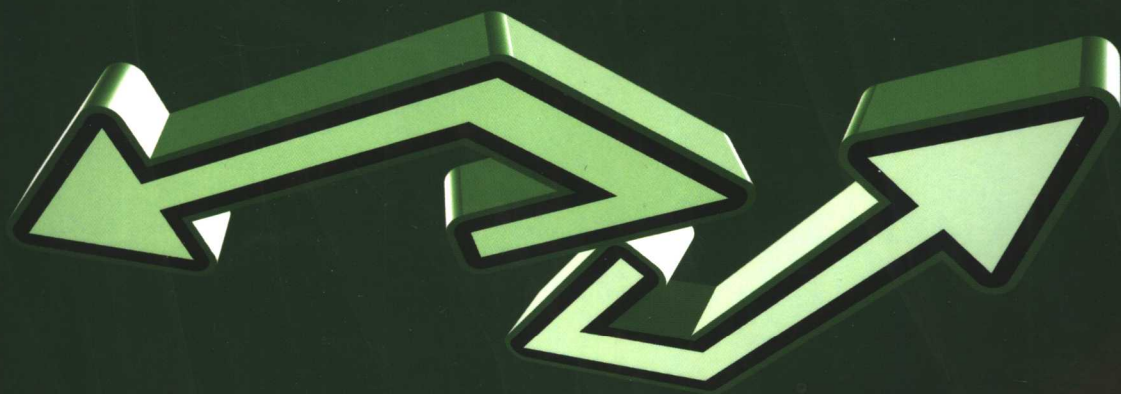


【先进制造业职业教育规划教材】

电器设备及控制技术

张仁麒 主编 毕燕萍 主审



化学工业出版社

职业教育教材出版中心

【先进制造业职业教育规划教材】

电器设备及控制技术

张仁麒 主编 毕燕萍 主审



化学工业出版社

职业教育教材出版中心

·北京·

本书编写内容参考了国家职业技能规范标准对中级维修电工技术工种的要求。内容主要包括：变压器、交直流电机、同步电动机、常用控制电机、常用低压电器、常用电机控制电路、典型生产机械的电气控制原理分析及技能训练等内容。

本书以项目的形式展开，以实验与实训场地为教学平台，改变了传统的教学模式。将理论与技能操作有机结合在一起，以现代技术工人为培养目标，突出技能培养，做到学以致用、学以能用、学以够用，突出教材的实用性。

本书共设置了8个课题28个项目。每个项目都具有明确的知识点和与之相对应的能力培养目标，紧密结合教学大纲和国家职业技能规范标准对中级维修电工技术工种的要求，力求突出针对性、实用性和先进性。强化了知识性和实践性的统一。

本书可作为中等职业教育电气类专业、机电类专业以及相关专业的教材，也可作为工程技术人员参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电器设备及控制技术/张仁麒主编. —北京：化学工业出版社，
2006.6

先进制造业职业教育规划教材

ISBN 7-5025-8839-6

I. 电… II. 张… III. 电气设备-职业教育-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 071015 号

先进制造业职业教育规划教材

电器设备及控制技术

张仁麒 主编 毕燕萍 主审

责任编辑：王丽娜 宋 薇

文字编辑：闫 敏

责任校对：洪雅姝

封面设计：潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行

职业教育教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询：(010) 64982530

(010) 64918013

购书传真：(010) 64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12¼ 字数 296 千字

2006年8月第1版 2006年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8839-6

定 价：20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

编写说明

目前,职业教育面临着大发展的良好机遇,职业教育如何更快、更好地适应社会进步和经济发展的要求,是摆在职业教育工作者面前的机遇和挑战,为了使电类专业的多年教学改革探索有一个总结、借鉴、交流、推广的平台,2005年12月化学工业出版社组织召开了职业教育教材改革研讨会,提出组织全国的职业教育工作者交流改革经验,并在总结成功经验的基础上编写一套既符合现代职教理念,又适合不同类型、不同教学模式的中等职业教育电类专业教材,为广大的教师和学生提供优质服务,并形成—个不断发展、不断完善—的机制。为此,组建了中职教学指导委员会电类专业教材编委会,由电类专业教材编委会组织调研并编写有特色、受欢迎的电类教材。经过近一年的努力,一套七本教材呈现在读者面前,这套教材和以往教材相比具有如下优点。

1.教材的总体结构和内容选择经过了大量的调查研究,并经企业专家讨论确定职业能力培养的重点和深度,兼顾了普遍性和特殊性,在深入探索认知规律、提高教学有效性和企业的适应性方面取得了探索性的成果。本套教材共七本,中等职前教学和职后培训都可使用,学校可整套选用也可单本选用。

2.《电工与电子技术》采用模块式结构,分基本模块和提高模块两部分。基本模块供非电类或以初级维修电工为主体能力目标的学员选用,基本模块加提高模块供中级维修电工为主体能力目标的学员选用,具有起点低、突出基本概念和基本技能、形象生动、理论实践一体化学习的特点。

3.其余六本书为任务引领型的项目化结构教材:《电子技术与应用实践》供电子类专业使用,也可供电气类专业选用;《电工技术与应用实践》供电气类专业使用,也可供电子类专业选用;《电器设备及控制技术》、《常用电器的安装与维修》、《可编程控制器技术应用》、《变流与调速技术应用》供电气类专业以中级维修电工为主体技能目标的学员使用,以岗位职业活动为基础,具有目标明确、任务引领、由简单到综合、先形象后抽象,符合学习心理的特点。

4.为了使项目化教材有更广的适用范围,在项目设计时也予以周到考虑,项目编写结构由能力目标、使用材料与工具、项目要求、工艺要求、学习形式、检测标准、原理说明、思考题几部分组成,以适应当今理论实践一体化学习的要求。完全按教材内容使用可作为项目化教学教材,如不用“原理说明”内容即可作为实验指导书,学习训练的测评标准和有梯度的项目、思考题设计,为提高学生的积极性和学习潜力、进行分类指导提供了条件。

