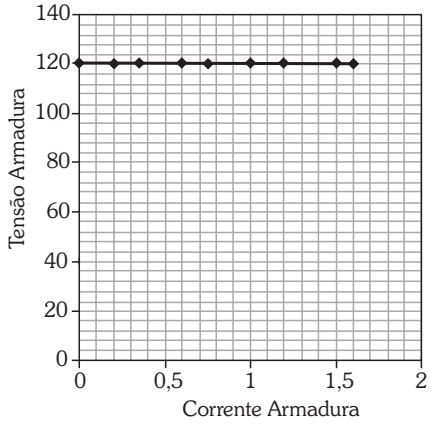


Figura 5.19 - Curva característica do gerador autoexcitado compound.

11) Inverta a ligação do enrolamento série para o ensaio do gerador compound diferencial.

12) Retire a carga do gerador. Ligue o motor síncrono e ajuste, através do reostato de armadura, a tensão de saída para 120 V. Meça e registre na Tabela 5.7 a I e a V de armadura.

13) Complete a Tabela 5.7 com os valores de I e V de armadura para os diversos valores de resistência de carga. Terminado, desligue todos os equipamentos.

Tabela 5.7 - Medições do ensaio do gerador autoexcitado compound diferencial

Rcarga (Ω)	Iarmadura (A)	Varmadura (V)	Potência (W)
Sem carga	0	120	0
600	0,2	109	22
300	0,25	94	23,5
200	0,38	80	30,4
150	0,4	56	22
120	0,36	44	16
100	0,34	32	11
80	0,32	24	7,7
75	0,32	20	6,4

14) Com os valores da Tabela 5.7 construa a curva de regulação do gerador compound diferencial:

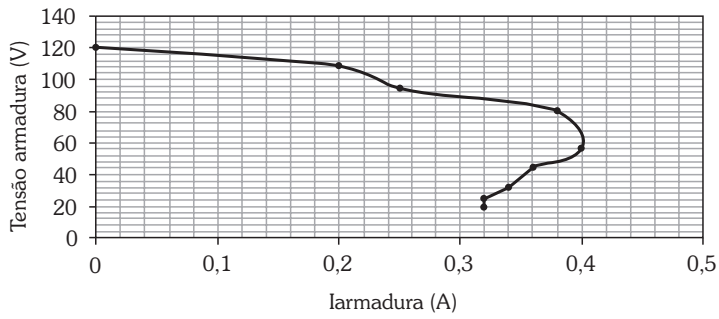


Figura 5.20 - Curva característica do gerador autoexcitado compound diferencial.

15) Responda às questões seguintes com relação ao ensaio executado:

a) Como se verifica se um gerador é diferencial ou cumulativo?

b) Quais são as duas maneiras de alterar um gerador compound diferencial para cumulativo?

c) Calcule a regulação de tensão do compound cumulativo.

d) Calcule a regulação de corrente do compound diferencial.

e) Explique por que a tensão de saída no gerador compound cumulativo não decresce com o aumento da carga.

5.7.4 Gerador CC série

Procedimentos

1) O circuito a ser montado pode ser estudado com o auxílio da Figura 5.21. A máquina CC deve estar com o ajuste de linha neutra executado. Se não estiver, realize o ajuste conforme ensaio do Capítulo 4.

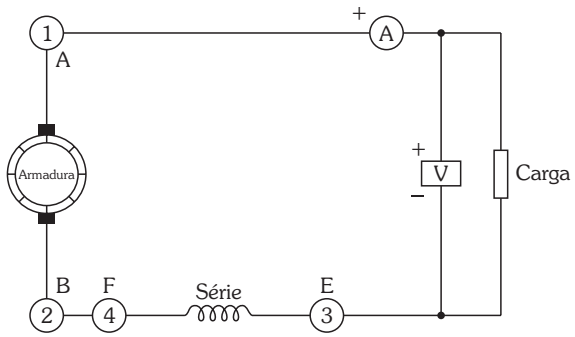


Figura 5.21 - Esquema de ligação do gerador CC série.

2) Monte o circuito da Figura 5.21, mantendo a carga desligada inicialmente.

3) Ligue o motor síncrono e meça a tensão gerada com o circuito aberto:

$$Vcc = 12{,}8\ V$$

4) Complete a Tabela 5.8, inserindo os valores de resistência de carga, registrando os valores de tensão e de corrente na carga. Ao terminar, desligue todos os equipamentos.

Tabela 5.8 - Medições do ensaio do gerador autoexcitado série

Rcarga (Ω)	Icarga (A)	Vcarga (V)	Potência (W)
Sem carga	0	13	0
40	0,74	30	22,2
37,5	0,83	31	25,7
35,3	0,92	33	30,4
33,3	1,00	35	35,0
31,5	1,10	38	41,8
30	1,20	39	46,8
28	1,30	40	52

5) Com os dados da Tabela 5.8 construa a curva de regulação do motor série.

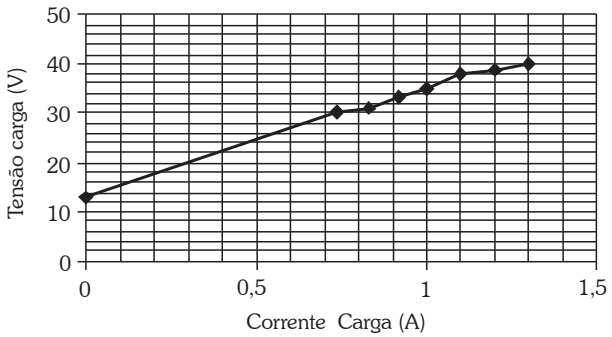


Figura 5.22 - Curva característica do gerador autoexcitado série.

6) Responda às questões seguintes relativas ao ensaio:

a) Com o gerador sem carga, circuito aberto, uma tensão de aproximadamente 12 V apareceu entre os terminais de saída. Como isso é possível?

b) Calcule a regulação de tensão do gerador série.

c) Preencha o quadro comparativo dos geradores:

Tabela 5.9 - Comparação de resultados

Gerador	Regulação	Tensão Máx. Saída
Shunt Exc. Ind.		
Shunt Autoexc.		
Compound		
Compound Dif.		
Série		

Alguns termos em inglês foram mantidos, mas é possível encontrar a mesma máquina fabricada no Brasil com nome adaptado para o português ou com nomes traduzidos em livros técnicos:

» Motor shunt: Motor paralelo

» Motor compound: Motor composto, motor série-paralelo

» Compound diferencial: Composto diferencial, série-paralelo diferencial

» OverCompound: SobreCompound

» UnderCompound: SubCompound

» FlatCompound: Compound Normal

Vamos recapitular?

O gerador transforma energia mecânica em energia elétrica. O gerador faz a transformação oposta ao do motor. A potência elétrica desenvolvida pelo gerador pode ser dada por:

$$P_{ele} = T.\omega = Eg.Ia$$

Uma das características elétricas mais importantes dos geradores é a relação entre a tensão de armadura e a corrente de armadura (V×I). Você fez ensaios em laboratório para levantar o comportamento dessa característica para cada tipo de excitação de gerador CC.

Sob o ponto de vista elétrico, esses geradores podem ser representados por meio de circuitos elétricos equivalentes, respeitando cada tipo de ligação.

Agora é com você!

1) O que é gerador?
2) Qual o componente que define se um gerador será CC ou CA?
3) Descreva o princípio de funcionamento do gerador.
4) Quais são os dois grupos principais de geradores CC?
5) Descreva as vantagens e desvantagens dos geradores com excitação independente com relação aos geradores autoexcitados.
6) Descreva as características do gerador shunt com excitação independente.
7) Cite as características do gerador shunt autoexcitado.
8) Descreva as características do gerador compound.
9) Descreva as características do gerador série.
10) Um gerador é acionado por um motor a diesel que fornece potência de 30 cv. Qual a potência elétrica (kW) que este gerador é capaz de fornecer considerando seu rendimento igual a 88%?
11) Toda máquina elétrica tem perdas internas, inclusive o gerador. Com relação ao exercício anterior, considere que 50% das perdas ocorrem na armadura, 45% no campo de excitação e 5% são perdas por atrito mecânico, especialmente nos rolamentos. Calcule o valor de cada uma dessas perdas (kW).
12) Se o motor do exercício anterior gira a 1800 rpm, qual é o torque no eixo?

6

Outros Motores

Para começar

Neste capítulo serão apresentados dois tipos de motores que podem operar tanto em CC como em CA. Os motores tipo universal e tipo de repulsão possuem essa característica. Serão apresentados os princípios de funcionamento e os aspectos construtivos básicos de cada um deles.

Conforme tem sido adotado desde o início deste livro, as características desses motores serão desenvolvidas por meio de ensaios em laboratório.

Este capítulo ainda faz referência a um outro tipo de motor chamado de motor de campo distorcido. Este tipo de motor só pode funcionar em CA, e se caracteriza como um caso particular de motor monofásico. Será feita apenas uma apresentação sumária sobre ele.

6.1 Visão geral

Este capítulo trata dos motores que podem ser ligados à rede monofásica, mas não foram mencionados até o momento. São eles o motor universal, o motor de repulsão e o motor de campo distorcido. Os dois primeiros possuem características trazidas dos motores CC, mas como veremos, têm finalidade e comportamento diferentes. O último tem características completamente diversas.

Dos três motores é difícil encontrar o motor de repulsão e o de campo distorcido em aplicações atuais, mas o universal é muito utilizado em eletrodomésticos e ferramentas elétricas portáteis. O motor de campo distorcido pode ser encontrado como bomba-d'água em algumas lavadoras de roupa.

6.2 Motor universal: aplicações

O motor universal é uma adaptação do motor CC série para que trabalhe tanto em CC como em CA. Se um motor série CC é conectado a uma rede CA, pode até partir, mas com extrema limitação, já que em CA a reatância indutiva presente nos enrolamentos apareceria e limitaria a corrente neles.

Como estudamos, a corrente que circula nos enrolamentos é extremamente importante para o desenvolvimento dos fenômenos eletromagnéticos internos, que neste caso estariam comprometidos. As perdas por histerese e correntes parasitas se tornariam relevantes devido ao fluxo magnético alternado no ferro magnético sólido do estator, e a transformação de tensão entre a armadura e os enrolamentos de campo produziria efeitos indesejados sobre as escovas e a comutação.

Um novo projeto, com características parecidas, mas adaptado para trabalhar com CA sem que seus efeitos afetem negativamente o motor, foi concebido. O motor universal, presente numa infinidade de eletrodomésticos, como batedeiras, liquidificadores, furadeiras etc., pode operar em CA, mas também em CC. A alta velocidade e a potência com relação às dimensões reduzidas são as motivações de suas aplicações.

6.3 Motor universal: princípio de funcionamento

O motor universal apresenta características construtivas semelhantes às do motor CC. Ele possui armadura, coletor, escovas e um enrolamento de campo fixo ao estator. A Figura 6.1 traz a representação elétrica de um motor universal.

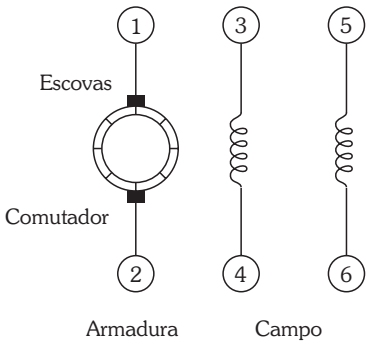


Figura 6.1 - Terminais de um motor universal.

Uma furadeira, um liquidificador ou uma batedeira têm estes componentes e estão presentes no dia a dia: duas bobinas de campo, uma armadura, escovas e comutador. Identifique esses componentes em um motor universal.

Um enrolamento de campo é chamado principal ou série e o outro, enrolamento de compensação.

A diferença fundamental, mas não única, é que o material que constitui o ferromagnético não é maciço, evitando que a variação de fluxo produza perdas muito grandes com correntes parasitas. Como se trata de um motor com características construtivas semelhantes às do motor CC, pode-se presumir que teremos reações semelhantes, mas com tratamento diferenciado devido à corrente alternada.

Para que o motor universal, que é uma modificação do motor série CC, trabalhasse adequadamente, procurou-se reduzir a reatância indutiva que aparece com a corrente alternada utilizando um enrolamento de compensação no estator. Esse enrolamento serve também para impedir uma possível reação da armadura, da mesma forma que o interpolo no motor CC. Conectado em série com a armadura, mas de forma que seu fluxo se oponha ao da armadura, reduz a corrente na armadura, reduzindo indiretamente a reatância indutiva. Neste caso temos uma compensação condutiva.

O enrolamento de compensação também pode ser instalado simplesmente como o secundário de um transformador em curto-circuito, desta forma a armadura age como primário e o campo induzido no secundário fica em oposição ao campo da armadura. Essa compensação se chama indutiva e é necessário um cuidado especial com o enrolamento de compensação em relação às suas características elétricas.

De um modo geral, o processo que faz o motor universal imprimir rotação é o mesmo que o motor CC, com a diferença de que os polos no estator se alternam, acompanhando o ciclo da tensão da rede. Temos então a inversão da corrente na armadura provocada pela corrente alternada, mas o polo no estator também inverte, portanto a reação da armadura continua a mesma e o motor se mantém girando.

6.4 Motor de repulsão: aplicações

O motor de repulsão é ideal para aplicações em que se tem uma carga alta de inércia e o motor precisa imprimir torque, absorvendo certa corrente da rede durante o período de partida da máquina. O torque de partida alto é o grande atrativo desse motor, mas existe a desvantagem de um equipamento com escovas, coletor e o desgaste e manutenção que vêm com esse conjunto.

