



高等职业教育“十二五”规划教材
(电气类、机电类专业通用)

电机与电气控制技术 项目教程

张明金 © 主编

DIANJI YU DIANQI KONGZHI JISHU
XIANGMU JIAOCHENG



配电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业教育“十二五”规划教材（电气类、机电类专业通用）

电机与电气控制技术 项目教程

主 编 张明金
副主编 范爱华 包西平
参 编 王成琪
主 审 赵成民



机械工业出版社

本书是根据高职高专人才培养的目标,并结合项目化、理实一体化、任务驱动等教学方法的改革,以“工学结合、项目引导、任务驱动、‘做中学,学中做,学做一体,边学边做’一体化”为原则编写的。本书采用工作任务引领的方式将相关知识点融入到工作项目中,使学生掌握必要的基本理论知识,并使学生的实践能力、职业技能、分析问题和解决问题的能力不断提高。

本书共6个项目:变压器的认识与使用、交流电动机的认识与使用、直流电动机的认识与使用、特种电机的认识、交流电动机继电器-接触器控制线路的装配与检修、典型机床电气控制线路的分析与检修。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校的电气类、机电类专业的教材,也可供工程技术人员参考。

为方便教学,本书配备电子课件等教学资源。凡选用本书作为教材的教师均可登录机械工业出版社教育服务网 www.cmpedu.com 免费下载。如有问题请致信 cmpgaozhi@sina.com,或致电 010-88379375 联系营销人员。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术项目教程/张明金主编. —北京:机械工业出版社, 2015.6

高等职业教育“十二五”规划教材. 电气类、机电类专业通用
ISBN 978-7-111-50103-9

I. ①电… II. ①张… III. ①电机学—高等职业教育—教材
②电气控制—高等职业教育—教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第087993号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘子峰 责任编辑:刘子峰

封面设计:张静 责任校对:任秀丽 胡艳萍

责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2015年6月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·463千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-50103-9

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高职高专人才培养的目标,并结合项目化、理实一体化、任务驱动等教学方法的改革,以“工学结合、项目引导、任务驱动、‘做中学,学中做,学做一体,边学边做’一体化”为原则编写的。本书采用工作任务引领的方式将相关知识点融入到工作项目中,突出了理论与实践相结合的特点,使学生掌握必要的基本理论知识,并使学生的实践能力、职业技能、分析问题和解决问题的能力不断提高。

本书共6个项目:变压器的认识与使用、交流电动机的认识与使用、直流电动机的认识与使用、特种电机的认识、交流电动机继电器-接触器控制线路的装配与检修、典型机床电气控制线路的分析与检修。考虑到电气类、机电类专业另开设可编程序控制器应用技术相关课程,所以本书不包括此部分内容。

本书在编写的过程中,本着“精选内容,打好基础,培养能力”的精神,力求讲清基本概念,精选有助于建立概念、巩固知识、掌握方法、联系实际应用的例题。各项目分成若干任务,各任务以任务描述、任务目标、子任务展开(相关知识的学习)、技能训练、问题研讨为主线。在知识内容讲解上,力求语言简练流畅。本书适用学时为90~110学时。

本书由张明金担任主编,负责制订编写大纲及最后统稿。范爱华、包西平担任副主编,王成琪参加编写。其中项目2、项目5由张明金编写,项目3、项目6由包西平编写,项目1由范爱华编写,项目4由王成琪编写。

徐工轮胎集团有限公司的赵成民高级工程师担任本书的主审,对全部书稿进行了认真、仔细的审阅,提出了许多宝贵的意见,在此表示深深的谢意。

本书在编写过程中,得到了编者所在学院的各级领导及同事们的支持与帮助,在此表示感谢。同时对书后所列参考文献的各位作者表示诚挚的谢意。

由于“项目式”教学是一种全新的教学形式,多数高职高专院校都处在学习和摸索中,加之编者水平所限,书中不妥之处在所难免,在取材新颖和实用性等方面定有不足,敬请各位读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言