各学校—在选用本套教材后可发挥各自的优势和特色,根据自己的办学思想、教学模式适当增加校本内容,使教学内容和形式不断丰富和完善。

中职教学指导委员会电类专业教材编委会
2006年4月24日

前 言

本书是2005年全国化工中职院校教材建设工作会议确定编写的先进制造业职业教育规划教材之一。为适应中等职业教育的要求,针对中职电类及相关专业的需要,对教材内容重新定位,拓宽知识面,增加实践性内容。编写内容以2001年教育部颁发的《中等教育电气运行与控制专业教学指导方案》为依据,参考了国家职业技能规范标准对中级维修电工技术工种的要求。内容主要包括:变压器、交直流电机、同步电动机、常用控制电机、常用低压电器、常用电动机控制电路及典型生产机械的电气控制原理分析及技能训练等内容。

本书在内容上减少了对电机及电力拖动理论上的分析和数学推导过程,重点突出电机及电器结构分析、应用及检修等方面的专业技术知识;在内容编排上与传统教材有较大改动,以项目的形式展开,以实验与实训场地为教学平台,改变了传统的教学模式。将理论与技能操作有机结合在一起,以现代技术工人为培养目标,突出技能培养,做到学以致用、学以能用、学以够用,突出教材的实用性。

本书共设置了8个课题28个项目。每个项目都具有明确的知识点和与之相对应的能力培养目标,紧密结合教学大纲和国家职业技能规范标准对中级维修电工技术工种的要求,力求突出针对性、实用性和先进性。在对学生进行强化基本技能的培养和训练的同时,注重对学生分析问题和解决问题能力的培养,强化了知识性和实践性的统一。

本书为了适应不同教学层次,带“*”号内容可作为选学内容。

本书在教学过程中,应以实验与实训场地为教学平台,根据学校教学设施情况确定学习形式,以保证学生专业技能的培养,突出项目教学法的特色。

本书在技能训练环节中,应严格执行安全操作规范,文明生产,确保人身安全和设备安全。

本书适用于中等职业教育电气类专业、机电类专业以及相关专业。同时也可供工程技术人员作为参考书使用。

本书由上海石化工业学校卫智敏编写项目1~项目5和项目20~项目22,天津市工贸学校张仁麒编写项目6~项目18和附录,安徽化工学校徐庆高、西北工业学校郭德龙编写项目19、项目20,广东省化学工业学校张洪编写项目23~项目28。全书由张仁麒统稿并担任主编。

本书由广东省工业贸易学校毕燕萍担任主审,主审以严谨的科学态度对全书进行了审阅,提出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。同时,还对本书所引用的参考文献的作者深表感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2006年5月

目 录

课题一 变压器知识及技能训练	1
项目 1 变压器的基本构造和基本工作原理	1
项目 2 三相变压器的绕组连接	4
项目 3 单相变压器的空载、短路及负载运行	11
项目 4 互感器	18
项目 5 电焊变压器	22
课题二 异步电动机知识及技能训练	27
项目 6 三相异步电动机的结构与工作原理	27
项目 7 三相异步电动机定子绕组	35
项目 8 三相异步电动机的启动与调速	41
项目 9 三相异步电动机的制动	50
项目 10 单相异步电动机的构造和工作原理	54
课题三 直流电机知识及技能训练	59
项目 11 直流电机的工作原理及结构	59
项目 12 直流发电机的运行特性	64
项目 13 直流电动机的机械特性	69
项目 14 直流电动机的控制	75
项目 15 直流电机的换向	85
课题四 同步电动机知识及技能训练	89
项目 16 同步电动机	89
课题五 常用控制电机知识及技能训练	97
项目 17 测速发电机	97
项目 18 伺服电动机	101
课题六 常用低压电器知识及技能训练	111
项目 19 常用低压电器	111
课题七 三相异步电动机的控制电路知识及技能训练	131
项目 20 简单电气控制线路图的绘制	131
项目 21 三相异步电动机单方向旋转控制电路	137
项目 22 三相异步电动机可逆旋转控制电路	142
项目 23 三相异步电动机降压启动控制线路	148
项目 24 三相异步电动机电气制动控制线路	154
项目 25 三相双速异步电动机控制电路	159
课题八 常用典型生产机械的电气控制原理分析及技能训练	163
项目 26 电动葫芦的电气控制	163
项目 27 X62W 型万能铣床的电气控制	167

