



高职高专机电类规划教材

工业和信息化部职业教育指导委员会“十二五”规划教材

电机与设备 电气控制

谢志萍 主 编

王显涛 雷莉萍 罗凤曼 副主编

异步电动机

直流电动机

控制用电机

常用低压电器

典型设备电气分析

可编程控制器基础知识

可编程控制器编程方法及应用



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高职高专机电类规划教材

电机与设备电气控制

谢志萍 主 编

王显涛 雷莉萍 罗凤曼 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

全书以“能力本位”课程思想为主导,摆脱“学科本位”课程思想的束缚,打破原来的课程界限,以工程应用的需要重组教学内容。将原“机床电气控制与PLC”和“电机与控制”课程的内容进行优化衔接、定向选择和合理取舍,建立了一种全新的、结构综合化的课程体系。

本书内容简明扼要,图文并茂,通俗易懂。主要内容有变压器、常用电动机、常用低压电器、电气控制电路基本环节、典型设备的电气控制电路分析、可编程控制器的基础知识、FX_{2N}系列可编程控制器及指令系统和可编程控制器的编程方法及应用等。

本书可作为高职高专机电一体化、机械工程及自动化等机电类专业的教材,也可供电气工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电机与设备电气控制 / 谢志萍主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.8
ISBN 978-7-121-13866-9

I. ①电… II. ①谢… III. ①电机—控制系统—高等职业教育—教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 116273 号

责任编辑: 郝黎明 特约编辑: 孙志明

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.25 字数: 387.2 千字

印 次: 2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

出版说明

为了顺应当前我国高职高专教育突飞猛进的发展形势,配合高职高专院校的教材改革和教材建设,进一步提高我国高职高专教育教材质量,将高职高专教育改革的理念和成果与具体教学实践结合起来,不断提高教学质量和人才培养质量,我们组织编写了该套教材。

教材编写团队由成都电子机械高等专科学校国家级教学名师和一批“双师型”骨干教师组成,其中有四川省学术带头人后备人选3人;有2人获得“国家级教学成果奖”一等奖,1人获得“国家级教学名师奖”,1人获得“全国优秀教师”光荣称号,2人获得“省教学名师奖”。编写团队成员与企业联系紧密,积极开展科研和技术服务,近5年主持和主研的省部级科研项目35项,获国家专利8项,有多项成果获国家和省部级奖励。

该系列教材,贯彻了高职高专教育“以技能型应用性人才培养为主,重在实践”的原则,按照“就业导向、校企合作、适应时代、推行双证”的教学改革基本思路进行编写。即以地方经济发展对人才的需求为导向确定人才培养目标;以岗位职业能力为基础;以工学结合为手段提升职业能力;以工作过程为基础,工作情境为支撑,校企合作为途径实施人才培养。教材的编写在多年教学改革的优秀成果基础上,对课程体系进行了重新设计,突出了基础理论的应用和实践技能的培养,整合了相关课程,明确了每一门课程在整个人才培养方案中的地位和作用,同时注重与职业资格要求的知识能力有机衔接,具有鲜明的职业教育特色。

本系列教材可作为高职高专院校、成人高校、民办高校及本科院校举办的职业技术学院机械、机电、数控及相关专业的教学用书,也适用于五年制高职、中职相关专业,并可作为社会从业人员的业务参考书及培训用书,也可供工程技术人员、工人和管理人员参考。

前 言

电机与设备电气控制是高职高专机电类专业的专业主干课。它是将电机与控制、继电器接触器控制和可编程控制器（PLC）控制技术整合到一起的新型教材。

该教材以学生的就业需求为导向，打破原来的课程界限，以工程应用的需要重组教学内容。将传统的“机床电气控制与PLC”和“电机与控制”课程的内容进行优化衔接、定向选择和合理取舍，将两者的内容紧密地结合了起来，建立了一种全新的、结构综合化的课程体系。经过优化、整合后的教材进一步拓宽了专业课程覆盖面，体现了传统工程、现代工程技术和非技术要求的融合，摆脱了片面追求知识的广博和片面强调单一技能的现象，更注重学生应用能力的提高和综合素质的培养。在一定程度上解决了各阶段教学环节因时空分离所造成的理论与实践的脱节。