项目 1 变压器的认识与使用 1

任务 1.1 单相变压器的认识与使用 1

子任务 1 变压器的用途、结构与分类 1

子任务 2 变压器的运行 5

任务 1.2 其他用途变压器的认识与使用 13

子任务 1 自耦变压器的认识与使用 14

子任务 2 电焊变压器的认识与使用 15

子任务 3 仪用互感器的认识与使用 16

任务 1.3 小型单相变压器的检测 19

子任务 1 变压器绕组的同极性端与测定 19

子任务 2 小型变压器的常见故障及检修方法 22

任务 1.4 三相变压器的认识与使用 25

子任务 1 三相变压器磁路系统的认识 25

子任务 2 三相变压器电路系统的认识 26

子任务 3 三相变压器的结构和铭牌数据 29

习题 39

项目 2 交流电动机的认识与使用 44

任务 2.1 三相异步电动机的认识与使用 44

子任务 1 三相异步电动机的结构 45

子任务 2 三相异步电动机的铭牌及主要技术参数 48

子任务 3 三相异步电动机的运行原理 50

子任务 4 三相异步电动机的绕组始、末端的测定 54

任务 2.2 三相异步电动机的运行特性 57

子任务 1 三相异步电动机中的感应电动势和感应电流 57

子任务 2 三相异步电动机的机械特性 59

子任务 3 三相异步电动机的工作特性 63

任务 2.3 三相异步电动机的起动、反转、调速与制动 67

子任务 1 三相异步电动机的起动 67

子任务 2 三相异步电动机的反转 73

子任务 3 三相异步电动机的调速 73

子任务 4 三相异步电动机的制动 76

任务 2.4 三相交流异步电动机的使用、维护与检修 83

子任务 1 三相交流异步电动机的选择原则 83

子任务 2 三相交流异步电动机起动前的准备和起动时的注意事项 85

子任务 3 三相异步电动机运行中的监视与维护 86

子任务 4 三相交流异步电动机的定期检修 87

子任务 5 三相交流异步电动机的常见故障及修理方法 88

任务 2.5 单相异步电动机的认识与检修 93

子任务 1 单相异步电动机的结构和运行原理 93

子任务 2 单相异步电动机的起动 94

子任务 3 单相异步电动机的反转 97

子任务 4 单相异步电动机的调速 98

子任务 5 单相异步电动机的常见故障与处理方法 100

任务 2.6 三相同步电机的认识 103

子任务 1 三相同步电机的种类与结构 103

子任务 2 三相同步电机的工作原理 106

子任务 3 三相同步电动机的功角及矩角特性 106

子任务 4 三相同步电动机的 V 形曲线 及功率因数的调节	107	任务 4.4 直线电动机的认识	188
子任务 5 三相同步电动机的起动和 调速	108	子任务 1 直线异步电动机的结构	189
习题	111	子任务 2 直线异步电动机的工作 原理	191
项目 3 直流电动机的认识与使用	117	子任务 3 直线异步电动机的应用	192
任务 3.1 直流电动机的认识	117	习题	193
子任务 1 直流电动机的结构	117	项目 5 交流电动机继电器-接触器 控制线路的装配与检修	195
子任务 2 直流电动机的分类与铭牌 数据	121	任务 5.1 常用低压电器的认识与 使用	195
子任务 3 直流电机的工作原理	123	子任务 1 常用开关类低压电器的认识 与使用	196
任务 3.2 直流电动机的运行特性	125	子任务 2 主令电器的认识与使用	202
子任务 1 直流电动机的转子电动势、 功率和转矩	125	子任务 3 保护电器的认识与使用	206
子任务 2 直流电动机的机械特性	128	子任务 4 交流接触器的认识与 使用	210
子任务 3 直流电动机的换向	132	子任务 5 继电器的认识与使用	214
任务 3.3 直流电动机的起动、反转、 调速与制动	136	任务 5.2 三相异步电动机直接起动控制 线路的装配与检修	222
子任务 1 直流电动机的起动	137	子任务 1 电气控制线路的设计、绘制 及国家标准	222
子任务 2 直流电动机的反转	140	子任务 2 三相异步电动机单向点动控 制线路	228
子任务 3 直流电动机的调速	140	子任务 3 三相异步电动机单向长动控 制线路	228
子任务 4 直流电动机的制动	145	子任务 4 三相异步电动机正、反转控制 线路	230
任务 3.4 直流电动机的使用、维护与 检修	153	任务 5.3 三相异步电动机限位控制和多 地控制线路的装配与检修	236
子任务 1 直流电动机的选择原则	153	子任务 1 三相异步电动机限位控制 线路	237
子任务 2 直流电动机的维护保养	155	子任务 2 三相异步电动机多地控制 线路	239
子任务 3 直流电动机的常见故障与 处理方法	155	任务 5.4 三相异步电动机顺序控制线 路的装配与检修	241
子任务 4 直流电动机修理后的检查 和试验	157	子任务 1 主电路实现顺序控制的 控制线路	242
习题	158	子任务 2 控制电路实现顺序控制 的控制线路	243
项目 4 特种电机的认识	164	任务 5.5 三相笼型异步电动机减压起动 控制线路的装配与检修	246
任务 4.1 伺服电动机的认识	164	子任务 1 三相笼型异步电动机定子串电 阻减压起动控制线路	247
子任务 1 直流伺服电动机	164		
子任务 2 交流伺服电动机	167		
子任务 3 伺服电动机的应用	169		
任务 4.2 测速发电机的认识	175		
子任务 1 交流测速发电机	176		
子任务 2 直流测速发电机	178		
任务 4.3 步进电动机的认识	180		
子任务 1 步进电动机的结构	180		
子任务 2 步进电动机的工作原理	181		
子任务 3 步进电动机的应用	183		

子任务 2	三相笼型异步电动机星形-三角形减压起动控制线路	248	子任务 2	CA6140 型卧式车床电气控制线路分析	272
子任务 3	三相笼型异步电动机定子串自耦变压器减压起动控制线路	250	子任务 3	CA6140 型卧式车床常见电气故障检修	274
任务 5.6	三相异步电动机调速控制线路的装配与检修	252	任务 6.2	M7140 型平面磨床电气控制线路的分析与检修	277
子任务 1	双速异步电动机控制线路	253	子任务 1	M7140 型平面磨床的主要结构及运动形式	278
子任务 2	三速异步电动机控制线路	254	子任务 2	M7140 型平面磨床电气控制线路分析	279
任务 5.7	三相异步电动机制动控制线路的装配与检修	257	子任务 3	M7140 型平面磨床常见电气故障检修	282
子任务 1	三相异步电动机能耗制动控制线路	258	任务 6.3	Z3040B 型摇臂钻床电气控制线路的分析与检修	286
子任务 2	三相异步电动机反接制动控制线路	259	子任务 1	Z3040B 型摇臂钻床的主要结构及运动形式	286
习题		266	子任务 2	Z3040B 型摇臂钻床电气控制线路分析	287
项目 6	典型机床电气控制线路的分析与检修	270	子任务 3	Z3040B 型摇臂钻床常见电气故障检修	290
任务 6.1	CA6140 型卧式车床电气控制线路的分析与检修	270	参考文献		293
子任务 1	CA6140 型卧式车床的主要结构及运动形式	271			

