



中等职业技术学校

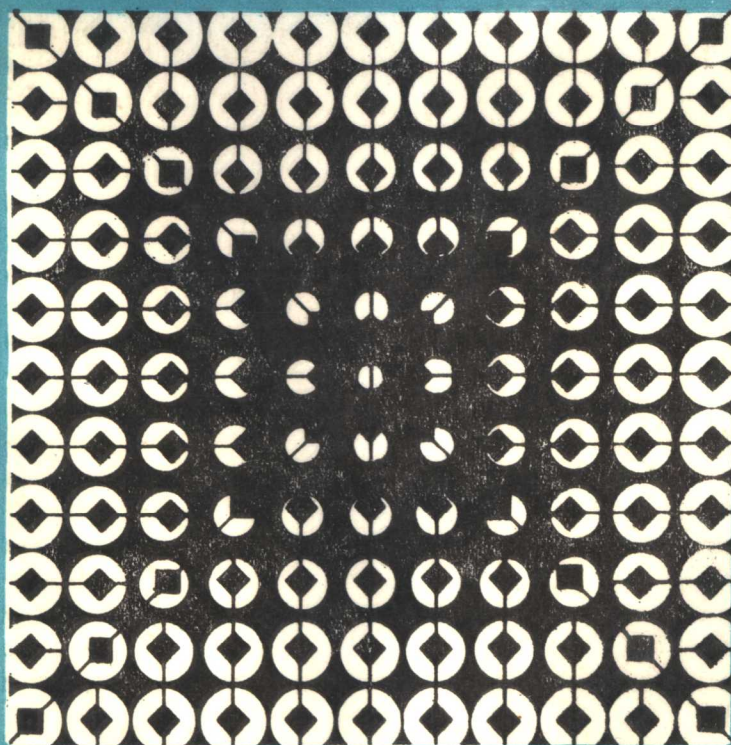
试用教材

辽宁省教育学院 编

王 生 主 编

高等教育出版社

电机与变压器



中等职业技术学校试用教材

电机与变压器

辽宁省教育学院 编

王 生 主编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书是国家教委职业技术教育司和高等教育出版社共同组织编写的中等职业技术学校电工专业系列教材之一。

本书内容包括变压器原理、三相变压器、特殊变压器、异步电动机、同步电机、直流电机和特种电机等。每章后附有小结及习题。本书与《电动机与变压器维修》是姐妹篇，两书配合使用可满足中等职业技术学校电工维修专业基础理论与实用技能的需要。本书内容起点低、通俗易懂、深入浅出，注重理论联系实际，突出实际应用。

本书适合作职业高中中等职业技术学校电工专业基础理论课教材，也可以作为中级电工岗位培训的教材，以及广大自学者用书。

责任编辑 禹天安

中等职业技术学校试用教材

电机与变压器

辽宁省教育学院 编

王 生 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 12.5 字数 300 000

19 年 月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 0 001—28 640

ISBN 7-04-003694-0/TM·187

定价 4.20 元



出版说明

1989年12月,国家教委职业技术教育司和高等教育出版社在江苏省常州市组织召开了有17个省市及能源部中国电力企业联合会代表参加的中等职业技术学校电工专业教材会议,拟定了为编写教材用的中等职业技术学校电工专业教学计划,审定了该专业11门课程的教材编写提纲。本书是根据会议精神组织编写的这套教材中的一种。

教材以三年制中等职业技术学校学生为主要读者对象,培养目标为中级技术工人。本系列教材侧重低压电器维修与安装,以部颁最新中级工人技术等级标准为依据编排专业课与工艺实习课,坚持学以致用,注意拓宽学生的基础知识,突出职业技能训练,以适应职业高中的就业需要。为了适应各地区各单位的不同要求,课程设置采用“积木式”结构安排,分为文化课、专业基础课和工艺实习课三个层次。本次编写的教材主要有:《电工应用识图》、《电工仪表与测量》、《电机与变压器》、《电动机与变压器维修》、《工厂电气控制设备》、《低压电气设备运行与维修》、《电力内外线施工》、《工厂供电》。

本套教材的特点是专业课设置以专业基础课与工艺实习课为两条主线,相辅相成。例如:《电机与变压器》与《电动机与变压器维修》,《工厂电气控制设备》与《低压电气设备运行与维修》,既紧密配合,又有一定的系统性与独立性。这样,为突出技能训练与教学改革提供了条件。

为了保证教材质量,我们在全国内范围内遴选有丰富教学经验、较高专业水平和文字能力、有一定实际操作能力的教师、高级技师、高级工程师参加编写和审稿工作。

参加本系列教材审定工作的有:能源部中国电力企业联合会及北京、江苏、南京、天津、河北、辽宁、沈阳、大连、西安、黑龙江、山东、江西、湖南、武汉、河南、重庆、成都等省市的代表。江苏省教育委员会对本专业教学计划的制定给予了具体帮助,在此谨向他们表示谢忱。