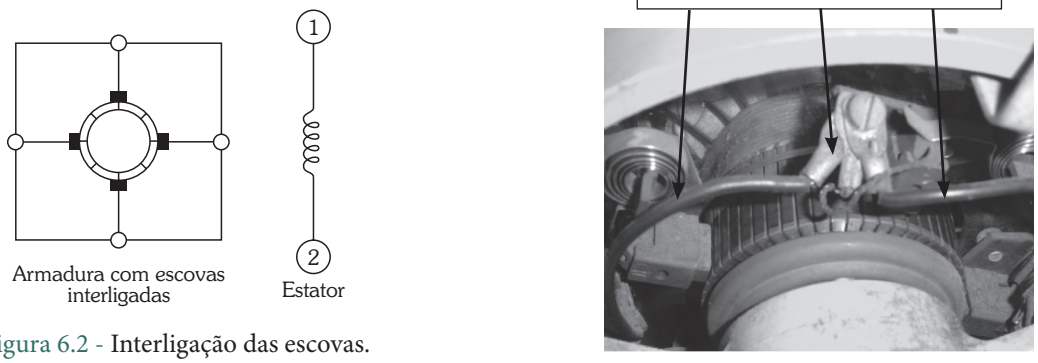


Figura 6.2 - Interligação das escovas.

Esse torque, em comparação com um motor de capacitor de partida, é um pouco maior, mas a corrente que ele absorve da rede na partida, mesmo com torque maior, é bem menor. Colocando no papel os custos operacionais de um motor de repulsão com relação a um motor de capacitor de partida, este último vence, e em muitas aplicações tomou o lugar do motor de repulsão. Em aplicações que precisam do torque elevado de partida com reduzida corrente, o motor de repulsão é a opção mais indicada por apresentar a melhor relação torque/corrente dos motores monofásicos. Trituradores e moedores antigos em fazendas ainda utilizam esses motores, mas é difícil encontrá-los.

6.5 Motor de repulsão: funcionamento

O motor de repulsão possui armadura como o motor CC, um comutador e escovas que, por ação centrífuga, curto-circuitam todas a barras do comutador quando o motor atinge velocidade próxima à nominal. O estator de um motor de repulsão é semelhante ao estator do motor de fase dividida, com exceção da ausência do enrolamento auxiliar, que no motor de repulsão é desnecessário. O torque de partida é obtido pelo princípio da repulsão.

O sistema de escovas do motor de repulsão é parte fundamental no seu funcionamento. Há pares de escovas interligadas, divididas em espaços de 90°, que podem ser deslocadas para inversão de rotação e ajuste

de torque máximo. Ao alimentar as bobinas do estator, o campo produzido encontra, em uma determinada região, um lado da armadura com as escovas interligadas e induz corrente nesse segmento da armadura.

Essa corrente induzida faz surgir um campo muito forte nos enrolamentos não curto-circuitados na armadura nesse momento. Ele reage com o campo produzido no estator, produzindo torque. Em outras palavras, o campo gerado no estator atinge a armadura, mas ela "enxerga" esse campo de duas maneiras devido ao curto-circuito em um segmento. Tem-se virtualmente uma divisão do campo no estator. Parte do enrolamento é considerada de indução, pois induz corrente na parte curto-circuitada da armadura, e a outra parte é chamada apenas de enrolamento de campo, porque sofre a reação do campo que aparece na armadura.

Então, o enrolamento de indução induz corrente na parte curto-circuitada da armadura, que reage com o campo magnético produzido no enrolamento de campo, produzindo torque. Essa repulsão da armadura dá ao motor seu nome.

Quando o motor atinge uma determinada velocidade, cerca de 80% da nominal, o comutador é todo curto-circuitado por ação centrífuga e a armadura adquire características de um rotor gaiola de esquilo. Nesse momento a máquina passa a trabalhar com características semelhantes a um motor de fase dividida.

6.6 Motor de campo distorcido

O motor de campo distorcido possui como principal característica anéis de cobre que curto-circuitam parte do estator, Figuras 6.3 e 6.4, sendo por isso conhecido também como motor de polo subdividido. A finalidade do anel em curto é promover a concentração de linhas de força em uma extremidade.

No semiciclo positivo da tensão da rede, analisando em duas etapas, o fluxo magnético no estator do motor de campo distorcido, de 0 a 90° em crescimento, corta os anéis de cobre, criando neles um campo magnético contrário ao fluxo que o gerou. O resultado é a redução da densidade nas extremidades com anéis (menos linhas de fluxo) e a concentração de linhas na outra extremidade, Figura 6.3. De 90° a 180°, deduz-se o efeito contrário; quando o fluxo reduz sua intensidade acompanhando a tensão da rede, o campo magnético criado nos anéis soma-se às linhas do estator, tendo densidade resultante maior que na outra extremidade. Nota-se um deslocamento polar na superfície das sapatas que é acompanhado pelo rotor gaiola pelo efeito da indução.

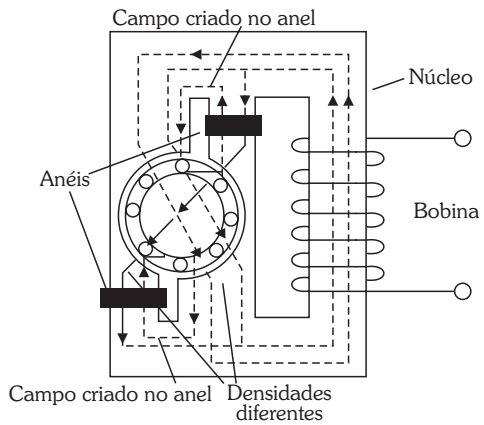


Figura 6.3 - Esquema do motor de campo distorcido.

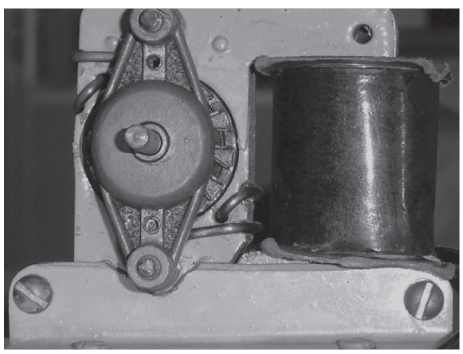


Figura 6.4 - Imagem do motor de campo distorcido.

Esses motores são utilizados em pequenos aparelhos, como agitadores para química, ventiladores de pequeno porte e antigas vitrolas para discos de vinil. A aplicação desse tipo de motor está limitada a sua baixa potência (cerca de, no máximo, 300 W) e a velocidade limitada pelo número de polos e a frequência (900 a 3600 rpm). Já sua simplicidade deve ser considerada fator importante na produção de equipamentos sem exigência de torque.

Amplie seus conhecimentos

O motor de campo distorcido também é conhecido como motor de polo sombreado. Na prática são considerados mini-motores, usualmente com potência inferior a 1/10 cv. São aplicados, sobretudo, para movimentação de ar através de pequenos ventiladores e exaustores. Podem ser encontrados em coifas, sistemas de resfriamento e refrigeração, inaladores e outros dispositivos de pequeno porte.

6.7 Ensaio: motor universal

Objetivo: Estudar as propriedades e características do motor universal na prática. Observar na prática como realizar conexões de circuitos com motores e conexões mecânicas com equipamentos auxiliares.

Fique de olho!

Os ensaios descritos em seguida foram realizados com um determinado motor CC. Isso não quer dizer que você precise realizar seu ensaio com uma máquina idêntica nem que tenha de obter os mesmos valores anotados neste ensaio. O objetivo principal é a constatação. Você leu e releu a teoria, agora vai comprovar alguns aspectos, seguindo um guia de procedimentos elaborado de forma que possa comparar seus resultados com os esperados e com os anotados no livro. Registre seus resultados.

Equipamentos utilizados: motor universal 0,25 HP 1800 rpm 120 V 3 A, fonte CA ajustável 0 a 120 V 8 A, fonte CC ajustável de 0 a 120 V, eletrodinamômetro com capacidade de aplicar cargas até 3 N.m, tacômetro, voltímetro e amperímetro para as tensões e correntes esperadas.

Fique de olho!

Estamos trabalhando com níveis de tensão que podem trazer risco à vida humana e com partes mecânicas girantes que podem causar danos físicos, portanto realize os ensaios apenas sob orientação e supervisão de um profissional habilitado e siga à risca todas as orientações de segurança. Antes de ligar o equipamento para verificar o funcionamento e tomar nota dos dados, peça ao profissional citado que inspecione o circuito. Ligações e alterações devem ser feitas com todos os equipamentos completamente desligados.

Fique de olho!

Para medir a potência ativa total e, consequentemente, as perdas no motor, vamos utilizar um wattímetro. Esta é a maneira mais simples de obter esses dados. A outra maneira, por meio de cálculos, foge ao escopo deste livro.

Procedimentos

1) Inicialmente obtenha as características físicas do seu motor conforme a seguir:
   - » Número de bobinas do enrolamento principal (série): 4
   - » Número de bobinas de compensação: 4

2) Meça a resistência dos enrolamentos com um ohmímetro e anote:

$$R_{principal(série)} = 1{,}7\ \Omega$$

$$R_{compensação} = 3\ \Omega$$

$$R_{armadura} = 4{,}7\ \Omega$$

3) Ajuste a linha neutra como o item 4.9.1 do capítulo 4. Esse ajuste é imprescindível para evitar faiscamento excessivo e desgaste prematuro das escovas e do comutador. Desta vez vamos utilizar o enrolamento de compensação e a armadura.

4) Execute a montagem representada na Figura 6.5 com a fonte CA inicialmente em 0 V e desligada.

5) Ajuste a fonte CA para uma tensão de 60 V aplicada à armadura. Ajuste as escovas, através do mecanismo de ajuste, para que a tensão indicada no voltímetro seja a menor possível. Agora a linha neutra está ajustada.

6) É necessário ligar o enrolamento de compensação em série com a armadura de modo que os dois campos se anulem, reduzindo indiretamente a reatância. Monte o circuito como na Figura 6.6 (enrolamento de compensação em série com a armadura) com a fonte CA em 0 V e desligada:

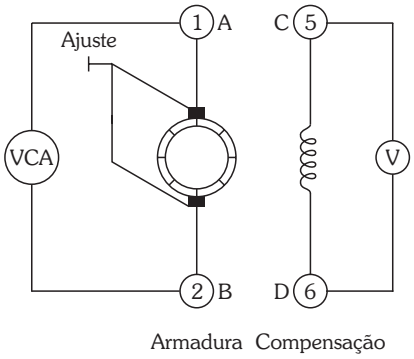


Figura 6.5 - Ligação para ajuste da linha neutra.

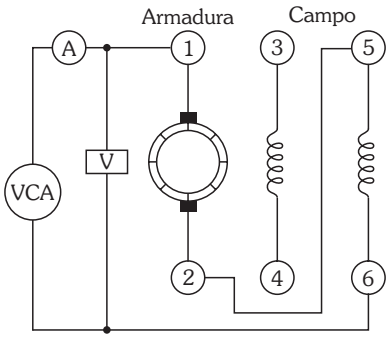


Figura 6.6 - Esquema de ligação em série.

7) Ligue a fonte CA e ajuste a tensão para 24 VCA. Meça a corrente no amperímetro e registre.

$$I_m(2;5) = 2{,}6\ A$$

8) Desligue a fonte, inverta a ligação do enrolamento de compensação. Repita o item 7, meça novamente a corrente e registre. Desligue a fonte ao terminar.

$$I_m(2;6) = 0{,}15\ A$$

Reflexão: Como estudamos, se os campos se anulam para o motor CC, e este é o objetivo, temos menor indutância e uma corrente maior circulando, portanto a ligação correta da compensação condutiva é a que resultou em maior corrente. Marque-a porque vai utilizá-la adiante. No exemplo, 2 conectado ao 5 (2;5).

9) Monte o circuito representado na Figura 6.7. Mantenha a fonte desligada durante a montagem, pois o objetivo principal é testar as características do motor ligado à rede CA.

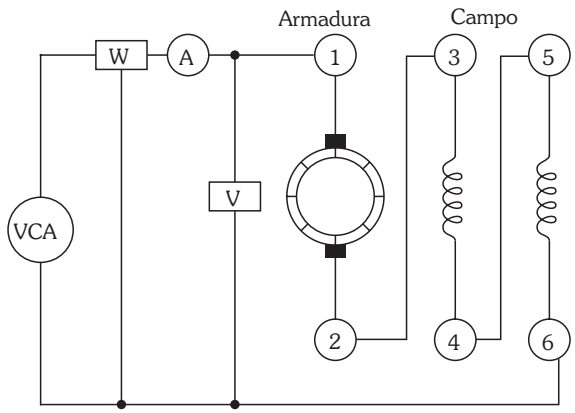


Figura 6.7 - Esquema de ligação para ensaio das características.

10) Acople o eletrodinamômetro ao motor e ajuste-o para carga máxima.

11) Pré-ajuste a tensão da fonte CA, fora do circuito, para a tensão nominal do motor, neste caso 120 V. Desligue-a e conecte novamente ao circuito.

12) Inicie o ensaio ligando todos os equipamentos, fonte CA e eletrodinamômetro. Ajuste a carga conforme a Tabela 6.1 e registre os valores medidos de corrente, potência ativa no wattímetro e velocidade, necessários para o preenchimento total da Tabela 6.1. Desligue todos os equipamentos ao terminar.

Tabela 6.1 - Medições do ensaio do motor universal em CA

Carga (N · m)	P (watts)	I (A)	rpm	Aparente (VA)	Potência (HP)
0	210	1,9	4100	228	0
0,35	240	2,3	2550	276	0,12
0,7	285	2,9	1850	348	0,18
1	320	3,3	1400	396	0,2

Fique de olho!

Para calcular a potência em HP, calcule primeiro a potência em watts com a fórmula watts no eixo = rpm × N · m × 0,105 e divida por 746 W, pois 1 HP = 746 W.

13) Substitua a fonte CA por uma fonte CC e todos os instrumentos de medição por instrumentos de medição CC.

14) Repita os itens 11 e 12 para essa atual condição do circuito com a nova fonte e os instrumentos para CC. Veja a Tabela 6.2.

