



高等职业教育  
机电系列精品教材

电机与电气控制技术



主编  
张 晔

# 电机与电气 控制技术

主编 张 晔

主审 赵京岚 李高建

# 电机与电气 控制技术



定价: 59.90元

西北工业大学出版社

西北工业大学出版社

免费提供  
精品教学资料包  
服务热线: 400-615-1233  
www.xinsijiaocai.com

高等职业教育  
机电系列精品教材

# 电机与电气 控制技术

主 编 张 晔

副主编 韩廷水 杨兆伟 刘福祥

主 审 赵京岚 李高建

西北工业大学出版社

西 安

**【内容简介】** 本书以现代工业自动化技术为核心,围绕电机与电气控制技术的理论与实践,构建了“基础技能+工程应用+安全规范”的模块化内容体系。全书分为5篇、9个项目、15个任务,深度融合“启—承—转—评”创新教学模式,强化过程性评价与职业素养的培养。本书主要内容包括变压器的通电运行与测试、电机的选型、交流电机的通电运行与测试、直流电机的通电运行与测试、特种电机的通电运行与测试、直接起动运行类电气控制柜的安装与调试、降压起动运行类电气控制柜的安装与调试、继电器-接触器控制系统设计方案制定,以及电气设备与安全用电的认识。

本书支持“理实一体化”教学模式,适用于高等职业院校机电一体化技术、电气自动化技术、工业机器人技术、智能制造装备技术等专业的教学使用,也可作为企业电气工程师和设备维护人员的岗位培训手册。

## 图书在版编目(CIP)数据

DIANJI YU DIANQI KONGZHI JISHU

电机与电气控制技术

张 晔 主编

---

责任编辑:孙 倩

装帧设计:黄燕美

责任校对:朱辰浩

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号

邮编:710072

电 话:(029)88491757, 88493844

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:河北龙大印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm

1/16

印 张:19.75

字 数:506千字

版 次:2026年5月第1版

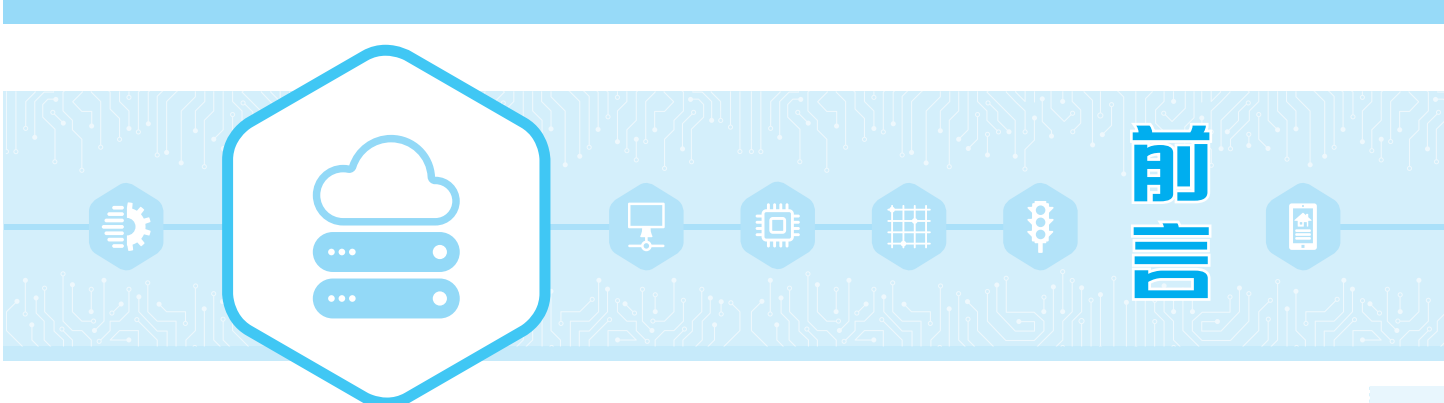
2026年5月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5775-0393-6

定 价:59.90元

---

如有印装问题请与出版社联系调换



随着智能制造、工业互联网等技术的快速发展,电机与电气控制技术已成为现代工业自动化领域的核心支撑。为破解传统教材重理论、轻实践,教学内容与技术发展脱节,课程思政融入生硬等问题,本书遵循“以学生为中心、以能力为本位、以行动为导向”的职业教育理念,积极响应职业教育教学关键要素改革要求,将行业的新方法、新技术、新工艺、新标准、新装备系统引入教材内容,突出实践性与应用性,助力学生掌握电机与电气控制技术的核心技能,提升职业素养与创新能力。本书立足职业院校学生认知规律与岗位需求,以“解决工程实际问题”为主线,构建“项目引领、任务驱动”的内容体系,通过对电机与电气控制技术领域典型工作任务进行职业分析与跟岗挖掘,系统梳理并重构核心技能点与知识点,形成结构化的课程能力图谱,并以此为基础设计综合化教学项目,致力于培养学生的技术应用能力、规范操作习惯及结构化思维能力。

在编写本书的过程中突出创新,将每个任务划分为“启动任务—承前学习—转化练习—评价提升”等阶段。其中,“启动任务”通过真实情境任务激发学生学习兴趣,建立知识与实践的关联;“承前学习”结合视频资源、知识拓展、虚拟仿真等方式,强化学生理论理解;“转化练习”采用“信息→计划与决策→实施→检查与交付”四步工作法,培养学生规范化操作能力,该设计也为教师开展项目化教学提供清晰的实施框架与评价抓手,有助于教师在指导学生完成任务的过程中同步提升实践指导能力与教学组织能力;“评价提升”构建“过程性+增值性”评价体系,并引入促动技术,依据聚焦式会话法(ORID,即客观性、反应性、诠释性、决定性四个思维层级),引导学生从客观事实、情感反应、意义诠释到行动决策进行结构化反思,帮助学生关注过程与自身成长,提升自主改进能力。

以“四融三讲”方式创新课程思政新模式。本书深入挖掘体现行业特色与职业特点的思政元素,将安全生产、工匠精神、劳动精神等价值理念与行业标准、企业规范、岗位要求紧密融合,构建了融入具体教学案例的思政元素资源库。教师通过“学思园地”将“安全生产、脚踏实地”等思政元素自然融入教学内容,培养学生“担当、包容、和谐、进取”的精神品质,实现思政元素融于案例、融于任务、融于评价、融于反思,在知识传授中传递劳动精神、劳模精神和工匠精神。

本书深度践行产教融合与校企合作机制,与山东明佳科技有限公司、山东栋梁科技设备有限公司等区域龙头企业建立了“三方共编、共享、共用、共推”的合作模式。在编写本书过程中,企业全面开放技术资源,将其脱敏后的技术标准、核心生产装备参数、典型工艺文件及一线操作规范系统性地转化为教学内容。通过校企联合开展职业岗位分析,将企业真实的工程案例、工艺流程深度融入项目任务,确保教材内容与行业技术发展同频同步,实现了企业生产资源向教育教学资源的有效转化与数字化位移。本书将转化练习、评价提升部分以

可裁切页面形式呈现,可灵活用作工作计划书、质量检测手册等配套资料,便于过程性评价与工作质量评价。同时,本书配套二维码视频、虚拟仿真等数字化资源,将企业生产装备、操作技能、工艺流程的真实场景以数字化形式融入教材,实现了纸质教材与数字资源的深度融合,拓展了学生学习路径,顺应了职业教育教材形态多样化的发展方向。通过模块化编排,本书支持教学资源随技术发展动态调整,可满足不同层次院校的个性化教学需求。

全书共分五篇,涵盖变压器、电机驱动、电气控制柜、电气控制系统设计及安全技术五大模块,适用于高等职业院校机电一体化技术、电气自动化技术、工业机器人技术、智能制造装备技术等专业,可作为“理实一体化”“项目化教学”的配套教材。本书内容源于企业真实岗位,设计兼顾岗位培训需求,还可用于企业员工培训、社会学习者技能提升等场景,服务于职业教育优质教材的广泛推广与应用。

本书是山东省职业教育教学改革研究项目《数字化转型背景下“启—承—转—评”教学模式的研究与实践》的成果之一(课题编号:2023370)。

本书由泰山职业技术学院张晔担任主编,泰山职业技术学院韩廷水、杨兆伟及泰安技师学院刘福祥担任副主编。张晔负责全书框架设计与统稿,主要负责电机驱动模块、电气控制柜模块的编写工作;韩廷水主要负责变压器模块的编写工作;杨兆伟主要负责安全技术模块的编写工作;刘福祥主要负责电气控制系统设计模块的编写工作。此外,泰山职业技术学院苑承一、李琪、聂继康负责内容核对与整理等工作;山东明佳科技有限公司张树君、山东栋梁科技设备有限公司刁秋珍、上海数林软件有限公司朱松提供了技术支持。本书由泰山职业技术学院赵京岚、泰山学院李高建担任主审。

感谢山东理工大学孙贤明、山东工商学院吴现波、苏州健雄职业技术学院张宏杰在模式搭建和教学内容上给予的支持,为“启—承—转—评”教学模式的落地应用与“四融三讲”课程思政育人模式的有效融入提供了重要指导;感谢合作企业山东明佳科技有限公司、山东栋梁科技设备有限公司、上海数林软件有限公司提供的真实工程案例、设备资料、相关工艺标准以及虚拟仿真资源,为教材的实践性奠定了基础。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,请广大读者批评指正。

编者

2025年10月

## 第一篇 变压器模块

<b>项目一</b>	<b>变压器的通电运行与测试</b> .....	2
	任务一 单相变压器的运行与检测 .....	2
	任务二 三相变压器的运行与检测 .....	22

## 第二篇 电机驱动模块

<b>项目二</b>	<b>电机的选型</b> .....	53
	任务 低压离心式水泵电机的选型 .....	53

<b>项目三</b>	<b>交流电机的通电运行与测试</b> .....	73
	任务 传送带驱动电机的手动调试 .....	73

<b>项目四</b>	<b>直流电机的通电运行与测试</b> .....	93
	任务 电动窗帘的手动调试 .....	93

<b>项目五</b>	<b>特种电机的通电运行与测试</b> .....	113
	任务一 步进电机驱动直线导轨的手动调试 .....	113
	任务二 伺服电机驱动直线导轨的手动调试 .....	126

## 第三篇 电气控制柜模块

<b>项目六</b>	<b>直接起动运行类电气控制柜的安装与调试</b> .....	158
	任务一 水泵直接运行电气控制柜的元件选型 .....	158
	任务二 水泵直接运行电气控制柜的安装与调试 .....	202
	任务三 手动往返运料小车电气控制柜的安装与调试 .....	222

