



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

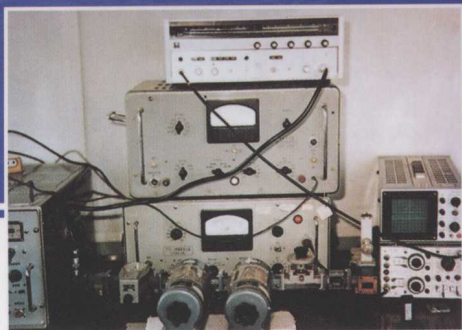
交通职业教育教学指导委员会推荐教材

# 船舶电气设备

主编 孙旭清

主审 林春熙

CHUANBO DIANQI SHEBEI



大连海事大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
交通职业教育教学指导委员会推荐教材

# 船舶电气设备

主编 孙旭清  
主审 林春熙

大连海事大学出版社

© 孙旭清 2007

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气设备 / 孙旭清主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2007. 8  
(交通职业教育教学指导委员会推荐教材. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材)  
ISBN 978-7-5632-2086-1

I. 船… II. 孙… III. 船用电气设备—高等学校—教材 IV. U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 133767 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮政编码:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail:cbs@dmupress.com

大连理工印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:19.5

字数:485千 印数:1~3000册

责任编辑:史洪源 版式设计:海韵

封面设计:王艳 责任校对:枫叶

ISBN 978-7-5632-2086-1 定价:32.00元

## 内容简介

本书共分三篇二十一章,上篇为船舶电机及电力拖动系统,主要包括:变压器、异步电动机、同步电机、直流电机、控制电机、常用电器元件、三相交流电动机控制电路、泵的自动控制、船舶锚机的自动控制、船用起货机和船舶舵机;中篇为船舶电站,主要包括:船舶电力系统与配电装置、同步发电机电压自动调节装置、船舶同步发电机的并联运行、船舶应急电源和船舶电站自动化;下篇为仪表及电气管理,主要包括:电工仪表、船舶照明系统、船舶集中监测系统、船舶安全用电和船舶电气管理。各章内容尽量反映当前船舶电力拖动及自动控制系统的最新内容及实际情况。

本书为高职高专航海类轮机专业教材,也可供船舶轮机员及相关专业人员阅读和参考。

# 前 言

高职高专航海类专业“十一五”规划教材(下称“系列教材”)是交通部科教司为了使高职航海类专业人才培养进一步符合《STCW78/95 公约》和我国海事局颁布的《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》要求而组织编写的。首批系列教材共 22 种(航海技术专业 11 种,轮机工程技术专业 11 种)。编审人员是由交通职业教育教学指导委员会航海类专业指导委员会在全国航海高职院校范围内组织遴选并聘请的专业教师。参加编审的人员普遍具有较丰富的航海高职教学经验与生产实践经历,其中主编和主审均具有副教授以上专业技术职务。

本系列教材依据 2006 年 3 月新版《高职高专院校海洋船舶驾驶(航海技术)专业教学指导方案》和《高职高专院校轮机工程技术教学指导方案》中相应课程大纲编写,适用于三年制高职高专航海技术和轮机工程技术专业学生使用,也可作为上述专业中等职业教育和船员培训教材或教学参考书。

本系列教材具有如下特点:

1. 较好地体现了《STCW78/95 公约》和《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》,强调知识更新、突出技能,有利于培养适应现代化船舶的航海技术应用型人才。

2. 紧密结合航海类专业人才培养目标和岗位任职条件,及时充实了新颁布的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》(海船员[2005]412 号)内容,有利于增强高职航海类专业毕业生岗位就业能力。

3. 按照《高职高专院校海洋船舶驾驶(航海技术)专业教学指导方案》、《高职高专院校轮机工程技术教学指导方案》设计,使教材理论教学体系与实践教学体系在知识内容与职业技能之间做到相互交融。

4. 把培养合格海员所需的品格素质、知识素质、能力素质和身心素质贯彻教材当中,强化了高职航海类专业学生素质教育力度。

在本系列教材编写、统稿和审校过程中业经多方把关,力求做得更好。时逢教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材遴选,本系列教材中《船舶电气设备》等 12 种教材入选其中。衷心感谢为本系列教材付梓而辛劳的海事局、行业协会、港航企业、航海院校各位专家的帮助和支持。

热切期待教材使用者对本系列教材存在的问题给予指正,欢迎大家积极建言献策,以利交通职业教育教学指导委员会航海类专业指导委员会适时组织人员对本系列教材内容进行修改、调整和充实。