Desligue todos os equipamentos ao terminar.

Tabela 6.2 - Medições do ensaio do motor universal em CC

Carga (N.m)	P (watts)	I (A)	rpm	W (efetivo)	Potência (HP)
0	240	1,7	4500	204	0
0,35	290	2,0	3300	240	0,16
0,7	350	2,5	2600	300	0,25
1	400	2,9	2200	348	0,32

15) Com os resultados obtidos no ensaio, calcule os dados necessários ao preenchimento da Tabela 6.3. Alguns dados da tabela podem ser extraídos diretamente do ensaio.

Tabela 6.3 - Parâmetros do motor universal em CA e CC

Dados/Alimentação	CA a vazio	CA a plena carga	CC a vazio	CC a plena carga
Potência ativa				
Potência aparente				
Fator de potência				
Potência reativa				
Watts no eixo				
Eficiência				
Velocidade				
Perdas no motor				

Formulário

$$\text{Fator de potência} = \frac{P(W)}{S(VA)}$$

$$\text{Watts no eixo} = \text{rpm} \times N \cdot m \times 0{,}105$$

$$\text{Eficiência } \eta = \frac{\text{Psaída}}{\text{Pent}} \times 100$$

$$\text{Perdas no motor} = \text{P entrada(W)} - \text{P no eixo(W)}$$

16) Para determinar quando o motor universal desempenha o maior torque, vamos aplicar tensão reduzida com carga máxima oferecida pelo dinamômetro e medir a corrente de partida e o torque.

17) Para o circuito da Figura 6.7, aplique 30 Vcc com eletrodinamômetro ligado e com carga máxima para a partida. Meça o torque de partida desenvolvido e a corrente exigida e registre:

$$Im = 4\ A \qquad Torque = 1{,}9\ N \cdot m$$

18) Aplique 30 VCA ao mesmo circuito do item 17 e repita o procedimento. Registre a corrente e o torque do motor universal em corrente alternada:

Im = 1,6 A Torque = 0,2 N·m

19) Quais as diferenças apresentadas pelo motor universal quanto à ligação em CC ou em CA?

6.8 Ensaio: motor de repulsão de partida

Objetivo: Estudar as propriedades e características do motor de repulsão de partida na prática. Observar como realizar conexões de circuitos com motores e conexões mecânicas com equipamentos auxiliares.

Fique de olho!

Os ensaios descritos em seguida foram realizados com um determinado motor CC. Não quer dizer que você precise realizar o ensaio com uma máquina idêntica nem que tenha de obter os mesmos valores anotados neste ensaio. O objetivo principal é a constatação. Você leu e releu a teoria, agora vai comprovar alguns aspectos, seguindo um guia de procedimentos elaborado de forma que possa comparar seus resultados com os esperados e com os anotados no livro. Registre seus resultados.

Equipamentos utilizados: motor de repulsão 0,25 HP 1800 rpm 120 V 5,5 A, fonte CA ajustável 0 a 120 V 8 A, eletrodinamômetro com capacidade de aplicar cargas até 3 N·m, tacômetro, voltímetro e amperímetro para as tensões e correntes esperadas.

Fique de olho!

Estamos trabalhando com níveis de tensão que podem trazer risco à vida humana e com partes mecânicas girantes que podem causar danos físicos, portanto realize os ensaios apenas sob orientação e supervisão de um profissional habilitado e siga à risca todas as orientações de segurança. Antes de ligar o equipamento para verificar o funcionamento e tomar nota dos dados, peça ao profissional citado que inspecione o circuito. Ligações e alterações devem ser feitas com todos os equipamentos completamente desligados.

Fique de olho!

Para medir a potência ativa total e, consequentemente, as perdas no motor, vamos utilizar um wattímetro. Esta é a maneira mais simples de obter esses dados. A outra maneira, por meio de cálculos, foge ao escopo deste livro.

Procedimentos

1) Inicialmente obtenha as características físicas do motor conforme a seguir:
   - » Número de bobinas do enrolamento do estator: 4
   - » Número de escovas ligadas ao comutador: 4
2) Meça a resistência dos enrolamentos com um ohmímetro e anote:

Restator = 3,7 Ω

Fique de olho!

No motor de repulsão se torna difícil medir a resistência da armadura sem desmontar o motor, já que está curto-circuitada pelas escovas. Esta é uma forma de reconhecer o motor de repulsão, observando as escovas interligadas.

3) O ajuste do posicionamento das escovas no motor de repulsão será executado com o motor em funcionamento. Monte o circuito da Figura 6.8. A fonte VCA deve estar inicialmente ajustada para 0 V e desligada.

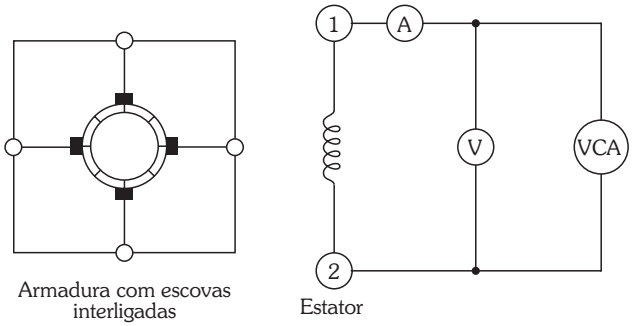


Figura 6.8 - Esquema de ligação para ensaio dos parâmetros do motor de repulsão.

4) Acople o eletrodinamômetro desligado e com carga máxima ajustada ao motor.

Fique de olho!

Os itens 5, 6 e 7 devem ser executados o mais rapidamente possível enquanto o profissional monitora o aquecimento da máquina. Se o tempo exceder 25 segundos, desligue tudo, espere dois minutos para que o motor esfrie e reinicie. Procure aprimorar a técnica para executar os testes com mais rapidez na segunda ou terceira tentativa.

5) Ligue a alimentação do eletrodinamômetro, ligue a fonte VCA e ajuste a tensão para 120 VCA.

6) Com extremo cuidado altere o posicionamento das escovas. Note que o motor muda de rotação e há variação de torque indicada pelo dinamômetro.

7) Ajuste as escovas de modo a obter, aproximadamente, o máximo torque no sentido horário de rotação. Tome nota da corrente e do torque obtidos. Desligue tudo ao terminar, registre os dados obtidos e aguarde dois minutos para que o motor esfrie.

Torque: 3,2 N · m

I: 7 A

Fique de olho!

Sem carga é possível ajustar o posicionamento das escovas pelo monitoramento da velocidade. Quando lida a maior velocidade no tacômetro, é a melhor posição sem carga para as escovas. O ideal é a realização desse posicionamento com carga, mas como demonstração este método é válido.

8) Ainda com o eletrodinamômetro com torque máximo ajustado, ligue a alimentação do eletrodinamômetro, ligue a fonte VCA com tensão 120 VCA. Gradualmente reduza a carga aplicada pelo dinamômetro e observe a resposta em velocidade. Quanto maior a carga, maior ou menor a velocidade?

9) Retorne a fonte CA a 0 V e desligue todos os equipamentos.

10) Instale o wattímetro no circuito conforme a Figura 6.9.

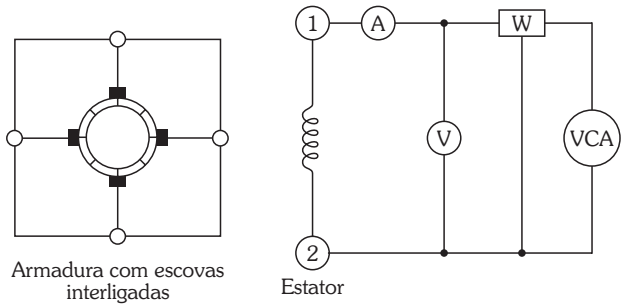


Figura 6.9 - Esquema de ligação para ensaio das características do motor de repulsão.

11) Ligue o eletrodinamômetro e a fonte CA. Ajuste a tensão para 120 V. Ajuste a carga aplicada para 1 N · m.

12) Meça os valores de corrente, potência ativa e velocidade para carga de 1 N · m e registre na Tabela 6.4. Repita esse procedimento para todos os valores de carga constantes na Tabela 6.4. Ao terminar, desligue todos os equipamentos. Complete a tabela calculando a potência em HP e a potência aparente.

Tabela 6.4 - Medições do ensaio do motor de repulsão em CA

Carga (N.m)	P (watts)	I (A)	rpm	Aparente (VA)	Potência (HP)
0	260	5	1745	600	0
0,35	310	5,2	1710	624	0,08
0,7	390	5,5	1665	660	0,16
1	500	6	1580	720	0,21
1,4	640	7	1485	840	0,29

13) Para as situações de carga da Tabela 6.5, calcule os dados necessários para o preenchimento completo da tabela. Considere a plena carga a situação de carga em que o motor absorveu da rede corrente mais próxima da nominal.

Tabela 6.5 - Parâmetros do motor de repulsão em CA

Dados/Alimentação	CA a vazio	CA a plena carga
Potência ativa		
Potência aparente		
Fator de potência		
Potência reativa		
Watts no eixo		
Eficiência		
Velocidade		
Perdas no motor		

14) Responda às questões seguintes com relação ao ensaio:

a) Compare o valor da corrente de partida do motor de repulsão com relação aos outros motores CC para desenvolver o torque de partida. Qual dos motores desenvolveu a melhor relação torque/corrente?

b) Como pode ser invertida a rotação do motor de repulsão?

Vamos recapitular?

Neste capítulo você viu que existem dois tipos de motores que podem ser alimentados tanto em CC, como em CA. O primeiro é o motor universal, que é muito parecido com o motor CC autoexcitado na configuração série. É muito usado em aparelhos eletrodomésticos. O outro motor é o de repulsão, atualmente em desuso.

Você também aprendeu os conceitos básicos do motor de polo sombreado, que na verdade é aplicado como minimotor para acionamento de pequenos sistemas de ventilação. Este tipo de motor só funciona em CA.



Agora é com você!

1) Quais as partes fundamentais de um motor universal? Descreva a função delas.

2) Qual a função do enrolamento de compensação no motor universal?

3) O motor universal apresenta maior rendimento ligado em CC ou CA? Por quê?

4) Quais as vantagens e desvantagens do motor de repulsão com relação ao motor com capacitor de partida?

5) Como é possível reconhecer um motor de repulsão?

7

Geradores Síncronos

Para começar

Gerador síncrono é uma máquina de corrente alternada. Também é conhecido como alternador. A máquina síncrona, tal como a máquina CC, é reversível, isto é, ela pode operar no modo gerador ou motor.

Neste capítulo você vai aprender o princípio de funcionamento e os aspectos construtivos deste tipo de máquina elétrica. Será dada ênfase aos geradores trifásicos.

Geradores síncronos inseridos numa rede elétrica precisam estar sincronizados. Neste capítulo, você aprenderá o conceito de sincronização e deverá fazer ensaios de laboratório sobre esse importante aspecto dos geradores síncronos.

Outro fator determinante para a operação desses geradores é a sua excitação que, em resumo, é o modo de criar um campo magnético girante para propiciar a indução magnética.

Por meio de ensaios de laboratório sugeridos, você verificará as características elétricas dessa máquina, especialmente a curva de saturação e a regulação de tensão.

7.1 Visão geral

O principal objetivo deste capítulo é introduzir conceitos básicos de corrente alternada, monofásica e trifásica, pela compreensão da geração desse tipo de energia. Os geradores de corrente alternada são os responsáveis pela geração da energia elétrica que movimenta o País, que chega às nossas casas, que nos serve diariamente. É difícil imaginar um país no mundo, cuja industrialização está presente, viver sem a energia elétrica fornecida por essas máquinas.

7.2 Aspectos construtivos

Um gerador CA possui um rotor bobinado, como a armadura do gerador CC, mas sem o comutador que, como lido anteriormente, é o retificador mecânico do gerador CC. Sem o retificador a corrente passa a circular num sentido durante 180° e em outro sentido nos outros 180° de uma rotação do eixo.

Num gerador aplica-se um dos fundamentos do eletromagnetismo em que temos uma bobina movimentada dentro de um campo magnético ou o contrário, em que o elemento excitador, que produz o campo magnético, gira e colhemos a tensão induzida nas bobinas da parte fixa no estator da máquina. Portanto, o rotor bobinado pode girar dentro de um campo magnético que normalmente é produzido pela excitação de bobinas montadas no estator da máquina ou o mais comum, em que se aplica tensão de excitação ao rotor e este, ao girar, faz com que o campo magnético criado nele corte as bobinas do estator, possibilitando o surgimento de tensão induzida nessas bobinas.

Para conectar a parte girante do gerador ao meio externo, utilizam-se anéis fixos ao eixo do rotor que, através de escovas, têm contato com terminais externos. O detalhe desses anéis é que são completamente diferentes de um comutador. O contato de cada anel com sua respectiva escova é contínuo e o número de anéis equivale ao número de fases geradas ou, no caso de excitação no rotor (mais utilizado), existem dois anéis para conexão do positivo e do negativo da fonte de excitação. Veja o detalhe dos anéis na Figura 7.1.

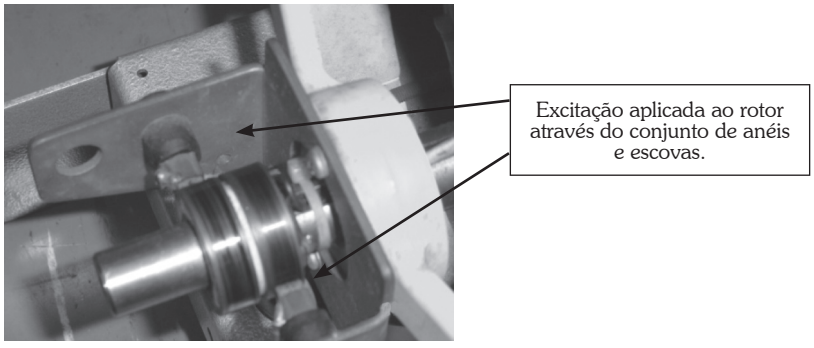


Figura 7.1 - Detalhe dos anéis e escovas de um gerador síncrono.