本书内容分为三大部分，共8章。第一部分（1~2章）主要阐述变压器和常用电机的工作原理和使用方法。详细介绍了异步电动机、简单阐述了直流电动机、简明扼要地介绍了机电类专业常用控制电机等教学内容。第二部分（3~5章）主要介绍继电器接触器控制技术，阐述了常用低压电器、电气控制电路的基本环节和典型设备电气控制电路分析等基本教学内容。在编写时淡化低压电器的工作原理，强调低压电器的选用；精简机床的电气控制分析，增加起重机等其他设备的电气控制分析。第三部分（6~8章）介绍PLC控制技术，选择了具有代表性的三菱FX_{2N}系列产品，详细介绍了PLC的工作原理、FX_{2N}的指令系统（包括基本指令和常用功能指令）、PLC程序设计和PLC控制系统的应用设计等内容。编写时注重教学内容的更新，增加PLC的新知识，紧跟时代的发展，力求将最新的行业知识介绍给读者。

本书在教学的使用过程中，可根据专业的不同、课时的多少进行增减，有些内容可安排在实训、实验和课程设计中进行。由于课程三大部分既相互联系，又相互独立，可供分别开设“电机与控制”、“机床电气控制”及“可编程控制器应用技术”三门课程的院校选用。

本书由成都电子机械高等专科学校谢志萍、王显涛、雷莉萍、罗凤曼和郑向华编写。第1章由雷莉萍编写，第4章由罗凤曼编写，第5章由郑向华编写，其余章节由谢志萍编写。王显涛负责全书的习题编写。

本书编者尽心尽力而为，但由于编者水平有限，书中难免有疏漏及错误之处，恳请专家和同行批评指正。

2011年7月

目 录

第 1 章 变压器	1
1.1 变压器的结构及工作原理	1
1.1.1 变压器的结构及其分类	1
1.1.2 变压器的工作原理	3
1.2 变压器的功能及运行特性	6
1.2.1 变压器的功能	6
1.2.2 变压器的运行特性	9
1.3 三相变压器及特殊变压器	11
1.3.1 三相变压器	11
1.3.2 特殊变压器	12
1.4 变压器使用中的问题	15
1.4.1 变压器的铭牌	15
1.4.2 变压器的绕组极性	17
第 2 章 常用电动机	18
2.1 异步电动机	18
2.1.1 三相异步电动机的结构	18
2.1.2 三相异步电动机的工作原理	20
2.1.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	22
2.1.4 三相异步电动机的启动	26
2.1.5 三相异步电动机的调速、反转与制动	29
2.1.6 三相异步电动机的铭牌数据及使用	30
2.1.7 单相异步电动机	32
2.2 直流电动机	35
2.2.1 直流电动机的工作原理	36
2.2.2 直流电动机的结构	37
2.2.3 直流电动机的分类及机械特性	39
2.2.4 直流电动机的调速	43
2.2.5 直流电动机的启动、反转和制动	45
2.3 常用控制电动机	47
2.3.1 控制电动机概述	47
2.3.2 步进电动机	48
2.3.3 伺服电动机	51

第3章 常用低压电器	54
3.1 常用低压电器的基础知识	54
3.1.1 低压电器的分类	54
3.1.2 电磁式低压电器基本结构	55
3.2 接触器	58
3.2.1 接触器的分类及工作原理	59
3.2.2 接触器的技术参数及选用	60
3.3 继电器	62
3.3.1 电流继电器	63
3.3.2 电压继电器	64
3.3.3 中间继电器	64
3.3.4 时间继电器	65
3.3.5 热继电器	68
3.3.6 速度继电器	70
3.4 熔断器	71
3.4.1 熔断器的种类及结构	72
3.4.2 熔断器的技术参数及典型产品	73
3.4.3 熔断器的选用	74
3.5 开关电器	75
3.5.1 刀开关	75
3.5.2 转换开关	76
3.5.3 低压断路器	77
3.6 主令电器	79
3.6.1 控制按钮	79
3.6.2 行程开关	81
3.6.3 万能转换开关	82
第4章 电气控制电路基本环节	84
4.1 电气控制系统图的绘制规则和常用符号	84
4.1.1 电气图常用的图形符号、文字符号和接线端子标记	84
4.1.2 电气图的绘制原则	85
4.2 电气控制系统的基本控制电路	89
4.2.1 自锁与互锁控制	89
4.2.2 点动和长动控制	90
4.2.3 多地和多条件控制	91
4.2.4 正、反转控制	91
4.2.5 顺序控制	94