项目 1 变压器的认识与使用

项目内容

- ◆ 单相变压器的结构、工作原理、运行特性及测试。
- ◆ 自耦变压器、电焊变压器、仪用互感器的结构、工作原理及使用方法。
- ◆ 三相变压器的认识及联结组别的判定。
- ◆ 变压器的使用与维护。

知识目标

- ◆ 掌握变压器的作用、结构及工作原理。
- ◆ 理解自耦变压器、电焊变压器、仪用互感器的工作原理；掌握其结构特点及使用方法。
- ◆ 掌握变压器同极性端的判定方法。
- ◆ 了解三相变压器联结组别和时钟表示法的判定。

能力目标

- ◆ 能对小型变压器进行测试。
- ◆ 能正确地选用自耦变压器、电压互感器、电流互感器、电焊变压器。
- ◆ 能正确地判定变压器的同极性端。
- ◆ 变压器的常见故障及其处理。

任务 1.1 单相变压器的认识与使用

任务描述

变压器和电动机是以电磁感应原理为工作基础的。变压器在电力线路中用于电能的传输，在电子电路中用于信号的变换，是电工、电子电路中的重要设备和器件。本任务学习单相变压器的用途、结构、运行和工作特性。

任务目标

了解变压器的用途；理解变压器的基本原理，空载运行、有载运行的分析；掌握变压器的结构，电压、电流和阻抗变换作用。

子任务 1 变压器的用途、结构与分类

1. 变压器的用途

变压器是根据电磁感应原理制成的一种静止的电气设备，用它可把某一电压等级的交流

电变换为同频率的另一电压等级的交流电。变压器的基本作用是在交流电路中变电压、变电流、变阻抗及用作电气隔离。

发电厂欲将 $P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi$ 的电功率输送到用电的区域, 在 P 、 $\cos\varphi$ 为一定值时, 采用的电压越高, 则输电线路中的电流越小, 因而可以减少输电线路上的损耗, 节约导电材料, 所以远距离输电采用高电压是最为经济的。

目前, 我国交流输电的电压最高已达 500kV, 这样高的电压, 无论从发电机的安全运行方面或是从制造成本方面考虑, 都不允许由发电机直接输出。

发电机的输出电压一般有 3.15kV、6.3kV、10.5kV、15.75kV 等几种, 因此必须用升压变压器将电压升高才能远距离输送。电能输送到用电区域后, 为了适应用电设备的电压要求 (多数用电器所需的电压是 380V、220V 或 36V, 少数电动机也采用 3kV、6kV 等), 还需通过各级变电所 (站) 利用变压器将电压降低为各类电器所需要的电压值。

升压、降压都需要用变压器。变压器最主要的用途是在输配电系统。除了电力系统的变压器外, 电气技术人员做实验时, 要用调压变压器; 电镀电解行业需要变压器来产生低压大电流; 焊接金属器件常用交流电焊机; 在广播扩音电路中, 为了使扬声器得到最大功率, 可用变压器实现阻抗匹配; 为了测量高电压和大电流要用到电压互感器和电流互感器; 有的电器为了使用安全要用变压器进行电气隔离; 人们平时常用的稳压电源盒充电器中也包含着变压器。

2. 变压器的基本结构

变压器的基本结构主要由铁心和绕组两部分组成。为改善散热条件, 大、中型的电力变压器的铁心和绕组浸在盛满变压器油的封闭油箱中, 各绕组的端线由绝缘套管引出。

(1) 铁心

铁心是变压器的磁路, 它又是绕组的支撑骨架。铁心由铁心柱和铁轭两部分构成, 铁心柱上装有绕组, 铁轭连接铁心柱构成闭合的磁路。为了提高铁心的导磁性, 减小磁滞损耗和涡流损耗, 铁心采用厚度为 0.35 ~ 0.5mm、材料表面涂有绝缘漆的热轧 (或冷轧) 硅钢片冲压成型, 并叠合组装成一个整体。

铁心的基本结构形式有心式和壳式两种, 如图 1-1 所示。心式结构的特点是绕组包围铁心, 结构比较简单, 绕组的装配及绕组的绝缘也比较容易, 如图 1-1a 所示。它适用于容量大、电压高的变压器, 如电力变压器均采用心式结构。壳式结构的特点是铁心包围绕组, 机械强度较好, 铁心容易散热, 但外层绕组的铜线用量较多, 制造工艺又复杂, 铁心材料消耗多, 如图 1-1b 所示。它一般多用于小型干式变压器, 如电炉变压器、收音机、电视机中用的小型特种变压器。

各种变压器的铁心, 是先将硅钢片冲压成条形, 然后将条形硅钢片交错地叠合组装成“口”字形或“日”字形, 如图 1-2 所示。交错叠片的目的是使各层接缝互相错开, 以免接缝处的间隙集中, 从而减小磁路的磁阻和励磁电流。