<b>项目七</b>	<b>降压起动运行类电气控制柜的安装与调试</b> .....	231
	<b>任务 降压起动消防泵电气控制柜的安装与调试</b> .....	231

## 第四篇 电气控制系统设计模块

<b>项目八</b>	<b>继电-接触器控制系统设计方案制定</b> .....	243
	<b>任务一 电动葫芦电气控制系统设计方案制定</b> .....	243
	<b>任务二 多级皮带控制系统设计方案制定</b> .....	271

## 第五篇 安全技术模块

<b>项目九</b>	<b>电气设备与安全用电的认识</b> .....	282
	<b>任务一 认识电气设备的组成</b> .....	282
	<b>任务二 电工安全基础知识</b> .....	294

<b>参考文献</b> .....	309
-------------------	-----

# 第一篇

## 变压器模块

变压器是在电力系统和电子电路中应用广泛的电气设备。它利用电磁感应原理,将一种交变电压转变为另一种或两种及以上频率相同而数值不同的交变电压。在电能的变换、传输、分配和使用过程中,变压器是关键设备。除电力系统外,它在电气检测、通信、广播、冶金、焊接、智能控制、电子实验等方面均有广泛应用。

### 学思园地

#### “电网神探”,攻坚克难筑牢电网守护防线的大国工匠——冯新岩

作为装备制造大国,我国是拉动世界电力和变压器市场的最大驱动力,自主研发制造了世界上最大容量的变压器,且在特高压高端设备制造方面处于世界领先水平,制定了特高压国际标准。

冯新岩,国网山东省电力公司超高压公司变电检修中心电气试验班副班长,工作 20 多年来一直从事“大国重器”“中国名片”特高压领域最核心部件变压器(换流变)的检测工作,被誉为“电网神探”。在百万伏特高压电磁环境下,他能轻松辨别出特高压核心部件的异常放电信号。他累计发现设备重大缺陷 100 余次,避免因设备故障造成的经济损失数亿元。

本篇主要针对变压器的基本结构组成(绕组、铁芯)展开介绍,通过学习“电网神探”冯新岩从事特高压领域最核心部件变压器(换流变)检测工作挽回损失数亿元的事迹,感受大国工匠精神,培养学生安全生产、团结协作、不怕犯错、技能报国的意识,建立学生的课程理论和课程技能自信。



# 项目一 变压器的通电运行与测试



## 任务一 单相变压器的运行与检测



### 启动任务

一位车床操作工遇到了机床控制变压器冒烟的情况,但他不了解变压器的原理和技术参数。如果你是维修电工技术人员,如何向他介绍变压器的原理及结构特点?为了保证变压器的安全,在出厂前该如何检测相关参数和做哪些常规性的基本试验?



### 任务分析

本次任务中,变压器是一种交流电气设备,在一定电学知识的基础上,重点了解电磁感应原理。为有效应用该原理,变压器具有铁芯、绕组结构。变压器作为电力系统的核心设备,需对其相关的电压、电流、功率等各种物理量进行较全面的分析,为保障安全,使用前需反复进行必要的检测或试验,如测定负载运行情况、变压比、空载电流及损耗、负载损耗及短路阻抗等。



### 任务目标

通过完成本次任务,学生应了解单相变压器的结构组成,理解变压器的工作原理和技术参数,掌握单相变压器的常规测试;能够进行单相变压器运行和测试线路的连接,并进行单相变压器测试参数的分析。



### 承前学习

#### 一、变压器的基本原理和结构

变压器是利用电磁感应原理将一种电压等级的交流电转换成另一种电压等级的交流电的静止电磁装置。变压器外形如图 1-1-1 所示。



图 1-1-1 变压器外形

变压器的用途广泛,可以用来变换电压,从而改变电流和阻抗等。图 1-1-1(a)所示控制变压器、图(b)所示电源变压器可用来将一种电压、电流的交流电变换为同频率的另一种(或几种)电压、电流的交流电;图(c)所示脉冲变压器用来传输脉冲信号;电子设备中的输入、输出变压器用来变换输入、输出阻抗以达到阻抗匹配。这些都必须依靠变压器来完成。

### 1. 变压器的基本工作原理

以单相双绕组变压器为例,即在一个闭合的铁芯上缠绕两个绕组,两个绕组之间只有磁的耦合,而没有电的联系。

如图 1-1-2 所示,左侧与电源相连并接收交流电能的绕组,称为一次绕组,又称原绕组或初级线圈;右侧绕组与负载相连并送出交流电能,称为二次绕组,又称副绕组或次级线圈。通常,与一次绕组相关的物理量加下角标注“1”,与二次绕组相关的物理量加下角标注“2”以示区别。

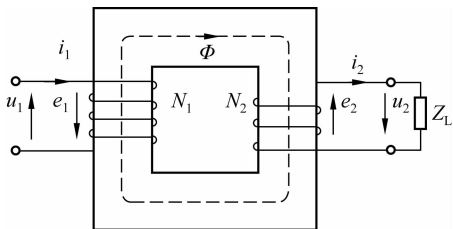


图 1-1-2 单相变压器基本工作原理图

变压器的基本工作原理基于电磁感应定律,若一次绕组两端加上交流电压 $u_1$ ,则在一次绕组中就会有交流电流 $i_1$ 流过,该电流产生沿铁芯闭合的交变主磁通 $\Phi$ ,若忽略漏磁,交变主磁通 $\Phi$ 同时交链一次绕组和二次绕组,按照电磁感应定律,便会在一次、二次绕组中分别产生自感电动势 $e_1$ 和互感电动势 $e_2$ ,可得一次、二次绕组中的感应电动势如下:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

通常, $N_1$ 不等于 $N_2$ ,所以 $e_1$ 也不等于 $e_2$ ,从而达到变换电压的目的。如将二次绕组的两端与负载接通,变压器便对负载供电,电能由一次绕组通过电磁耦合传递给二次绕组,可见电能的变换和传递是以交变磁通为媒介的。

交变磁通  $\Phi$  的交变频率是由电源电压  $u_1$  的频率决定的,而感应电动势  $e_1$ 、 $e_2$  又是由同一个交变磁通  $\Phi$  感应产生的,因此  $e_1$  和  $e_2$  的频率相同,变压器能将一种电压的交流电能,在频率不变的情况下变换成另一种电压的交流电能。

可见,变压器的基本工作原理是以磁场为媒介,通过电磁感应作用,把一种电压的交流电转换成相同频率的另一种电压的交流电。

## 2. 变压器的基本结构

单相变压器的基本结构主要包括铁芯和绕组两部分,如图 1-1-3 所示。

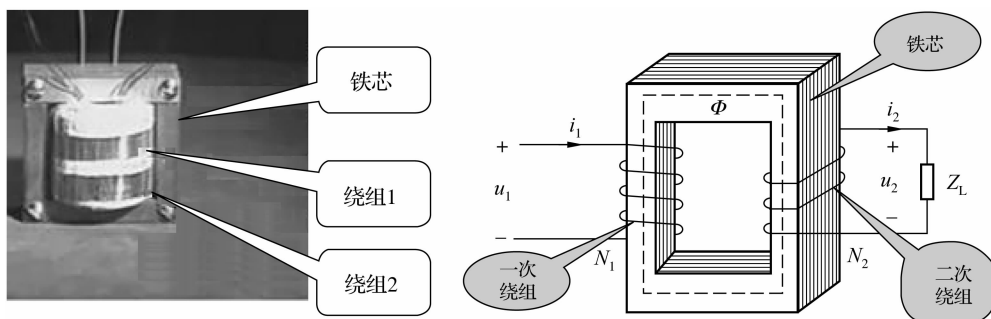
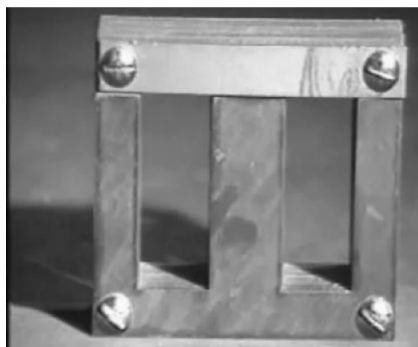


图 1-1-3 单相变压器基本结构示意图

(1)铁芯(磁路部分)。如图 1-1-4(a)所示,铁芯既是变压器的磁路,又是变压器的机械骨架,用以支承绕组和减小磁路的磁阻。铁芯通常用含硅量为 4%~5%、厚度为 0.35 mm 或 0.5 mm 的硅钢片叠压而成,片间由氧化膜或绝缘漆绝缘以减小铁芯内的涡流及磁滞损耗。



(a) 铁芯



(b) 绕组

图 1-1-4 铁芯和绕组外观图

(2)绕组(电路部分)。如图 1-1-4(b)所示,绕组是变压器的电气部分,一般用绝缘铜线或绝缘铝线绕制而成。绕组的作用是作为电气的载体,产生磁通和感应电动势。

## 二、变压器的分类

变压器按铁芯的结构可分为芯式、壳式两种,如图 1-1-5 所示。



(a) 芯式变压器



(b) 壳式变压器

图 1-1-5 心式、壳式变压器外观图

(1) 芯式变压器的绕组绕在铁芯的铁芯柱上,这时铁芯柱好像绕组的芯子,故称为芯式。铁芯冲片交错叠成以减小接缝处的磁阻。芯式变压器结构简单,绕组布置和绝缘较容易。电力变压器大多采用心式结构。

(2) 壳式变压器的一次绕组及二次绕组都绕在中间铁芯柱上,这时,铁芯好像绕组的外壳,故称为壳式。壳式变压器较芯式变压器用铁少,但因两个绕组都绕在同一铁芯柱上,使外面的线圈直径增大,用铜量增多。壳式变压器的壳式结构机械强度高。壳式变压器一般用于特种变压器和小型变压器。

小型变压器的绕组用圆铜漆包线绕制,因低压绕组对绝缘的要求不高,故将低压绕组放在里面、高压绕组放在外面,各绕组间妥善绝缘,高、低压绕组间加强绝缘。

如图 1-1-6 所示,在电源变压器中,为减少外界干扰,在一次、二次绕组(也称副绕组)间加装屏蔽线,屏蔽线可用导线绕成,也可以包上一层铜箔来代替。应注意屏蔽线不能构成闭合电路,否则将形成短路的二次绕组,导致变压器过热而烧毁。屏蔽线一端应与机壳相连,当有外界干扰信号的电源线接入变压器时,干扰信号被屏蔽线与一次绕组之间的分布电容所短路,从而达到屏蔽的目的。