4.3	异步电动机的启动控制	95
4.3.1	直接启动	96
4.3.2	定子串电阻(或电抗器)降压启动	96
4.3.3	星—三角形(Υ — Δ)降压启动	97
4.3.4	自耦变压器降压启动	97
4.3.5	电动机启动方法的选择	98
4.4	异步电动机的制动控制	99
4.4.1	能耗制动	99
4.4.2	反接制动	100
4.5	异步电动机的调速控制	101
4.5.1	变转差率调速	101
4.5.2	变极调速	101
4.5.3	变频调速	103
4.6	电气控制系统常用的保护环节	105
4.6.1	短路保护	105
4.6.2	过载保护	105
4.6.3	过电流保护	105
4.6.4	失压保护	106
4.6.5	欠压保护	106
4.6.6	过电压保护	107
4.6.7	其他保护	107
第5章	典型设备的电气控制电路分析	108
5.1	CA6140型普通车床电气控制电路分析	108
5.1.1	主要结构及运动特点	109
5.1.2	电气控制要求	109
5.1.3	CA6140型车床的控制线路	110
5.2	Z3040型摇臂钻床电气控制分析	112
5.2.1	钻床结构与运动形式	112
5.2.2	电力拖动特点与控制要求	113
5.2.3	电气控制电路分析	113
5.3	X62W型铣床电气控制分析	117
5.3.1	主要结构和运动特点	117
5.3.2	电力拖动特点与控制要求	118
5.3.3	电气控制电路分析	118
5.3.4	X62W型卧式万能铣床电气控制特点	124
5.4	5吨桥式起重机的电气控制分析	124

5.4.1 桥式起重机结构及运行特点	124
5.4.2 桥式起重机电力拖动及控制要求	125
5.4.3 5吨桥式起重机的控制电路分析	126
第6章 可编程控制器的基础知识	130
6.1 可编程控制器概述	130
6.1.1 PLC的发展历史	130
6.1.2 PLC的特点	131
6.1.3 PLC的应用领域	133
6.1.4 PLC的发展趋势	134
6.2 PLC系统的组成及分类	136
6.2.1 PLC的硬件结构	136
6.2.2 PLC的软件组成	137
6.2.3 PLC的分类	138
6.3 PLC的编程方法与工作原理	141
6.3.1 PLC的编程方法	141
6.3.2 PLC的工作原理	143
第7章 FX_{2N}系列可编程控制器及指令系统	147
7.1 FX _{2N} 系列可编程控制器及其性能	147
7.1.1 FX系列PLC型号名称的含义	147
7.1.2 FX系列PLC性能简介	148
7.2 FX _{2N} 系列PLC的编程元件	151
7.3 FX _{2N} 系列可编程控制器的基本逻辑指令	158
7.4 FX _{2N} 系列可编程控制器的常用功能指令	165
7.4.1 功能指令的基本格式	165
7.4.2 FX _{2N} 系列PLC的常用功能指令	167
第8章 可编程控制器的编程方法及应用	178
8.1 梯形图程序的特点及绘制原则	178
8.1.1 梯形图的特点及编程规则	178
8.1.2 常用基本环节的梯形图编程	180
8.2 PLC程序设计方法	183
8.2.1 梯形图的经验设计法	183
8.2.2 根据继电器电路图设计梯形图程序	186
8.2.3 梯形图的顺序控制设计法	188
8.3 顺序控制梯形图的编程方式	192
8.3.1 使用STL指令的编程方式	192
8.3.2 使用启—保—停电路的编程方式	198