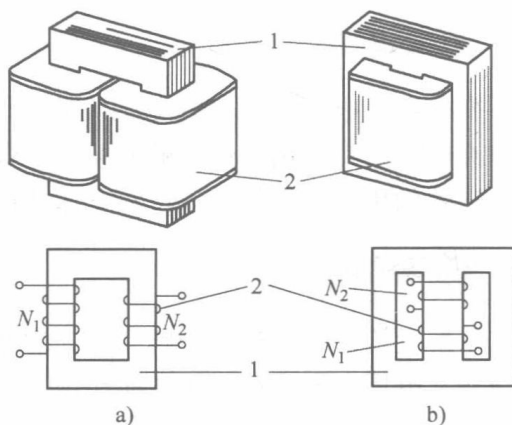


图 1-1 铁心的基本结构形式

a) 心式 b) 壳式

1—铁心 2—绕组

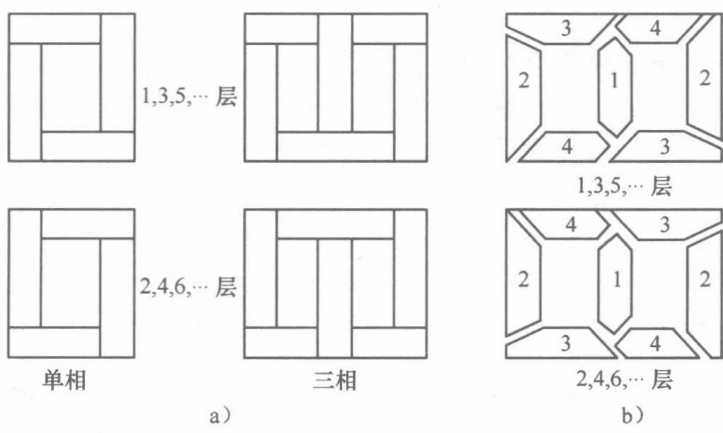


图 1-2 叠片式铁心交错叠装的方法
a) 热轧硅钢片叠法 b) 冷轧硅钢片叠法

铁轭的截面有矩形、外 T 形、内 T 形和多级阶梯形，如图 1-3 所示。

铁心柱的截面在小型变压器中常为方形或矩形，但大型变压器为了充分利用线圈内圆空间而常用阶梯截面，有的还设有冷却油道。近年来，出现了渐开线形铁心的变压器，它的铁轭由同一宽度的硅钢带卷制成型，铁心柱用硅钢片在专用成型机上轧制，按三角形方式布置，使磁路完全对称，该变压器的主要优点在于节省硅钢片、绕组耗铜材少、便于机械化生产和减少装配工时。常见铁心柱的截面如图 1-4 所示。

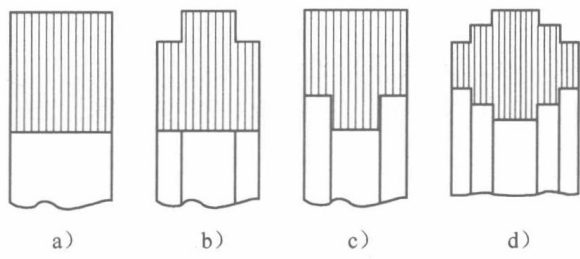


图 1-3 铁轭的截面
a) 矩形 b) 外 T 形 c) 内 T 形 d) 多级阶梯形

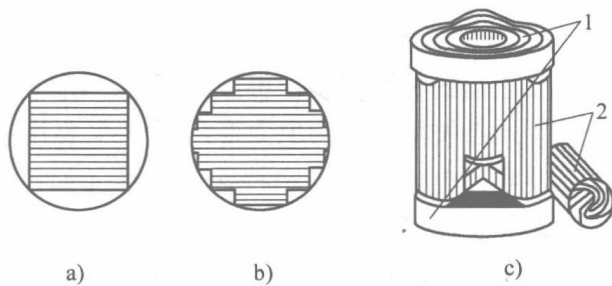


图 1-4 常见铁心柱的截面
a) 矩形 b) 多级阶梯形 c) 三相渐开线形铁心
1—铁轭 2—铁心柱

(2) 绕组

变压器绕组的作用是构成电路，它一般用绝缘漆包铜线或铝线绕制而成。通常把接于电源的绕组称为一次绕组，接于负载的绕组称为二次绕组；或者把电压高的绕组称为高压绕组，电压低的绕组称为低压绕组。

根据高、低压绕组在铁心柱上排列的方式不同，变压器的绕组可分为同心式和交叠式两种。同心式绕组的高、低压绕组同心套在铁心柱上，通常低压绕组靠近铁心层，高压绕组放在外面，二者之间用绝缘纸筒隔开。当低压绕组靠近铁心柱放置时，因为低压绕组与铁心柱所需的绝缘距离比较小，所以线圈的尺寸也就可以缩小，整个变压器的体积也就减小了。同

心式绕组结构简单、制造方便，国产电力变压器均采用这种绕组，其基本结构如图 1-5 所示。

交叠式绕组的高、低压绕组交替地套在铁心柱上，一般低压绕组靠近铁轭侧，绕组都做成饼式，高、低压绕组之间用绝缘材料隔开，绕组漏电抗小、引线方便、机械强度高。但交叠式高、低压绕组之间的间隙较多，绝缘比较复杂，主要用在电炉和电焊等特种变压器中。三相交叠式绕组如图 1-6 所示。