本系列教材亦可供岗位培训及自学人员使用。

本系列教材1992年秋出齐,欢迎广大读者选用,并提出宝贵意见。

高等教育出版社

职教部

1991年6月

前 言

本书由国家教委职业技术教育司和高等教育出版社共同组织编写。

1989年12月国家教委职业技术教育司和高等教育出版社共同召集我国17省市职业中学、中专和大专院校的代表40余人,在江苏省常州市召开了职业高中电工类(低压电器维修与安装专业)教材编写提纲讨论会。会议确定了本专业教学计划和八门专业课教材的编写提纲。本书就是根据这次会议审定通过的《电机与变压器》编写提纲编写的。

本书编写的基本原则是起点低,由浅入深,以适用为主,达到中级技术工人应具备的理论水平。既从当前实际教学水平出发,又考虑未来发展的需要,力求以基本概念和基本原理为主,突出针对性和实用性,从实际出发,理论联系实际,通俗易懂,循序渐进。本教材适宜于职业高中、技工学校使用。

本书内容是根据电工维修专业和相近专业的需要安排的,以变压器和异步电动机为主要内容。全书共分七章,第一章至第三章讲述变压器原理,三相变压器、特殊变压器等内容;第四章讲述三相异步电动机的原理、特性和控制,单相异步电动机的原理、特性和控制等内容;第五章扼要介绍同步电机的基础理论知识;第六章简述有关直流电机的原理结构、特性及控制原理,直流弧焊发电机的结构原理;第七章介绍了几种特种电机的原理,结构及使用方法。

本教材安排两个学期讲授,参考学时为144学时,各章学时大致分配如下表所列,可供

学时分配表

章 次	学 时	章 次	学 时
绪 论	1	第四章	45
第一章	9	第五章	20
第二章	10	第六章	25
第三章	12	第七章	10
		学生实验	12

参考。使用时各地可根据实际需要进行调整。本书应与《电动机与变压器维修》一书同时使用,这两本教材是相互配合,相互补充的。

参加本书编写提纲讨论的有宋常仁、贺广发、黄永铭、曾祥富等同志。

本书由重庆大学覃考教授主审。参加本教材审阅的还有黄永铭、曾祥富等同志。

本书在编写过程中得到本学校及各级领导的大力支持,在此谨向他们表示感谢。此外,编写时查阅参考了大量资料,在此向原作(编)者表示谢意。

限于编者水平及经验不足,书中缺点和错误实所难免,衷心希望广大读者给以批评指正。

编 者

1991年元月

目 录

绪论	1	本章小结	105
第一章 变压器原理	3	习题	107
第一节 变压器的结构及其分类	3	第五章 同步电机	109
第二节 变压器的工作原理	8	第一节 同步电机的特点和分类	109
第三节 变压器的外特性和电压调整率	12	第二节 三相同步电机的结构和铭牌数 据	110
第四节 变压器的空载试验和短路试验	14	第三节 三相同步电机的工作原理	115
第五节 变压器的损耗和效率	15	第四节 同步电机的励磁系统	117
第六节 变压器的铭牌	18	第五节 同步电动机的起动方法	119
本章小结	20	第六节 同步发电机的并联运行	121
习题	21	本章小结	122
第二章 三相变压器	22	习题	123
第一节 三相变压器的磁路结构	22	第六章 直流电机	124
第二节 变压器绕组的极性	23	第一节 直流电机的结构	124
第三节 三相变压器绕组的联接	26	第二节 直流电机的工作原理	128
第四节 三相变压器的联接组	28	第三节 直流电机的分类和铭牌	131
第五节 三相变压器的并联运行	31	第四节 直流电机的空载磁场和电枢反 应	134
本章小结	34	第五节 直流发电机及其运行特性	137
习题	35	第六节 直流电动机及其机械特性	143
第三章 特殊变压器	36	第七节 直流电动机的起动和反转	148
第一节 互感器	36	第八节 直流电动机的调速	150
第二节 自耦变压器	40	第九节 直流电动机的制动	151
第三节 电焊变压器	44	第十节 直流弧焊发电机	153
第四节 小型变压器的设计	46	本章小结	156
本章小结	50	习题	158
习题	51	第七章 特种电机	160
第四章 异步电动机	52	第一节 特种电机的种类及用途	160
第一节 三相异步电动机的结构和铭牌	52	第二节 单相串励电动机(手电钻)	161
第二节 异步电动机的工作原理	57	第三节 伺服电动机	163
第三节 三相异步电动机的运行原理	62	第四节 测速发电机	165
第四节 三相异步电动机的运行特性	66	第五节 电磁调速异步电动机	167
第五节 三相异步电动机的控制	76	第六节 交磁放大机	170
第六节 三相异步电动机绕组概述	90	第七节 步进电动机	172
第七节 单相异步电动机的原理和 起动	93	第八节 微型同步电动机	174
第八节 单相异步电动机的绕组	101	本章小结	175
第九节 单相异步电动机的反转控制程 调速方法	104	习题	175

学生实验	177
实验一 单相变压器的空载实验	177
实验二 单相变压器的短路实验	179
实验三 变压器绕组极性的测定	181
实验四 三相变压器联接组别的校核	184