8.4 可编程控制器在工业中的应用	203
8.4.1 PLC 控制系统的设计步骤	203
8.4.2 减少输入/输出点的方法	205
8.4.3 可编程控制器的应用举例	207
习题	221
第 1 章 变压器	221
第 2 章 常用电动机	222
第 3 章 常用低压电器	223
第 4 章 电气控制电路基本环节	223
第 5 章 典型设备的电气控制电路分析	225
第 6 章 可编程控制器的基础知识	225
第 7 章 FX _{2N} 系列可编程控制器及指令系统	226
第 8 章 可编程控制器的编程方法及应用	227
参考文献	231

变压器是根据电磁感应原理制成的一种静止电气设备，具有变换电压、变换电流和变换阻抗的功能。它不仅在电能的传输、安全使用上有重要作用，而且广泛用于电气控制系统、电子技术领域和焊接技术领域等。



1.1 变压器的结构及工作原理

变压器输入与输出之间无电的关联，是靠磁路将两侧耦合起来的。能量的传输或信号的传递都要经过电→磁→电的变换。即通过磁的耦合作用，将绕在同一铁芯柱上的原绕组的电压与电流从某种数量等级改变为副绕组的另外一种等级的电压与电流。

1.1.1 变压器的结构及其分类

1. 变压器的基本结构

变压器的主要组成部分是铁芯和原、副绕组。大、中容量的电力变压器为了满足散热、绝缘、密封和安全等要求，还需要有油箱、绝缘套管及其他附件。如图 1-1 所示是一台油浸式电力变压器的外形结构。

(1) 铁芯

铁芯是变压器的主磁路部分，也是绕组的支撑骨架。为了减少磁滞和涡流损耗，一般由厚 0.28~0.35mm 的硅钢片叠成，叠片的两面均涂以绝缘漆使片间绝缘，叠片每层的接缝相互错开。

根据线圈套入铁芯的形式，铁芯分为壳式和心式两种。心式结构的特点是原、副绕组分别套装在铁芯的铁芯柱上，如图 1-2 (a) 所示，结构简单，绕组装配和绝缘比较容易。



适用于容量大、电压高的变压器，一般电力变压器多选用心式结构。壳式结构的特点是铁芯包围绕组的顶面、底面和侧面，如图 1-2 (b) 所示，其机械强度好，但制造复杂，铁芯用材料较多，只在一些特殊变压器（如电炉变压器）中采用。