* 项目 28 T68 型卧式镗床电气控制	175
附录 电气图常用图形及文字符号一览表	183
参考文献	185

课题一 变压器知识及技能训练

项目 1 变压器的基本构造和基本工作原理

一、能力目标

1. 熟悉变压器的用途和种类。
2. 熟悉变压器的结构组成。
3. 掌握常用变压器的铭牌数据的含义。
4. 掌握单相变压器的基本工作原理。

二、使用的设备

S9-80/10 电力变压器 1 台、各种小型变压器若干。

三、项目要求

1. 熟悉变压器的用途和种类

为了适应不同的工作条件和使用目的，变压器有很多类型。如果按照变压器的用途来分，应用最为广泛的如下。

(1) 电力变压器 在电力系统中，用来输送和分配电能，按其功能不同可分为升压变压器、降压变压器和配电变压器等。

(2) 仪用变压器 用于测量和继电保护用。

(3) 专用变压器 有整流变压器、小容量控制变压器（脉冲、变频）和电子设备中作为电源、隔离、阻抗匹配等小容量变压器。

(4) 特殊用途变压器 如电炉变压器、电焊变压器等。

(5) 实验变压器 供电气设备的耐压实验用。

按相数分为单相、三相、多相变压器；按冷却方式分为干式、油浸式和充气式变压器。

2. 熟悉变压器的结构组成

变压器的基本结构主要是铁芯和绕组两大部分。下面以油浸式电力变压器为例，扼要介绍变压器主要部件及其主要附件等（见图 1-1）。

(1) 绕组 绕组是变压器的电路部分，

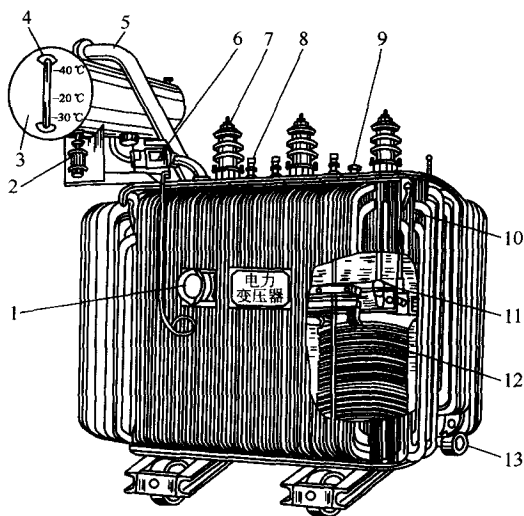


图 1-1 油浸式电力变压器

- 1—信号温度计；2—吸湿器；3—储油柜；4—油表；
5—安全气道；6—气体继电器；7—高压套管；
8—低压套管；9—分接开关；10—油箱；
11—铁芯；12—绕组；13—放油阀门

常用绝缘铜线或铝线绕制而成，也有用铝箔或铜箔绕制的。接电源的绕组称一次绕组；接负载的绕组称二次绕组。按绕组绕制的方式不同，可分为同心绕组和交叠绕组两种类型（见图 1-2、图 1-3）。

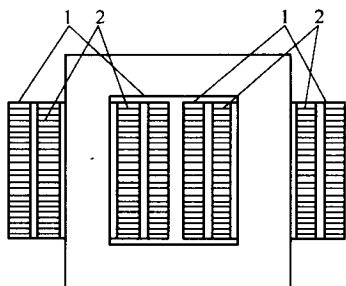


图 1-2 同心绕组

1—高压绕组；2—低压绕组

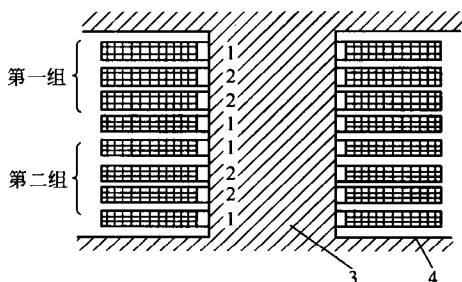


图 1-3 交叠绕组

1—低压绕组；2—高压绕组；3—铁芯；4—铁轭

(2) 铁芯 铁芯是主磁通的通道，也是器身的骨架。为了提高铁芯导磁能力，使变压器容量增大，体积减小，效率提高，采用性能好的导磁材料是很关键的。铁芯常用硅钢片叠装而成，热轧硅钢片厚度有 0.35mm 和 0.5mm 两种，片间涂覆绝缘漆。冷轧硅钢片比热轧的性能更好，磁导率高而损耗小，但工艺性较差，导磁有方向性且价格贵，多用于大型变压器中。电力变压器全部都已采用冷轧硅钢片，厚度有 0.35mm、0.30mm 和 0.27mm 多种，越薄质量越好。铁芯因线圈的位置不同，可分成芯式和壳式两类（见图 1-4），芯式指线圈包着铁芯，结构简单，装配容易，省导线，适用于大容量、高电压，所以电力变压器大多采用三相芯式铁芯（见图 1-5），壳式是铁芯包着线圈，铁芯易散热，用线量多，工艺复杂，除小型干式变压器外很少采用。

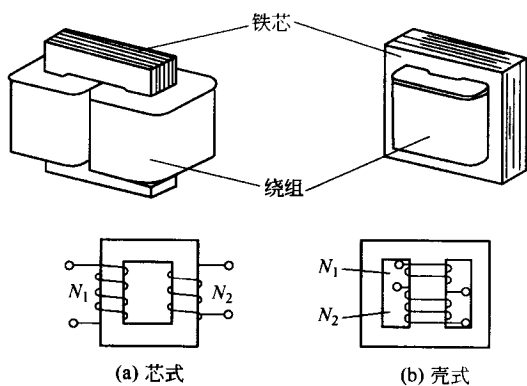


图 1-4 芯式与壳式铁芯

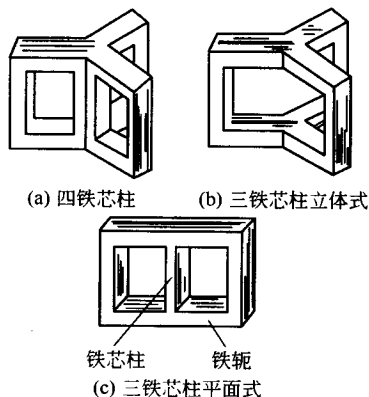


图 1-5 三相芯式铁芯形成过程

3. 掌握常用变压器的铭牌数据的含义

(1) 型号 型号表示变压器的结构特点、额定容量 (kV·A) 和高压侧的电压等级 (kV)。

【例】旧型号 SJL-560/10。

第一字母 S——三相，D——单相；

第二字母 J——油浸自冷，F——风冷，G——干式，S——水冷；

第三字母 L——铝线, P——强迫油循环;

数字 560——额定容量 ($\text{kV} \cdot \text{A}$), 10——高压侧的电压 (kV)。

新型号 S7-500/10——三相电力变压器第7设计序号, $S_N = 500 \text{kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N} = 10 \text{kV}$ (高压侧);

S9-80/10——三相电力变压器第9设计序号, $S_N = 80 \text{kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N} = 10 \text{kV}$ (高压侧);

SZ9——代表有载调压三相电力变压器;