实验五 三相异步电动机的起动实验	186
实验六 三相异步电动机定子绕组 首尾端的测定	188
附录 电气用图形符号和文字符号 新旧对照表 (摘录)	191

绪 论

一、电机在国民经济中的作用

自从19世纪奥斯特发现电流周围存在磁场及法拉弟发现电磁感应现象,并创造出世界上第一台感应发电机之后,开辟了一个伟大的电力时代。当今,电能的应用极其广泛,是最常用的一种能源。电机是电能应用中的重要设备。工业、农业、交通运输、国防以及人们日常生活中都普遍地使用了电机。

在电力工业中,电机是发电厂的主要设备。如将水力、热力、风力、太阳能、核能转换成电能,都要使用发电机。为了经济地传输和分配电能,用变压器将电能传输和分配到各个用电单位。

在机械工业、采矿工业、冶金工业、化学工业及其它各种工业企业中,都用电动机作为生产机械的原动机。如机床、吊车、鼓风机、压缩机,搅拌机,纺织机等都用电动机拖动。

在农业中,随着农业机械化的进展,在排灌、脱粒、米面加工、榨油、铡草等农牧业机械中也采用电动机拖动。

在国防工业中、军舰、潜艇、飞机都应用着大量的发电机和电动机。

在航天技术、雷达、无线电、计算机中需要大量的特种电机作为自动控制系统元件。

在医疗、文化教育事业中,电机的应用也日趋普遍。

在人们的日常生活中,如电风扇、电冰箱、空调器,洗衣机中也应用着电动机。

电机的广泛应用,可以加速扩大生产规模,实现生产的自动化控制,提高生产效率。电机在国民经济建设的各个领域起着重要作用。

二、我国电机制造业的发展概况

我国古代,在电学和磁学方面对人类都有过贡献,但漫长的封建社会禁锢科学的发展。解放初期,我国电机制造业仍很落后,当时的电机制造厂仅能生产200kW的水轮发电机,还不能生产汽轮发电机。电动机单台不超过132kW,变压器单台不超过2000kVA。

解放以后,我国电机制造业很快得到了发展,仅十年内,已能制造50000kW汽轮发电机,725000kW水轮发电机,120000kVA的变压器,2000kW异步电动机。1961年后J₂、JO₂系列异步电动机正式投产。1982年Y系列异步电动机正式定型生产。Y系列具有体积小,重量轻、起动转矩大、噪声和振动降低,效率提高等优点。在直流电机和特种电机方面也有较大的发展。在大型电机方面,1969年制成了125000kW双水内冷汽轮发电机,1972年又制成了300000kW双水内冷汽轮发电机,同时制成了300000kW双水内冷水轮发电机。1986年制成了500000kW氢冷汽轮发电机。近几年引进国外技术着手试制600000kW定子水冷、转子氢冷汽轮发电机样机。在变压器方面,自行设计制造了单台容量可达550000kVA、工作电压可达500000V的变压器。在直流电机方面,已能生产晶闸管整流供

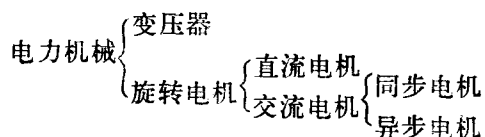
电直流电动机。并能制造10000kW的同步电动机和8000kW的异步电动机，基本形成了一整套电机制造工业体系。

三、电机的主要类型

电机的分类方法很多，按功能可分为：

- (1) 发电机——把机械能转换为电能；
- (2) 电动机——把电能转换为机械能；
- (3) 变压器、变频机等——分别用来改变电压和频率等；
- (4) 特种电机——用于自动控制系统中，完成信息的某种处理。

前三种统称为电力机械。从它们的运行情况，可大致分为变压器和旋转电机两大类。旋转电机又可分为交流电机和直流电机两类。交流电机中又可分为异步电机和同步电机。这种分类方法可归纳如下：



四、本课程的任务

本课程是维修电工专业技术理论课，通过学习，要求掌握变压器、异步电动机、直流电机的结构、工作原理、主要特性、控制原理等方面的知识。对同步电机和特种电机的结构、原理有一定的了解。培养对电机进行理论分析、故障判断和进行电机实验的能力。为电机与变压器维修课和解决实际维修技术以及进一步深造打下初步的理论基础。

要学好本课程，最重要的是加强理论联系实际，手脑并用，增强动手能力，在分析问题和解决实际问题中加深对理论的理解和应用。只要认真学习并注意改进学习方法，就能取得好的学习效果。

第一章 变压器原理

变压器是电气工程的重要设备。它是按照电磁感应原理，将一种交变电压，变为另一种交变电压的电气设备，在电能的传输、分配和使用中，都具有重要意义；同时，它在电气的测量、控制等方面，也有广泛的应用。