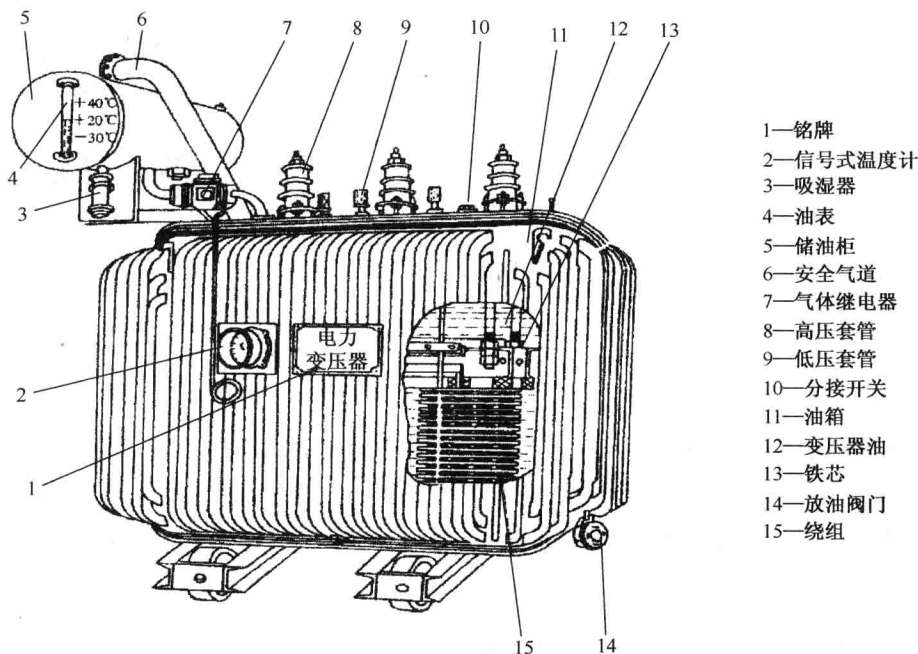


图 1-1 油浸式电力变压器的外形结构

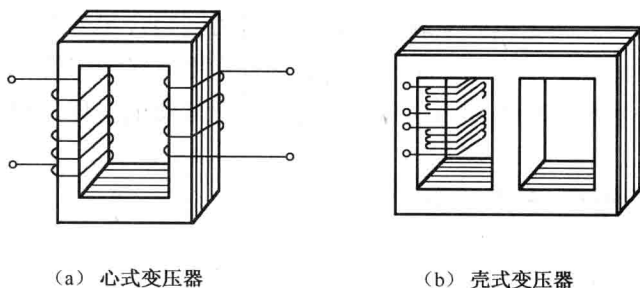


图 1-2 心式变压器和壳式变压器

(2) 绕组

变压器的线圈通常称为绕组，它是变压器的电路部分，一般用绝缘铜线或铝线绕制而成。

变压器中，接到高压电网的绕组称为高压绕组，接到低压电网的绕组称为低压绕组，按高、低压绕组在铁芯柱上放置方式的不同，绕组有同心式和交叠式两种。

同心式绕组是将高、低压绕组同心套在铁芯柱上。为了便于绕组与铁芯绝缘，通常低压绕组靠近铁芯，高压绕组套装在低压绕组的外面，如图 1-3 (a) 所示。同心式绕组结构简单，制造方便，常用于心式变压器，国产电力变压器均采用这种结构。

交叠式绕组又称饼式绕组，它将高压绕组分成若干线饼，沿着铁芯柱的高度方向交替

排列。为了便于绕线和铁芯绝缘,一般最上层和最下层放置低压绕组,如图 1-3 (b) 所示。交叠式绕组漏抗小、机械强度好、引出线布置方便,多用于低电压、大电流的电焊、电炉变压器及壳式变压器。

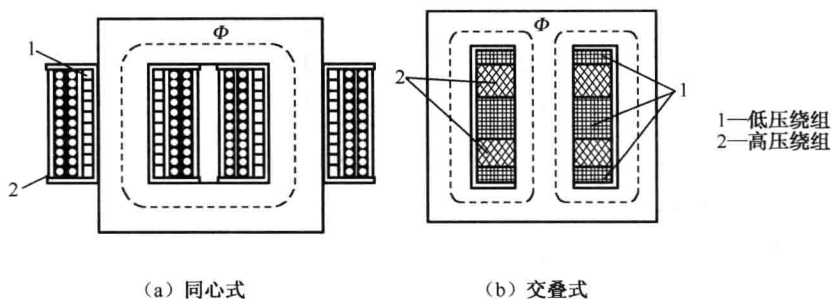


图 1-3 绕组结构

变压器在工作时,绕组和铁芯都要发热,故要考虑冷却问题。小容量的变压器采用空气自冷方式,即通过绕组和铁芯直接将热量散失到周围的空气中去;大容量的变压器需采取专用的冷却措施,常将绕组和铁芯放在盛满变压器油的油箱中,热量通过油箱中的油散失到周围空气中,油箱的外壁装有散热片或油管,这种方式称为油浸自冷式。此外还有强迫通风或强迫油循环等冷却方式。

2. 变压器的分类

变压器的种类很多,可以按绕组数、用途、结构、相数和冷却方式等进行分类。

按绕组数不同,可分为单绕组(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。

按相数不同,可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

按铁芯结构的不同,可分为心式变压器和壳式变压器。

按冷却介质和冷却方式的不同,可以分为空气自冷式(或称为干式)变压器、油浸式变压器和充气式变压器。

按用途不同,可以分为电力变压器和特种变压器(如仪用变压器、电炉变压器、电焊变压器等)。电力变压器主要用在输电系统中,按电压变换不同,分为升压变压器、降压变压器和配电变压器;按容量大小不同,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)。