图 1-1-6 各种电源变压器外观图



微课

单相变压器的  
基本原理和  
结构

### 三、变压器的额定值(铭牌值)

每台变压器上都有一个铭牌,如图 1-1-7 所示。铭牌上标明了变压器的额定值,是在使用变压器时必须满足的一些条件。



图 1-1-7 变压器铭牌

(1) 额定容量  $S_N$ 。额定容量表示在额定工作条件下变压器的输出功率,是变压器的视在功率,即  $S_N = U_N I_N$ ,也就是输出最大电功率的能力,这里  $U_N$ 、 $I_N$  分别是绕组的电压有效值和电流有效值。对于三相变压器而言,额定容量指三相容量之和,即  $S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$ ,这里  $U_{1N}$ 、 $I_{1N}$  分别是一次侧额定线电压、线电流,  $U_{2N}$ 、 $I_{2N}$  分别是二次侧额定线电压、线电流。

(2) 额定电压  $U_{1N}$  和  $U_{2N}$ 。变压器在额定运行情况下,根据绝缘等级和允许温升所规定的一次绕组线电压值,称为一次绕组的额定电压  $U_{1N}$ 。在一次绕组加额定电压后,二次绕组空载时的线电压值,称为二次绕组的额定电压  $U_{2N}$ 。对于三相变压器而言,额定电压是指线电压。

(3) 额定电流  $I_{1N}$  和  $I_{2N}$ 。变压器在额定运行情况下,一次、二次绕组长时间工作允许的线电流值,分别用  $I_{1N}$ 、 $I_{2N}$  表示。对于三相变压器而言,额定电流是指线电流。

(4) 额定频率  $f_N$ 。我国规定标准工业用交流电频率为 50 Hz。世界上有些国家规定为 60 Hz。



微课

单相变压器的分类和额定值

#### 四、单相变压器的空载运行——变电压作用

##### 1. 空载运行的电压平衡方程及变电压作用

单相变压器空载运行示意图如图 1-1-8 所示。

所谓空载运行,是指变压器一次绕组外接正弦交流电源,其电压为额定电压,而二次绕组开路的情况。此时,二次绕组的电流  $i_2 = 0$ 。

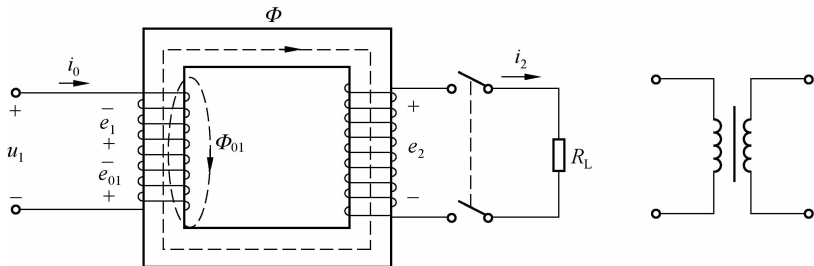


图 1-1-8 单相变压器空载运行示意图

一次绕组外加正弦交流电压 $u_1$ ,此时一次绕组中通过的电流称为空载电流,又称励磁电流,用 $i_0$ (或 $i_{10}$ )表示。若一次绕组的匝数为 $N_1$ ,则产生磁通势 $N_1 i_0$ ,建立磁场。其中绝大部分磁力线沿铁芯闭合,形成主磁通,即工作磁通 $\Phi$ ,它同时与一次、二次绕组交链,根据电磁感应定律在一次、二次绕组中产生感应电动势 $e_1$ 和 $e_2$ 。磁通势 $N_1 i_0$ 在产生主磁通 $\Phi$ 的同时,还有少量漏磁通 $\Phi_{01}$ 沿一次绕组周围空间的非铁磁性材料闭合。漏磁通常只占总磁通量的百分之零点几,且只与一次绕组交链,而不与二次绕组交链,所以它不起传递能量的作用,只是在一次绕组中产生很小的感应电动势 $e_{01}$ 。

根据基尔霍夫电压定律,对一次绕组可以列写电压平衡方程:

$$u_1 = i_0 r_1 + (-e_{01}) + (-e_1)$$

上式可以写成相量形式:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 - \dot{E}_{01} - \dot{E}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

式中, $Z_1 = r_1 + j X_1$ 为一次绕组的漏阻抗( $\Omega$ )。

由于绕组导线的电阻 $r_1$ 很小,空载电流 $I_0$ 也很小,故绕组的电阻压降 $I_0 r_1$ 可以忽略不计。同时,漏磁通产生的感应电动势 $E_{01}$ 也很小,也可以略去不计。所以可近似认为电源电压 $U_1$ 只用来平衡 $E_1$ 所造成的电压降,即 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 。

电磁关系如下。

$u_1$ 为正弦交流电压,则主磁通按照正弦规律变化,设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ,有

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = \omega N_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

有效值为

$$E_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

电压变换

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1, \quad U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2, \quad U_{20} = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

则改变匝数比,就可改变输出电压。

## 2. 空载运行等效电路

由一次绕组侧电压平衡方程: $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$ ,其中 $Z_1 = r_1 + j X_1$ ,则可认为

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (R_m + j X_m) = \dot{I}_0 Z_m$$

那么

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (Z_1 + Z_m)$$

式中: $Z_m$ 为励磁阻抗; $R_m$ 为励磁电阻(反映铁损); $X_m$ 为励磁电抗。

单相变压器空载运行时的等效电路如图 1-1-9 所示。

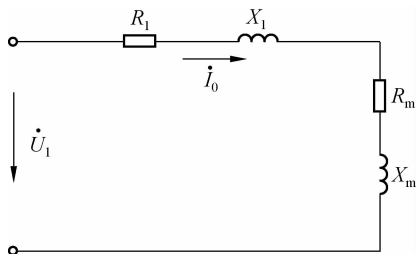


图 1-1-9 单相变压器空载运行等效电路

### 3. 空载运行相量图

相量图是用极坐标方式描述变量变化的一种图形表示方式,可以很直观地表现正弦量的大小和相位关系。

如相量式: $\dot{A}=\dot{B}+\dot{C}$ 、 $\dot{I}$ 、 $j\dot{I}$ 、 $-j\dot{I}$ 、 $-\dot{I}$ ,其相应相量图如图 1-1-10 所示。

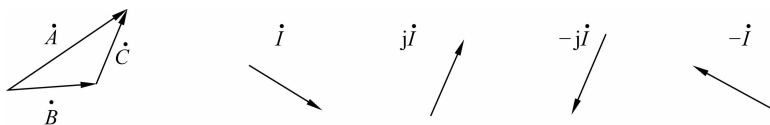


图 1-1-10 相量图

这样,根据变压器空载运行时电压平衡方程式: $\dot{U}_1=-\dot{E}_1+j\dot{I}_0X_1+\dot{I}_0r_1$ ,可以作出变压器空载运行时的相量图,如图 1-1-11 所示。其画法步骤如下。

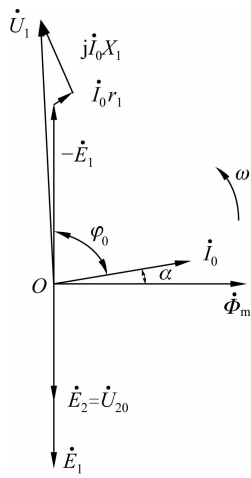


图 1-1-11 单相变压器空载运行相量图

- (1) 在水平位置画出主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 作为参考相量;
- (2)  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 均滞后于 $\dot{\Phi}_m$ 90°,沿顺时针垂直方向作出;
- (3) 空载电流 $\dot{I}_0$ 超前 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁损角 $\alpha$ (水平电流分量产生磁通,垂直电流分量产生铁损);



微课  
单相变压器的  
空载运行——  
变压作用

(4)按照电压平衡方程 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 r_1$ 画出 $\dot{U}_1$ 。

## 五、单相变压器的负载运行——变电流作用

### 1. 负载运行的电压平衡方程及变电流作用

变压器的一次绕组接交流电源,二次绕组接负载,为带负载运行。如图 1-1-12 所示,当一次绕组接交流电压 $u_1$ 便会产生交流电流 $i_1$ ,磁动势 $i_1 N_1$ 在铁芯中产生磁通 $\Phi_1$ ,同时也产生了漏磁通 $\Phi_{s1}$ ,主磁通 $\Phi$ 在一次绕组产生感应电动势 $e_1$ ,在二次绕组产生感应电动势 $e_2$ ,在带负载的情况下,便产生感应电流 $i_2$ ,磁动势 $i_2 N_2$ 也要产生磁通 $\Phi_2$ ,磁通 $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 共同作用形成最后的主磁通 $\Phi$ 。结论就是:带负载时,主磁通 $\Phi$ 由一次、二次绕组磁动势共同产生。同理,磁动势 $i_2 N_2$ 还会产生漏磁通 $\Phi_{s2}$ ,其与漏磁通 $\Phi_{s1}$ 一样,会在各自的绕组上分别产生漏磁感应电动势 $e_{s2}$ 、 $e_{s1}$ 。

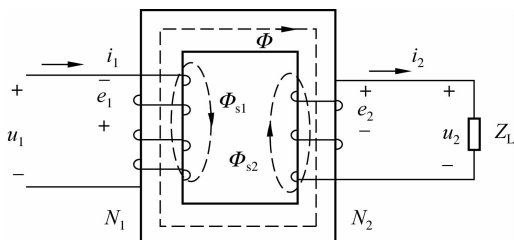


图 1-1-12 单相变压器负载运行示意图

在一次绕组侧,依据基尔霍夫电压定律可列出方程 $u_1 = i_1 r_1 - e_1 - e_{s1} \approx -e_1$ ,与空载运行时的情况分析相似,仍然可以得出结论 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ ,而二次绕组侧分析与空载时不同,由基尔霍夫电压定律得到方程为 $u_2 = e_2 + e_{s2} - i_2 r_2$ ,写为相量表达式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j \dot{I}_2 X_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

负载运行时,电磁关系仍为 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ , $E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$ ,与空载运行时的情况完全相同。

电流变换关系: $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ ,若 $U_1$ 、 $f$ 不变,则 $\Phi_m$ 不变,这就是恒磁通的概念。在空载时, $i_0 N_1$ 产生主磁通 $\Phi_m$ ,有负载时, $i_1 N_1 + i_2 N_2$ 产生主磁通 $\Phi_m$ ,则 $i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$ ,由此其相量表达式为 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$ ,空载电流 $\dot{I}_0$ 很小,若忽略不计,可得 $\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2$ ,即