本章主要叙述变压器的结构、分类、工作原理和运行特性等内容。

第一节 变压器的结构及其分类

一、变压器的结构

变压器的主要组成部分是铁芯和原、副绕组（俗称为器身）。为了改善散热条件，大、中容量的电力变压器的铁芯和绕组浸入盛满变压器油的封闭油箱中，各绕组对外线路的联接由绝缘套管引出。为了使变压器安全可靠地运行，还设有储油柜、安全气道、气体继电器等附件。图1-1是一台三相油浸式电力变压器的外形图。

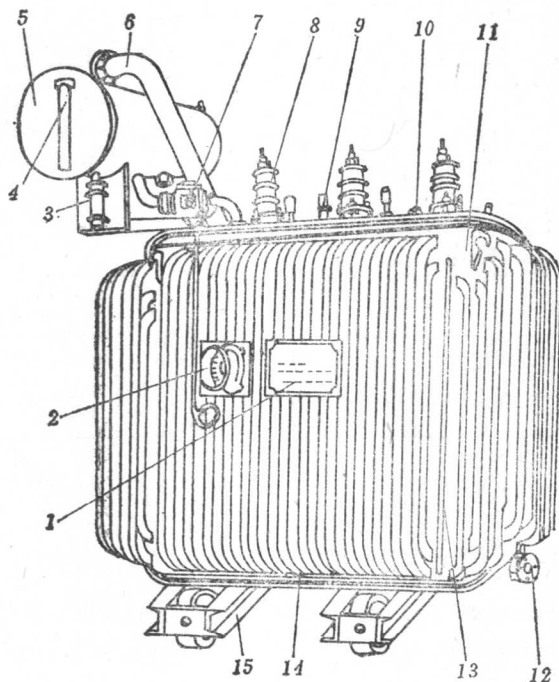


图 1-1 三相油浸式电力变压器外形图。

1—铭牌；2—讯号式温度计；3—吸湿器；4—油表；5—储油柜；6—安全气道；7—气体继电器；8—高压套管；9—低压套管；10—分接开关；11—油箱；12—放油阀门；13—器身；14—接地板；15—小车

1. 铁芯

铁芯是变压器的主要磁路，又作为绕组的支撑骨架。铁芯分铁芯柱和铁轭两部分。铁芯柱上套装绕组，铁轭的作用是使磁路闭合。为了提高导磁性能，减少磁滞损耗，铁芯多采用0.35mm厚冷轧硅钢片迭装而成，片间彼此绝缘。按绕组套入铁芯柱的形式，变压器可分为芯式和壳式两种如图1-2所示。

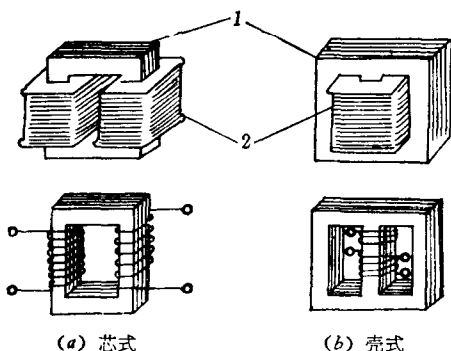


图 1-2 芯式和壳式变压器
1—铁芯；2—绕组

芯式变压器的原、副绕组套装在铁芯的两个铁芯柱上，如图1-2a所示。这种结构比较简单，有较多的空间装设绝缘，装配比较容易，适用于容量大、电压高的变压器，一般电力变压器均采用芯式结构。

壳式变压器的铁芯包围着绕组的上下和侧面，如图1-2b所示，这种结构的变压器机械强度较好，铁芯容易散热，但外层绕组的铜线用量较多，制造也较为复杂，小型干式变压器多采用这种结构形式。

大、中型变压器的铁芯，一般都将硅钢片裁成条状，采用交错迭片的方式迭装而成，使各层磁路的接缝互相错开，这种方法可以减小气隙和磁阻，如图1-3所示。

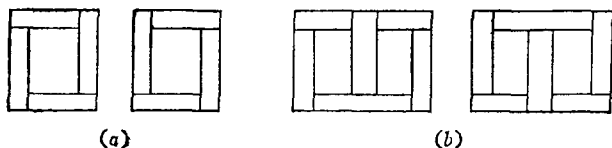


图 1-3 铁芯叠片
(a) 单相铁芯；(b) 三相铁芯

小型变压器为了简化工艺和减小气隙，常采用E字形，F字形，C字形和日字形冲片交错叠装而成。这些冲片的形状如图1-4所示。

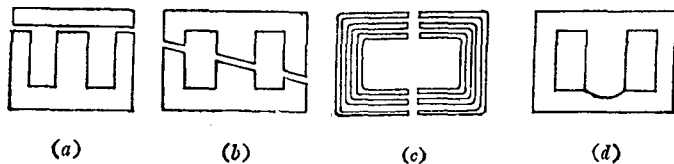


图 1-4 小型变压器的铁芯冲片
(a) E字形；(b) F字形；(c) C字形；(d) 日字形

小型变压器铁芯柱的截面是方形或长方形的；大型变压器为了充分利用空间，铁芯柱的截面通常是梯形截面如图1-5所示。为了改善铁芯内部的散热条件，当铁芯柱截面较大时，中间留有油道，如图1-5c所示。