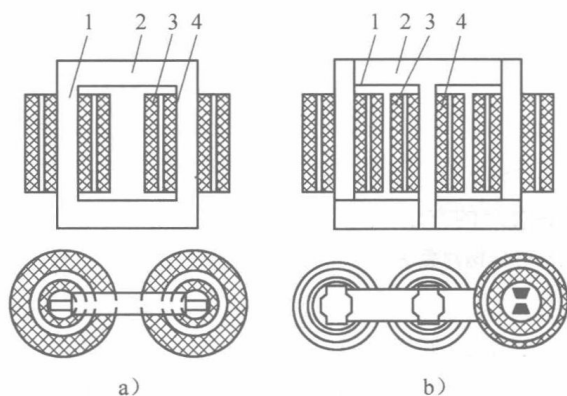


图 1-5 同心式绕组

a) 单相 b) 三相

1—铁心柱 2—铁轭 3—高压绕组 4—低压绕组

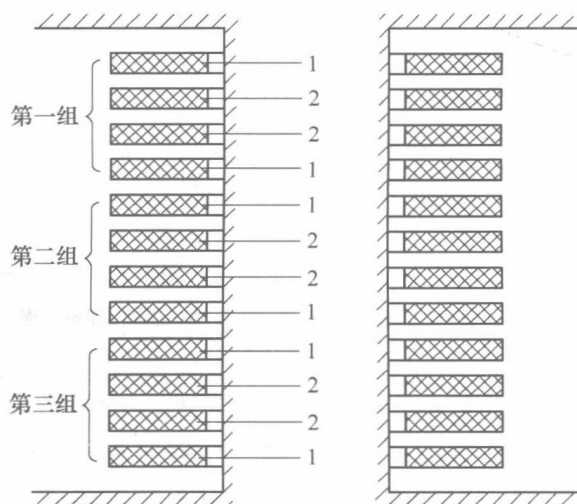


图 1-6 三相交叠式绕组

1—低压绕组 2—高压绕组

3. 变压器的分类

变压器的种类很多，可以按用途、结构、相数、冷却方式等来进行分类。

变压器按用途分为电力变压器（主要用在输、配电系统中，又分为升压变压器、降压变压器和配电变压器）和特殊变压器（如试验用变压器、仪用变压器、电炉变压器、电焊变压器和整流变压器等）。

变压器按绕组数目分为单绕组（自耦）变压器、双绕组变压器、三绕组变压器和多绕组变压器等。

变压器按相数分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

变压器按铁心结构分为心式变压器和壳式变压器。

变压器按调压方式分为无励磁调压变压器和有载调压变压器。

变压器按冷却介质和冷却方式分为空气自冷式（或称为干式）变压器、油浸式变压器（包括油浸自冷式、油浸风冷式、强迫油循环水冷却式和强迫油循环风冷却式）和充气式冷却变压器。

电力变压器按容量大小通常分为小型变压器（容量为 $10 \sim 630 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ）、中型变压器（容量为 $800 \sim 6300 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ）、大型变压器（容量为 $8000 \sim 63000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ）和特大型变压器（容量在 $90000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 及以上）。

单相变压器的表示符号如图 1-7 所示。

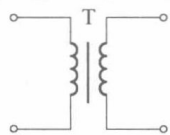


图 1-7 单相变压器的表示符号

子任务2 变压器的运行

1. 单相变压器的工作原理

变压器是利用电磁感应原理进行工作的。变压器有两个绕组，接在额定电压的交流电源上的绕组称为一次绕组，其匝数为 N_1 ；接负载的绕组称为二次绕组，其匝数为 N_2 。当一次绕组外加电压为 u_1 （交流）时，一次绕组中流过交流电流，产生交变磁通势，使铁心中产生交变磁通 ϕ ，并交链于一、二次绕组，使一、二次绕组中产生交流电动势 e_1 和 e_2 。单相变压器的工作原理如图 1-8 所示。

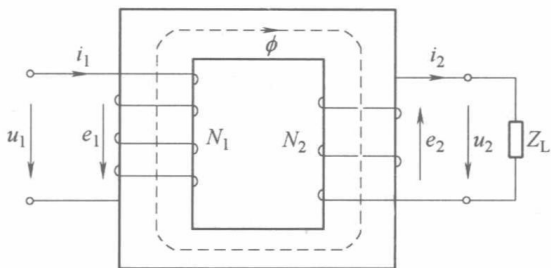


图 1-8 单相变压器的工作原理图

根据电磁感应定律，交变的主磁通 ϕ 在一、二次绕组中分别感应出电动势 e_1 与 e_2 ，有

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

忽略绕组中的漏电抗压降，不考虑绕组中的电阻压降，一、二次绕组的端电压可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &\approx e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ u_2 &\approx e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

若二次绕组开路（不接负载），这种运行方式称为变压器的空载运行。若二次绕组接负载，这种运行方式称为变压器的负载运行。 N_1 和 N_2 分别为一、二次绕组的匝数，则有

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-3)$$

从式 (1-3) 中可知，变压器的一、二次绕组感应电动势之比与电压之比都等于一次绕组与二次绕组的匝数之比。在磁通势一定的条件之下，只需改变一、二次绕组的匝数之比，就可实现改变二次绕组输出电压大小的目的。

2. 变压器的空载运行

变压器空载运行是指变压器的一次绕组接在额定频率、额定电压的交流电源上，而二次绕组开路时的运行状态，如图 1-9 所示。图中一次绕组两端加上交流电压 u_1 时，便有交变电流 i_0 通过一次绕组， i_0 称为空载电流。大、中型变压器的空载电流约为一次侧额定电流的 3%~8%。变压器空载时一次绕组近似为纯电感电路，故 i_0 较 u_1 滞后 90° ，此时一次绕组的交变磁动势为 $i_0 N_1$ ，它产生交变磁通，因为铁心的磁导率比空气（或油）的大得多，绝大部

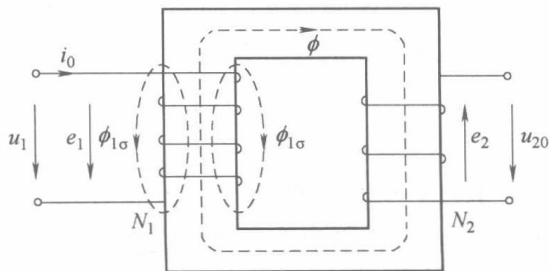


图 1-9 单相变压器的空载运行原理图

分磁通通过铁心磁路交链着一、二次绕组,称为主磁通或工作磁通,记为 ϕ ;还有少量磁通穿出铁心沿着一次绕组外侧通过空气或油而闭合,这些磁通只与一次绕组交链,称为漏磁通,记为 $\phi_{1\sigma}$ 。漏磁通一般都很小,为了使问题简化,可以略去不计。