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

结论:一次、二次绕组侧电流与匝数成反比。

### 2. 负载运行等效电路

负载运行时,可得如下基本方程式。

一次绕组端电压方程式:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

二次绕组端电压方程式:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

一次、二次绕组端电势联系:

$$\dot{E}_1 = K \dot{E}_2$$

一次、二次绕组端磁势联系:

$$\dot{I}_1 + \frac{1}{K} \dot{I}_2 = \dot{I}_0$$

激磁方程:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -\dot{I}_0 Z_m$$

负载方程:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$

以上 6 个方程式综合了变压器的电磁关系,由于变压器的一次、二次绕组之间无直接电的联系,在分析电路时较复杂,需对其进行等效电路的变换。即在不改变变压器电磁关系与功率关系的原則下,把二次绕组具有的匝数换算成与一次绕组具有的匝数相同,换算后的各量都在符号的右上角加“'”来表示,则有  $\dot{U}_2' = K \dot{U}_2$ ,  $\dot{I}_2' = \frac{1}{K} \dot{I}_2$ ,  $r_2' = K^2 r_2$ ,  $X_2' = K^2 X_2$ 。换算后,变压器负载运行时的基本方程式变为:  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ ,  $\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'$ ,  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_0 Z_m$ ,  $\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0$ ,  $\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_L'$ 。

此时,一次、二次绕组的匝数相等,可得到等效电路如图 1-1-13 所示。

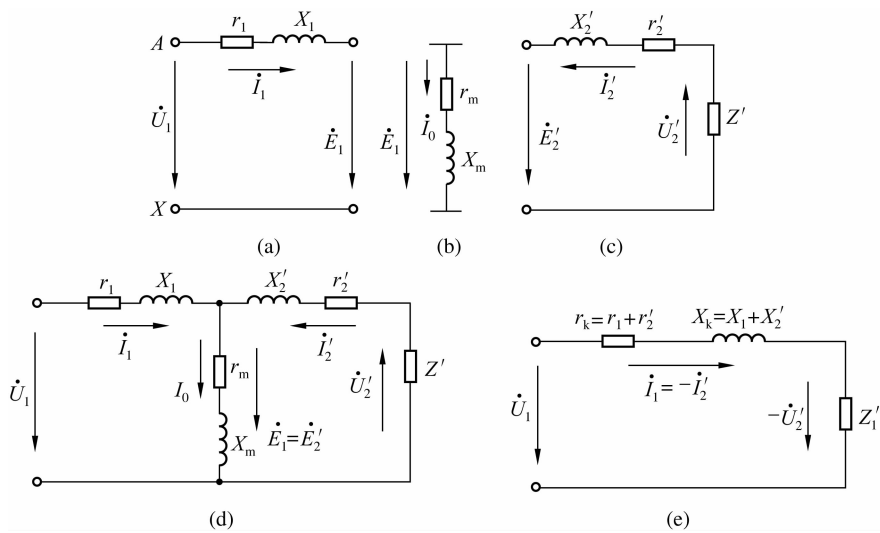


图 1-1-13 单相变压器负载运行等效电路

### 3. 负载运行相量图

根据简化后的等效电路,可以由二次绕组的相量开始分 6 步画出其相应的相量图,如图 1-1-14 所示,按比例画出  $\dot{U}_2'$ 、 $\dot{I}_2'$ ; 求出  $\dot{E}_2'$ , 画出  $\dot{E}_1$  和  $-\dot{E}_1$ ; 画主磁通  $\dot{\Phi}_m$ ; 求励磁电流  $\dot{I}_0$ ; 求一次绕组端电流  $\dot{I}_1$ ; 求一次绕组端电压  $\dot{U}_1$ 。

相量图不仅可以表明变压器负载运行时的电磁关系,还能直观地表示出变压器运行时

各物理量的大小及相位关系。

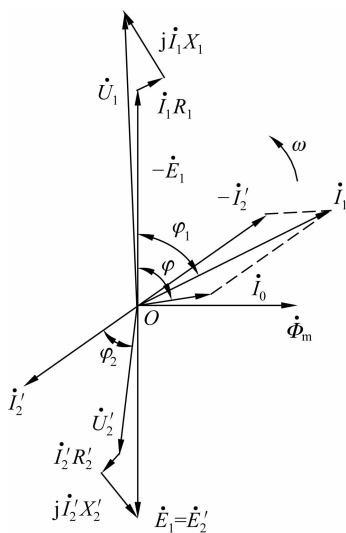


图 1-1-14 单相变压器负载运行相量图



微课

单相变压器的  
负载运行——  
变电流作用

## 六、变压器的变阻抗作用

变压器除了具有变换电压和变换电流的作用之外,还有变阻抗的作用。利用变压器的变阻抗作用可以实现电路的阻抗匹配,使负载获得最大功率输出。

如图 1-1-15 所示,负载接于二次绕组,而电功率却是从一次绕组通过工作磁通传到二次绕组的。根据等效的观点可以认为,当变压器一次绕组直接接入一个阻抗 $Z'_L$ 时,一次绕组的电压、电流和功率与其二次绕组接上负载阻抗 $Z_L$ 时的电压、电流和功率完全一样。这就可以认为,对于交流电源来说一次绕组接入阻抗 $Z'_L$ 与二次绕组接负载阻抗 $Z_L$ 是等效的。阻抗 $Z'_L$ 称为 $Z_L$ 折算到一次绕组的数值。

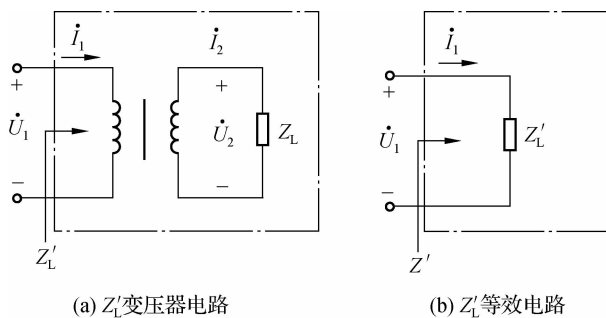


图 1-1-15 变压器的变阻抗作用

为了简化计算,并突出阻抗变换作用,可将一次、二次绕组中的导线电阻、漏磁阻抗和铁芯损耗略去不计,则有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$U_2 \approx E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

而负载阻抗的大小为

$$|Z_L| = \frac{U_2}{I_2}$$

从一次绕组看的等效负载阻抗为

$$|Z'_L| = \frac{U_1}{I_1}$$

则可得

$$|Z'_L| = \frac{\frac{N_1}{N_2} U_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 |Z_L|$$

该式表明一次绕组等效接入的负载阻抗 $|Z'_L|$ 是 $|Z_L|$ 的 $K^2$ 倍,这就是变压器的变阻抗作用。只要改变变压器一次、二次绕组的匝数,就可以将负载阻抗 $|Z_L|$ 变换成所需要的数值。

## 七、变压器绕组的同名端

磁场的方向取决于绕组的绕制方向和电流方向,实际中绕组一般都被封装起来,看不到绕制方向。为了明确磁场的方向,就需要作出事先的约定。

### 1. 同名端的概念和应用

同名端(同极性端):具有磁耦合的两绕组,当电流分别从两绕组各自的某端同时流入(或流出)时,若两者产生的磁场相互增强,则这两端叫作同名端,用黑点“·”或星号“\*”作标记。

变压器其实就是将两个绕组缠绕在同一个磁芯上,如图 1-1-16 所示。当电流分别从两个绕组的 1、3 端流入或者 2、4 端流入,利用“右手螺旋定则”,两个绕组的磁场在磁芯中如图中两个箭头表示的路径方向均一致而相互增强,此时这两个电流流入的 1 和 3 端就是同名端(2 和 4 也是同名端)。

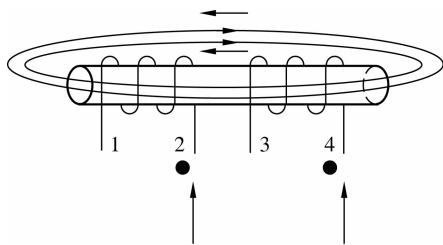


图 1-1-16 同名端示意图

如图 1-1-17(a)所示,1 脚、4 脚是同名端。变压器电能通过“电—磁—电”转化进行传输,本质上不进行能量存储,那么除了励磁能量,电源和负载的磁场是时刻相互抵消的。这样才能保持磁平衡,不至于出现无限的饱和问题。因此,如图 1-1-17(b)所示,变压器工作时,如果把线圈 1 当作源端绕组,电流从 1 脚流入形成回路,那么负载端绕组电流一定是从 4 脚(同名端)流出与负载形成回路。

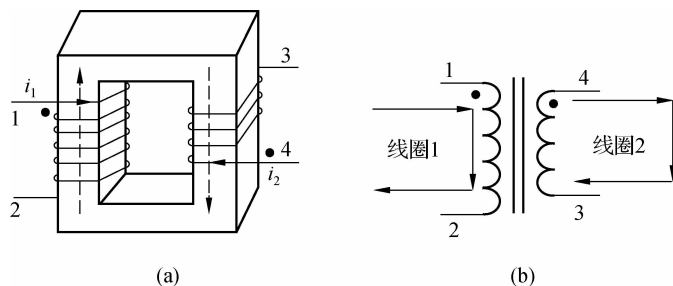


图 1-1-17 同名端对比示意图

## 2. 同名端的判别方法

变压器工作依靠的主要是绕组,当变压器工作时,绕组之间需进行正确的连接。一旦接错,就可能造成变压器严重损坏。因此,变压器绕组在进行连接前,应进行极性和首尾判定,即同名端的判定。

(1) 绕向已知的两个绕组的判定。对两绕组分别假设从任意一端通入电流,根据右手螺旋定则判别:若电流在铁芯中所产生的磁通方向一致,则这两端便是同名端,如图 1-1-18(a) 所示;若电流在铁芯中所产生的磁通方向相反,则该两端称为异名端,如图 1-1-18(b) 所示。