交通职业教育教学指导委员会航海类专业指导委员会

2006 年 12 月

## 编者的话

《船舶电气设备》一书是根据高职高专学校轮机工程专业的需要,应交通职业教育教学指导委员会航海类专业指导委员会的邀请而编写的。本书既满足 STCW78/95 公约中对船舶轮机员在电气方面的知识、能力和操作的要求,同时又兼顾《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》。本书包括船舶电机、电力拖动、电站、仪表、集中监测、安全用电与管理等船舶电气及自动控制方面的主要内容。在编写过程中力求理论联系实际,在理论上以够用为度;在原理及线路分析上,重在培养学生的独立分析问题和解决问题的能力;在实践操作及故障排除方面,尽量结合典型船型;同时考虑到船上工作的特点,力求简明扼要,便于自学,每章后附有思考题,供复习学过的内容。

本书由孙旭清高级工程师主编,第二章、第五章、第十八章、第十九章、第二十章由张桂臣副教授编写,第十五章、第十六章由于风卫副教授编写,第十二章、第十三章、第十四章由高兴斌讲师编写,其他章节由孙旭清编写。林春熙副教授在百忙当中抽出时间对全书进行了认真的审阅,在此表示诚挚的谢意。

本书内容涉及面广,由于编者的水平及实践经历的局限性,书中难免有错误之处,欢迎批评指正。

编者

2007年6月

# 目 录

## 上篇 船舶电机与电力拖动系统

第一章 变压器 .....	(1)
第一节 变压器的结构和额定参数 .....	(1)
第二节 变压器的基本原理 .....	(3)
第三节 变压器绕组的极性及三相变压器 .....	(5)
第四节 特殊变压器 .....	(7)
第二章 异步电动机 .....	(10)
第一节 三相异步电动机的结构及转动原理 .....	(10)
第二节 定子和转子电路分析及异步电动机的运行特性 .....	(14)
第三节 三相异步电动机的启动、制动和调速 .....	(18)
第四节 单相交流异步电动机 .....	(20)
第三章 同步电机 .....	(23)
第一节 同步电机的结构 .....	(23)
第二节 同步发电机的基本特性 .....	(25)
第三节 同步电动机 .....	(28)
第四章 直流电机 .....	(30)
第一节 直流电机的工作原理 .....	(30)
第二节 直流电机的构造 .....	(33)
第三节 直流电机的励磁方式和运行特性 .....	(34)
第五章 控制电机 .....	(42)
第一节 伺服电动机 .....	(42)
第二节 自整角机 .....	(45)
第三节 测速发电机 .....	(49)
第六章 常用控制电器 .....	(53)
第一节 按钮及组合开关 .....	(53)
第二节 熔断器及装置式自动开关 .....	(54)
第三节 交流接触器 .....	(56)
第四节 继电器 .....	(58)
第五节 常用电器的维护保养 .....	(63)
第七章 三相交流电动机控制电路 .....	(65)
第一节 电气线路图及绘制方法 .....	(65)
第二节 交流电动机控制线路 .....	(67)

第三节	交流电动机的星形—三角形降压启动	(73)
第四节	交流电动机的制动控制线路	(74)
第五节	电气设备的保护	(77)
第六节	控制线路测绘和故障查找	(78)
<b>第八章</b>	<b>泵的自动控制</b>	<b>(82)</b>
第一节	泵的常规控制	(82)
第二节	泵的微机控制	(86)
<b>第九章</b>	<b>船舶锚机的自动控制</b>	<b>(90)</b>
第一节	锚机的电力拖动与控制	(90)
第二节	电动起锚机控制线路	(92)
<b>第十章</b>	<b>船舶起货机</b>	<b>(96)</b>
第一节	起货机的电力拖动与控制要求	(96)
第二节	交流恒功率变极调速起货机	(97)
第三节	交流恒转矩变极调速起货机	(104)
第四节	电动—液压起货机	(109)
第五节	船舶电动—液压克令吊	(112)
第六节	交流电动起货机电气系统的维护与检修	(120)
<b>第十一章</b>	<b>船舶舵机</b>	<b>(123)</b>
第一节	舵机装置及技术要求	(123)
第二节	舵机的操舵方式及工作原理	(125)
第三节	自动舵的调节规律及要求	(129)
第四节	安休斯(ANSCHUTZ)自动操舵仪简介	(131)