7.3 Funcionamento

O funcionamento eletromagnético do gerador CA difere pouco do gerador CC. A diferença está na corrente elétrica gerada e seu sentido devido à ausência do comutador. Vamos a um exemplo ilustrativo em que temos a tensão gerada na parte fixa do gerador (bobina do estator). Há um eletroímã, excitado por fonte CC, girando sob ação de uma força externa, que pode ser um motor diesel, e cujas linhas de campo atingem a bobina fixa no estator. Quanto maior a densidade magnética, maior a tensão induzida, portanto o pico da tensão gerada ocorre nos polos do ímã. Como os polos magnéticos têm os sentidos das linhas de campo diferentes, a corrente induzida terá sentidos diferentes para os dois polos e, consequentemente, a tensão medida tem polaridade diferente.

Numa rotação completa, 360°, tem-se a tensão indicada no galvanômetro saindo do 0, dirigindo-se ao pico positivo com a aproximação do polo norte e em seguida, com a passagem do polo norte, o retorno do ponteiro ao 0. Continuando a rotação, com a aproximação do polo sul o ponteiro se move em direção ao máximo negativo, atingindo o pico com o polo sul do eletroímã à frente da bobina, Figura 7.3. Esse ciclo se repete, por exemplo, na rede elétrica, 60 vezes por segundo, 60 Hz, para uma rotação da bobina de 3600 rpm.

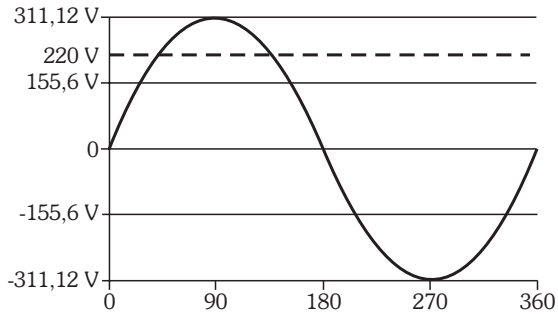


Figura 7.2 - Tensão senoidal.

As linhas de campo criadas no eletroímã atingem constantemente a bobina. Quanto maior a densidade magnética, maior a tensão induzida. Na figura 7.3 o polo N produz um pico positivo e o S produz pico negativo.

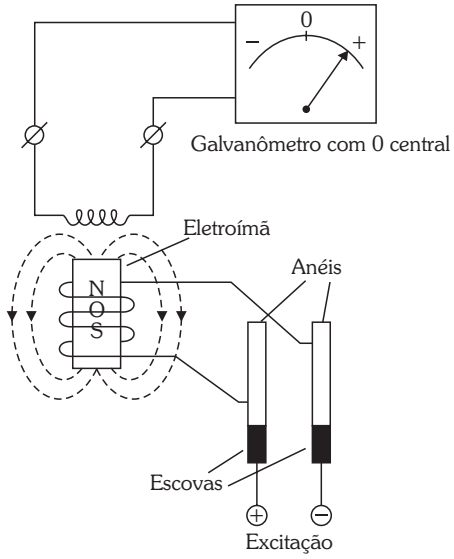


Figura 7.3 - Representação esquemática do gerador síncrono.

Num voltímetro convencional a tensão medida é a tensão eficaz representada na Figura 7.2 pela linha pontilhada. A tensão de pico, tanto positiva quanto negativa, é a tensão eficaz multiplicada por $\sqrt{2}$.

O gerador CA também é conhecido como alternador. Encontramos alternadores em veículos automotivos produzindo tensão CA, que é retificada logo em seguida, para manter a carga da bateria do automóvel.

O gerador trifásico aproveita melhor os 360° de uma rotação, e com bobinas posicionadas a cada 120°, trabalha três ciclos distintos, sendo a resultante instantânea dos três igual a zero.

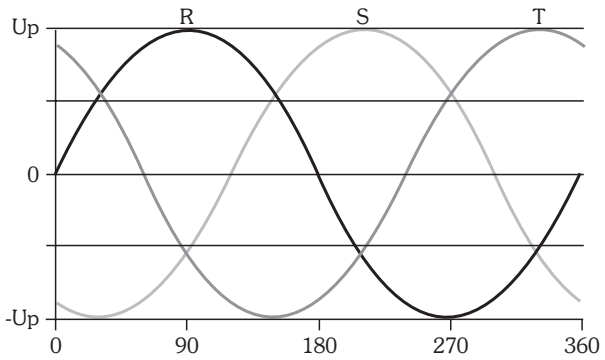


Figura 7.4 - Tensão senoidal trifásica.

Observe a posição 90° e some as três tensões. Temos em R Umáx, em S –Umáx/2 e em T –Umáx/2.

A resultante instantânea é 0 V.

Sob esta observação é construído o condutor chamado Neutro, que é uma união de três pontas das bobinas do gerador.

No instante t, de posição angular igual a 90°, por exemplo, temos as tensões negativas de S e T somadas e subtraídas da tensão em R. A resultante é zero. Para cada bobina temos uma tensão gerada independente e entre as tensões uma defasagem de 120°, Figura 7.4. Se medirmos a tensão gerada em quaisquer das bobinas individualmente, teremos uma tensão eficaz, por exemplo, 220 Vef. Com um osciloscópio pode-se medir a tensão de pico da onda, que calculada seria 220 Vef $\times \sqrt{2}$. O problema é que, para utilizar esse gerador, seria preciso levar os seis condutores, dois de cada bobina, até as cargas. Foi então que alguém observou que em qualquer instante a soma das três fases resulta 0 e que três pontas de cada bobina poderiam ser unidas, formando um condutor neutro.

Observe a Figura 7.5.

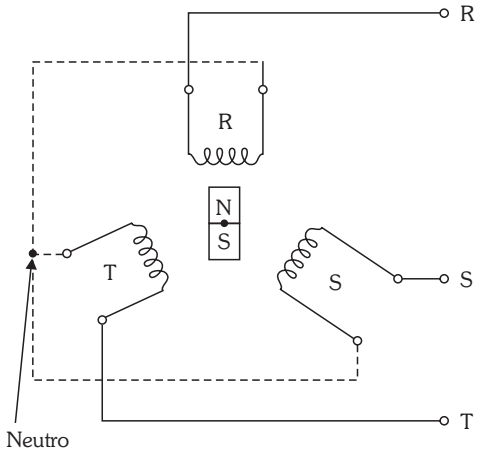


Figura 7.5 - Representação de três bobinas e um campo girante.

O condutor neutro resulta da união de três pontas das três bobinas. Agora temos três fases e um neutro, quatro condutores em vez de seis condutores. Entre qualquer fase e o neutro tem-se 220 Vef, o que se chama tensão de fase, entre fases tem-se 220 V ef $\times \sqrt{3}$.

Esse tipo de ligação chama-se estrela (como visto em transformadores) e costuma-se aterrar o neutro.

Em uma aplicação prática é quase impossível ter um equilíbrio perfeito entre as fases, portanto circula certa corrente no neutro. Aterrando o neutro, possibilitamos um caminho fácil para essa corrente em direção a terra.

As bobinas também podem ser ligadas em triângulo, mas temos apenas 220 V de tensão de linha e a tensão de fase é igual à de linha.

Num gerador a diesel, quanto maior a corrente absorvida pela carga, maior deve ser o torque para rotacionar o rotor do gerador e maior o consumo de diesel. Sob circunstância extrema de carga, o gerador sofre queda de tensão e exige maior potência da máquina que fornece força motriz. Normalmente os geradores a diesel possuem um sistema automatizado que monitora e controla a corrente de excitação e a aceleração da máquina motriz, para manter o mesmo padrão de tensão e fornecer a potência exigida.

Em uma hidrelétrica, quanto mais consumimos energia, mais água é utilizada para manter a rotação nas turbinas. Por isso, em tempos de seca, aumentam os programas educacionais que trabalham o uso racional da energia, já que no Brasil a maior parte da energia gerada provém de hidrelétricas, que aproveitam a força das águas para movimentar as turbinas e o rotor do gerador preso a ela.

Uma parte fundamental de uma máquina geradora é a sua excitação. Em laboratório utiliza-se uma fonte de corrente contínua para fornecer a tensão de excitação, mas na prática, tirar proveito máximo da energia mecânica aplicada à turbina torna-se essencial para a eficiência do sistema de geração. Normalmente é preso ao eixo da turbina do gerador um gerador CC autoexcitado que provê a tensão de excitação ao gerador.

Fique de olho!

Uma máquina síncrona deve girar numa rotação rigorosamente constante. Essa velocidade não deve variar com a carga. A rotação de máquinas síncronas, conhecida como velocidade síncrona, é dada em função da frequência f e do número de polos.

$$N(rpm) = \frac{120.f(Hz)}{p}$$

Para o Brasil, f = 60 Hz. A velocidade síncrona de uma máquina de dois polos será de 3600 rpm. Para uma máquina com 20 polos, a rotação será de 360 rpm.

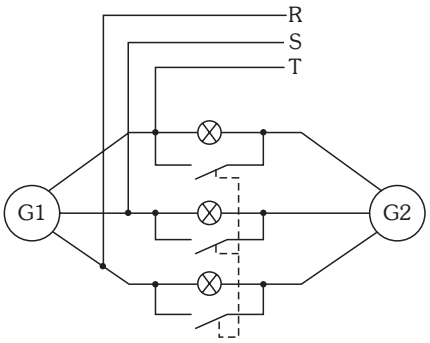
7.4 Sincronização

A fonte de energia que utilizamos, que libera potência para movimentar a indústria, não provém de uma única fonte. De fato sabemos que no Brasil temos algumas hidrelétricas inter-

ligadas, suprindo a energia necessária para determinada região. É importante saber como são interligadas duas fontes geradoras de energia a uma rede sem ocasionar um curto-circuito e danificar uma delas.

Para conectar duas fontes geradoras de energia, elas devem estar sincronizadas e possuir a mesma tensão gerada, isto é, devem gerar a mesma tensão sob a mesma frequência e defasagem.

Na Figura 7.6 pode-se observar um exemplo de ligação entre duas fontes a uma linha trifásica. Para que a chave trifásica seja fechada interligando as duas fontes G1 e G2, é necessário que as três lâmpadas sinalizadoras estejam apagadas, indicando que as fases nos dois sistemas têm o mesmo nível de tensão, frequência e estão em fase. Quando há diferença de nível de tensão, as lâmpadas ficam acesas conforme o diferencial de tensão. Quando não há sincronia na rede, as lâmpadas acendem e apagam com velocidade de acordo com a diferença entre as frequências. Quanto maior a diferença entre as frequências, mais rápido as lâmpadas piscam.



Na figura 7.6, G1 é um gerador já ligado e sincronizado à rede e G2 é um segundo gerador a ser ligado à rede.

Figura 7.6 - Dois geradores em paralelo.

Os geradores em sincronia, trabalhando juntos, devem possuir um sistema de controle individual que garanta o controle do nível de tensão e da frequência gerada.

Para realizar a sincronização, deve-se executar as seguintes etapas:

1) Ajustar o nível de tensão.
2) Acertar a sequência de fase.
3) Corrigir eventual defasagem/frequência.

As lâmpadas de sincronização têm uma indicação para cada etapa:

4) Se as lâmpadas piscam alternadamente e não juntas, é necessário acertar a sequência de fase.
5) Se a luminosidade das três lâmpadas é intensa, a defasagem entre as fases do gerador e da rede está próxima a 180°. Se as lâmpadas acendem com luminosidade fraca, o gerador e a rede estão quase em fase.
6) Quando as lâmpadas estiverem completamente apagadas, o gerador e a rede estão em fase, e o gerador pode ser ligado em paralelo com a rede.

Para acertar as fases, invertem-se duas das fases do gerador. Para acertar a defasagem, ajusta-se a velocidade do motor que fornece força motriz. Esse procedimento é realizado de modo que as três lâmpadas pisquem juntas e vagarosamente até que apaguem completamente. O ajuste na velocidade

do motor deve ser fino, isto é, a velocidade pré-ajustada para 60 Hz em um motor de quatro polos é 1800 rpm. Ao ajustar a fase, é feita uma pequena alteração nessa velocidade, enfim, vamos continuar teoricamente com 1800 rpm.

Em outras palavras, se a rede opera com uma frequência de 59,8 Hz, o gerador deve estar com 59,8 Hz e não com 60 Hz. Felizmente, depois de ligada a rede, o gerador fica amarrado eletromagneticamente a ela e qualquer alteração na força motriz não atinge mais a frequência e sim a potência disponibilizada.

Quando o gerador está em sincronia com a rede, ele pode ser conectado a ela. A corrente absorvida pelo gerador nesse instante deve ser a menor possível. Quanto melhor a qualidade da sincronização, menos corrente é absorvida pelo gerador ao ser conectado à rede e ele entra em flutuação, I gerador = 0 A, se não houver necessidade de potência.

Fique de olho!

O gerador pode sofrer sérios danos se ligado à rede fora da mesma sequência de fase, ou se não estiver em fase com a rede.

7.5 Disponibilização de potência

Um gerador tem como função disponibilizar potência para a rede. Assim que ele é conectado a ela, após a sincronização, se não for exigida potência do sistema, a corrente de saída será próxima a zero (flutuação). Podemos esperar, ao fechar a chave de ligação entre o gerador e a rede, uma corrente pequena de pico, que depende da qualidade da sincronização, em seguida a corrente fica próxima de zero. Note que, ao conectar o gerador à rede, é afetado o gerador, se porventura estiver com tensão ou frequência diferente da rede.