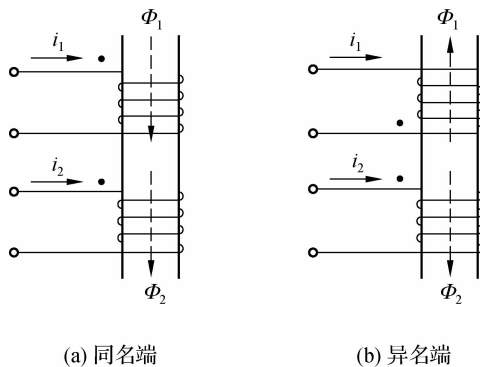


图 1-1-18 绕向已知的同名端判定

(2) 制作成型的变压器绕组判定。此时已无法从外部观察其绕组的绕向,这时只能采用图 1-1-19 所示的试验方法确定其绕组的同名端,主要有直流法和交流法两种。

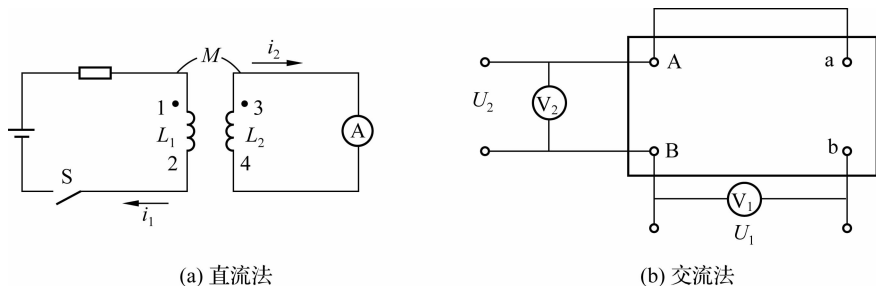


图 1-1-19 同名端判定试验线路

①直流法:如图 1-1-19(a)所示,当开关 S 闭合时,电流从线圈的端点 1 流入,且电流随时间增大。若此时电流表的指针向正刻度方向偏转,则说明 1 与 3 是同名端,否则是异名端。

②交流法:用导线将高压绕组的一端与低压绕组的一端相连,同时将它们的另一端接交流电压表  $V_1$ ,再将高压绕组两端接入低压交流电源和并入交流电压表  $V_2$ ,如图 1-1-19(b)所示。测量  $U_1$ 、 $U_2$  的值。若  $U_1 < U_2$ ,则 A、a 为同名端;若  $U_1 > U_2$ ,则 A、b 为同名端。

### 3. 绕组的串联与并联

(1)绕组的串联:为使一次绕组能够适应较高的电源电压,二次绕组能够输出较高的电压,需要把两个绕组串联。

正确的连接方法如图 1-1-20(a)所示,即将绕组的两个异名端连在一起,余下的两端接电源(一次绕组)或负载(二次绕组)。一旦接错,对于一次绕组,将烧毁绕组;对于二次绕组,将使输出电压为零。

(2)绕组的并联:为了得到大一些的电流,就需要把两个绕组并联使用。正确的连接方法如图 1-1-20(b)所示,将两个绕组的同名端对应连接。一旦接错,将烧毁绕组。

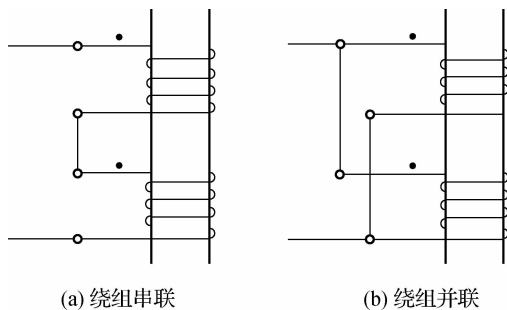


图 1-1-20 绕组的串并联



微课

单相变压器的  
阻抗变换及绕  
组同名端

## 八、单相变压器空载、短路实验

### 1. 变压器的参数及测定方法

各种分析中都要用到变压器参数,参数的获得在制造前可通过设计计算,制造后可通过试验测量获得。

主要参数(技术指标):空载电流  $I_0$ 、空载损耗(铁损)  $P_0$ 、励磁阻抗  $Z_m$  由空载实验测得;负载损耗(铜损)  $P_{Cu}$ 、短路阻抗  $Z_K$  由短路实验测得。

### 2. 空载实验

(1)实验电路。高压侧电压高且电流小,为了安全和仪器选择的方便,空载实验通常在低压侧加电压和测量,高压侧开路,如图 1-1-21 所示。注意,由于电流较小,为测量准确,电流表要尽量靠近绕组。

二次绕组开路,一次绕组接上额定电压  $U_{1N}$ ,测量  $U_1$  和  $I_0$ ,输入功率  $P_0$  及高压侧电压  $U_{20}$ 。

(2)参数计算。

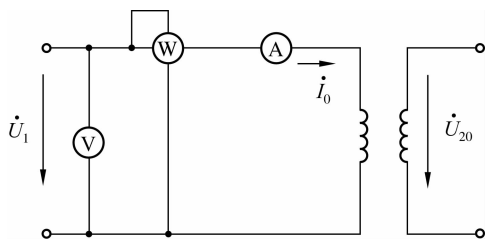


图 1-1-21 单相变压器空载实验线路

电压比: 
$$K = \frac{U_{20}}{U_{1N}}$$

空载损耗(铁损): 
$$P_0 \approx P_{Fe}$$

励磁阻抗: 
$$Z_0 = Z_1 + Z_m \approx Z_m = \frac{U_1}{I_0}$$

励磁电阻: 
$$r_0 = r_1 + r_m \approx r_m = \frac{P_0}{I_0^2}$$

励磁电抗: 
$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}$$

注意:变比  $K$  为高压侧对低压侧的电压比,所测得的各励磁参数的数值为低压侧的数值。若要得到高压侧的各参数值,需进行折算,即将测得的参数乘以  $K^2$ 。

### 3. 短路实验

(1)实验电路。因为短路时低压侧电流太大,为了方便,短路实验通常在高压侧加电压和测量,低压侧短路,如图 1-1-22 所示。注意,由于电压较小,为测量准确,电压表要尽量靠近绕组。

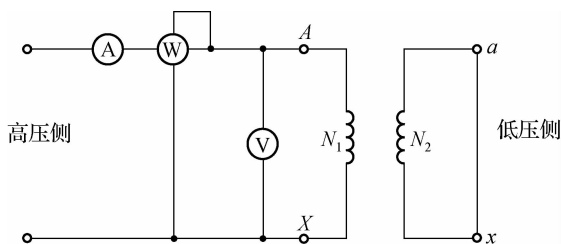


图 1-1-22 单相变压器短路实验线路

将高压侧接入调压器,从零逐渐增大到额定电压的  $4.5\% \sim 10\%$ ,直到高压侧短路电流  $I_K$  达到额定电流  $I_{1N}$  时,测量出所加电压  $U_K$  和输入功率  $P_K$ 。

(2)参数计算。

负载损耗(铜损): 
$$P_{Cu} \approx P_K$$

短路阻抗: 
$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}$$

短路电阻: 
$$r_K = \frac{P_K}{I_K^2}$$

短路电抗: 
$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}$$



微课

单相变压器空载、短路实验

转化练习

一、信息

(1) 根据本次任务的具体要求,完成表 1-1-1。

表 1-1-1 认读单相变压器铭牌信息表

型号		生产日期		生产厂家	
生产地		技术参数			

【任务提示】

选择能在低压范围内实现变压的单相变压器即可。

(2) 完成本次任务的元件清单明细表,见表 1-1-2。

表 1-1-2 元件清单明细表

序号	名称	型号、规格等	数量	性能
1	单相变压器	AC 220 V/24 V	1	
2	单相交流调压器	AC 0~400 V	1	
3	直流电源	DC 24 V	1	
4	白炽灯泡	24 V, 60 W	1	
5	按键开关		1	
6	交流电压表		2	
7	交流电流表		2	
8	功率表		1	
9	指针式万用表		1	

(3) 按照任务要求,进行参数测试并完成相应数据表。

① 单相变压器的负载运行测试,电路图如图 1-1-23 所示。

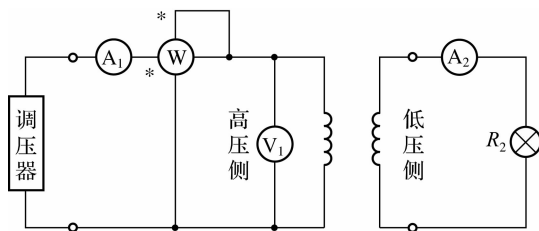


图 1-1-23 单相变压器的负载运行测试电路图

【任务提示】

按照图 1-1-23 连接电路,通电读取测量数据,观察负载的变化情况。

接通电源,调节调压器,使电压表  $V_1$  读数由小经 5 个测量点增大到 220 V,每个测量点都做好测量记录并填入表 1-1-3,计算出相关参数,同时观察二次侧负载(白炽灯)的亮度。



表 1-1-3 单相变压器的负载运行测试数据处理表

序号	实验测试数据				计算参数数据		
	$U_1/V$	$I_1/A$	$P_1/W$	$I_2/A$	$R_2/\Omega$	$P_2/W$	$\eta$
1							
2							
3							
4							
5							

②单相变压器空载、短路实验。

a. 变比测试, 电路图如图 1-1-24 所示。

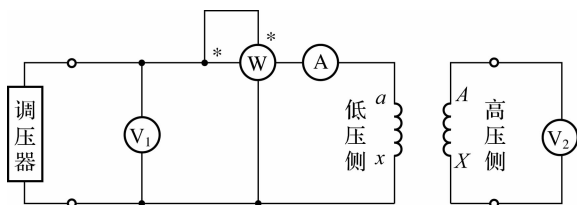


图 1-1-24 单相变压器的变比测试电路图

### 【任务提示】

为了安全, 空载实验一般在低压侧进行, 即低压端接电源, 高压端开路。

按照图 1-1-24 连接电路, 接通电源, 调节调压器, 使电压表  $V_1$  读数分别达到  $50\%U_N$ 、 $80\%U_N$ 、 $100\%U_N$  (额定电压  $U_N$  为 24 V); 分别将电压表  $V_1$ 、 $V_2$  的读数填入表 1-1-4, 计算变压器的变比  $K$  (求平均值)。