## 中篇 船舶电站

<b>第十二章</b>	<b>船舶电力系统与配电装置</b>	<b>(140)</b>
第一节	船舶电力系统概述	(140)
第二节	自动空气断路器	(150)
第三节	船舶配电装置	(154)
第四节	发电机的保护	(161)
<b>第十三章</b>	<b>同步发电机电压自动调压装置</b>	<b>(165)</b>
第一节	船用同步发电机电压自动调节	(165)
第二节	不可控相复励调压装置	(168)
第三节	晶闸管(可控硅)调压装置	(171)
第四节	可控相复励调压装置	(173)
第五节	无刷同步发电机及其励磁系统	(175)
第六节	主机轴带发电机	(177)
第七节	船舶中压电力系统简介	(180)



<b>第十四章</b>	<b>船舶同步发电机组的并联运行</b>	(183)
第一节	同步发电机组的并车与解列	(183)
第二节	并联运行发电机组间无功负荷的自动分配	(190)
第三节	并联运行发电机组间有功负荷分配及频率的调整	(195)
<b>第十五章</b>	<b>船用应急电源</b>	(203)
第一节	概述	(203)
第二节	应急发电机	(204)
第三节	船用蓄电池	(208)
<b>第十六章</b>	<b>船舶电站自动化</b>	(213)
第一节	船舶自动电力管理系统的结构与组成	(213)
第二节	船舶自动电力管理系统的基本功能	(217)
第三节	同步发电机的自动准同步并车	(222)

## 下篇 仪表及电气管理

<b>第十七章</b>	<b>电工仪表</b>	(231)
第一节	电工仪表及测量	(231)
第二节	万用表	(234)
第三节	兆欧表	(237)
第四节	钳形电流表	(239)
<b>第十八章</b>	<b>船舶照明系统</b>	(241)
第一节	照明系统的分类和特点	(241)
第二节	船舶常用灯具和电光源	(244)
第三节	照明控制线路	(248)
<b>第十九章</b>	<b>船舶集中监测系统</b>	(251)
第一节	船舶集中监测基础知识	(251)
第二节	船舶常用传感器	(254)
第三节	船舶火警报警系统及火警探测传感器	(262)
<b>第二十章</b>	<b>船舶安全用电</b>	(266)
第一节	触电及预防	(266)
第二节	电气设备防火	(268)
第三节	电气设备的接地保护	(269)
<b>第二十一章</b>	<b>船舶电气管理</b>	(271)
第一节	船舶电气管理人员的职责	(271)
第二节	船舶电气设备的安装	(280)
第三节	船舶电器的维护与检修	(284)
第四节	船舶辅机电气系统的管理与维修	(289)
第五节	船舶电气设备修理	(294)

附录 1 中国远洋运输总公司《远洋船员职务规则》 ..... (297)  
附录 2 电工系统常用电器符号及标注 ..... (299)  
参考文献 ..... (302)

# 上篇 船舶电机与电力拖动系统

## 第一章 变压器

变压器(transformer)是将某一数值的交流电压转变成同一频率的另一种或几种不同数值交流电压的常用电气设备。广泛应用于城乡电力系统以及各种电子设备中,通常可分为电力变压器和特殊变压器两大类。

电力变压器(electrical transformer)是电力系统中的关键设备之一,由于发电厂大都集中在煤炭和水力资源丰富的地区,要将电能输送到各地的用户,必须通过电线进行远距离输电,这样,在输电过程中电能损失不可避免。在功率相同的情况下,输电的电压越高,则电流越小,在线路电阻一定时损耗就减少,因此高压输电比低压输电经济。一般情况下,输电距离越远,输送功率越大,要求输电电压越高。

特殊变压器(special transformer)是指除电力系统应用的变压器以外的各种变压器的统称。其品种繁多,如自耦变压器、电压互感器、电流互感器;工程技术中专用的焊接、整流、电炉变压器等;电子线路中变换阻抗用的输入、输出变压器等。

目前船舶大多数为500 V以下的低压电力系统,许多电力负载又是由发电机直接供电,所以船上一般只有照明变压器和一些小容量电源变压器以及控制用变压器。较大容量的变压器应用得较少。这些船用变压器容量虽小但却很重要,它们为船舶照明系统、航行信号系统、通信导航系统、控制系统和安全报警系统供电,是保证船舶正常工作、安全航行和船员旅客生活的重要设备。

变压器的结构和性能虽然各有特点,但是其基本工作原理都是相同的,即都是以线圈间的电磁感应原理为基础的。

### 第一节 变压器的结构和额定参数

#### 一、变压器的基本结构(structure)

变压器因使用场合、工作要求不同,其结构形式是多种多样的,但是,最基本的结构都是由铁芯与绕在铁芯上相互绝缘的线圈(绕组)构成的。图1-1-1是它的结构示意图及符号。