另外，从60年代开始出现一种新的铁芯结构——渐开线式铁芯。它的铁芯柱用预先成型的渐开线形状的冷轧硅钢片插装压合而成。铁轭用成卷的带状冷轧硅钢片连续卷绕而成。再用长螺杆等夹紧附件把铁轭和铁芯柱对接紧固，如图1-6所示。这种渐开线式铁芯



图 1-5 铁芯柱截面

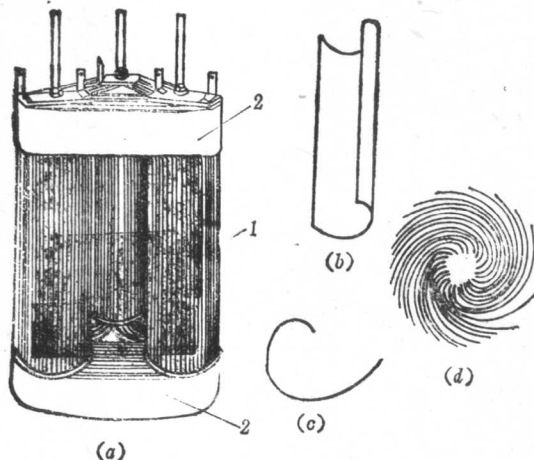


图 1-6 渐开线式铁芯

(a) 渐开线铁芯结构；(b) 铁芯叠片；(c) 渐开线形状；(d) 铁芯柱断面
1—铁芯柱；2—铁轭

迭片，各片形状相同，很适合机械化流水线生产，而且具有体积小，用料省，重量轻和铁损耗少等优点。

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分，一般用绝缘铜线或绝缘铝线绕制而成，近几年还有用铝箔绕制的。

变压器中，接到高压电网的绕组称高压绕组，接到低压电网的绕组称低压绕组。高、低压绕组之间的相对位置有同心式和交迭式两种不同的排列方法。

(1) 同心式绕组 同心式绕组是将高、低压绕组同心地套在铁芯柱上，为了便于绕组和铁芯绝缘，通常低压绕组靠近铁芯，把高压绕组装在低压绕组的外面如图 1-7 所示。但也有低压大电流绕组放在高压绕组外面的。

同心式绕组具有结构简单，制造方便的特点。国产变压器多采用这种结构。它又分为圆筒式，螺旋式和连续式等几种基本型式，如图 1-8 所示。

(2) 交迭式绕组 交迭式绕组又叫饼式绕组。它是将高、低压绕组分成若干绕饼，沿着铁芯柱的高度方向交替排列，为了便于绕制和铁芯绝缘，一般最上层和最下层放置低压绕组，如图 1-9 所示。

交迭式绕组的主要优点是漏抗小，机械强度好，引线方便。这种绕组仅用于壳式变压

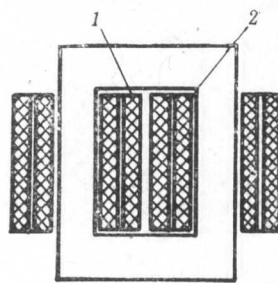


图 1-7 同心式绕组

1—高压绕组；2—低压绕组

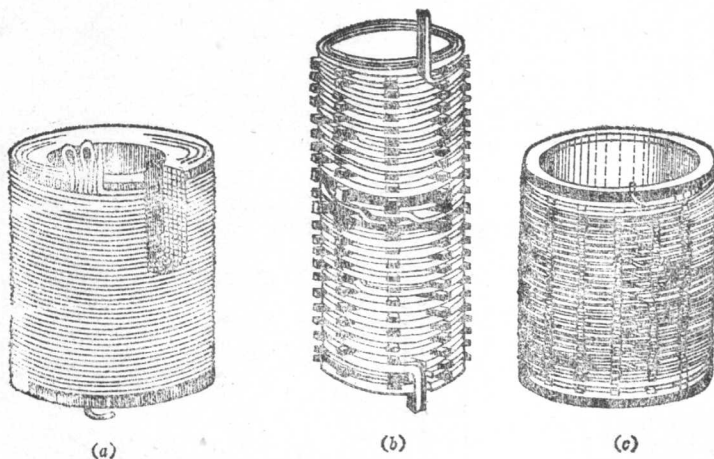


图 1-8 同心式绕组的基本形式
(a) 圆筒式; (b) 螺旋式; (c) 连续式

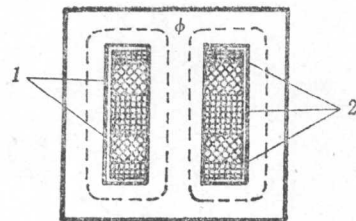


图 1-9 交迭式绕组
1—高压绕组; 2—低压绕组

器中, 如大型电炉变压器就采用这种结构。

3. 附件

电力变压器的附件有油箱、油枕、分接开关、安全气道、气体继电器、绝缘套管等。其作用是保证变压器的安全和可靠运行。

(1) 油箱 油浸式变压器的外壳就是油箱, 箱中盛有用来绝缘的变压器油, 它保护变压器铁芯和绕组不受外力和潮湿的浸蚀, 并通过油的对流, 把铁芯和绕组产生的热量传递给箱壁和散热管, 再把热量散发到周围的空气中去。