表 1-1-4 单相变压器的变比测试数据处理表

输入电压	实验测试数据		计算参数数据
	$U_1/V$	$U_2/V$	$K=U_1/U_2$
$50\%U_N$			
$80\%U_N$			
$100\%U_N$			
变压器变比 $K$ 的平均值			

b. 变压器空载实验测试, 电路图如图 1-1-25 所示。

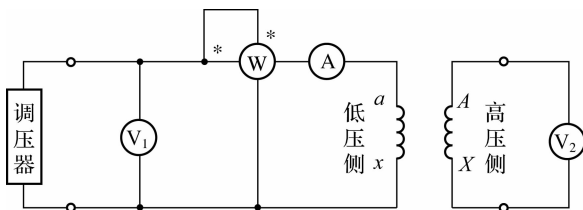


图 1-1-25 单相变压器的空载实验电路图

## 【任务提示】

为了安全,空载测量一般在低压侧进行,即低压端接电源,高压端开路。

按照图 1-1-25 连接电路,接通电源,调节调压器,使电压表  $V_1$  读数达到  $50\%U_N$  (额定电压  $U_N$  为 24 V) 并作短暂的停顿;观察变压器无异常情况时,继续逐渐调大调压器输出电压达到  $120\%U_N$ ,然后再分 6 次逐渐降低电压至  $50\%U_N$ ,每次做好测量记录并填入表 1-1-5。

表 1-1-5 单相变压器空载实验测试数据处理表

序号	实验测试数据				计算参数数据			
	$U_1/V$	$U_2/V$	$I_0/A$	$P_0/W$	$Z_m$	$R_m$	$X_m$	$\cos\varphi$
1	28 V							
2	26 V							
3	24 V							
4	18 V							
5	15 V							
6	12 V							

c. 变压器短路实验测试,电路图如图 1-1-26 所示。

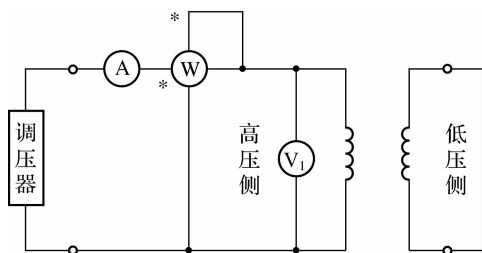


图 1-1-26 单相变压器的短路实验电路图

## 【任务提示】

为了安全,短路实验在接通电源之前,必须先将调压器调至输出电压为零的位置。短路实验一般在高压侧进行,低压侧短路。

按照图 1-1-26 连接电路,接通电源并从零开始调节调压器(先略加一个低电压),检查各仪表显示正常后在  $(5\% \sim 10\%)U_{1N}$  范围内缓慢增大电压,直到电流表读数达到  $1.1I_{1N}$ ,在  $(0.2 \sim 1.1)I_{1N}$  范围内测取包括  $I_{1N}$  值在内的 6 组数据填入表 1-1-6。

表 1-1-6 单相变压器短路实验测试数据处理表

序号	实验测试数据			计算参数数据			
	$U_k/V$	$I_k/A$	$P_k/W$	$Z_k$	$R_k$	$X_k$	$\cos\varphi$
1							
2							
3							
4							

续表

序号	实验测试数据			计算参数数据			
	$U_k/V$	$I_k/A$	$P_k/W$	$Z_k$	$R_k$	$X_k$	$\cos\varphi$
5							
6							

## 二、计划与决策

小组讨论制订工作计划,明确工作内容和注意事项,完成表 1-1-7。

表 1-1-7 工作计划

工作计划				
日期:	班级:	姓名:	学号:	小组成员:
序号	工作步骤	手册/工具/辅具/场地	注意事项	工作时间
1				
2				
3				
4				
5				

## 三、实施

### 1. 注意事项与工作提示

(1)请按照计划执行,不要超时。

(2)请注意小组合作,主动沟通。师生间进行关于评分分歧、工作过程中存在的问题、技术上的问题及理论知识等方面的专业讨论,注重主动沟通。

### 2. 小组工作

按决策的计划实施测试工作。注重操作规范、工作效率和纪律,按时完成任务。小组观察员及监督员发挥合理的作用,记录计划实施过程中小组工作出现的良好与不良现象。同时,教师也要记录小组的工作情况,如 7S\* 执行情况、学生的工作态度、工作质量等。

### 3. 问题与解决

教师记录小组工作过程中出现的问题及其产生原因和分析过程。

## 四、检查与交付

测试完毕后请按照表 1-1-8 进行自查,完毕后交付给教师评分,必要时做相关讲解或演示说明。

\* “7S”是整理(Seiri)、整顿(Seiton)、清扫(Seiso)、清洁(Seiketsu)、素养(Shitsuke)、安全(safety)和节约(saving)这 7 个词的首字母缩写。



表 1-1-8 自查表

检查序号	检查点	完成情况	问题记录
1	工作计划表	<input type="checkbox"/> 完成 <input type="checkbox"/> 未完成	
2	依据测试电路进行电路连接	<input type="checkbox"/> 完成 <input type="checkbox"/> 未完成	
3	依据任务提示进行调整测试	<input type="checkbox"/> 完成 <input type="checkbox"/> 未完成	
4	数据处理	<input type="checkbox"/> 完成 <input type="checkbox"/> 未完成	

请做目测检查,确定每一点是否存在问题,并记录检查结果,若无问题则交付验收。

## 评价提升

### 小组成果分享和总结

将小组的成果向其他同学介绍,描述收获、问题和改进措施,依据描述写出停止做、继续做、开始做的部分,对工作完成过程中不尽如人意的地方征求意见。

### 工作过程评价表(见表 1-1-9 至表 1-1-13)

#### (一)信息阶段

表 1-1-9 信息阶段表

序号	评价项目	评价手段	0~10分	权重	小计
1	任务分析与资料收集	谈话/观察/记录		×1	
2	任务分析	学生工作页		×4	
3	知识点问答	学生工作页		×5	
本阶段得分					

#### (二)计划阶段

表 1-1-10 计划阶段表

序号	评价项目	评价手段	0~10分	权重	小计
1	围绕任务组内充分交流讨论	谈话/观察		×2.5	
2	工作计划表制订	学生工作页		×5	
3	方案评估与确定	谈话/观察/记录		×2.5	
本阶段得分					

#### (三)实施阶段

表 1-1-11 实施阶段表

序号	评价项目	评价手段	0~10分	权重	小计
1	工作任务的完成情况、效率	工作过程记录		×3.0	
2	功能的完整性	学生工作页、观察		×2.5	
3	完成质量与技术标准	工作质量评价表的评估 (见表 1-1-12)		×2.0	
4	解决问题的能力	谈话/观察		×2.5	
本阶段得分					

表 1-1-12 工作质量评价表

序号	评价内容	评分细则	配 分	自评分	互评分
1	电路连接	工具、设备位置、接法正确	10 分		
		电流表、电压表位置、接法正确			
		功率表位置、接法正确			
		导线连接整齐、正确			
		高、低压侧连接正确			
2	调整测试	调整顺序正确	30 分		
		测试次数准确			
		读取记录数据准确			
		操作平稳,误差小			
		程序性、条理性强			
3	数据处理	填表记录数据准确、清晰	30 分		
		计算公式运用正确			
		计算数据清晰正确			
		特殊数据处理正确			
		结论判断正确			
本项总计分			70 分		
1	安全生产	安全着装,高低压侧测量选择正确,按规程操作	10 分		
		及时进行场地清理			
2	技能报国	电路连接熟练、正确、规范、标准	10 分		
		数据测试精确,计算正确			
3	不怕犯错	多次测试数据,每次反复调整	10 分		
		处理干扰因素,精益求精			
本项总计分			30 分		
工作质量总分					

#### (四)检查阶段

表 1-1-13 检查阶段表

序号	评价项目	评价手段	0~10 分	权 重	小 计
1	验收/检测记录	学生工作页/观察		×3.0	
2	工作结果记录和自我评估	学生工作页/观察		×2.0	
3	相关重要资料的完整移交	相关资料		×2.0	
4	测试参数移交并做说明演示	谈话/观察		×3.0	
本阶段得分					

## 工作过程总成绩(见表 1-1-14)

表 1-1-14 工作过程总成绩表

序号	评价项目	阶段得分	权重	总分
1	信息		×0.2	
2	计划		×0.2	
3	实施		×0.3	
4	检查		×0.3	
实际任务得分				

教师签字:

年 月 日

## 总结与反思

利用聚焦式会话法——ORID 进行本次任务的结构化反思,并完成图 1-2-27。

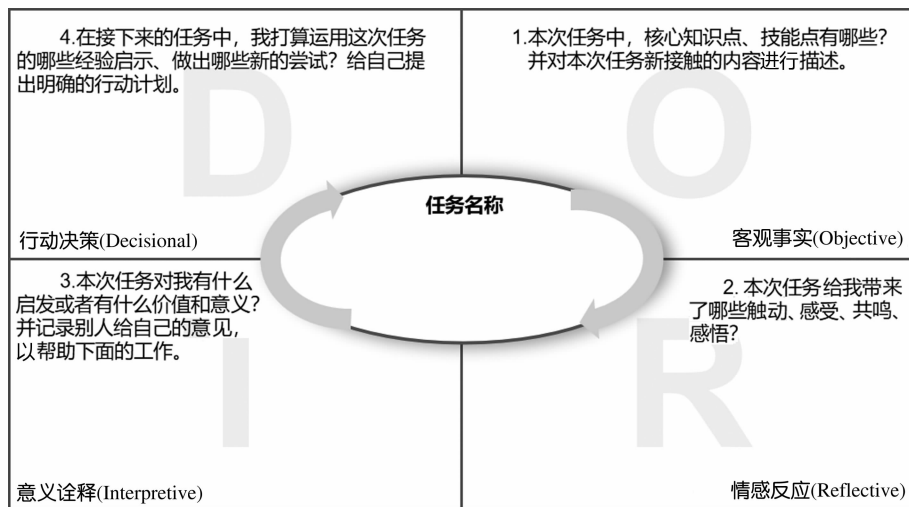


图 1-2-27 ORID 结构化反思

## 任务二 三相变压器的运行与检测

## 启动任务

一位司机看到路边电力变压器爆炸起火的情况,非常惊恐,但他不了解电力变压器的原理和技术参数,如果你是维修工程师,如何向他介绍三相变压器的原理及结构特点?为保证电力变压器的应用安全,在出厂前除做与单相变压器同样的实验外还需做什么样的常规实验?在使用中如何检查诊断变压器出现的相关故障?