S9-M——代表全密封三相电力变压器。

(2) 额定电压 U_N 一次侧额定电压是指它正常工作时的线电压, 它是由变压器的绝缘强度和允许发热条件所规定的。二次侧额定电压是指在一次侧额定电压时, 分接开关位于额定电压位置上, 二次侧空载时的线电压, 单位是 V 。

(3) 额定电流 I_N 额定电流是指在某环境温度, 某种冷却条件下允许规定的满载线电流值。当环境温度和冷却条件改变时, 额定电流也应变化。额定电流的大小主要由绕组绝缘和散热条件限制。例如, 干式变压器加风扇散热后, 电流可提高 50%。我国规定变压器的环境温度是 40°C 。

(4) 额定容量 S_N 额定容量的单位为 $\text{kV} \cdot \text{A}$, 也称视在功率, 表示在额定工作条件下变压器的最大输出功率, 而满负荷时实际的输出功率为 $P_2 = S_N \cos \varphi_2$ 。当然, S_N 也和 I_N 一样受到环境和冷却条件的影响。

单相时: $S_N = U_{2N} I_{2N}$

三相时: $S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$

(5) 温升 温升是变压器额定工作条件下, 内部绕组允许的最高温度与环境温度之差, 它取决于所用绝缘材料的等级。绕组的最高允许温度为额定环境温度加变压器额定温升, 如 $40 + 65 = 105 (^\circ\text{C})$, 为 A 级绝缘的耐热温度。这时变压器油面的最高温度为 $40 + 55 = 95 (^\circ\text{C})$, 一般上层油温应工作在 85°C 以下, 以控制油的老化不致太快。

4. 根据给出的变压器填写下表

分接位置		高压		标准代号	产品型号	产品代号	相数	相	额定容量	$\text{kV} \cdot \text{A}$	额定频率	Hz	冷却方式	器身质量	kg	使用条件	油质量	kg	连接组标号	总质量	kg	绝缘水平	LI	AC	出厂序号	制造年月	年	月
		电压 V	电流 A																									
I																												
II																												
III																												
		低压																										
		电压 V	电流 A																									
		阻抗电压																										

中华人民共和国

变压器厂

四、变压器的基本工作原理

图 1-6 为变压器的示意图，它表示变压器在不同电路图中的代表符号。从图 1-6(a) 可见，最简单的变压器是由一个作为磁路的闭合铁芯和绕在铁芯柱上的两个或两个以上的独立绕组所组成。变压器的工作是通过电磁感应原理来传递电能或传输讯号的。图 1-7 为变压器的工作原理图，由图 1-7 表明，接入电源的线圈称一次绕组，与其相关的电磁量均加下角标“1”表示；与负载相接的线圈称二次绕组，其电磁量加下角标“2”表示。

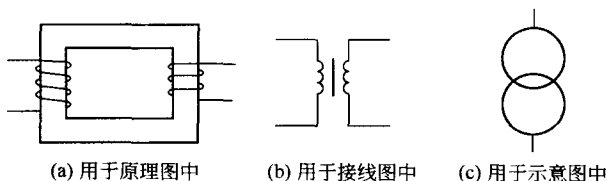


图 1-6 变压器的示意图

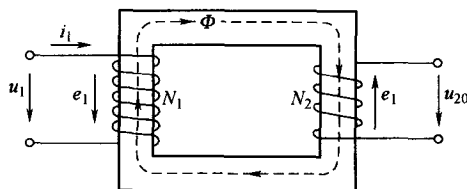


图 1-7 变压器的工作原理图

当一次侧绕组接到交流电源时，绕组中流有电流 i_1 ，并在铁芯中产生交变磁通 Φ 。若忽略绕组的漏磁影响，根据电磁感应定律，可列出下面的瞬时值方程式

$$u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

$$u_2 = -e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

$$\text{则} \quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知，绕组电势正比于匝数，改变绕组匝数，就起到变压的作用，这就是变压器的变压原理。当二次绕组接上负载（电灯、电动机等），便可向负载供电，传输电能，这就实现了能量从一次绕组到二次绕组的传递。

五、思考题与练习

1. 变压器是根据什么原理实现的？它有哪些主要用途？
2. 变压器额定容量为什么以千伏安为单位？额定值对于单相的与三相的有什么区别？
3. 变压器一次绕组若接上直流电源，二次绕组有无电压？接上后会产生什么后果？
4. 变压器的基本组成部分是什么？各部分的作用是什么？采用什么材料，为什么？
5. 有一台旧的单相变压器，铭牌上只能看到 $U_{N1}/U_{N2} = 10/0.23\text{kV}$ 及 $I_{N2} = 43.5\text{A}$ 请确定该台变压器的容量为多少 $\text{kV} \cdot \text{A}$ ，一次绕组的额定电流值为多少？
6. 单相变压器，额定容量为 $1\text{kV} \cdot \text{A}$ ，额定电压为 $380/220\text{V}$ ，现在低压侧接上 25W 、 220V 的电灯需多少盏才达到额定运行情况？并求出低压绕组中的额定电流？

项目 2 三相变压器的绕组连接

一、能力目标

1. 熟悉测定三相变压器绕组极性的方法。

2. 掌握变压器的连接方法和连接组检验方法。

二、使用的设备及仪器

三相调压器、三相变压器、交流电压表、开关、熔断器、连接导线等。

三、项目要求

1. 三相变压器相间极性和一、二次侧极性的测定

(1) 极性测定

① 用万用表电阻挡测量 12 个出线端通断情况及电阻的大小,找出三相变压器高压绕组的六个端头,暂标记为 U_1 、 V_1 、 W_1 ; U_2 、 V_2 、 W_2 。然后按图 2-1 接线,将 V_2 、 W_2 两端用导线连接。