(2) 油枕 油枕亦称储油柜, 如图1-10所示。它是一个圆筒形容器, 装在油箱上, 用管道与油箱相连, 使油刚好充满到油枕的一半。油面的升降被限制在油枕中, 并且从外部的玻璃管中可以看到油面的高低。其作用是既能及时将油充满整个油箱, 又能根据温度变化进行热胀冷缩, 还能防止潮气侵入。

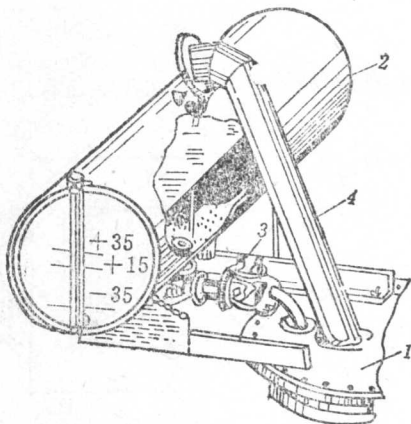


图 1-10 储油柜、安全气道及气体继电器
1—油箱; 2—储油柜; 3—气体继电器; 4—安全气道

低油箱内的压力, 从而避免油箱内因受到强大的压力而爆裂。

(4) 气体继电器 如图1-10所示。当变压器内部发生故障使绝缘物质损坏时, 油箱内部产生的气体使气体继电器动作, 接通中间继电器, 直接切断变压器的油开关, 同时发出事故信号, 以便运行人员及时处理。

(5) 分接开关 变压器运行时,其输出电压是随输入电压的高低和负载电流的大小及性质而变动的。在电力系统中,为了使变压器的输出电压控制在允许的变化范围内,变压器的原边绕组匝数要求在一定范围内调节,因而原绕组一般都备有抽头,称为分接头,如图1-11所示。利用开关 S 与不同分接头相连接,就可以改变原绕组的匝数,从而达到调节电压的目的。其调节范围是额定输出电压的 $\pm 5\%$ 。

分接开关分为有载调压和无载调压两种。

(6) 绝缘套管 由绝缘套管内外部的瓷套和其中的导电杆组成。其作用是使高、低压绕组的引出线与变压器箱体绝缘。它的结构主要取决于电压等级和使用条件。电压 $\leq 1\text{kV}$ 时采用实心瓷套管,电压在 $6\sim 10\text{kV}$ 时采用充气式绝缘套管,电压在 $10\sim 35\text{kV}$ 时采用充气式和充油式套管,电压 $\geq 110\text{kV}$ 时采用电容式套管,为了增加表面放电距离,套管外形做成多级伞形,如图1-12所示。

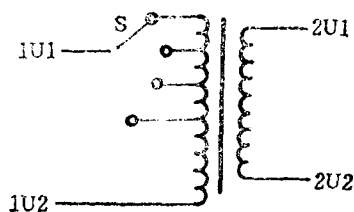


图 1-11 绕组的分接开关

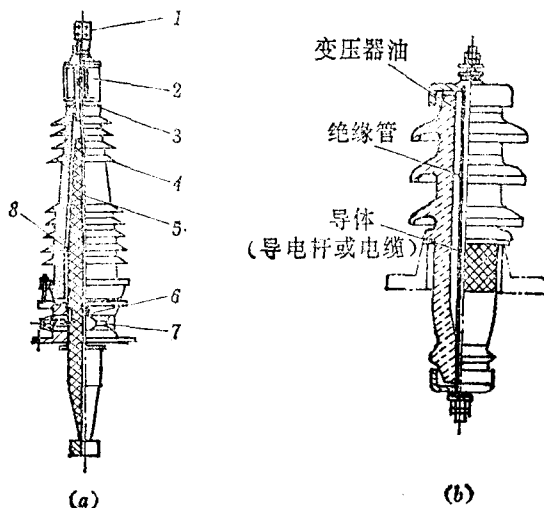


图 1-12 绝缘套管
(a) 110kV 胶纸电容式; (b) 35kV 充油式

二、变压器的分类

为了达到不同的使用目的并适应不同的工作条件,变压器有很多类型,可按其用途、绕组结构、铁芯结构、相数、调压方式、冷却方式等进行分类。

(1) 按用途不同 变压器分为电力变压器(又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、厂用变压器等);特种变压器(电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等);仪用互感器(电压互感器、电流互感器);试验用的高压变压器和调压器等。

(2) 按绕组构成不同 变压器分为双绕组、三绕组、多绕组变压器和自耦变压器。

(3) 按铁芯结构不同 变压器分为芯式变压器和壳式变压器。

(4) 按相数的不同 变压器分为单相、三相、多相(如整流用的六相)变压器。

(5) 按调压方式不同 变压器分为无激磁调压变压器,有载调压变压器。

(6) 按冷却方式不同 变压器分为干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器、强迫循环导向冷却变压器、充气式变压器等。