A partir desse momento o gerador está amarrado à rede devido ao fluxo constante no estator (campo girante) resultante de tensão e frequência fixas da rede aplicadas ao estator. Interagindo com esse campo, tem-se fluxo criado pela corrente de excitação, possibilitando ao rotor do gerador acompanhar esse campo girante no estator. Para manter essa interação entre rotor e campo girante, e como resultado tensão e frequência, o gerador pode fornecer potência reativa e ativa ao sistema ou absorver potência reativa e ativa do sistema.

Aumentando a corrente de excitação a partir da flutuação, aumenta-se o fluxo no rotor e, consequentemente, temos corrente no estator, resultante da potência reativa indutiva imposta à rede. Por outro lado, se reduzirmos a corrente de excitação do rotor, reduzimos o campo nele e, para manter a interação com o campo girante no estator, é absorvida potência reativa da rede.

Tratando de potência ativa, para que o gerador contribua com ela para a rede, é necessário torque aplicado ao rotor. Quanto maior a potência ativa solicitada ao gerador, maior deve ser o torque aplicado pela máquina motriz ao rotor. Se a máquina não puder disponibilizar o torque necessário, o gerador passa a consumir potência ativa da rede com forte inclinação a trabalhar como motor síncrono ligado à rede.

Deve-se observar que a transformação de energia em um sistema de geração é constante e complexa. Cada parte do gerador é responsável por parte da energia a ser fornecida. O torque

aplicado ao rotor sustenta eventuais demandas de potência ativa (trabalho). A corrente de fase medida na saída do gerador representa a potência aparente (soma vetorial da potência ativa e reativa) liberada pelo gerador.

Um experimento complexo em equipamentos pode demonstrar a relação entre potências e corrente no estator e de excitação:

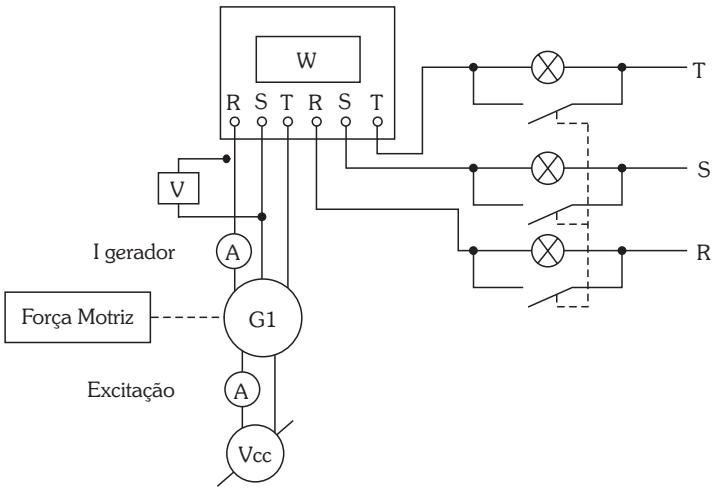


Figura 7.7 - Ligação de instrumentos para ensaio.

O wattímetro indica a potência ativa disponibilizada para a rede pelo gerador ou absorvida da rede pelo gerador. A aparente pode ser extraída multiplicando a corrente e a tensão lida.

Fique de olho!

Um wattímetro monofásico pode ser utilizado, entre fase e neutro, medindo potência de fase e sua potência multiplicada por 3, para sistemas trifásicos equilibrados.

Considerando o gerador em flutuação, Igeração = 0 para determinada corrente de excitação, a indicação nos wattímetros é 0 também. O que esperar se aumentarmos um pouco a corrente de excitação do rotor do gerador? Pode-se esperar que o gerador aplique potência reativa à rede. Tem-se então uma potência aparente que pode ser calculada com a equação $S = U \cdot \text{Igeração} \cdot \sqrt{3}$. Como a potência ativa aplicada pelo gerador nesse momento é 0, a potência aparente também é a potência reativa liberada pelo gerador para a rede, que neste caso é negativa (reativa capacitiva).

Se a corrente de excitação for reduzida, partindo da flutuação Igeração = 0, pode-se notar que a corrente indicada no amperímetro Igeração aumenta também, indicando a existência de potência reativa, mas desta vez o gerador absorve potência reativa da rede, comportando-se como um indutor, potência reativa positiva (reativa indutiva).

Conclusão quanto à excitação do rotor: atuando sobre a excitação do rotor partindo da flutuação, o gerador pode fornecer potência reativa indutiva se subexcitado e reativa capacitiva se sobre-excitado. Essas potências são observadas na forma de potência aparente através de amperímetro e voltímetro.

Para trabalhar a potência ativa, deve-se atuar na máquina motriz. Partindo da flutuação, se aumentarmos o torque aplicado pela máquina motriz, teremos indicação no wattímetro da potência ativa disponibilizada pelo gerador. Note que foi aumentado o torque para produzir potência ativa.

Se reduzirmos o torque aplicado pela máquina motriz, o gerador tenta manter o rotor com a mesma velocidade do campo girante e absorve potência ativa da rede.

No experimento sugerido pela Figura 7.7, temos um wattímetro para medir exclusivamente a potência ativa disponibilizada ou absorvida da rede. Na ausência do wattímetro, como comentado anteriormente, pode-se ficar de olho na corrente indicada no amperímetro a partir da flutuação e perceber as suas variações provocadas pela atuação no torque ou na excitação.

Amplie seus conhecimentos

Em grandes sistemas de potência, a máquina síncrona pode ser utilizada com o propósito de correção do fator de potência.

7.6 Ensaio: gerador trifásico CA

Objetivos: Estudar as propriedades e características do gerador trifásico CA na prática. Observar como realizar conexões de circuitos com geradores e conexões mecânicas com equipamentos auxiliares. Obter a curva de saturação sem carga do gerador. Estudar as características de regulação do gerador CA. Observar o efeito de cargas não balanceadas aplicadas ao gerador.

Fique de olho!

Os ensaios descritos a seguir foram realizados com um determinado gerador trifásico. Isso não quer dizer que você precise realizar o ensaio com uma máquina idêntica nem que tenha de obter os mesmos valores anotados neste ensaio. O objetivo principal é a constatação. Você leu e releu a teoria, agora vai comprovar alguns aspectos, seguindo um guia de procedimentos elaborado de forma que possa comparar seus resultados com os esperados e com os anotados no livro. Registre seus resultados.

Equipamentos utilizados: motor síncrono 0,25 HP 1800 rpm 127/220 V 120 W, fonte CA ajustável 0 a 120 V 8 A, motor trifásico assíncrono 0,25 CV quatro polos, motor CC, banco de resistências, indutâncias e capacitâncias, tacômetro, voltímetro e amperímetro para as tensões e correntes esperadas.

Fique de olho!

Estamos trabalhando com níveis de tensão que podem trazer risco à vida humana e com partes mecânicas girantes que podem causar danos físicos, portanto realize os ensaios apenas sob orientação e supervisão de um profissional habilitado e siga à risca todas as orientações de segurança. Antes de ligar o equipamento para verificar o funcionamento e tomar nota dos dados, peça ao profissional citado que inspecione o circuito. Ligações e alterações devem ser feitas com todos os equipamentos completamente desligados.

Procedimentos

1) Com as fontes desligadas monte o circuito conforme a Figura 7.8 e acople mecanicamente o motor trifásico ao gerador:

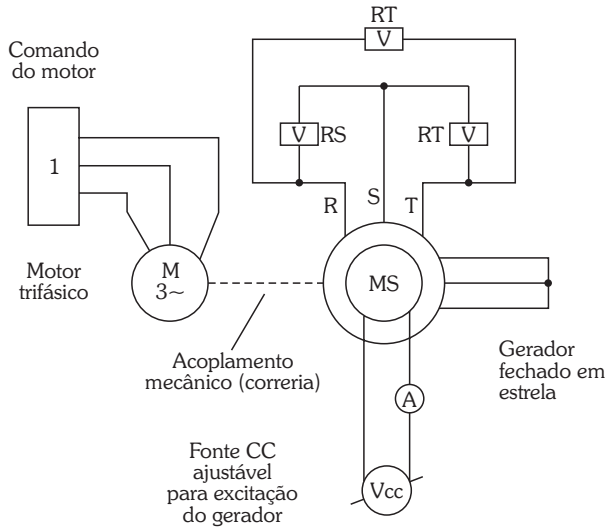


Figura 7.8 - Esquema de ligação para ensaio de excitação do gerador.

O motor trifásico não é a opção ideal para rotacionar o gerador com carga, pois ele não mantém a velocidade devido ao escorregamento. Como nessa primeira etapa testaremos as condições sem carga, ele pode ser aplicado para fornecer força motriz.

Fique de olho!

Observe a polaridade dos instrumentos e a fonte corrente contínua.

2) Ligue a alimentação do motor trifásico e anote os valores de tensão indicados nos multímetros para 0 V de tensão de excitação do rotor.

3) Lentamente aumente a tensão de excitação do rotor, aumentando a tensão da fonte CC de modo a obter uma corrente de 0,1 A no amperímetro. Registre as tensões indicadas nos voltímetros na tabela.

4) Para todos os valores de corrente constantes na tabela, meça e registre os valores de tensão indicados nos voltímetros, ajustando a tensão de excitação como no item 3. Desligue todos os equipamentos ao terminar.

Tabela 7.1 - Medições do ensaio de excitação do gerador síncrono

Iexcitação (A)	U 1	U 2	U 3	Valor médio	rpm
0	5	5,5	5	5	1787
0,1	60	62	60	61	1787
0,2	118	120	118	119	1785
0,3	145	145	145	145	1785
0,4	180	180	180	180	1785
0,5	205	208	205	206	1785

Iexcitação (A)	U 1	U 2	U 3	Valor médio	rpm
0,6	220	220	220	220	1785
0,7	230	230	230	230	1785
0,8	240	240	240	240	1785
0,9	245	245	245	245	1785

5) Calcule o valor médio entre as fases para cada linha da tabela e registre.

6) Ligue novamente o motor trifásico e a fonte de excitação. Ajuste a fonte de excitação para uma tensão de saída de 200 V em um dos voltímetros e mantenha assim. Desligue os equipamentos ao terminar esta etapa.

7) Religue os voltímetros de modo a ler a tensão de fase em cada bobina do estator do alternador (fase para o neutro).

8) Ligue o motor trifásico e a fonte de excitação novamente e anote o valor indicado nos voltímetros:

U1 = 116 V U2 = 115 V U3 = 116 V

Pergunta: Estes valores estão de acordo com a equação $Uf = \frac{Ul}{\sqrt{3}}$?

9) Trace a curva de saturação do gerador com os dados da Tabela 7.1.

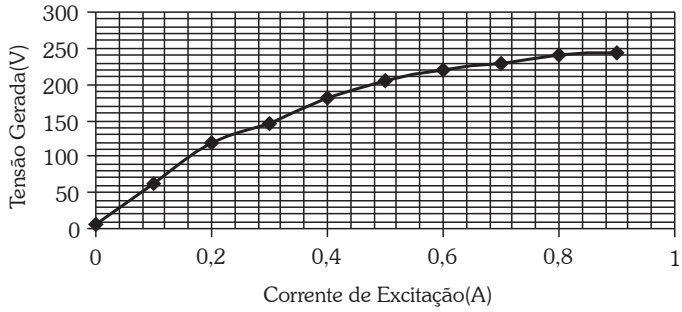


Figura 7.9 - Curva de excitação do gerador síncrono.

10) De acordo com o seu gráfico, a partir de qual valor de tensão gerada ocorre o joelho da curva (observe o momento em que a curva tende a "horizontalizar". Se for necessário, trace duas retas sobre a curva e marque o vértice)?

Aproximadamente a partir de 210 V.

11) O que se pode observar quanto ao aumento da corrente de excitação com relação à tensão gerada a partir do início da saturação (joelho da curva)?

12) As etapas de 12 a 16 verificam o comportamento da tensão de saída para os três tipos de carga fundamentais, que são resistiva, indutiva e capacitiva. O motor trifásico CA será substituído pelo motor CC utilizado anteriormente devido ao escorregamento no motor

trifásico e à dificuldade em manter velocidade constante. Monte o circuito representado na Figura 7.10 para estas etapas.

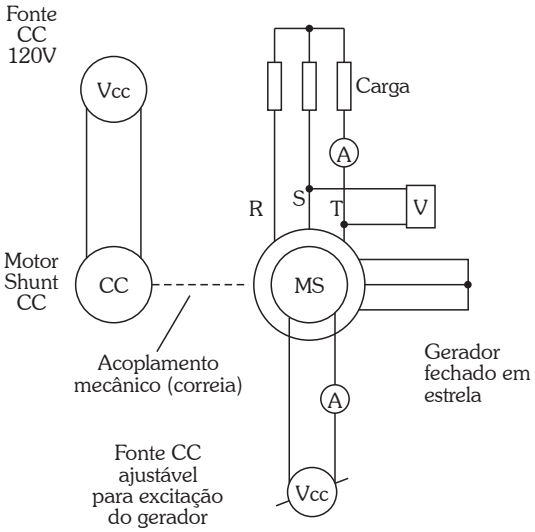


Figura 7.10 - Esquema de ligação para ensaio das características.

No ensaio com carga a intenção é verificar o efeito de cada tipo de carga sobre a tensão da rede.

Como carga utilizamos componentes resistivos, capacitivos e indutivos trifásicos fechados em estrela com impedância individual mínima de 300 Ω.

Os resistores devem ser de fio e suportar a dissipação de potência prevista calculada com a equação:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

13) A potência máxima contínua a ser fornecida por esse gerador é de 120 W. Considerando que temos uma tensão nominal de linha gerada de 220 V, para não sobrecarregar demasiadamente o gerador utilizamos uma carga resistiva trifásica composta de três resistores iguais ou maiores que 300 Ω ligados em estrela. Ligue o conjunto de resistências ligadas em estrela ao gerador no lugar da carga da Figura 7.10.