② 在 U 相施加低电压,约为 U_N 的 50% 左右,用电压表测量电压 U_V 、 U_W 及 U_{VW} ,若 $U_{VW} = U_V - U_W$,则说明 V 、 W 两相首端为同名端,标号正确。若 $U_{VW} = U_V + U_W$,则说明 V 、 W 两相首端为异名端,标号是错误的,应更换标号及连接端头。

③ 用同样的方法,在 V 相施加低电压,决定 U 、 W 相间极性。相间极性确定后,把高压绕组首末端做正式标记。

(2) 测定三相变压器高、低压绕组极性

① 在定好一次侧极性后,暂定二次侧的六个标记 u_1 、 v_1 、 w_1 、 u_2 、 v_2 、 w_2 并按图 2-2 接线,此时一、二次侧都为 Y 连接,两中点间用导线连接。

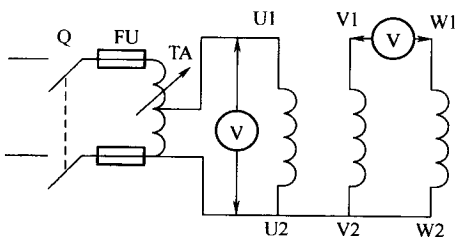


图 2-1 相间极性的测定

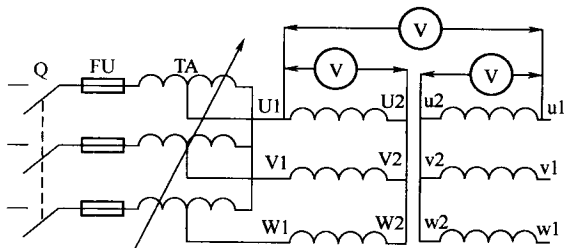


图 2-2 一、二次侧极性的测定

② 在高压边加三相电压,约为 $50\%U_N$,用电压表分别测量 U_U 、 U_V 、 U_W 、 U_u 、 U_v 、 U_w 、 U_{Uu} 、 U_{Vv} 、 U_{Ww} 。若 $U_{Uu} = U_U - U_u$ 时,则 U_U 和 U_u 同相位, U_1 、 u_1 端点极性相同,称为同名端,用“ $\cdot$ ”表示。若 $U_{Uu} = U_U + U_u$,则 U_U 和 U_u 反相位, U_1 、 u_1 端点极性相反,称为异名端。

③ 用同样的方法观察 U_{Vv} 与 U_V 、 U_v 的关系以确定 V 相的同极性端,观察 U_{Ww} 与 U_W 、 U_w 的关系以确定 W 相的同极性端。

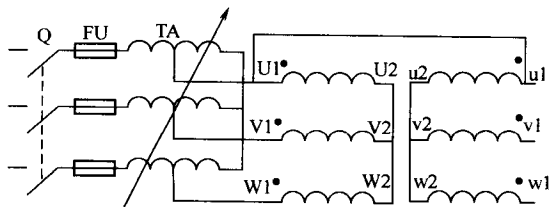


图 2-3 三相变压器 Y, y 连接组别的校验

2. 校验 Y, y 连接组 按图 2-3 所示进行接线。用导线将 U_1 、 u_1 端连在一起,将三相调压器调到其输出电压 100V 左右。用电压表分别测量电压 U_{Uv} 、 U_{uv} 、 U_{Vv} 、 U_{Ww} 及 U_{Vw} 数值,记录于表 2-1 中。根据 Y, y 连接组的电压向量图可知:

表 2-1 数据记录表

测量值/V					计算值/V		
U_{Uv}	U_{uv}	U_{Vv}	U_{Ww}	U_{Vw}	U_{Vv}	U_{Ww}	U_{Vw}

$$U_{Vw} = U_{uv} \sqrt{K^2 - K + 1}$$

$$U_{Vv} = U_{Ww} = (K - 1)U_{uv}$$

式中, $K = U_{UV} / U_{uv}$, 为变压器的线电压比。

若实测结果与计算结果相同, 则表明该变压器连接组别为 Y, y。

四、原理说明

1. 变压器绕组的极性

变压器绕组的极性是指变压器一次侧、二次侧绕组在同一磁通作用下所产生的感应电动势之间的相位关系, 通常用同名端来标记。在图 2-1 中, 铁芯上绕制的所有线圈都被铁芯中交变的主磁通所穿过, 在任何瞬间, 电动势都处于相同极性 (如正极性) 的线圈端就称同名端; 而另一端就成为另一组同名端, 它们也处于同极性 (如负极性)。不是同极性的两端就称为异名端。例如, 在交变磁通 $\dot{\Phi}$ 的作用下, 感应电动势 $\dot{E}_{1U}$ 与 $\dot{E}_{2U}$ 的正反向所指的 1U2、2U2 是一对同名端, 而 1U1 与 2U1 也是同名端。应该指出没有被同一个交变磁通所贯穿的线圈, 它们之间就不存在同名端的问题。

同名端的标记有好几种, 例如, 用 “*” 或 “•” 来表示, 在互感器绕组上常用 “+” 和 “-” 来表示 (并不表示真正的正负意义)。

对一个绕组而言, 哪个端点作为正极性都无所谓, 但一旦定下来, 其他有关的线圈的正极性也就根据同名端关系定下来了。有时也称为线圈的首与尾, 只要一个线圈的首尾确定了, 那些与它有磁路穿通的线圈的首尾也就确定了。

2. 极性的判别

(1) 直观法 因为绕组的极性是由它的绕制方向决定的, 所以可以用直观法判别它们的极性, 如图 2-4 和图 2-5 所示。如果从绕组的某端通入直流电, 产生的磁通方向一致的这些