1.1.2 变压器的工作原理

如图 1-4 所示为变压器的电路原理图。工作时,接电源的绕组为一次绕组(原绕组),接负载的绕组为二次绕组(副绕组)。实际的变压器两个绕组是同心地套在铁芯上的,为了分析问题方便,将两个绕组分别画在铁芯的左、右两边。

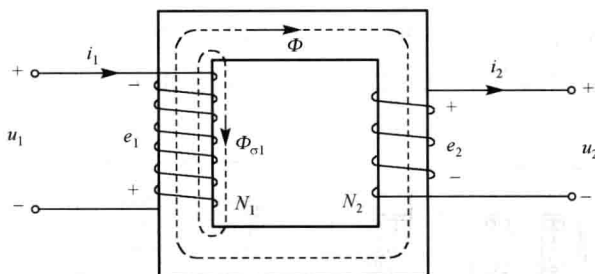


图 1-4 变压器的电路原理图

1. 变压器的空载运行

变压器一次绕组接额定交流电压，而二次绕组开路，即 $i_2=0$ 的工作方式，称为变压器的空载运行。空载时在外加交流电压 u_1 的作用下，一次绕组中通过的电流称为空载电流 i_0 。在 i_0 的作用下，铁芯中产生交变磁通，一部分通过铁芯磁路闭合，形成主磁通 Φ ，另一部分通过空气等非磁性物质与一次绕组构成漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 。 Φ 和 $\Phi_{\sigma 1}$ 形成总磁通，其中 $\Phi_{\sigma 1}$ 只是总磁通中很小的一部分，即 $\Phi \gg \Phi_{\sigma 1}$ 。

主磁通 Φ 同时穿过一、二次绕组，分别在其中产生感应电动势 e_{10} 和 e_{20} 。由电磁感应定律有

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

假设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，则感应电动势为

$$\begin{aligned} e_{10} &= -N_1 \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t \\ &= 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{10m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-2)$$

可见在相位上， e_{10} 滞后 $\Phi 90^\circ$ 。

同理

$$\begin{aligned} e_{20} &= 2\pi f N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{20m} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ E_{10} &= \frac{E_{10m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi N_1 f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 f \Phi_m \end{aligned} \quad (1-3)$$

$$E_{20} = \frac{E_{20m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi N_2 f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 N_2 f \Phi_m \quad (1-4)$$

式中， Φ_m 为交变磁通的最大值，单位是 Wb； N_1 和 N_2 分别为一、二次绕组的匝数； f 为交流电的频率，单位是 Hz； E_{10m} 、 E_{20m} 为感应电动势的最大值； E_{10} 、 E_{20} 为感应电动势的有效值。

漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 只穿过一次绕组，设其产生的感应电动势为 $e_{\sigma 10}$ ，一次绕组的漏磁电抗为 $X_{\sigma 1}$ ，则 $e_{\sigma 10} = -jX_{\sigma 1}i_0$ 。

实际变压器一次绕组有很小的电阻 r_1 ，空载电流 i_0 流过它要产生电压降 $i_0 r_1$ ，它和感应电动势 e_{10} 、漏抗电动势 $e_{\sigma 10}$ 一起为电源电压 u_1 所平衡。根据克希荷夫电压定律，一次绕组的电压平衡方程为

$$u_1 + e_{10} + e_{\sigma 1} = i_0 r_1 \quad (1-5)$$

电源电压 u_1 是正弦电压, 式 (1-5) 中各量都是正弦量, 式 (1-5) 用相量表示为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_{10} - \dot{E}_{\sigma 1} + r_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_{10} + jX_{\sigma 1} \dot{I}_0 + r_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_{10} + \dot{Z}_{\sigma 1} \dot{I}_0 \quad (1-6)$$