14) Ligue a alimentação do motor CC e ajuste a tensão para a nominal, no caso, 120 Vcc. Com um tacômetro ajuste a rotação do motor CC para 1800 rpm pelo reostato do campo shunt.

15) Ligue a fonte de excitação do gerador e ajuste a tensão de excitação para uma tensão de saída com carga de 220 V aproximadamente. Registre os valores de corrente de carga e de excitação indicados nos amperímetros:

Icarga = 0,45 A Iexcitação = 0,55 A

16) Desligue a carga resistiva trifásica do circuito e registre novamente o valor da corrente de excitação e o novo valor da tensão gerada indicada no voltímetro. Retorne a tensão de excitação a zero e desligue todos os equipamentos.

Iexcitação = 0,55 A Ul sem carga = 235 V

17) Calcule a regulação do gerador para cargas resistivas:

$$\%\text{Regulação} = \frac{\text{Usem_carga} - \text{Ucom_carga}}{\text{Ucom_carga}} \times 100 = 6{,}8\%$$

18) Acople uma carga indutiva trifásica fechada em estrela com reatância indutiva mínima por fase de 300 ohms como carga. Ligue a fonte de excitação do gerador e ajuste a tensão de excitação para uma tensão de saída com carga de 220 V aproximadamente. Registre os valores de corrente de carga e de excitação indicados nos amperímetros:

Icarga = 0,4 A Iexcitação = 0,7 A

19) Desligue a carga indutiva trifásica do circuito e registre novamente o valor da corrente de excitação e o novo valor da tensão gerada indicada no voltímetro. Retorne a tensão de excitação a zero e desligue todos os equipamentos.

Iexcitação = 0,68 A Ul sem carga = 253 V

Fique de olho!

Se necessário e possível, pode-se ajustar o gerador para gerar tensão mais baixa com carga, por exemplo, 190 V, não atingindo o fundo de escala de alguns instrumentos analógicos. Com 190 V de linha teríamos 110 V de fase sobre cada elemento da carga.

20) Calcule a regulação do gerador para cargas indutivas:

$$\%\text{Regulação} = \frac{\text{Usem_carga} - \text{Ucom_carga}}{\text{Ucom_carga}} \times 100 = 15\%$$

21) Acople uma carga capacitiva trifásica fechada em estrela com reatância indutiva mínima por fase de 300 ohms. Ligue a fonte de excitação do gerador e ajuste a tensão de excitação para uma tensão de saída com carga de 220 V aproximadamente. Registre os valores de corrente de carga e de excitação indicados nos amperímetros:

Icarga = 0,4 A Iexcitação = 0,3 A

22) Desligue a carga capacitiva trifásica do circuito e registre novamente o valor da corrente de excitação e o novo valor da tensão gerada indicada no voltímetro. Retorne a tensão de excitação a zero e desligue todos os equipamentos.

Iexcitação = 0,3 A Ul sem carga = 150 V

23) Calcule a regulação do gerador para cargas capacitivas:

$$\%\text{Regulação} = \frac{\text{Usem_carga} - \text{Ucom_carga}}{\text{Ucom_carga}} \times 100 = -31{,}8\%$$

24) Questões relativas ao ensaio:

a) Que tipo de carga produziu a pior regulação positiva?

b) Como você explica a regulação negativa produzida pela carga capacitiva? Como ocorre o aumento na tensão gerada?

c) O que acontece com a tensão gerada após o joelho da curva de saturação com relação à corrente de excitação?

7.7 Ensaio: sincronização com a rede

Objetivo: Gerar tensão trifásica, sincronizar a tensão produzida pelo gerador com a tensão da rede e conectar essa tensão gerada em paralelo com a tensão da rede.

Fique de olho!

Vamos utilizar como máquina motriz o motor CC shunt ensaiado no capítulo 4. Para ajustar a velocidade, altera-se o campo shunt através de um reostato em série com o enrolamento shunt. Quanto menor o campo shunt, maiores a velocidade e o torque.

Procedimentos

1) Monte o circuito representado na Figura 7.11. Gerador desligado e rede trifásica desligada inicialmente. É imprescindível manter a chave CH1 aberta, pois ela só deve ser fechada se o gerador estiver sincronizado com a rede. As lâmpadas devem ser testadas antes de serem utilizadas, evitando falsas indicações.

   Lembre-se dos três passos para sincronização:

   a) Mesmo nível de tensão;

   b) Mesma sequência de fases;

   c) Correção em eventual defasagem.

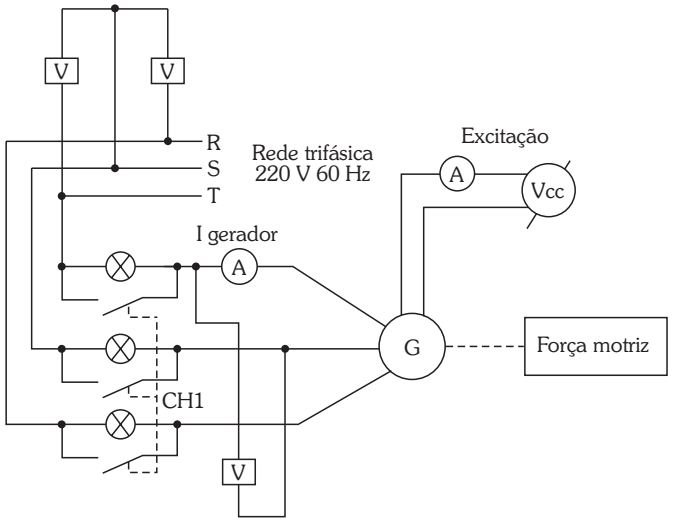


Figura 7.11- Esquema de ligação para ensaio de sincronização de geradores com a rede.

2) CH1 deve estar aberta. Ligue o gerador e o equipamento auxiliar (motor CC e fonte de excitação) para fornecer uma tensão de linha igual à tensão trifásica da rede a que ele será acoplado (neste caso, 220 V), ajuste o motor CC que fornece força motriz para 1800 rpm, produzindo frequência de aproximadamente 60 Hz. As indicações de tensão nos voltímetros devem ser iguais. Ajuste a tensão de excitação para que a tensão gerada se iguale à tensão da rede. Anote as tensões da rede e a tensão gerada:

Urede = 219 V Ugerada = 219 V

3) O próximo passo é observar as três lâmpadas de sinalização e determinar a necessidade de acertar a sequência de fase:

   a) Se as lâmpadas piscam em sequência e não todas juntas, isso significa que a rede e o gerador não têm a mesma sequência de fase e é necessário acertar. Desligue a fonte e o gerador, inverta duas das três fases do gerador e ligue novamente para observar o comportamento das três lâmpadas.

4) Ajuste cuidadosamente a velocidade do motor CC para que as três lâmpadas juntas acendam e apaguem lentamente (com o auxílio do tacômetro verifique que a velocidade continua próxima ao 1800 rpm). Neste momento a frequência do gerador está próxima à frequência da rede.

5) Verifique as tensões nos voltímetros, que devem estar iguais. Atenção: Feche a chave CH1 no momento em que as três lâmpadas estiverem apagadas, observando a corrente no amperímetro conectado ao gerador. Anote o valor da corrente instantânea e o que ocorreu:

   Im = 0,35 A, este foi o pico de corrente no instante da ligação do gerador à rede. A corrente em seguida foi a zero.

Fique de olho!

Quanto maior a intensidade luminosa das lâmpadas, maior a defasagem entre o gerador e a rede. Quando a luminosidade é intensa, a defasagem aproxima-se de 180° e o gerador nunca deve ser ligado à rede neste instante ou sofrerá danos.

A indicação de corrente lida no amperímetro instalado numa das fases do gerador vai depender do instante da ligação dele à rede. Quanto mais apagadas as lâmpadas, menor a corrente.

6) O gerador está sincronizado com a rede, então é possível verificar o resultado da atuação na corrente de excitação e no torque da máquina motriz sobre o gerador. Anote o valor da corrente de excitação na condição de flutuação e, se possível, a corrente do motor CC shunt que está fornecendo a força motriz.

$$I_{excitação} = 0{,}55\ A \qquad I_{motor\ CC} = 0{,}7\ A$$

7) Aumente a corrente de excitação até que Igerador = 0,34 A, observando o valor indicado pelo amperímetro ligado a uma das fases do gerador. Anote o valor dessa corrente, da corrente de excitação e calcule a potência aparente disponibilizada.

$$I_{excitação} = 0{,}7\ A \qquad I_{gerador} = 0{,}34\ A \qquad S = 130\ VA$$

Fique de olho!

Se for instalado um wattímetro trifásico, a atuação sobre a corrente de excitação interfere apenas na potência reativa, portanto o valor calculado da potência aparente é igual ao da potência reativa.

Não há razão especial para o valor 0,34 A, podendo ser utilizada outra referência.

8) Volte à condição de flutuação, Igerador = 0, e reduza a corrente de excitação para valor menor que 0,55 A, até que Igerador = 0,34 A.

9) Anote os valores das correntes de excitação, do gerador e calcule a potência aparente. Esta é a potência aparente absorvida da rede.

Iexcitação = 0,25 A Igerador = 0,34 A S = 130 VA

10) Volte o gerador ao estado de flutuação, Igerador = 0. Aplique mais torque ao gerador através do motor CC e observe a indicação do amperímetro ligado ao gerador. Houve disponibilidade de potência? Calcule a potência aparente disponibilizada.

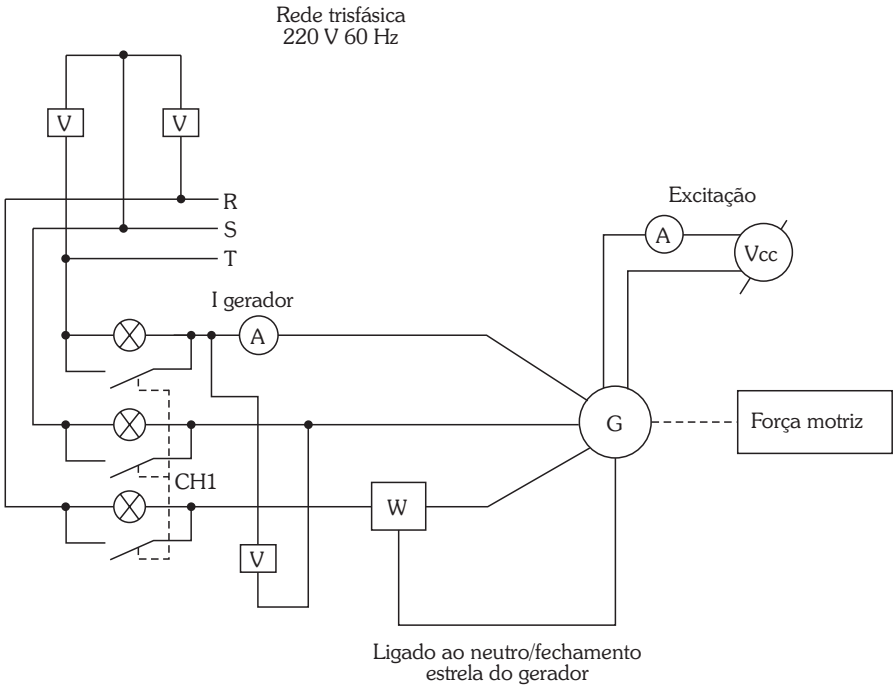
Fique de olho!

Para monitorar o torque aplicado pelo motor CC, deve-se acompanhar a corrente consumida no motor CC. Mais corrente, mais torque. Consulte o capítulo 5 se tiver dúvidas quanto ao motor CC shunt.

11) Volte o gerador ao estado de flutuação, Igerador = 0. Aplique menos torque com o motor CC e observe a corrente através do amperímetro ligado a uma das fases do gerador. O gerador absorveu potência da rede? Calcule a potência aparente absorvida.

Fique de olho!

Se for acrescentado um wattímetro conforme a Figura 7.12, os itens de ensaio de 7 a 11 podem ser enriquecidos. Consegue-se observar que alterações na excitação do gerador não produzem potência ativa, mas sim reativa, e alterações no torque aplicado produzem potência ativa e aparente. Seria interessante registrar a corrente do motor shunt utilizado como máquina motriz no ponto de flutuação para visualizar o aumento ou a redução no torque.



Note que o wattímetro está entre a fase e o neutro do gerador.

Figura 7.12 - Esquema de ligação para ensaio com wattímetro.

Vamos recapitular?

O gerador síncrono é a máquina dominante para geração de energia elétrica CA.

Esse tipo de máquina deve operar com velocidade rigorosamente constante. Se dois ou mais geradores forem associados em paralelo numa rede elétrica, eles devem ser sincronizados. Isso quer dizer que eles devem ter a mesma velocidade do campo magnético girante e o mesmo nível de tensão.

Se o gerador precisar oferecer mais potência ativa para o sistema elétrico, o torque desenvolvido pelo motor responsável pelo seu acionamento deve aumentar, mantida a rotação constante.

Você também viu que a variação da corrente de excitação do gerador tem influência sobre sua componente reativa.

A regulação de tensão do gerador é uma de suas características elétricas mais importantes.

Agora é com você!

1) O que é gerador? Um gerador pode funcionar como um motor?
2) Cite as partes principais de um gerador CA.
3) O que é "excitatriz"?
4) Qual a finalidade das escovas no gerador?
5) Qual a diferença entre um gerador CA monofásico e um gerador CA trifásico?
6) Como é produzida a excitação em um gerador e para que serve?
7) Que tipos de máquina ou equipamentos podem fornecer força motriz para um gerador CA?
8) A maior parte da energia consumida no Brasil provém de que tipo de usina? O que produz a força motriz nessas usinas?
9) O que aconteceria se ligássemos um gerador trifásico não sincronizado à rede?
10) A partir da flutuação, se alterarmos a excitação do gerador, que tipo de potência é negociado com a rede? Cite exemplo de consumo e fornecimento desse tipo de potência por parte do gerador.
11) Como devemos proceder para que o gerador disponibilize potência ativa para a rede? Explique.
12) O ensaio 10 foi realizado com um wattímetro trifásico instalado. Num determinado momento do ensaio o gerador estava fornecendo 90 W de potência ativa e 120 VA de potência reativa. Qual o fator de potência no gerador nesse instante? Como podemos melhorar esse fator sem alterar a potência ativa fornecida? Explique.