若外加电压 u_1 按正弦变化,则 i_0 与 ϕ 也都按正弦变化。设 ϕ 的初相为零,即

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

式中, Φ_m 为主磁通的幅值。

将 ϕ 代入式(1-1),得

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -N_1 \Phi_m \omega \cos \omega t = E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -N_2 \Phi_m \omega \cos \omega t = E_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

可见 e_1 与 e_2 的相位都比 ϕ 滞后 $\frac{\pi}{2}$;因为 i_0 与产生的磁通 ϕ 是同相的,而 i_0 与外加电压 u_1 相比滞后 $\frac{\pi}{2}$,所以 e_1 与 e_2 都与外加电压 u_1 反相。

由式(1-4)求得 e_1 与 e_2 的有效值分别为

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_{1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m \omega = 4.44 f N_1 \Phi_m \\ E_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_{2m} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_2 \Phi_m \omega = 4.44 f N_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中, $N_1 \Phi_m \omega = 2\pi f N_1 \Phi_m = E_{1m}$; $N_2 \Phi_m \omega = 2\pi f N_2 \Phi_m = E_{2m}$ 。

由此可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_m}{4.44 f N_2 \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-6)$$

即一、二次绕组中的感应电动势之比等于一、二次绕组匝数之比。

由于变压器的空载电流 I_0 很小,一次绕组中的电压降可略去不计,故一次绕组的感应电动势 E_1 近似地与外加电压 U_1 相平衡,即 $U_1 \approx E_1$ 。而二次绕组是开路的,其端电压 U_{20} 就等于感应电动势 E_2 ,即 $U_{20} = E_2$ 。于是有

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-7)$$

式(1-7)说明,变压器空载时,一、二次绕组端电压之比近似等于电动势之比(即匝数之比),这个比值 k 称为电压比。

式(1-7)可写成 $U_1 \approx k U_{20}$ 。若 $k > 1$,则 $U_{20} < U_1$,是降压变压器;若 $k < 1$,则 $U_{20} > U_1$,是升压变压器。

一般地,变压器的高压绕组总有几个抽头,以便在运行中随着负载的变动或外加电压 U_1 稍有变动时,用来改变高压绕组匝数,从而调整低压绕组的输出电压。通常调整范围为额定电压的 $\pm 5\%$ 。

例 1-1 有一台单相降压变压器,一次绕组接到 6600V 的交流电源上,二次绕组电压为

220V, 试求其电压比。若一次绕组匝数 $N_1 = 3300$ 匝, 试求二次绕组匝数 N_2 。若电源电压减小到 6000V, 为使二次绕组电压保持不变, 试问一次绕组匝数应调整到多少?

解: 电压比为 $k = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{6600}{220} = 30$

二次绕组匝数为 $N_2 = \frac{N_1}{k} = \frac{3300}{30} \text{匝} = 110 \text{匝}$

若 $U'_1 = 6000\text{V}$, U_{20} 不变, 则一次绕组匝数应调整为 $N'_1 = N_2 \frac{U'_1}{U_{20}} = 110 \times \frac{6000}{220} \text{匝} = 3000 \text{匝}$

3. 变压器的负载运行

变压器的负载运行是指一次绕组加额定电压, 二次绕组与负载相接通时的运行状态, 如图 1-10 所示。这时二次电路中有了电流 i_2 , 它的大小由二次绕组电动势 E_2 和二次电路总的等效阻抗来决定。

因为变压器一次绕组的电阻很小, 它的电阻电压降可忽略不计。实际上, 即使变压器满载, 一次绕组的电压降也只有额定电压 U_{1N} 的 2% 左右, 所以变压器负载时仍可近似地认为 U_1 等于 E_1 。

由式 (1-5) 可得

$$U_1 \approx 4.44fN_1\Phi_m$$

上式是反映变压器基本原理的重要公式。它说明, 不论是空载还是负载运行, 只要加在变压器一次绕组的电压 U_1 及其频率 f 都保持一定, 铁心中工作磁通的幅值 Φ_m 就基本上保持不变, 那么, 根据磁路欧姆定律, 铁心磁路中的磁动势也应基本不变。

空载时, 铁心磁路中的磁通是由一次侧磁动势 i_0N_1 产生和决定的。设负载时一、二次电流分别为 i_1 与 i_2 , 则此时铁心中的磁通是由一、二次磁动势共同产生和决定的。它们都是正弦量, 可用相量表示。前面说过, 铁心磁路中的磁动势基本不变, 所以负载时的合成磁动势应近似等于空载时的磁动势, 即

$$\dot{I}_1N_1 + \dot{I}_2N_2 = \dot{I}_0N_1 \quad (1-8)$$

式 (1-8) 称为变压器负载运行时的磁动势平衡方程, 此式也可写成

$$\dot{I}_1N_1 = \dot{I}_0N_1 + (-\dot{I}_2N_2)$$

上式表明, 负载时一次绕组的电流建立的磁动势 $\dot{I}_1N_1$ 可分为两部分: 其一是 $\dot{I}_0N_1$, 用来产生主磁通 Φ_m ; 其二是 $-\dot{I}_2N_2$, 用来抵偿二次绕组电流所建立的磁动势 $\dot{I}_2N_2$, 从而保持 Φ_m 基本不变。