$\dot{Z}_{\sigma 1} = r_1 + jX_{\sigma 1}$ 称为变压器的漏阻抗。由于 r_1 和 $X_{\sigma 1}$ 的值均很小, 所以变压器空载时一次绕组的漏阻抗压降很小, 其数值不超过电源电压的 0.2%。为了方便分析问题, 不计漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$, 也不计一次绕组的电阻 r_1 及铁芯的损耗 (这种变压器为理想变压器), 则式 (1-6) 变成

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_{10} \quad \text{或} \quad U_1 = E_{10} \quad (1-7)$$

空载时, 二次绕组开路, 则感应电动势等于空载电压, 即

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{20} \quad \text{或} \quad U_2 = E_{20} \quad (1-8)$$

2. 变压器的负载运行

变压器一次绕组接额定交流电源, 二次绕组接负载的运行方式称为变压器的负载运行, 如图 1-5 所示。

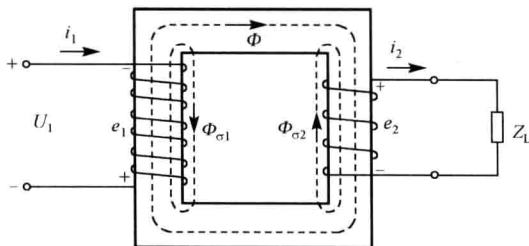


图 1-5 变压器负载运行原理图

变压器空载运行时, 二次绕组上的电流及其产生的磁通为零, 二次绕组电路对一次绕组电路没有影响。当二次绕组接上负载以后, 二次绕组与负载形成闭合回路, 产生电流 i_2 , 并产生磁通, 该磁通也作用在变压器的主磁路上, 从而改变了原来磁通的平衡。这时一次绕组中的电流由 i_0 增加到 i_1 , 以抵消二次绕组电流产生的磁通。

在 i_1 和 i_2 的作用下, 铁芯中产生交变磁通, 一部分通过铁芯磁路闭合, 形成主磁通 Φ , 另外通过空气等非磁性物质和一、二次绕组分别构成漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 和 $\Phi_{\sigma 2}$ 。根据前面对空载运行的分析, 变压器在负载运行时, 主磁通 Φ 同时穿过一、二次绕组, 分别在其中产生感应电动势 e_1 和 e_2 , 其有效值分别为

$$E_1 = 4.44 N_1 f \Phi_m \quad (1-9)$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f \Phi_m \quad (1-10)$$

式中, Φ_m 为交变磁通的最大值, 单位是 Wb; N_1 和 N_2 分别为一、二次绕组的匝数; f 为交流电的频率, 单位是 Hz; E_1 、 E_2 为感应电动势的有效值。

变压器负载运行时, 一次绕组回路的电压平衡方程为

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_1 r_1 \quad (1-11)$$

对应的相量关系为



$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jX_{\sigma 1}\dot{I}_1 + r_1\dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{Z}_{\sigma 1}\dot{I}_1 \quad (1-12)$$

式中, $\dot{Z}_{\sigma 1} = r_1 + jX_{\sigma 1}$ 为一次绕组的漏阻抗; r_1 和 $X_{\sigma 1}$ 分别为一次绕组中电阻和漏电抗。尽管变压器负载运行时一次绕组电流 i_1 比空载电流 i_0 大得多, 但因 r_1 和 $X_{\sigma 1}$ 很小 (与空载时相同), 一次绕组的漏阻抗压降仍然很小, 与 E_1 相比, 可忽略不计, 则

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \quad \text{或} \quad U_1 = E_1 \quad (1-13)$$

同样, 二次绕组也有电阻 r_2 , 同时二次绕组中也存在漏磁通 $\Phi_{\sigma 2}$, 如图 1-5 所示。故二次绕组中的电动势平衡方程为

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jX_{\sigma 2}\dot{I}_2 - r_2\dot{I}_2 = \dot{E}_2 - \dot{Z}_{\sigma 2}\dot{I}_2 \quad (1-14)$$

式中, $\dot{Z}_{\sigma 2} = r_2 + jX_{\sigma 2}$ 为二次绕组的漏阻抗; r_2 和 $X_{\sigma 2}$ 分别为二次绕组中电阻和漏电抗。