## 任务分析

本次任务中,电力变压器常由三个同样的单相变压器组成,除了掌握单相变压器的基础知识外,我们还需要了解三相变压器绕组的极性及连接、联结组、并联运行条件和负载运行测量等常识性内容。为完成任务,请学生通过课前自学完成课前测试。

(1)三相变压器的联结组反映的是变压器高、低压侧对应\_\_\_\_\_之间的相位关系。

(2)三相变压器并联运行的条件为\_\_\_\_\_,\_\_\_\_\_,\_\_\_\_\_,其中必须满足的条件是\_\_\_\_\_。

(3)查阅技术资料、手册、挂图,对照实物认识电力变压器各组成元件的安装部位,填写图1-2-1所示序号对应的元件名称,并了解各自的作用。

- 1) \_\_\_\_\_ 2) \_\_\_\_\_ 3) \_\_\_\_\_  
 4) \_\_\_\_\_ 5) \_\_\_\_\_ 6) \_\_\_\_\_  
 7) \_\_\_\_\_ 8) \_\_\_\_\_ 9) \_\_\_\_\_

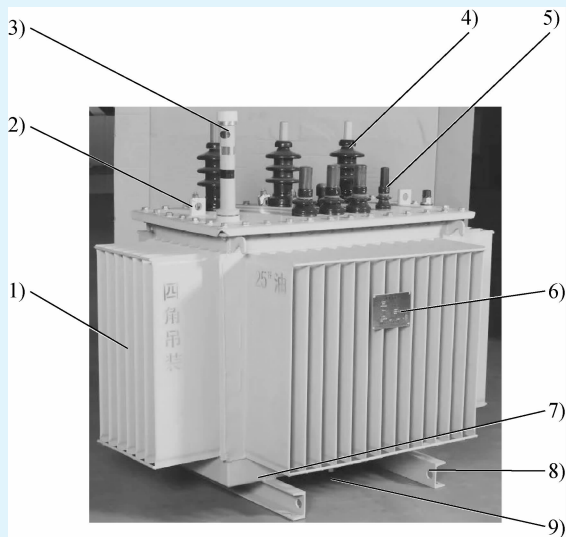


图 1-2-1 电力变压器

## 任务目标

通过完成本次任务,学生应了解三相变压器的结构组成,理解三相变压器的磁路系统,掌握三相变压器绕组的极性、连接及联结组的判定,能够进行三相变压器负载运行和测试线路的连接及三相变压器测试参数的分析,掌握基本的维护方法和故障处理技能。

## 承前学习

## 一、三相变压器的结构及工作原理(磁路系统)

在电力系统中广泛应用的三相变压器有升压变压器、降压变压器和配电变压器等,如图 1-2-2 所示。

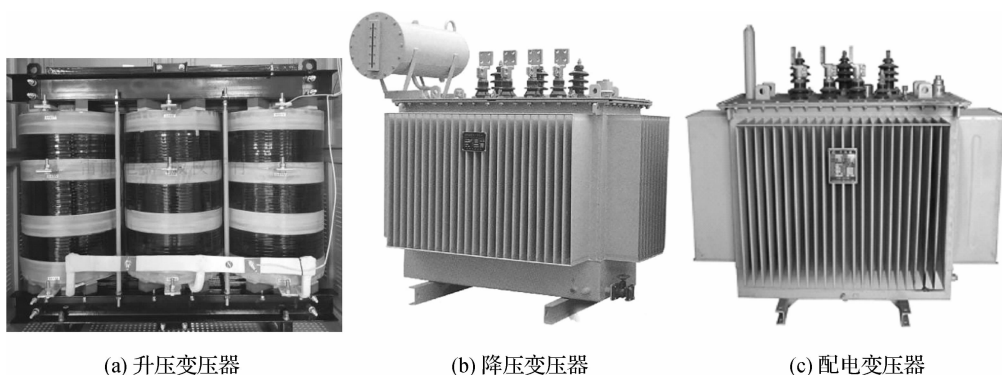


图 1-2-2 三相变压器

## 1. 三相变压器的结构

(1) 三相组式变压器。将三台容量、变比等完全相同的单相变压器的一次、二次绕组分别连接成星形或三角形而构成的变压器称为三相组式变压器,如图 1-2-3 所示。

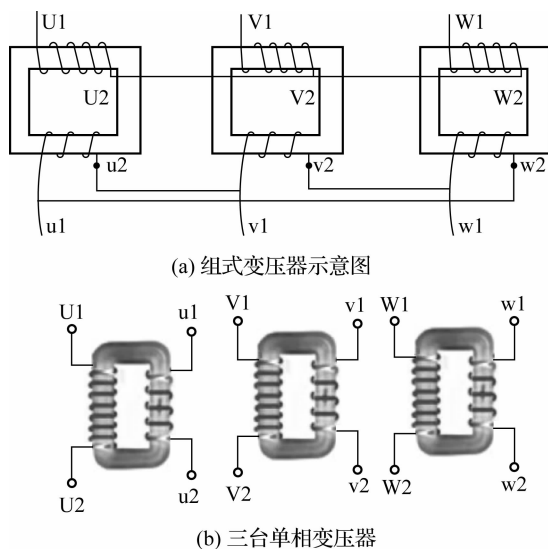


图 1-2-3 三相组式变压器

(2) 三相芯式变压器。铁芯是一个整体,在三个铁芯柱上各套着一相的一次和二次绕组,一次、二次绕组同样可分别连接成星形或三角形的变压器称为三相芯式变压器,如图 1-2-4 所示。

在相同额定容量下,三相芯式变压器成本低、效率高,因而得以广泛使用。三相组式变压器中的每一台单相变压器体积小、质量轻,因此一些超高电压、特大容量的三相变压器均采用组式变压器结构。

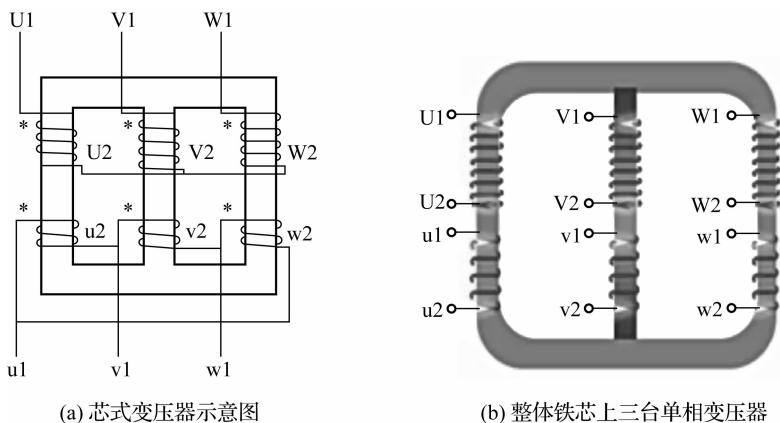


图 1-2-4 三相芯式变压器

## 2. 三相变压器的工作原理(磁路系统)

三相变压器的工作原理与单相变压器相同。变换关系中的电压和电流应为三相变压器的每相绕组的相值,即相电压和相电流。

(1)三相组式变压器。三相组式变压器是由三台单相变压器组成的,相应的磁路称为组式磁路,如图 1-2-5 所示。每相的主磁通沿各自磁路闭合,独立互不相关。当一次绕组外加三相对称电压时,各相的主磁通 $\dot{\Phi}_U$ 、 $\dot{\Phi}_V$ 、 $\dot{\Phi}_W$ 必然对称。由于磁路三相对称,所以各相空载电流也是对称的。

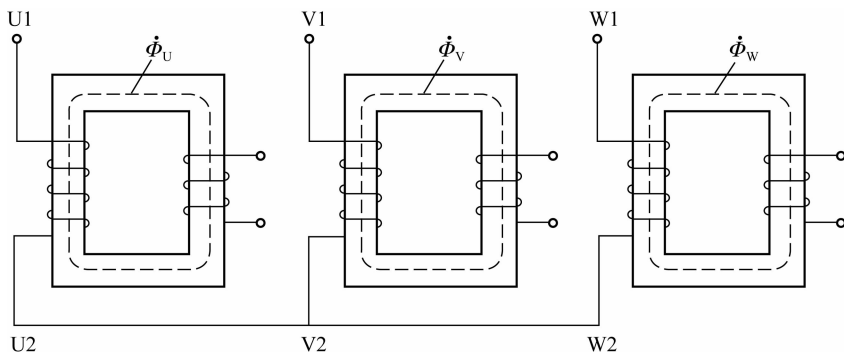


图 1-2-5 三相组式变压器的磁路系统示意图

特点:三相磁路彼此无关联,各相励磁电流数值相等。

(2)三相芯式变压器。三相芯式变压器的铁芯结构是从三相组式变压器铁芯演变过来的。其每相有一个铁芯柱,3个铁芯柱用铁轭连接起来,构成三相铁芯。三相芯式变压器的磁路系统示意图如图 1-2-6 所示。从图上可以看出,任何一相的主磁通都要通过其他两相的磁路作为自己的闭合磁路。如果把 3 台单相变压器的铁芯合并成如图 1-2-6 (a)所示的形式,则当

三相变压器一次绕组外施对称三相电压时,三相主磁通对称,中间铁芯柱内的磁通  $\dot{\Phi}_U + \dot{\Phi}_V + \dot{\Phi}_W = 0$ ,即中间铁芯柱无磁通经过,因此可将中间铁芯柱省掉,变成如图 1-2-6(b)所示的形式。为使结构简单、便于制造,把三个铁芯柱布置在同一平面内,便得到如图 1-2-6(c)所示的形式,这就是常用的三相芯式变压器铁芯。

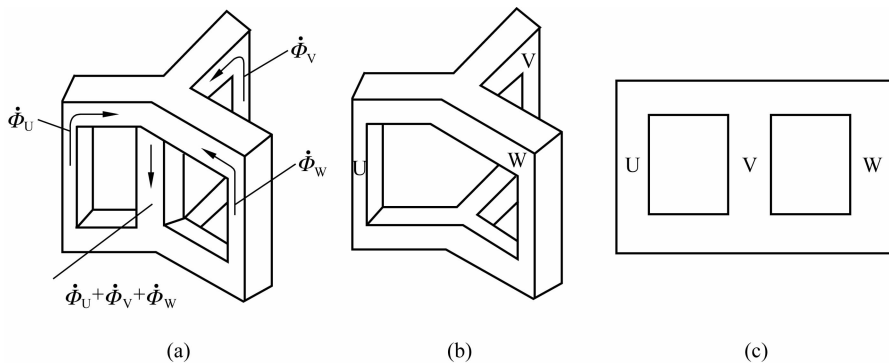


图 1-2-6 三相芯式变压器的磁路系统示意图

在三相芯式变压器中,磁路是彼此相关的,并且三相绕组的磁路长度不等,中间相的磁路较短,磁阻较小,当变压器外加三相对称电压时,三相空载电流不相等。但因其空载电流很小,它的不对称对变压器负载运行的影响很小,可以忽略。