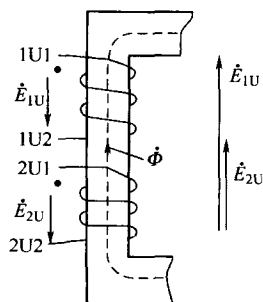


图 2-4 绕组的极性

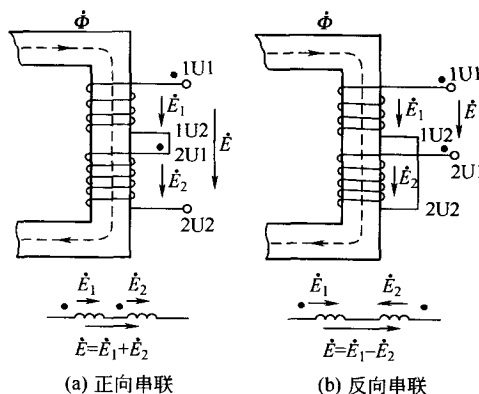


图 2-5 绕组的串联

端点就是同名端（用右手螺旋法则判别）。

(2) 测试法 如果无法观察到绕组的绕制方向（如绕组密封在内部），只能借助仪表来测试。

① 电压表法 如图 2-6 所示，测出电压 U_2 和 U_3 ，如果 $U_3 = U_1 + U_2$ ，则是正向串联，1U1 与 2U1 是异名端；如果 $U_3 = U_1 - U_2$ ，则是反向串联，1U1 与 2U1 是同名端。

② 检流计法 如图 2-7 所示，P 为检流计（检流计指针偏向电流流入的一端）。

当合上开关 S，如电流向下，说明这时 1U1 与 2U1 都处于高电位，所以它们是同名端。用这个方法时，为了省电和保护检流计，一般将高压侧接电池，低压侧接检流计。也可用直流毫安表代替检流计，直流毫安表量程由大至小试用，直到反应明显为止。

以上是对单相绕组的极性判别。对三相变压器来说，它的每一相的一次侧、二次侧绕组之间的同名端判别，同单相变压器一样。但三相绕组之间严格地讲不属于同名端判别范畴，因为它们分别绕在不同的铁芯柱上，有各自不同的磁通，因此不存在同名端关系，但根据三相磁场的对称要求，也有一个首尾判别问题。

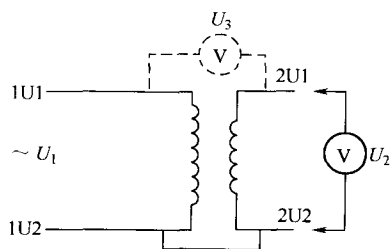


图 2-6 电压表法

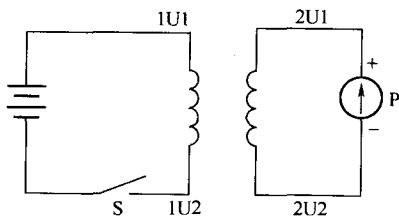


图 2-7 检流计法

3. 三相变压器及连接组别

三相交流电无论在经济、技术上都有极大的优越性，所以现代电力系统都采用三相交流电，为此三相交流变压器被广泛应用。它可以由三个单相变压器连接组成，称为三相组式变压器。但大多数均采用三相合为一体的三相芯式变压器，因为它体积小，经济性好，如图 2-8 所示。

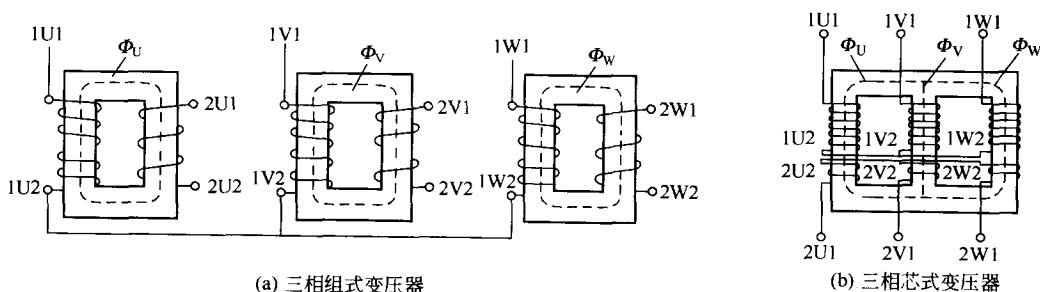


图 2-8 三相变压器

(1) 三相变压器的磁路结构

① 三相组式变压器的磁路 如图 2-8(a) 所示，它的三个单相变压器铁芯磁路是各自独立的，只要三相电压平衡，则磁路也是对称的，每只变压器可作为单相变压器来分析。

② 三相芯式变压器的磁路 三相芯式变压器有三个铁芯柱，供三相磁通 $\dot{\Phi}_U$ 、 $\dot{\Phi}_V$ 、 $\dot{\Phi}_W$

分别通过。在三相电压平衡时，磁路也是对称的，总磁通 $\dot{\Phi}_{\text{总}} = \dot{\Phi}_U + \dot{\Phi}_V + \dot{\Phi}_W = 0$ ，所以就不需要另外的铁芯来供 $\dot{\Phi}_{\text{总}}$ 通过。类似于三相对称电路中省去中线一样，这样就大量节省了铁芯的材料，如图 2-8(b) 所示。但由于中间铁芯磁路短一些，造成三相磁路不平衡，使三相空载电流也略有不平衡，但大变压器的空载电流 I_0 很小，影响不大。

变压器铁芯必须接地，以防感应电压或漏电。而且铁芯只能有一点接地，以免形成闭合回路，产生环流。

(2) 绕组的首尾判别

① 三相绕组的首尾判别 三相绕组之间有个首尾判别的问题，判别的准则是：磁路对称，三相总磁通为零。如果一次侧一相首尾接错，会破坏三相磁通的相位平衡，即 $\dot{\Phi}_{\text{总}} \neq 0$ ，结果磁通就不能从铁芯中返回，而要从空气和油箱中绕走，如图 2-9 所示。这就使磁阻大大增加，使空载电流也随之增加，尤其是反接的一相空载电流 I_0 更大，后果是严重的，所以绝不允许接错首尾。