1.2 变压器的功能及运行特性

1.2.1 变压器的功能

变压器主要用于电压变换、电流变换和阻抗匹配。

1. 电压变换

变压器空载运行时, 若忽略漏阻抗压降, 由式 (1-3)、式 (1-4)、式 (1-7) 和式 (1-8) 可知

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-15)$$

式中, K 为变压器的变比, 等于一、二次绕组的匝数比, 它是变压器中最重要的参数之一。在电源电压不变的情况下, 改变一、二次绕组的匝数比, 就可以得到不同的输出电压。当 $K > 1$ 时, 是降压变压器; 当 $K < 1$ 时, 是升压变压器。

变比表示一、二次绕组的额定电压之比。一次绕组的额定电压即为电源电压, 二次绕组的额定电压是指一次绕组加上额定电压时二次绕组的空载电压。由于负载运行时二次绕组存在内阻抗压降, 所以额定运行 (接额定负载) 时, 二次绕组的输出电压比空载电压降低 5%~10%。变比要在变压器铭牌上注明, 若铭牌上标有 “6000/400V”, 这表明一次绕组的额定电压 (电源电压) 为 6000V, 二次绕组的额定电压为 400V。

例 1-1 低压变压器一次绕组匝数 $N_1 = 1110$ 匝, 一次绕组电压 $U_1 = 220\text{V}$, 求二次绕组输出电压 $U_2 = 24\text{V}$ 时, 二次绕组的匝数 N_2 及变比 K 。

解 由式 (1-15) 可知

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1 = \frac{24}{220} \times 1110 = 121$$

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1110}{121} \approx 9.17$$

2. 电流变换

由前面分析可知, 当变压器空载运行时, 若忽略漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$, 也不计一次绕组的电阻 r_1 及铁芯的损耗时 (这种变压器为理想变压器)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_{10} \quad \text{或} \quad U_1 = E_{10}$$

将式 (1-3) 代入上式得

$$U_1 \approx E_{10} = 4.44 f N_1 \Phi_{0m} \quad (1-16)$$

式中, Φ_{0m} 为变压器空载时交变磁通的最大值, 单位为 Wb。

变压器负载运行时, 将式 (1-9) 代入式 (1-13) 得

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-17)$$

由于变压器在空载与负载运行时, 外加电源电压 U_1 相同, 则有

$$4.44 f N_1 \Phi_{0m} \approx 4.44 f N_1 \Phi_m \quad \text{即: } \Phi_{0m} \approx \Phi_m \quad (1-18)$$

空载与负载时磁路没变, 磁阻不变, 两种情况下磁通又近似相等, 因此空载和负载时磁动势 (激磁电流和线圈匝数的乘积) 相等, 即

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_0 \quad (1-19)$$

对应的相量式为

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0 \quad (1-20)$$

将式 (1-20) 化简后得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{K} \right) \quad (1-21)$$

变压器空载运行时 $\dot{I}_0$ 通常很小, 可以忽略不计, 则由式 (1-21) 可得

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad (1-22)$$

式 (1-22) 表明 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 在相位上相差 180° , 其大小关系为

$$I_1 \approx \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (1-23)$$

由式 (1-15) 和式 (1-23) 可得

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-24)$$

由式 (1-24) 可知, 变压器的高压绕组匝数多, 而通过的电流小, 因此绕组所用的导线细; 低压绕组匝数少, 通过的电流大, 所用导线较粗。

3. 变压器的阻抗变换

变压器除了以上介绍的变电压、变电流的作用外, 还具有阻抗变换作用。利用变压器的阻抗变换功能, 可以使负载从电源获取最大功率, 即电源与负载达到阻抗匹配。

图 1-6 (a) 中, 负载阻抗 Z_L 和变压器的二次绕组相接, 图中虚线框部分可用一个阻抗 Z'_L 来等效代替, 如图 1-6 (b) 所示。所谓等效, 是指输入电路的电压、电流和功率不变。就是说, 直接接在电源上的阻抗 Z'_L 和接在变压器二次绕组的负载阻抗 Z_L 是等效的。