铁芯(iron core)是变压器的磁路部分,一般采用表面涂有漆膜、厚度为0.35 mm或0.5 mm的硅钢片交错叠成,使磁路具有较高的磁导率和较小的磁滞涡流损耗。

绕组(winding)是变压器的电路部分,通常用涂有绝缘漆的铜线或铝线绕制而成。与电源连接的绕组称为原绕组,简称原边或初级(primary winding);与负载连接的绕组称为副绕组(secondary winding),简称副边或次级。绕组的形状有筒式和盘式两种。筒式绕组又称同心式绕组,原、副绕组相套在一起,低压绕组套在靠铁芯的里层,高压绕组套在低压绕组的外层。盘形绕组又称交叠式绕组,分层交叠在一起,低压绕组通常是套在铁芯柱靠上、下铁轭的外端,高

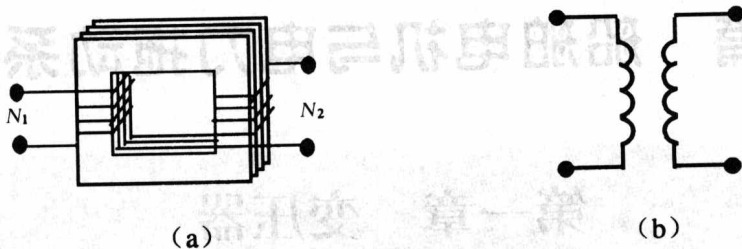


图 1-1-1 变压器及其符号

(a) 变压器结构示意图 (b) 变压器的符号

压绕组则夹在两低压绕组的中间。根据实际需要,一个变压器可以只有一个绕组,如自耦变压器;也可以有多个副绕组以输出不同的电压。

按铁芯和绕组的组合结构,变压器有芯式和壳式两种。芯式变压器的绕组环绕铁芯柱,如图 1-1-2(a)所示,其铁芯结构比较简单,绕组的安装和绝缘也比较容易,是应用较多的结构形式;壳式变压器的绕组除中间穿过铁芯外,还部分地被铁芯所包围,如图 1-1-2(b)所示。

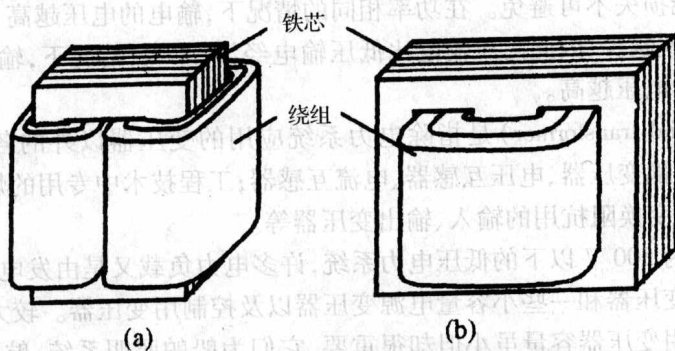


图 1-1-2 心式和壳式结构的变压器

(a) 芯式变压器 (b) 壳式变压器

变压器工作时铁芯和绕组都要发热,为了防止变压器过热而损坏绝缘材料,必须采用适当的冷却方式。对于小容量变压器,通常采用空气制冷,依靠空气的自然对流把铁芯和绕组的热量散发到周围的空气中(船用变压器全是采用空气制冷)、对容量较大的变压器,通常采用油浸自冷,油浸风冷或强迫油循环冷却等方式。

## 二、变压器的额定值 (rated value)

额定值是对变压器正常运行时所作的规定。在额定状态下运行可以保证变压器长期可靠地工作,并且有良好的性能。因此,为了正确地使用变压器,必须了解和掌握其额定值。额定值通常标在变压器的铭牌上,故也称为铭牌数据。变压器的额定值主要有:

### 1. 额定容量 (rated capacity) $S_N$

是指变压器的额定视在功率,单位是 VA 或 kVA。对于双绕组变压器原、副边容量是相同的。

### 2. 额定电压 (rated voltage) $U_{1N}/U_{2N}$

是指原、副绕组的额定线电压,例如 400 V/230 V。副边额定电压是指当原边接额定电压时副边的开路电压。因此,变压器可以升压也可以降压。

### 3. 额定电流 (rated current) $I_{1N}/I_{2N}$

是指原、副边的额定线电流,单位是 A。

变压器的额定容量、额定电压和额定电流之间的关系是：

$$\text{单相双绕组变压器 } S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N}$$

$$\text{三相双绕组变压器 } S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N}$$

### 三、变压器的日常管理 (daily management)

为了保持变压器的良好运行状态,应做好日常运行管理工作。

1. 经常检查保持变压器的外部干燥和清洁,避免外部漏电。
2. 经常检查并记录变压器的温度,并监视三相电压和电流、过载等情况。
3. 备用变压器投入运行前先检查绕组绝缘,检查有无短路或断路。

## 第二节 变压器的基本原理

### 一、变压器的空载运行和电压变换 (voltage transformer)

变压器的原边接上交流电压  $u_1$ , 副边开路, 这种运行状态称为空载运行, 如图 1-2-1 所示。这时副边电流  $i_2 = 0$ , 电压为开路电压  $u_{20}$ , 原绕组中通过的电流为空载电流  $i_{10}$ , 设原绕组的匝数为  $N_1$ , 副绕组的匝数为  $N_2$ 。

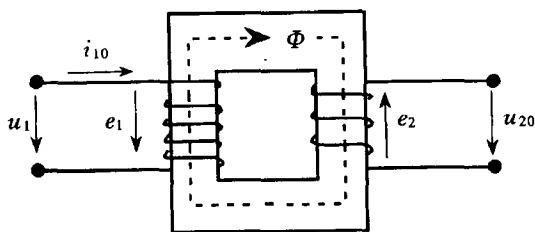


图 1-2-1 变压器的空载运行

因为副边 (secondary winding) 开路, 这时变压器的原边电路相当于一个交流铁芯

线圈电路, 空载电流  $i_{10}$  就是励磁电流。因为  $i_{10}$  是交变电流, 所以在磁动势  $i_{10} N_1$  作用下, 铁芯中的主磁通  $\Phi$  也是交变的, 并在原、副绕组中分别感应出电动势  $e_1$ 、 $e_2$ 。当  $e_1$ 、 $e_2$  与  $\Phi$  的参考方向之间符合右手螺旋定则时, 由电磁感应定律可得

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2-1)$$

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

当外加电压  $u_1$  按正弦规律变化时, 根据电磁铁 (electromagnet) 知识可知

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (1-2-3)$$

$$U_{20} \approx E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (1-2-4)$$

因此原边电压  $u_1$  与副边电压  $u_{20}$  之间的关系为

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-2-5)$$

上式表明, 变压器空载运行时, 原、副绕组的电压比等于它们的匝数比。

这个比值称为变压器的变比, 是变压器的一个重要参数。

当  $K > 1$  时为降压变压器; 当  $K < 1$  时则为升压变压器。

### 二、变压器的负载运行和电流变换 (current transform)

变压器的原边接交流电压  $u_1$ , 副边接负载  $Z_L$ , 这种运行状态叫做负载运行。

变压器未接负载之前, 原边电流为  $i_{10}$ ; 它在原边建立磁动势  $i_{10} N_1$ , 在磁路中产生主磁通

$\Phi_m$ 。接入负载后,在感应电动势  $e_2$  的作用下,副边绕组有电流  $i_2$ 。副边电流  $i_2$  的出现反过来要影响变压器铁芯内的磁通,从而影响原、副绕组的感应电动势。在原边电压  $u_1$  保持不变的情况下,  $e_1$  的变化会使原边绕组电流发生变化,这时原边电流将从空载电流  $i_{10}$  变为  $i_1$ ,如图1-2-2所示。

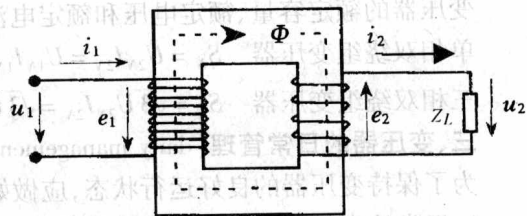


图 1-2-2 变压器的负载运行

在变压器外加电压  $u_1$  和电源频率  $f$  不变的条件下,主磁通应基本保持不变,即  $\Phi = \frac{u_1}{4.44fN_1}$  为