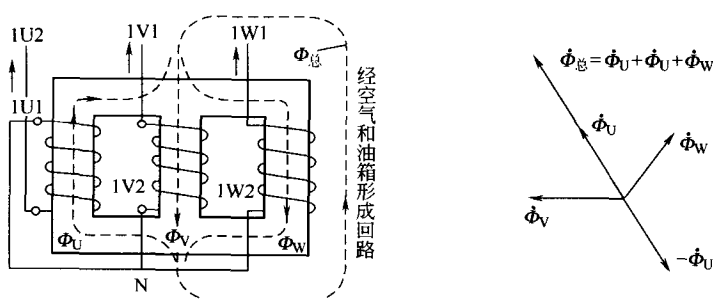


图 2-9 三相磁通不对称时的路径（一次侧一相接反）和磁通相量图

首尾的判别方法如图 2-10 所示。如图 2-10(a) 中接法，先假设 1U1 是首端，外加电压 U_1 后，测得电压 $U_2 = 0$ ，则说明 1U1 与 1V1 都是首端。如图 2-10(b) 中接法，测得电压 $U_2 = U_1$ ，则说明被连接的 1V2 是尾端。因为前者接法使磁通 Φ 自成一回路，W 相绕组中磁通 $\Phi = 0$ ，所以电压 $U_2 = 0$ 。而后者 U、V 两相的磁通都通入到 W 相中，则 W 相感应出电压等于 U、V 两相之和。

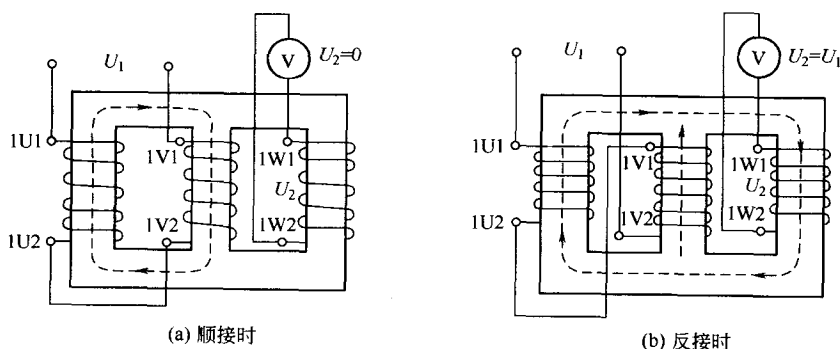


图 2-10 三相绕组的首尾判别

同理，把 W 相与 V 相交换，同样可测出 W 相的首、尾端。只有正确判别了三相绕组的首尾，才可进一步探讨三相绕组的两种连接方法——星形 (Y) 接法和三角形 (Δ)

接法。

② 星形接法 在电工基础中就曾讲过星形接法，它把三相绕组的尾连在一起构成中性点 N，三个首端接三相电源，如图 2-11 所示。一次侧是星形接法，接在三相电源上，因此电压总是对称平衡的，但由于中间相磁路略短，阻抗较大而该相空载电流 I_0 略小（有中线时更明显），这是正常的。但如果首尾接反，磁路将严重不对称，则会出现空载电流 I_0 上升，前面已分析过（见图 2-10），不在赘述。

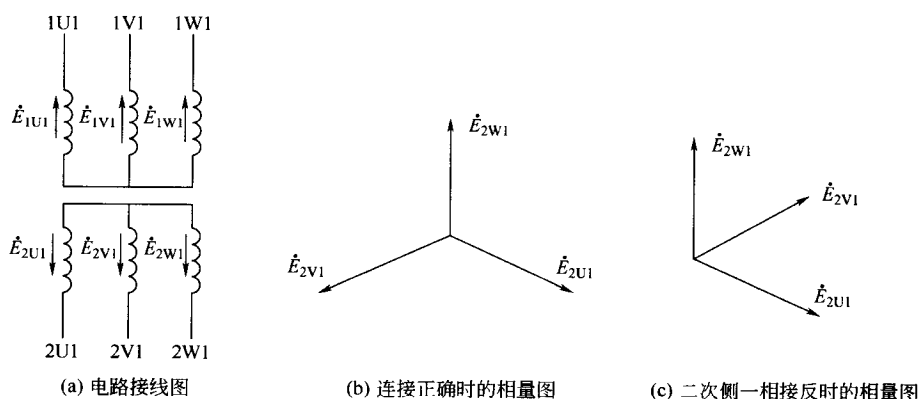


图 2-11 星形接法的电路图和相量图

对于二次侧的星形接法，情况就不同了。如果首尾接反的话，会出现三相电动势不对称，明显反映在三个线电压大小不一样，如图 2-11(c) 所示。其中两个线电压与相电压一样大（ $\dot{E}_{2W1,2V1}$ 、 $\dot{E}_{2V1,2U1}$ ），仅有一相线电压的大小为 $\sqrt{3}$ 倍的相电压（ $\dot{E}_{2W1,2U1}$ ），因此可以用测量二次侧线电压的大小来判断二次侧星形接法是否接对。

③ 三角形接法 它是把三相绕组的各相首尾相接构成一个闭合回路，把三个连接点接到电源上去，如图 2-12 所示。因为首尾连接的顺序不同，可分为正相序和反相序两种接法。与星形接法一样，如果一次侧有一相首尾接反了，磁通也不对称，就会同样出现空载电流 I_0 急剧增加，比星形接法还严重，这是不允许的。