13) Em usinas termoelétricas, o gerador pode ser acionado por turbinas a vapor ou a gás, que são motores de baixa inércia. Essas máquinas giram em elevadas rotações. Quase sempre existe um redutor de velocidade entre as turbinas e o gerador para manter sua rotação em 3600 rpm. Qual o número de polos desses geradores para a frequência de 60 Hz?

14) Em usinas hidrelétricas, o gerador é acionado por turbinas hidráulicas, que são motores de grande inércia. Essas máquinas giram em baixas rotações, posto que são muito pesadas. Qual o número de polos de um gerador diretamente acoplado a uma turbina hidráulica que gira a 83,7 rpm?

Bibliografia

CARVALHO, G. **Microcontroladores PIC**: *Teoria e Montagens Práticas*. São Paulo: Eltec, 2005.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FEIRA DE CIÊNCIAS. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/index12.asp>. Acesso em: 10 jan. 2014.

_____. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/index13.asp>. Acesso em: 10 jan. 2014.

_____. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala14/index14.asp>. Acesso em: 10 jan. 2014.

FIEMG, **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Minas Gerais: FIEMG, 1999.

FILHO, J.M. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GIECK. **Manual de Fórmulas Técnicas**. São Paulo: Hemus, 1996.

HEIM, A.; WEBER, S. **Eletrotécnica para Escolas Profissionais**. São Paulo: Mestre Jou, 1974.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.J.; UMANS, S.D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

KOSOW, I.L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 1996.

MARKUS, O. **Circuitos Elétricos Corrente Contínua e Alternada**: *Teoria e Exercícios*. São Paulo: Érica, 2011.

SIMONE, G.A. **Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos**: *Uma Introdução ao Estudo*. São Paulo: Érica, 2010.

_____. **Transformadores**: *Teoria e Exercícios*. São Paulo: Érica, 2010.

VALKENBURGH, V.; NOOGER & NEVILLE, I. **Eletricidade Básica**. Volume 5. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1982.

WEG. Disponível em: <http://www.weg.net/br>. Acesso em: 10 jan. 2014.

WILDI, T.; DE VITO, M. S. **Investigations in Electric Power Technology**. EUA: Lab-Volt, 1990.

Marcas Registradas

Todos os nomes registrados, marcas registradas ou direitos de uso citados neste livro pertencem aos seus respectivos proprietários.

Apêndice

A

Instrumentos de Medição

Para começar

Este apêndice tem como objetivo auxiliar o estudante quanto a entendimento e precaução ao realizar conexões elétricas para medição de variáveis em máquinas elétricas.

Atualmente, com a evolução da eletrônica, instrumentos para medição das três grandezas fundamentais (U, I e R) tendem a ser eletrônicos, com isso elimina-se, por facilidades tecnológicas, uma série de procedimentos que muitas vezes deveriam ser mantidos. Um instrumento eletrônico normalmente possui ajuste automático de escala e indicação de valores negativos; instrumentos instalados em painéis de máquinas nem sempre são eletrônicos e exigem cuidados de escolha e instalação. A regra geral é a seguinte: "antes de energizar o circuito verifique se os instrumentos estão ligados corretamente".

A.1 Amperímetro

Com exemplos o intuito é despertar a atenção em relação a amperímetros analógicos medindo intensidade de corrente em máquinas elétricas, seguindo estes critérios de inspeção:

1) Corrente alternada ou corrente contínua: deve-se verificar se a intensidade de corrente a ser medida provém de um circuito em corrente alternada ou contínua. Instrumentos de corrente contínua calculam o valor médio da grandeza medida, enquanto instrumentos de corrente alternada calculam a raiz média quadrática (RMS) ou valor eficaz. Medir corrente alternada com instrumento de corrente contínua pode resultar em falsa indicação de zero.

2) Polaridade: quando um amperímetro analógico é ligado a um circuito com corrente contínua, a polaridade desse instrumento deve ser observada com relação ao circuito.

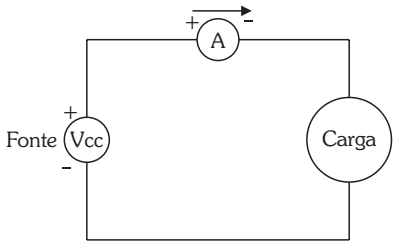


Figura A.1 - Ligação do amperímetro.

O fluxo de corrente pelo amperímetro deve fluir do positivo para o negativo, obedecendo ao sentido convencional, portanto é preciso analisar o sentido da corrente no circuito a ser instalado o amperímetro e ligá-lo adequadamente.

3) Fundo de escala: um amperímetro analógico que mede a corrente alternada de máquinas elétricas indutivas deve atender a certas exigências do circuito, medindo a corrente nominal do equipamento, mas também indicar ou ao menos suportar a corrente de partida dele, que é algumas vezes maior que a corrente nominal. Como regra prática tomamos a corrente nominal do motor a ser medida que deve ser indicada a um terço da escala do amperímetro. Exemplo:

Um motor possui corrente nominal 7 A e a relação Ip/In é 5 (corrente de partida sobre nominal). Que fundo de escala escolher para o amperímetro analógico do painel?

Resposta: Se Ip sobre In é igual a 5, a corrente de partida é aproximadamente 35 A. O amperímetro, portanto, deve ter um fundo de escala que suporte esse pico de corrente sem comprometer a indicação de corrente nominal.

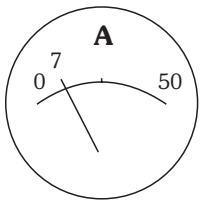


Figura A.2 - Escala de um amperímetro.

Se o fundo de escala adequado não permitir uma indicação apropriada da corrente nominal, reduza o fundo de escala, mas certifique-se de que o instrumento utilizado foi construído para suportar o pico de corrente acima da escala.

Alicates amperímetros são excelentes opções para medição esporádica e podem ser utilizados para medição de corrente nos ensaios com uma vantagem enorme sobre os amperímetros convencionais: não necessitam de conexão elétrica com o circuito. O campo magnético gerado pela corrente que passa em um condutor é proporcional ao valor dessa corrente, portanto, utilizando essa teoria, o alicate amperímetro mede a variação de campo ao redor do condutor em que se deseja saber a corrente e indica em uma escala, sem nenhum contato elétrico com o circuito.

A.2 Voltímetro

Alguns procedimentos de segurança utilizados para o amperímetro são válidos para o voltímetro.

1) Tensão alternada ou tensão contínua: deve-se verificar sempre a qualidade da tensão que se pretende medir. Se medirmos tensão alternada com um voltímetro de tensão contínua,

como mencionado para o amperímetro, teremos uma falsa indicação de zero, pois o voltímetro faz a indicação da tensão média, que no caso da corrente alternada é zero. O objetivo é a indicação da tensão eficaz, então deve ser instalado um voltímetro CA para medição de tensão alternada.

2) Polaridade: voltímetros digitais são capazes de indicar tensão negativa em corrente contínua, mas os voltímetros analógicos de painel, por exemplo, podem sofrer deflexão contrária do ponteiro, danificando seu mecanismo. Antes de ligar o sistema, verifique a conexão dos polos do voltímetro, que devem coincidir com a polaridade do ponto medido:

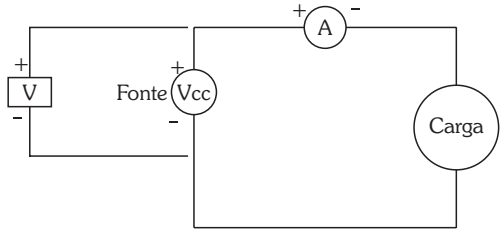


Figura A.3 - Ligação do voltímetro.

A.3 Wattímetro

Um equipamento puramente resistivo consumiria uma potência que pode ser calculada simplesmente com S = U × I. Equipamentos com reatância, capacitiva ou indutiva, causam defasagem entre tensão e corrente, produzindo dois tipos de potência, sendo a ativa, que realiza trabalho efetivo, e a reativa, responsável pelos efeitos eletromagnéticos no dispositivo. Existem, então, três potências a serem medidas: ativa, reativa e aparente (soma vetorial da ativa com a reativa).

Para encontrar o valor da potência aparente, basta multiplicar tensão e corrente mensuradas no circuito. Para obter o valor da potência ativa, é preciso saber o ângulo, a defasagem, entre a tensão e a corrente no circuito. Para medir potência ativa, essencialmente em circuitos de corrente alternada, utilizamos o wattímetro.

O wattímetro é um dos instrumentos mais complexos a serem instalados, pois envolve um conhecimento profundo do conjunto dos outros dois já vistos e calcula a potência ativa no circuito pelas leituras de tensão e de corrente.

A corrente que atravessa o wattímetro provoca o surgimento de um campo magnético na bobina de corrente; o potencial aplicado ao wattímetro faz surgir uma corrente na bobina de tensão que forma outro campo magnético. A interação dos campos magnéticos nas duas bobinas faz movimentar o ponteiro. Quanto mais em fase, maior o deslocamento do ponteiro. Se a tensão e a corrente estão defasadas em 90°, as duas bobinas, de tensão e de corrente, têm força resultante nula para empurrar o ponteiro.

Wattímetros digitais são encontrados no mercado e facilitam muito a medição de potência ativa em um sistema. Existem wattímetros trifásicos e monofásicos, digitais e analógicos. Quanto mais tecnologia envolvida, maior a facilidade de leitura e opções de escala. Deve-se verificar o manual do instrumento quanto à forma de proceder para determinado modelo em mãos, e são muitos os

disponíveis no mercado, inclusive alicates amperímetro-wattímetro. Wattímetros digitais modernos dispensam comentários, são ótimos, mas devem ser utilizados sob orientação do fabricante.

Resta estudar a montagem de um wattímetro ou sistema de medição de potência trifásica com wattímetros monofásicos e a medição de potência trifásica com um único wattímetro monofásico.

A.3.1 Wattímetro monofásico

Um wattímetro é essencialmente um voltímetro e um amperímetro, trabalhando em conjunto no mesmo instrumento, para o resultado: $P = U \times I \times Cos\varphi$. Observe a Figura A.4 com o desenho de um wattímetro e seus terminais.

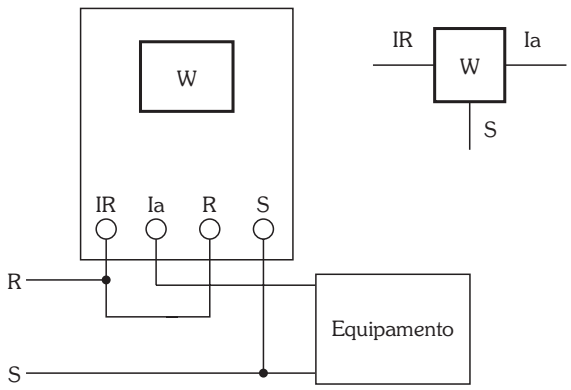


Figura A.4 - Ligação do wattímetro.

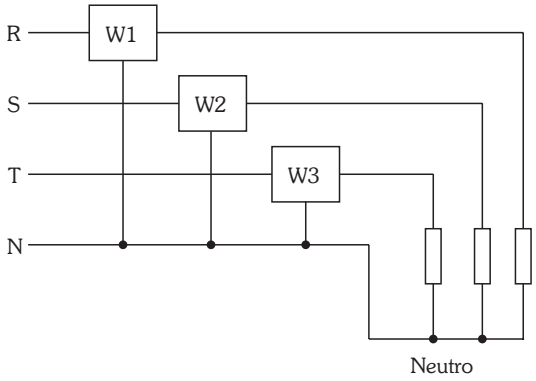
A ligação do wattímetro condiz com a forma de desenho ao lado.

Podemos representar o wattímetro com apenas três fios, pois a fase R pode ser conectada de IR a R no próprio instrumento.

Esta é a forma clássica de ligação do wattímetro para medir potência monofásica de um equipamento. Como medir potência trifásica a partir de um wattímetro monofásico?

São duas as possibilidades conhecidas. Acompanhe a explicação.

1) Medir potência ativa em um sistema trifásico com neutro

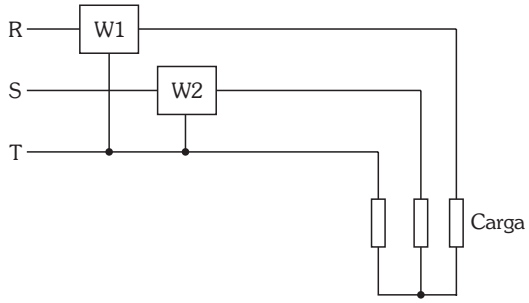


Medição de potência trifásica com três wattímetros monofásicos.

Figura A.5 - Método dos três wattímetros.

Três wattímetros monofásicos conectados a cada fase, tendo como referência o neutro, podem ser utilizados para medir a potência ativa total absorvida pela carga. A soma das três leituras individuais é a potência ativa total do sistema.

2) Sistema trifásico sem neutro



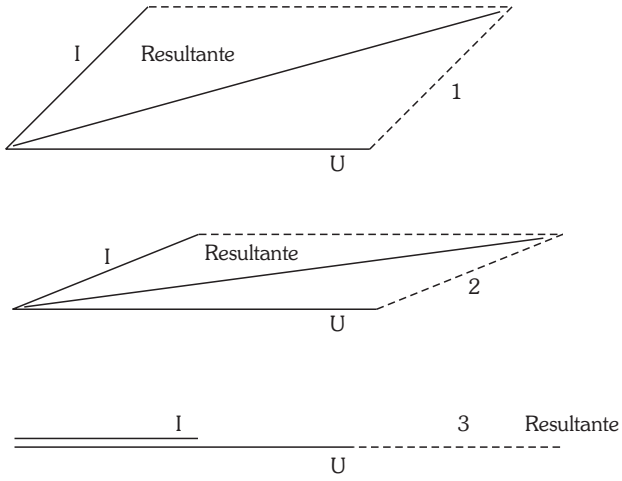
Medição de potência trifásica com dois wattímetros monofásicos.