当变压器接近满载时, I_0N_1 远小于 I_1N_1 , 即可认为 $I_0N_1 \approx 0$, 于是有

$$\dot{I}_1N_1 \approx -\dot{I}_2N_2$$

上式说明 $\dot{I}_1N_1$ 与 $\dot{I}_2N_2$ 近似相等而且反相。若只考虑量值关系, 则

$$I_1N_1 \approx I_2N_2$$

或

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-9)$$

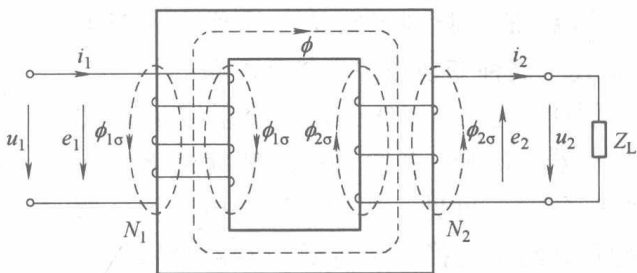


图 1-10 单相变压器的负载运行原理图

也就是说,变压器接近满载时,一、二次绕组的电流近似地与绕组匝数成反比,这表明变压器有变电流作用。应当指出,式(1-9)只适用于满载或重载的运行状态,而不适用于轻载的运行状态。

由以上分析可知,变压器负载加大(即 I_2 增加)时,一次电流 I_1 必然相应增加,电流能量通过铁心中磁通的媒介作用,从一次电路传递到二次电路。

变压器除有变电压和变电流作用之外,还可用来实现阻抗的变换。设在变压器的二次侧接入阻抗 Z_L ,那么从二次侧看,这个阻抗值相当于多少呢?由图1-10可知,从一次绕组输入端看进去的输入阻抗值 $|Z_L'|$ 为

$$|Z_L'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{kU_2}{k^{-1}I_2} = k^2 |Z_L| \quad (1-10)$$

式(1-10)说明,变压器二次侧的负载阻抗值 $|Z_L|$ 反映到一次侧的阻抗值 $|Z_L'|$ 近似为 $|Z_L|$ 的 k^2 倍,起到了阻抗变换作用。图1-11是表示这种变换作用的等效电路。

例如,把一个 8Ω 的负载电阻接到 $k=3$ 的变压器二次侧,折算到一次侧就是 $R' \approx 3^2 \times 8\Omega = 72\Omega$ 。可见,选用不同的电压比,就可把负载阻抗变换成为等效二端网络所需要的

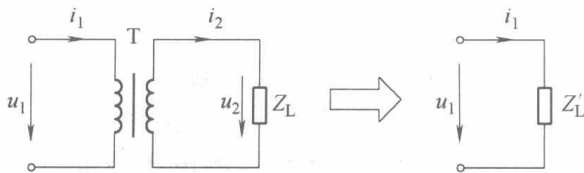


图 1-11 变压器阻抗变换等效电路

的阻抗值,使负载获得最大功率,这种做法称为阻抗匹配,在广播设备中常用到,该变压器称为输出变压器。

例 1-2 有一台降压变压器,一次绕组电压为 220V,二次绕组电压为 110V,一次绕组为 2200 匝,若二次绕组接入 10Ω 的阻抗,问变压器的电压比,二次绕组匝数,以及一、二次绕组中的电流。

解: 变压器电压比为 $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{110} = 2$

二次绕组匝数为 $N_2 = \frac{N_1 U_2}{U_1} = \frac{2200 \times 110}{220} \text{匝} = 1100 \text{匝}$

二次绕组电流为 $I_2 = \frac{U_2}{|Z_L|} = \frac{110}{10} \text{A} = 11 \text{A}$

一次绕组电流为 $I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1100}{2200} \times 11 \text{A} = 5.5 \text{A}$

4. 变压器的运行特性

对于用户来说,变压器相当于一个电源,对电源有两点要求:一是电源电压应稳定;二是变压器能量传递中损耗要小,因此衡量变压器运行性能的重要标志是外特性和效率特性。

(1) 变压器的外特性

变压器的外特性是指电源电压 U_1 和负载的功率因数 $\cos\varphi_2$ 为常数时,二次电压 U_2 随负载电流 I_2 变化的规律,即 $U_2 = f(I_2)$ 。

在负载运行时,由于变压器内部存在电阻和漏抗,故当负载电流流过时,变压器内部将产生阻抗压降,使二次侧端电压随负载电流的变化而变化。负载性质不同时,变压器的外特

性曲线如图 1-12 所示。在电阻性负载 ($\cos\varphi_2 = 1$) 和电感性负载 ($\cos\varphi_2 = 0.8$) 时, 外特性曲线是下降的; 而电容性负载 [$\cos(-\varphi_2) = 0.8$] 时, 外特性曲线是上升的。

(2) 变压器的电压变化率 (电压调整率)

电压变化率是指变压器一次绕组接入额定频率、额定电压的交流电源时, 二次绕组的空载电压 U_{20} 和带负载后在某一功率因数下的二次绕组电压 U_2 之差与二次绕组额定电压 U_{2N} 的百分比, 用 $\Delta U\%$ 表示, 即

$$\begin{aligned}\Delta U\% &= \frac{\Delta U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \\ &= \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \quad (1-11)\end{aligned}$$

电压变化率反映了变压器供电电压的稳定性与电能的质量, 所以它是表征变压器运行性能的重要数据之一。

(3) 变压器的损耗

变压器实际输出的有功功率 P_2 不仅取决于二次侧的实际电压 U_2 与实际电流 I_2 , 而且还与负载的功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关, 即