常数。但当变压器有载时,由于副边磁动势  $i_2N_2$  的影响,原绕组中的电流必须有  $i_{10}$  增加到  $i_1$  来抵消副绕组的磁动势对主磁通的影响,从而维持铁芯中的主磁通的大小不变,即与空载时在数量上接近相等。因此,变压器有载时产生主磁通的磁动势  $(i_1N_1 + i_2N_2)$  和空载时产生主磁通的磁动势应该相等,即

$$i_1N_1 + i_2N_2 = i_{10}N_1 \quad (1-2-6)$$

因为空载电流很小,在变压器接近满载的情况下,所以  $i_{10}N_1$  相对于  $i_1N_1$  或  $i_2N_2$  而言基本上可以忽略不计,于是得到原副边磁动势的关系式为  $i_1N_1 \approx -i_2N_2$ ,其数值关系为  $I_1N_1 \approx I_2N_2$ ,即

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} = K_i \quad (1-2-7)$$

式中:  $K_i$  为变压器的变流比,它是变压比  $K$  的倒数。

由此可见,变压器原副边的电流与它们的匝数成反比,而变压器的原边电流是随副边电流变化而变化的。

### 三、变压器的阻抗 (impedance) 变换

变压器除了能够改变交流电压和电流的大小以外,还能变换阻抗,这个功能广泛应用于电子技术领域。

变压器对其副边的用电设备而言它就是电源,它的实际负载阻抗  $|Z_L|$  等于副边电压除以副边电流,但对变压器的电源而言,整个变压器又是供电电源的一个等效负载阻抗,该阻抗等于原边电压除以原边电流,如图 1-2-3 所示。很显然,当原副绕组的匝数不同时,  $|Z_L| \neq |Z'|$ 。由此可见,对同一用电负载,从变压器原边看得等效负载阻抗不等于负载的实际阻抗,这就是变压器的阻抗变换作用。

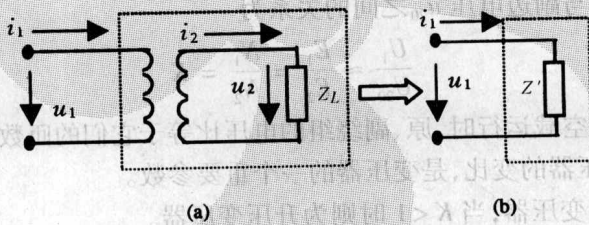


图 1-2-3 变压器的阻抗变换

(a) 副边带负载的变压器电路 (b) 等效电路

根据上述忽略绕组内阻、忽略漏磁、忽略损耗的理想变压器的原、副边电压和电流的变比



关系,可得到原边的等值阻抗与副边实际负载阻抗的数值变换关系,即

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{(N_1/N_2)U_2}{(N_2/N_1)I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 |Z_L| \quad (1-2-8)$$

上式表明,原边的等值阻抗等于副边实际阻抗乘以匝数比的平方,采用不同的匝数比,可将实际负载阻抗 $|Z_L|$ 变换为所需要的原边等值阻抗 $|Z'|$ ,以实现阻抗匹配。

#### 四、变压器的外特性(characteristic)

上面分析的变压器负载运行是在理想状态下进行的,即忽略了绕组的电阻和漏磁通,实际上,当副边电流为 $i_2$ ,考虑副边电阻和副边漏磁通时,副边电压方程式为

$$U_2 = E_2 - Z_2 I_2 \quad (1-2-9)$$

式中: $Z_2$ 为副边电阻和副边漏磁通的等效阻抗,是感性的。

上式表明,当负载变化引起副边电流 $i_2$ 发生变化时,副边绕组的阻抗电压降将发生变化,副边电压 $u_2$ 也随之变化。

当 $U_1$ 为额定值时, $U_2 = f(I_2)$ 的关系曲线称为变压器的外特性。分析表明,当负载为电阻性或电感性时,副边电压将随 $I_2$ 的增加而降低,在特殊情况下,负载为电容性质且电容较大,输出电压 $U_2$ 可能高于 $U_{1N}$ ,如图1-2-4所示。图中 $\varphi_2$ 是 $U_2$ 和 $I_2$ 的相位差,对感性负载来说,功率因数越低, $U_2$ 下降得越快。