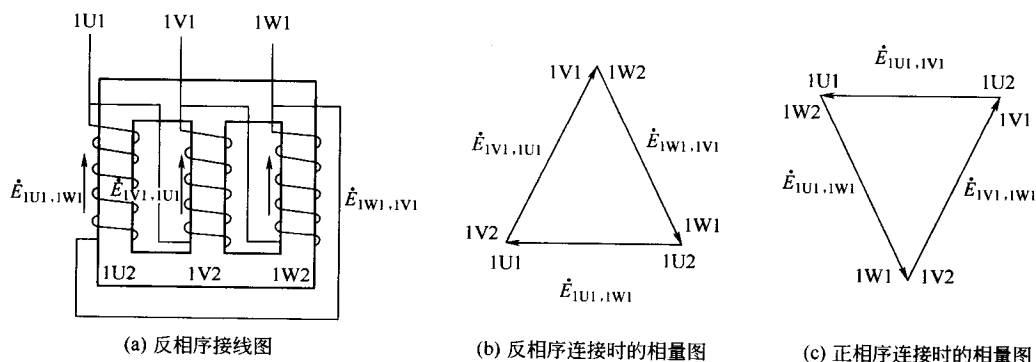


图 2-12 一次侧绕组三角形接法的电路图和相量图

二次侧绕组接法正确时，闭合回路的三相电动势之和为零，即 $\dot{E}_{\text{总}} = \dot{E}_U + \dot{E}_V + \dot{E}_W = 0$ ，所以也就不产生环流，如图 2-13(b) 所示。电动势相量图是闭合的，即 $\dot{E}_{\text{总}} = 0$ ，这时任意打

开回路中一个接点，测量该接点两端所得的电压，称为三角形的开口电压，其值应该为零。

如果其中一相接反，如图 2-14 所示，电动势的相量图是不闭合的，即 $\dot{E}_{\Sigma} \neq 0$ ，而是 $\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_{2U,2W} = 2\dot{E}_{\text{相}}$ ，它将在闭合回路中产生很大的环流，情况比二次侧两相短路还严重（因为电压增大一倍），所以是绝不允许的。因此，只要测量一下三角形接法的开口电压是否为零，就可以断定二次侧三角形接法是否接对了。

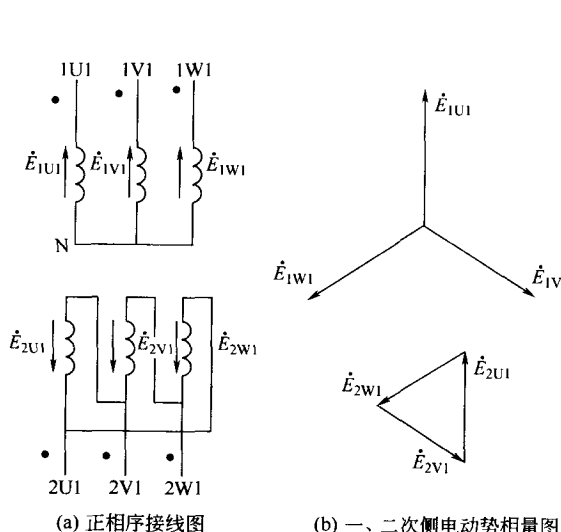


图 2-13 二次侧绕组的三角形接法

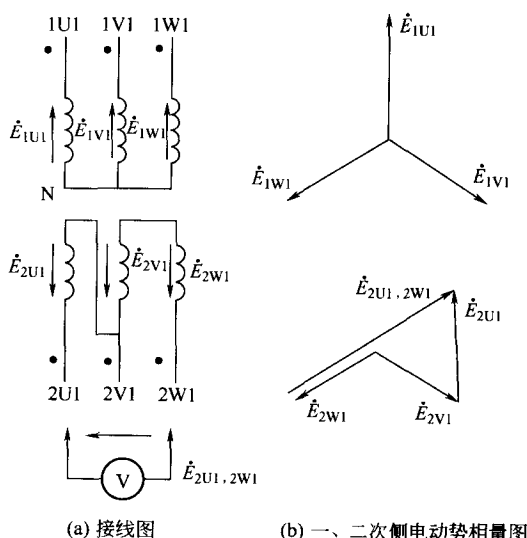


图 2-14 二次侧绕组一相接反的情况

(3) 三相变压器绕组的连接组别 变压器的一次侧、二次侧都可以有三角形或星形两种接法，一次侧绕组三角形接法用 D 表示、星形接法用 Y 表示、有中线时用 YN 表示；二次侧绕组分别用小写 d、y 和 yn 表示。根据不同的需要，一次侧、二次侧有各种不同的接法，形成了不同的连接组别，也反映出不同的一次侧、二次侧的线电压之间的相位关系。两台三相变压器并联，如果它们的一次侧、二次侧电压大小一样，但相位不同，则不能并联，要求它们的连接组别一样才能并联，从而说明连接组别判别的重要性。

国际上规定，标志三相变压器高、低压绕组线电动势的相位关系用时钟表示法。即规定高压侧线电动势 $\dot{E}_{1U1,1V1}$ 为长针，永远指向 12 点位置；低压侧线电动势 $\dot{E}_{2U1,2V1}$ 为短针，它指向几点钟，就是连接组别的标号。如 Y, d11 表示高压侧为星形接法，低压侧为三角形接法，一次侧线电压相位落后二次侧线电压 30° 。虽然连接组别有许多，但为了便于制造和使用，国家标准规定了五种常用的连接组别，如图 2-15 所示。

在一般情况下，Y, y 连接和 Y, d 连接已可满足多种需要，只有少数场合，如晶闸管整流电路中要求有 D, yn11 和 D, yn5 连接组别。

在常用的五种连接组别中，Y, yn0 连接组别是经常遇到的，可供三相动力和单相照明用电，容量不大，一般不超过 $1800\text{kV} \cdot \text{A}$ ，高压侧电压等级不超过 35kV 。此外，Y, yn0 连接组别不能用于三相组式变压器，只能用于三相芯式变压器，因为前者二次侧会感应出较高的三次谐波电压，对电网不利。Y, d11 连接组别用于高压 35kV 的电网中，YN, d11 用于高压 110kV 及其以上的输电系统中。