第二节 变压器的工作原理

一、变压器的空载运行

将变压器原绕组接交流电源，副绕组开路，这种运行方式称为变压器的空载运行。图1-13是单相变压器空载运行原理图。

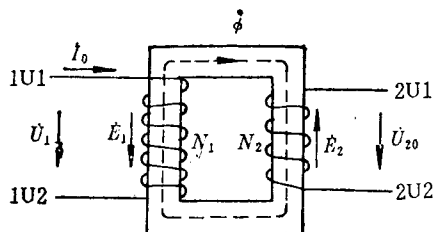


图 1-13 单相变压器空载运行原理图

由于变压器中电压、电流、磁通及电动势的大小和方向均随时间作周期性变化，为了能正确表明各量之间的关系，首先要规定它们的正方向。通常是这样规定的：

(1) 在原绕组内，电压的正方向与电流的方向一致；

(2) 磁通的正方向与电流的方向之

间关系符合右手螺旋法则；

(3) 由交变磁通产生的感应电动势，其正方向与产生该磁通的电流方向一致，符合右手螺旋法则和楞次定律。

图1-13中各有关量的正方向，就是根据上述规定作出的。图中 N_1 、 N_2 分别是原绕组和副绕组的匝数。假设变压器是理想变压器，其原、副绕组没有电阻，铁芯励磁后没有漏磁，磁路不饱和，而且铁芯中没有损耗。当原绕组加上交流电 $\dot{U}_1$ 后，其中就流过交流电流 $\dot{I}_0$ ，由于副绕组开路， $\dot{I}_2 = 0$ 这时 $\dot{I}_0$ 称为空载电流， $\dot{I}_0$ 在原绕组中产生交变磁动势 $\dot{F}_0 = N_1 \dot{I}_0$ ，磁动势 $\dot{F}_0$ 就产生交变磁通 $\dot{\Phi}_0$ ，磁通的大部分通过铁芯而闭合，既穿过原绕组，也穿过副绕组，称为主磁通 $\dot{\Phi}$ 。

根据电磁感应定律，主磁通 $\dot{\Phi}$ 将在原绕组、副绕组中产生感应电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 。按着基尔霍夫第二定律（回路电压定律），在原绕组中的电动势 $\dot{E}_1$ 与外加电压 $\dot{U}_1$ 相等，方向相反。在副绕组中，由于开路，产生的感应电动势 $\dot{E}_2$ 与端电压 $\dot{U}_{20}$ 相等，方向相同。即

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \quad (1-1)$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-2)$$

以上二式表明，在理想变压器中，外加电压 $\dot{U}_1$ 和原绕组中产生的感生电动势 $\dot{E}_1$ 在数值上是相等的，而方向是相反的，即相位上相差 180° 。

铁芯中没有损耗，即铁芯中没有磁滞损耗和涡流损耗，则 $\dot{I}_0$ 只用于产生主磁通 $\dot{\Phi}$ ，原绕组是一个没有电阻的纯电感电路，电流 $\dot{I}_0$ 滞后电压 $\dot{U}_1$ 90° ，又由于感应电动势 $\dot{E}_1$ 与外加电压 $\dot{U}_1$ 反相，所以感应电动势 $\dot{E}_1$ 滞后电流 $\dot{I}_0$ 90° ，主磁通 $\dot{\Phi}$ 与 $\dot{I}_0$ 同相位，所以 $\dot{\Phi}$ 超前感应电动势 $\dot{E}_1$ 90° 。

副绕组的感应电动势 $\dot{E}_2$ 与 $\dot{E}_1$ 同相。

因此，可以画出理想变压器空载运行时的相量图，如图1-14所示。

根据法拉第电磁感应定律，对于 N 匝数线圈，其感应电动势为

$$e = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (1-3)$$

式中 e —— 感应电动势瞬时值, 单位是伏特 (V);

N —— 绕组匝数;

$\Delta \phi$ —— 磁通量的变化量, 单位是韦伯 (Wb);

Δt —— 时间, 单位是秒 (s)。

式中负号表示感应电动势总是企图产生感应电流阻碍原磁通的变化。这里只考虑其绝对值。

$$e = \left| -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \right| = N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (1-4)$$

按正弦规律变化的电流 I_0 , 产生按正弦规律变化的磁通量 ϕ , 其值由零增加到幅值 ϕ_m 或由幅值减小到零, 所需要的时间为 $1/4$ 周期, 在此期间磁通量的变化量为 $\Delta \phi = \phi_m$,

$$\Delta t = \frac{T}{4} = \frac{1}{4f}$$

由此可以求得这段时间内的平均感应电动势值为

$$E_p = N \frac{\phi_m}{\frac{T}{4}} = 4fN\phi_m \quad (1-5)$$

式中 ϕ_m —— 磁通量的幅值, 单位是韦伯 (Wb);

T —— 交流电的周期, 单位是秒 (s);

f —— 交流电的频率, 单位是赫兹 (Hz);