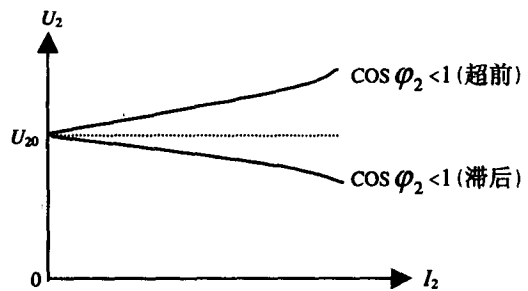


图1-2-4 变压器的外特性曲线

变压器从空载到满载时,副边电压 $U_2$ 的变化量与空载时副边电压 $U_{20}$ 的比值称为变压器的电压变化率,通常用百分数

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (1-2-10)$$

表示。对负载来说总希望越稳定越好,即电压变化率越小越好,一般电力变压器的电压变化率为3%~5%,变压器容量越大,电压变化率越小。

### 第三节 变压器绕组的极性及三相变压器

#### 一、变压器绕组的极性(polarity)

为了正确地使用变压器,有时还需了解原边电压和副边电压之间的相位关系。由于原、副边电压都是交变的,当某一瞬间原绕组某一端点的电压相对于另一端点为正时,副边绕组必然有一个对应的端点,其瞬间电位相对于副绕组的另一端点也为正。通常把原、副边绕组电位瞬时极性相对应的端点称为同极性端,有时也叫同名端。

图1-3-1(a)所示变压器有两个副绕组,因为两个绕组绕向相同,当磁通变化时绕组中产生感应电动势,端点1和3的电位瞬时极性必然相同,所以端点1和3就是同极性端,当然端点2和4也是同极性端。在使用变压器时,为了能正确地连接线路,通常在同极性端旁边标注“·”作为记号,图1-3-1(d)是表明了极性的变压器绕组符号。图1-3-1(b)和(c)为变压器绕组的串联和并连接线图。

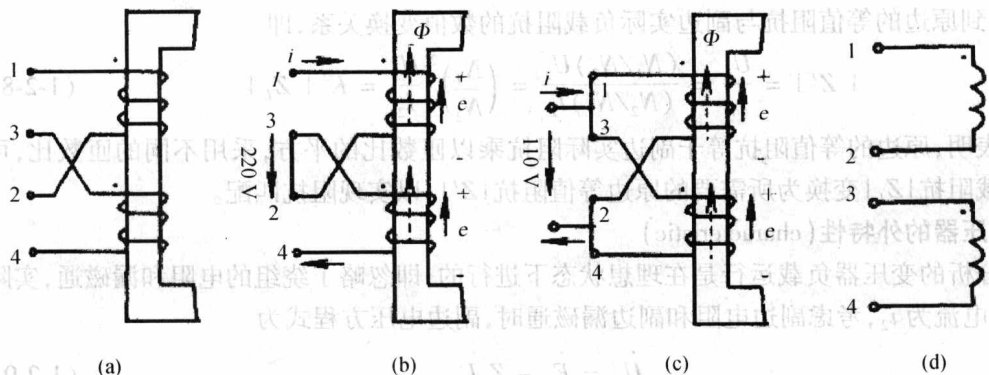


图 1-3-1 变压器绕组的极性及串并联

## 二、变压器绕组极性的测定 (determination)

对于一台实际的变压器,由于从外部无法知道绕组的绕向,当原副绕组的首尾端或同极性端标记无法辨认时,可用试验法进行判别,如图 1-3-2 所示。变压器的一个绕组(图中为 AX)通过开关和电池相连,另一绕组与直流毫安表相连,a 端接毫安表的正端,x 端接毫安表的负端。当开关 K 接通瞬间,如果毫安表的指针正向偏转,则 A、a 是同极性端;如果指针反向偏转,则 A、x 是同极性端。

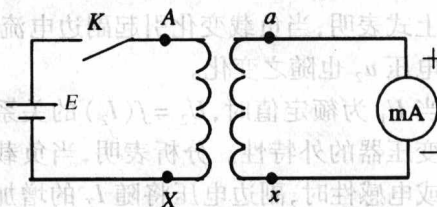


图 1-3-2 变压器绕组极性的测定

## 三、三相变压器 (three phase transformer)

三相变压器的结构有两种,即由三台单相变压器组成或三铁芯柱式三相变压器。

### 1. 三台单相变压器 (single phase transformer) 组成的三相变压器

如图 1-3-3 所示为三台单相变压器组成的三相变压器,其主要特点是三台单相变压器相互独立,各相磁路彼此之间无关,故可分可合。但有成本高、体积大、效率低的缺点,主要用作大容量变压器。