Figura A.6 - Método dos dois wattímetros.

Nesta condição temos dois wattímetros cujas bobinas de corrente estão uma em cada fase. As bobinas de tensão estão conectadas a uma fase comum a elas. A potência ativa total é o resultado da soma das leituras dos dois instrumentos. Para cargas balanceadas e fator de potência unitário as indicações dos dois wattímetros são iguais. Para um fator equivalente a 0,5, um wattímetro indica 0 e o outro a potência ativa atual do sistema. Entre 0,5 e 1 de fator de potência temos indicações positivas nos dois wattímetros, mas um com maior indicação que o outro.

Para fatores menores que 0,5 temos um dos wattímetros com indicação negativa. Isso se explica pela defasagem diferente das correntes e tensões de fase com relação à referência e à dinâmica eletromagnética das bobinas dos instrumentos envolvidos para realizar a indicação.

Seria complicado explicar em palavras o funcionamento teórico dessas bobinas nos instrumentos, mas tenha em mente que um wattímetro, devido à interação da bobina de tensão com a bobina de corrente, pode passar de indicação positiva para negativa e vice-versa. Por exemplo, se a corrente antes atrasada com relação à tensão entrasse em fase e logo em seguida se adiantasse, a deflexão do ponteiro, antes em um sentido, tomaria sentido contrário. Talvez os desenhos seguintes ajudem a dar forma às palavras:



As figuras ao lado, de 1 a 3, apresentam três situações de medição de cargas com a mesma impedância, mas características diferentes.

Figura A.7 - Representação fasorial.

A Figura A.7-1 mostra a corrente adiantada com relação à tensão. A força resultante para movimentar o ponteiro do wattímetro pode ser vista no gráfico. Comparando com a Figura A.7-2,

percebemos que quanto maior a defasagem entre corrente e tensão para uma mesma corrente, menor a deflexão do ponteiro do wattímetro, pois menor a força resultante. Isso pode ser confirmado também ao observar que a resultante da Figura A.7-3 é maior que as duas outras.

De forma mais técnica, com base na Figura A.6, temos URT e IR trabalhadas no W1 e UST e IS trabalhadas nos W2. Construindo um diagrama fasorial trifásico, Figura A8, pode-se perceber as defasagens entre essas tensões de linha e correntes de fase, a partir das tensões de fase, e o efeito sobre a medição de potência ativa que elas causarão, por exemplo, se a carga tiver um fator de potência indutivo igual a 0,5 (60° entre corrente e tensão de fase):

$$Pw1 = URT \times IR \times (\cos 90°),\ 90° \text{ entre IR e URT, } \cos 90° = 0$$

$$Pw2 = UST \times IS \times (\cos 30°),\ 30° \text{ entre IS e UST, } \cos 30° = 0{,}866$$

Percebe-se claramente que temos uma indicação nula no wattímetro 1 e uma indicação positiva no wattímetro 2. Entre as tensões de fase e de linha há uma defasagem de 30° que foi considerada ao determinar a defasagem entre tensões de linha e correntes de fase.

Para o wattímetro 1 temos 30° entre a corrente na fase R (IR) e a tensão entre as fases R e T (URT). Para o wattímetro 2 há 90° entre a corrente na fase S (IS) e a tensão entre as fases S e T (UST).

$$PT = Pw1+Pw2$$

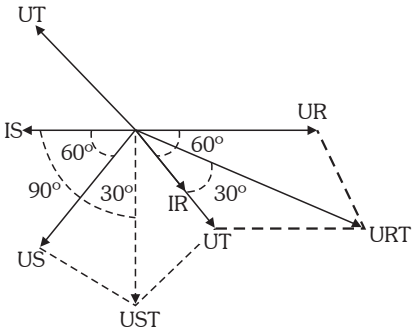


Figura A.8 - Tensões trifásicas.

Quando há mudança no sentido de deflexão do ponteiro de um wattímetro, devemos inverter um dos campos magnéticos, desta forma modificamos a força resultante que atua sobre o ponteiro. Executamos essa tarefa invertendo a ligação da bobina de tensão do wattímetro.

Conclusão: Imagine dois vetores com defasagem de 90° entre eles e uma resultante no centro. Caso gire um dos vetores 360° e cada grau acompanhe a reta resultante, você nota que esta resultante atinge comprimento máximo a 0° e mínimo a 180°. Num instrumento com interação de dois campos, a resultante é a força que movimenta o ponteiro, com acréscimo de que os vetores são a corrente e a tensão e variam de acordo com o circuito, provocando indicação do ponteiro.

Fique de olho!

Cuidado com o valor da tensão de escala do wattímetro. Pode-se obter valores errados de leitura se utilizada a escala de tensão incorreta.

A.3.2 Indicador de sequência de fase

Acertar a sequência de fase em certos equipamentos não pode seguir o método de "tentativa e erro" ou "tentativas sistemáticas", como brinca um grande amigo. Nesses equipamentos você tem

uma única chance para acertar a sequência de fase. Isso quer dizer que não pode errar, portanto necessita de um instrumento que garanta a sequência correta.

Equipamentos comprometidos com a sequência de fase devem ter em seu sistema de acionamento um relé de sequência de fase que o impeça de ser ligado em caso de sequência errada. Testes de sequência de fase podem ser executados com instrumentos construídos para esta finalidade, dos mais simples, a partir de pequenos motores, que indicam o sentido de rotação, até os eletrônicos.

Vamos analisar um sequenciador de fase com três componentes básicos e seu funcionamento. Assim, com duas lâmpadas e um capacitor você pode ter um indicador de sequência de fase ao alcance.

Suponha um circuito formado por duas lâmpadas incandescentes e um capacitor ligados em estrela e a uma rede trifásica. Podemos esperar que a corrente no capacitor se adiante, provocando uma diferença de corrente entre as fases.

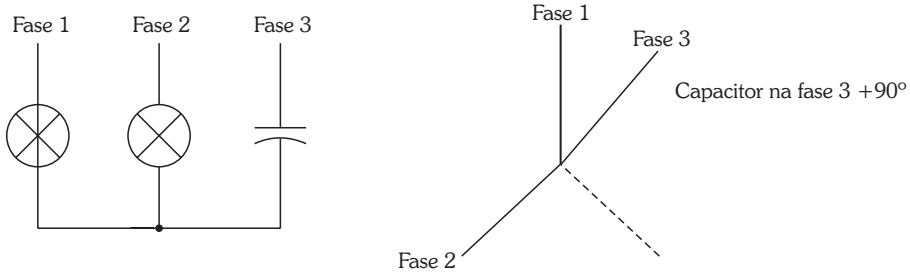


Figura A.9 - Carga trifásica RC.

A corrente na fase 1 é menor que a corrente na fase 2, por consequência da instalação do capacitor e da corrente adiantada. Medindo a tensão de fase, é possível notar isso. Geometricamente, uma reta para interligar a extremidade das fases umas as outras, por exemplo: fase 1 a 2, fase 2 a 3 e fase 3 a 1 pode confirmar isso. Quanto maior o segmento, maior a tensão e a corrente em determinada fase e maior a intensidade luminosa da lâmpada. Matematicamente, podemos calcular a corrente angular, lembrando que as lâmpadas possuem impedância com ângulo 0 e o capacitor com ângulo 90°.

A sequência poderia ser marcada como: lâmpada fraca, lâmpada forte e capacitor, o que daria: fase 1, fase 2 e fase 3. O sistema a ser interligado a essa rede deve estar na mesma sequência, por exemplo, um gerador. Testa-se a sequência desta forma e depois o conecta ao sistema de sincronização com a sequência pré-ajustada. Complemente com este conhecimento o ensaio do gerador CA.

Para complemento de estudos observe uma montagem com duas lâmpadas 100 W, 220 V e um capacitor de 2,2 μF/250 V/Xc = 1200 Ω em que foram obtidos os seguintes valores de tensão nas lâmpadas e no capacitor.

Tabela A1 - Medições de tensões referentes ao circuito RC da Figura A9

Lâmpada	Fase	Tensão
Lâmpada 1	1	70 V
Lâmpada 2	2	140 V
Capacitor	3	177 V

A.3.3 Medidor de fator de potência

O medidor de fator de potência geralmente é utilizado em painéis para acompanhamento visual. Em ensaios com máquinas pode ser utilizado para acompanhar e conferir os cálculos matemáticos efetuados. Alicates wattímetros modernos possuem incorporado ao instrumento o cálculo do fator de potência.

Basicamente o medidor de fator de potência ou "cossifímetro" tem as mesmas conexões que um wattímetro monofásico, acrescentando que instrumentos de painel recebem corrente e tensão de transformadores de corrente e potencial respectivamente.

O funcionamento do medidor de fator de potência também se baseia na interação dos campos da bobina de tensão e da bobina de corrente, como o wattímetro, apenas com alguns ajustes construtivos e alteração da escala.

Apêndice

B

Formulário e Conversão de Unidades

Para começar

Antes de apresentar, neste anexo, algumas das fórmulas mais utilizadas, é preciso esclarecer uma questão importante relativa a nomenclaturas utilizadas em vários livros. A tensão elétrica, por exemplo, pode ser representada por três letras: U, V e E, mas quando e como utilizá-las? Por observação, representar V = 150 V é característica de livros de eletrônica, portanto é representação utilizada em eletrônica. A representação U = 150 V é adotada por livros de eletricidade geral.

B.1 Nomenclaturas da tensão elétrica

Para máquinas elétricas, em que a tensão está associada à determinada parte da máquina, a letra utilizada na maioria dos livros de máquina no mercado é a E, associada à letra da respectiva parte da máquina, e algumas vezes U. Exemplo: Ea = Ufonte – Ur; traduzindo, tensão da armadura igual à tensão da fonte menos a tensão no resistor r.

No livro, muitas vezes a opção é fazer referência completa à parte do equipamento junto com a indicação de tensão U (exemplo: UsaídaEstator) e todas as nomenclaturas seguem o texto, portanto certamente não há problemas para identificá-las.

Sugestões futuras quanto à nomenclatura são bem-vindas no intuito de melhorar o entendimento na tomada de notas durante os ensaios.

B.2 Magnetismo e eletromagnetismo

Fluxo magnético: $\Phi(Mx) = B(G) \times A(cm^2)$

Força ímã: $F(N) = \frac{B^2(G) \times A(cm^2)}{2549400}$

Campo magnético: $H(Ae/cm) = \frac{I(A) \times N(espiras)}{L(cm)}$

Indução magnética: $B(Tesla) = \frac{N(esp) \times I(A) \times \mu\,(T.m/A)}{L(m)}$

Relutância: $Rm(A/Wb) = \frac{L(m)}{\mu\,(T.m/A) \times A(m^2)}$

B.3 Transformador monofásico

Relação de transformação: $\frac{Uprim}{Usec} = \frac{Nprim}{Nsec}$

Relação de corrente: $\frac{Iprim}{Isec} = \frac{Nsec}{Nprim}$

Número de espiras do primário: $Np = \frac{Up(V) \times 100.000.000}{4{,}44 \times 60 \times Sl(cm^2) \times B(Gauss)}$

Potência do secundário: $Ps = Us(V) \times Is(A)$

Potência do primário: $Pp = Ps(W) \times 1{,}1$

Seção líquida: $Sl = \sqrt{Pp}$

Seção bruta: $Sb = Sl \times 1{,}2$

Regulação de tensão: $R\% = \frac{Us(sem\ carga) - Us(com\ carga)}{Us(com_carga)} \times 100\%$

Rendimento η em %: $Rend = \frac{Us \times Is}{Us \times Is + Pcu + Pfe} \times 100\%$

B.4 Transformador trifásico

Potência aparente: $S(VA) = U(V) \times I(A) \times \sqrt{3}$

Potência ativa: $P(W) = U(V) \times I(A) \times \sqrt{3} \times Cos\varphi$

Potência reativa: $Q(VAr) = U(V) \times I(A) \times \sqrt{3} \times Sen\varphi$

Fator de potência: $Cos\varphi = \frac{P(W)}{S(VA)}$

Tensão de linha em estrela: $UL = Uf \times \sqrt{3}$

Corrente de fase em triângulo: $IF = \frac{IL}{\sqrt{3}}$

B.5 Motores em geral

Regulação de velocidade: $\frac{\text{rpm sem carga} - \text{rpm plena carga}}{\text{rpm plena carga}} \times 100\%$

Torque: $T(N \cdot m) = \frac{7024 \times CV}{rpm}$

Potência em CV: $P(CV) = \frac{T(N \cdot m) \times N(rpm)}{7024}$

Potência em W: $P(W) = rpm \times 0{,}105 \times T(N.m)$

B.6 Conversão de unidades

As unidades de medida diferentes em certos países causam problemas de adaptação que podem ser superados com a ajuda de certas tabelas que relacionam as unidades envolvidas.

Unidades de força

1 N = 0,102 Kgf

1 N = 0,225 Lbf

1 Kgf = 2, 205 Lbf

Unidades de potência

1 HP = 746 W

1 CV = 736 W

1 W = 3,415179 BTU/h

Unidades de torque

1 N · m = 0,102 Kgf · m

1 N · m = 8,85 Lbf · in

1 kgf · m = 86,796 Lbf · in

Velocidade

1 km/h = 0,2777778 m/s

Energia

1 BTU = 0,2930711 W · h

1 W · s = 1 N · m