E_p —— 感应电动势的平均值, 单位是伏特 (V)。

一个周期可分为四个四分之一周期, 一个周期内的平均感应电动势与四分之一周期内的平均感应电动势相同。从电工基础知道, 正弦量的有效值是其平均值的 1.1 倍, 所以, 感应电动势的有效值为

$$E = 1.1E_p = 4.44fN\phi_m \quad (1-6)$$

所谓理想变压器是指铁芯导磁率为无穷大, 没有漏磁, 没有损耗, 线圈没有电阻、全部磁通与原、副绕组同时交链。这样, 理想变压器原、副绕组中的感应电动势 E_1 、 E_2 可按上式求得, 又由于 $\phi_m = SB_m$ 故有

$$\begin{cases} E_1 = 4.44fN_1\phi_m = 4.44fN_1SB_m \\ E_2 = 4.44fN_2\phi_m = 4.44fN_2SB_m \end{cases} \quad (1-7)$$

式中 B_m —— 磁感应强度最大值, 单位是特斯拉 (T);

S —— 铁芯截面积, 单位是米² (m²);

N_1 —— 变压器原绕组的匝数;

N_2 —— 变压器副绕组的匝数。

由式 (1-1)、(1-2) 和式 (1-6) 可得出

$$\begin{cases} U_1 = E_1 = 4.44fN_1\phi_m \\ U_2 = E_2 = 4.44fN_2\phi_m \end{cases} \quad (1-8)$$

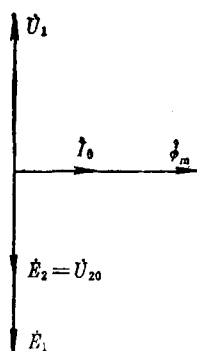


图 1-14 单相理想变压器空载运行相量图

变压器副绕组中的感应电动势 E_2 与副绕组空载输出电压 U_{20} 大小相等, 相位相同, 即 $E_2=U_{20}$ 。根据式(1-8)可以求得变压器的变比 K

$$K = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明, 变压器的变比 K 等于原、副绕组的匝数之比。当 $K>1$ 时, 是降压变压器, 当 $K<1$ 时是升压变压器。变比是变压器的一个重要运行参数。

实际运行的变压器空载时, 绕组电阻、漏磁通、铁耗等都不能忽略, 此时, 空载电流 I_0 既建立了主磁通、漏磁通、又克服了铁耗和绕组铜耗所需要的电流。

一般情况下, 实际变压器绕组的电阻很小, 空载电流通过原绕组电阻 r_1 , 要产生电压降 $r_1 I_0$, 空载电流激起的磁通绝大部分交链原、副绕组, 称为主磁通, 其幅值用 ϕ_m 表示,

它在原、副绕组中产生感应电动势 E_1 和 E_{20} , 还有另外一部分磁通只与原绕组交链, 称为漏磁通, 用 ϕ_{s1} 表示, 它原绕组中产生漏磁感应电动势, 用 E_{s1} 表示。漏磁通也是很小的, 只有主磁通的千分之几, 相应的漏磁感应电动势也是很小的。

在实际变压器中, 由于存在磁滞损耗和涡流损耗, 合称为铁耗。空载电流要提供铁耗所需要的有功功率。这就是要求 I_0 中包括与电源电压 U_1 同相位的有功电流, 因此, I_0 会超前 ϕ 一个很小的所谓铁损耗角 δ , 如图1-15所示。由于变压器一般都采取了减小铁耗的措施, 铁损耗角也是很小的, 所以有功电流也是很小的。

综上所述, 空载电流产生的电阻电压降 $r_1 I_0$, 感应电动势 $\dot{E}_1$ 及漏磁电动势 $\dot{E}_{s1}$ 与电源电压 $\dot{U}_1$ 相平衡, 可以得到原绕组电压平衡方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + r_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + Z_{s1} \dot{I}_0 \quad (1-10)$$

式中 Z_{s1} 为电阻电压降 $r_1 \dot{I}_0$ 和漏磁电动势 $\dot{E}_{s1}$ 的等效阻抗。

既然上述几个量 $r_1 \dot{I}_0$, $\dot{E}_{s1}$ 都是很小的, 实际变压器空载运行时

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &\approx \dot{E}_1 \\ \dot{U}_2 &\approx \dot{E}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

在一般电力变压器中, 空载电流 I_0 只有负载时原绕组电流的2—10%。

二、变压器的负载运行

变压器原绕组接在电源上, 副绕组与负载连接时的运行情况, 称为变压器的负载运行。图1-16表示单相变压器负载运行原理图。

在副绕组接通负载以后, 在 E_2 的作用下, 副绕组流过负载电流 I_2 , 并产生相应的磁动势 $F_2=N_2 I_2$, 产生新的磁通来削弱原绕组电流 I_0 产生的磁通 ϕ_m , 因此将会影响 E_1 , 使其有所减小。当 U_1 不变时, E_1 的减小会导致原绕组电流的增加, 使磁通保持原来的大小, 原绕组电流由 I_0 增加到 I_1 , 这时原绕组的电压平衡方程式变为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_{s1} \dot{I}_1 \quad (1-12)$$