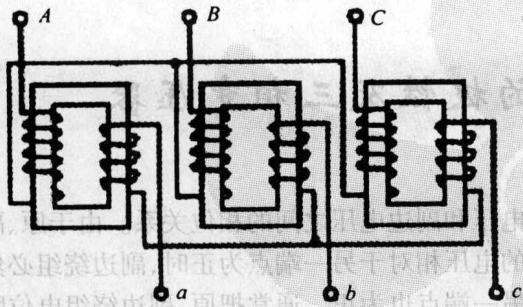


图 1-3-3 三单相变压器组

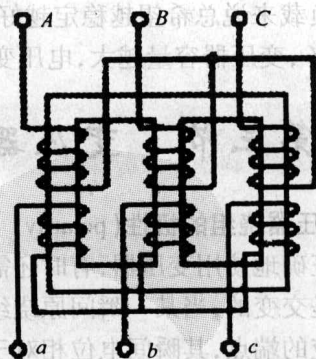


图 1-3-4 三铁芯柱式三相变压器

### 2. 三铁芯柱式三相变压器 (three phase transformer)

图 1-3-4 所示为三铁芯柱式三相变压器。这种变压器有三个相同截面的铁芯柱,各套一相原、副绕组,各相磁路相互并联,由于三相原绕组所加的电压是对称的,因此磁通是对称的,副边电压也是对称的。



三铁芯柱式三相变压器的原、副边都有三个绕组,可以根据需要接成星形(Y)或三角形( $\Delta$ )。因此有4种基本连接方式:Y/Y、 $\Delta$ /Y、Y/ $\Delta$ 和 $\Delta$ / $\Delta$ 。我国只采用Y/Y和Y/ $\Delta$ 两种标准形式,如图1-3-5所示。

### 3. 三相变压器的变比关系 (variable ratio relationship)

当原边和副边的三相绕组的连接方式和连接极性完全一致时,例如Y/Y或 $\Delta$ / $\Delta$ 连接,则两边线电压之比等于相电压之比,并且两者同相位。当原副绕组连接方式不一致时,则两边线电压之比不等于相电压的变比,例如,Y/ $\Delta$ 连接的三相变压器两边线电压的变比是相电压变比的 $\sqrt{3}$ 倍,并且两者的相位不同,副边线电压超前原边线电压 $30^\circ$ 。

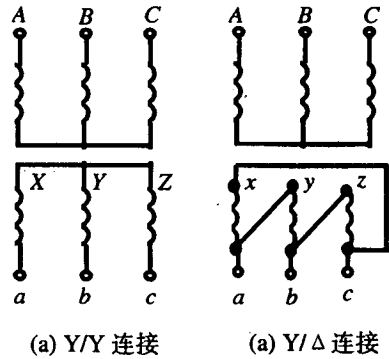


图 1-3-5 三相变压器的两种接法

## 第四节 特殊变压器

前面讨论的主要是双绕组变压器,在实际应用上,还有一些特殊用途的变压器,例如自耦变压器、电压互感器、电流互感器等,它们都有各自的主要特点和用途。

### 一、自耦变压器 (auto-transformer)

普通变压器至少有两个绕组,原、副绕组是相互绝缘的,只有磁耦合而无直接的电的联系。自耦变压器只有一个绕组,如图1-4-1所示,其中高压绕组的一部分线圈兼作低压绕组,自耦变压器的高低压绕组之间除了有磁的联系外,还有电的直接联系。自耦变压器的基本工作原理与普通变压器相同,同样有以下关系

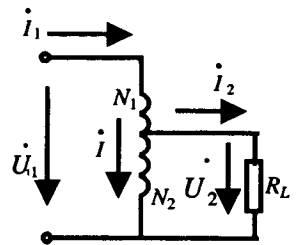


图 1-4-1 自耦变压器

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-4-1)$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} = K_i \quad (1-4-2)$$

当变压器满载或接近满载时,原边电路和副边电路中的电流 $I_1$ 和 $I_2$ 的相位差接近 $180^\circ$ ,在公共绕组内流过的电流 $I$ 较小( $I = I_1 - I_2$ ),因而这部分绕组可用截面积较小的导线绕制。

自耦变压器与普通变压器相比它的优点是:效率高、省铜线、制造简单、体积小、重量轻;它的缺点是:原、副方电路有电的直接联系,容易发生触电事故。因此电气安全操作规程规定,自耦变压器不容许作为安全变压器使用,安全变压器一定要采用原副绕组相互绝缘的双绕组变压器。

### 二、仪用互感器 (mutual inductor)

在高电压、大电流的线路中,通常不能直接用仪表去测量电压和电流,而需借助于特制的仪表变压器将高电压降为低电压、大电流变为小电流后,再进行测量。这样可以使测量仪表与高压电路绝缘,以保证测量人员和仪表的安全,并可扩大仪表的量程。这种专用仪表变压器称