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2 \quad (1-12)$$

式中, φ_2 为 u_2 与 i_2 的相位差。

变压器输入功率决定于它的输出功率。输入的有功功率为

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1-13)$$

式中, φ_1 为 u_1 与 i_1 的相位差。

变压器输入功率与输出功率之差 ($P_1 - P_2$) 是变压器本身消耗的功率, 称为变压器的功率损耗, 简称损耗, 它包括以下两部分。

1) 铜损 p_{Cu} 。变压器的铜损也分为基本铜损和附加铜损两部分。基本铜损是电流在一、二次绕组电阻上的损耗, 而附加铜损包括由趋肤效应引起导线等效截面积变小而增加的损耗以及漏磁场在结构部件中引起的涡流损耗等。附加铜损为基本铜损的 0.5% ~ 20%。变压器铜损的大小与负载电流的二次方成正比, 所以把铜损称为可变损耗。

2) 铁损 p_{Fe} 。变压器的铁损包括基本铁损和附加铁损两部分。基本铁损为铁心中涡流和磁滞损耗, 它取决于铁心中磁通密度大小、磁通交变的频率和硅钢片的质量。铁损中的附加铁损包括由铁心叠片间绝缘损伤引起的局部涡流损耗、主磁通在结构部件中引起的涡流损耗等, 一般为基本铁损的 15% ~ 20%。

变压器的铁损还与一次侧外加电源电压的大小有关, 而与负载大小无关。当电源电压一定时, 其铁损就基本不变, 所以铁损又称为不变损耗。

(4) 变压器的效率和效率特性

变压器的效率是指变压器的输出功率与输入功率之比, 用百分数表示, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{Fe} + P_{Cu}}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \right) \times 100\% \quad (1-14)$$

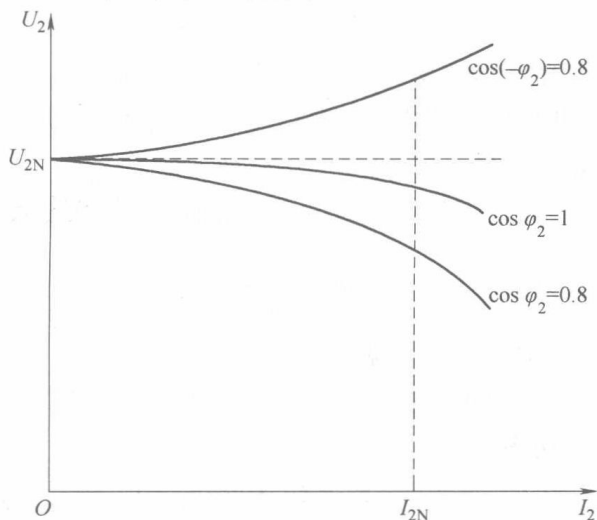


图 1-12 变压器的外特性曲线
(负载性质不同)

变压器效率的大小反映了变压器运行的经济性能的好坏,是表征变压器运行性能的重要指标之一。由于变压器没有转动部分,也就没有机械摩擦损耗,因此它的效率很高,一般中、小型电力变压器的效率在95%以上,大容量电力变压器的效率最高可达98%~99%。

在计算效率时,可采用下列几个假定。

1) 以额定电压下的空载损耗 p_0 作为铁损 p_{Fe} ,并认为铁损不随负载变化而变化,即 $p_0 = p_{Fe} = \text{常数}$ 。

2) 以额定电流时的短路损耗 p_k 作为额定电流时的铜损 p_{CuN} ,且认为铜损与负载电流的二次方成正比,即, $p_{Cu} = \left(\frac{I_2}{I_{2N}}\right)^2 p_k = \beta^2 p_k = \beta^2 p_{CuN}$ 。

式中, β 为负载系数, $\beta = I_2/I_{2N}$ 。

3) 由于变压器的电压变化率很小,负载时 U_2 的变化可不予考虑,即认为 $U_2 = U_{2N}$ 。故输出功率为

$$P_2 = U_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = U_{2N} \beta I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2 \quad (1-15)$$

式中, S_N 为额定容量。

由此可得

$$\eta = \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_k}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_k}\right) \times 100\% \quad (1-16)$$

对于已制成的变压器, p_0 和 p_k 是一定的,所以效率与负载大小及功率因数有关。在功率因数一定时,变压器效率与负载系数之间的关系 $\eta = f(\beta)$ 称为变压器的效率特性曲线,如图1-13所示。

从图中可以看出,空载时, $\beta = 0$, $P_2 = 0$, $\eta = 0$;当负载增大时,效率增加很快;当负载达到某一数值时,效率最大,然后又开始降低。这是因为随负载功率 P_2 的增大,铜损 p_{Cu} 按 β 的二次方成正比增大,超过某一负载之后,效率随 β 的增大反而变小了,其间有一个最高效率 $\eta_{\max}$ 。通过数学分析,可求出最高效率的条件是:铜损 p_{Cu} 等于铁损 p_{Fe} (即可变损耗等于不变损耗),即

$$p_{Cu} = \beta_m^2 p_k = p_0 = p_{Fe}$$

或

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_k}} \quad (1-17)$$

式中, β_m 为最大效率时的负载系数。

将式(1-17)代入式(1-16)中,可得出最高效率为

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{2p_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2p_0}\right) \times 100\% \quad (1-18)$$

由于电力变压器长期接在电网上运行,总有铁损,而铜损却随负载变化而变化,一般变压器不可能总在额定负载下运行,因此,为提高变压器的运行效率,设计时应使铁损相对小一些,一般取 $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ 。

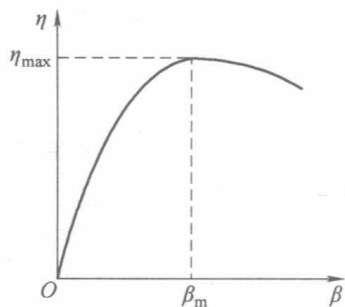


图 1-13 变压器的效率特性曲线