特点:三相磁路有关联,磁路长度不同。

## 二、三相变压器绕组的极性及连接

变压器绕组的极性是指变压器一次、二次绕组中感应电动势之间的相位关系,即前面讲过的同名端(同极性端),对三相变压器的正常运行十分重要。

三相变压器共有 6 个绕组,3 个高压绕组相的首端(引出端)用 A、B、C 表示,尾端用 X、Y、Z 表示;对应低压绕组相的首端(引出端)用 a、b、c 表示,尾端用 x、y、z 表示,见表 1-2-1。三相绕组可以为星形连接或三角形连接,如图 1-2-7 和图 1-2-8 所示。各相绕组内感应电动势互差  $120^\circ$ ,变压器正常运行。如果一相绕组接反了,则该相绕组产生的磁通会与另外两相绕组产生的磁通相互抵消,使得变压器空载阻抗变得很小,接入电源后会流过很大的电流而烧坏变压器。

表 1-2-1 绕组表示

绕组名称	首端	末端	中性点
高压绕组	A, B, C	X, Y, Z	O
低压绕组	a, b, c	x, y, z	o

三相绕组的星形连接的接线图及相量图如图 1-2-7 所示。

三相绕组的三角形连接的接线图及相量图如图 1-2-8 所示。三角形连接有两种相序,图 1-2-8 所示为逆相序连接,此外还有顺相序连接。



微课

三相变压器的  
结构及工作  
原理

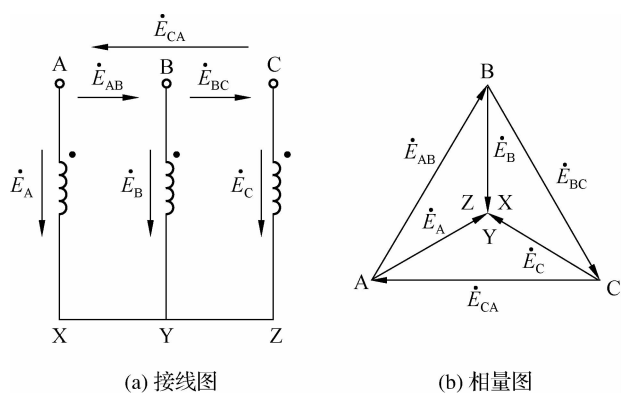


图 1-2-7 三相绕组的星形连接

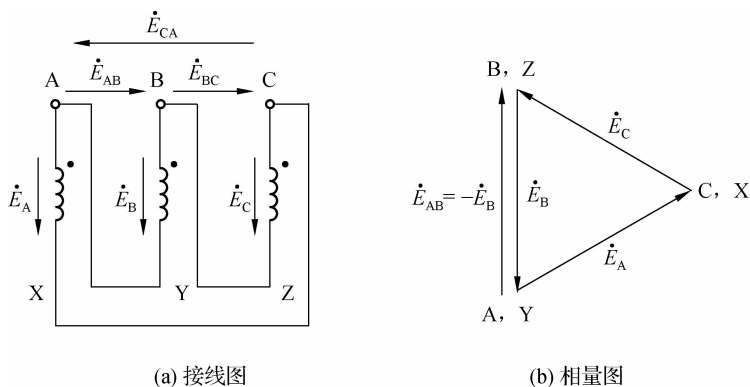


图 1-2-8 三相绕组的三角形连接

### 三、三相变压器的联结组

#### 1. 联结组

三相变压器的高、低压绕组可以接成星形,也可以接成三角形,其排列组合使得绕组可有多种接线方法,也称为联结组。高压、低压绕组对应的线电动势(或线电压)之间会存在一定的相位差,其值总是  $30^\circ$  的整数倍。因此,国际上常采用“时钟表示法”来标示三相变压器高、低压绕组线电动势的相位关系,即规定把对应相的高、低压绕组同名端点重合,高压绕组线电动势  $\dot{E}_{AB}$  为分针,固定指在时钟 12 点的位置,低压绕组线电动势  $\dot{E}_{ab}$  为时针,它所指的钟点就是该联结组的标号(指向“12”时,标号为“0”)。联结组别的书写形式为:用大写、小写英文字母 Y 或 y 分别表示高、低压绕组星形连接,有中性线引出时在字母后面加字母 N(n) 表示;D 或 d 分别表示高、低压绕组三角形连接;在小写英文字母后面写出标号数字。

例如,“Yd-11”联结组表示:当一次侧线电压相量作为分针指在时钟 12 点的位置时,二次侧的线电压相量在时钟的 11 点位置。也就是说,二次侧的线电压  $E_{ab}$  滞后于一次侧线电压  $E_{AB}$   $330^\circ$ (或超前  $30^\circ$ ),如图 1-2-9 所示。

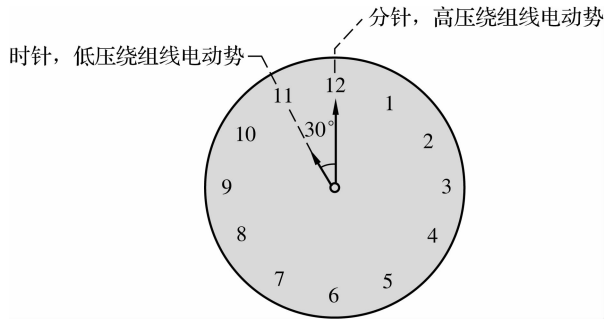


图 1-2-9 联结组 Yd-11

### 2. 联结组相量分析及判别方法

如图 1-2-10(a) 所示, 根据三相变压器绕组接线图, 通过“三步法”可判断该变压器的连接组别。

第一步: 分别作出对应的一次侧、二次侧相电压相量图, 如图 1-2-10(b)(c) 所示。

由于三绕组电压相量互差  $120^\circ$ , 无论是星形连接还是三角形连接, 为便于比较相量关系, 均可以相量始(末)端重合画图。

第二步: 分别推导并作出一次侧、二次侧线电压相量图, 如图 1-2-10(d)(e) 所示。

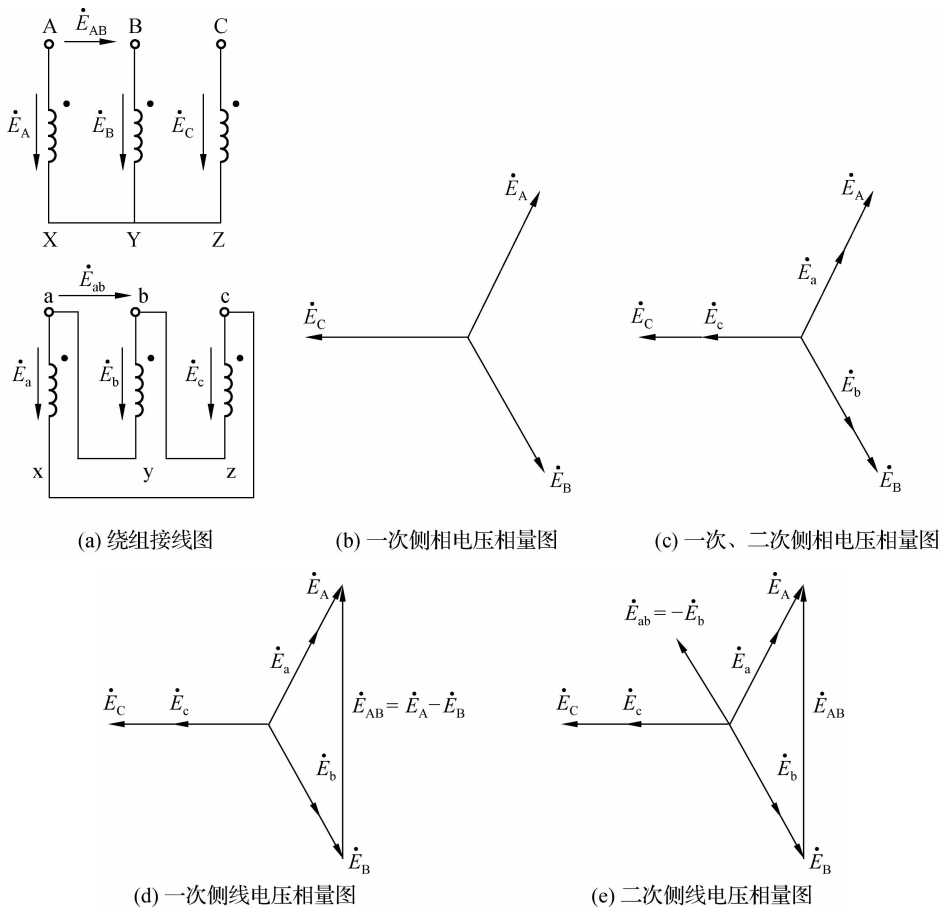
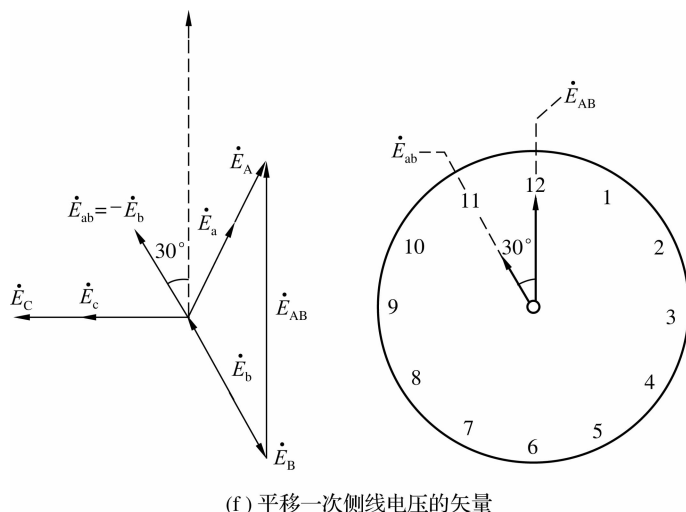


图 1-2-10 “三步法”判断联结组别



续图 1-2-10 “三步法”判断联结组别

第三步: 平移一次侧线电压的矢量, 使其末端与二次侧线电压的矢量末端重合, 如图 1-2-10(f), 按钟表表示法判断联结组别的类型为 Yd-11 联结组。

经分析, Yy 联结总共可以得到 6 种偶数联结组, Yd 联结总共可以得到 6 种奇数联结组, 如图 1-2-11、图 1-2-12 所示。

(1) Yy 联结 (6 种)。

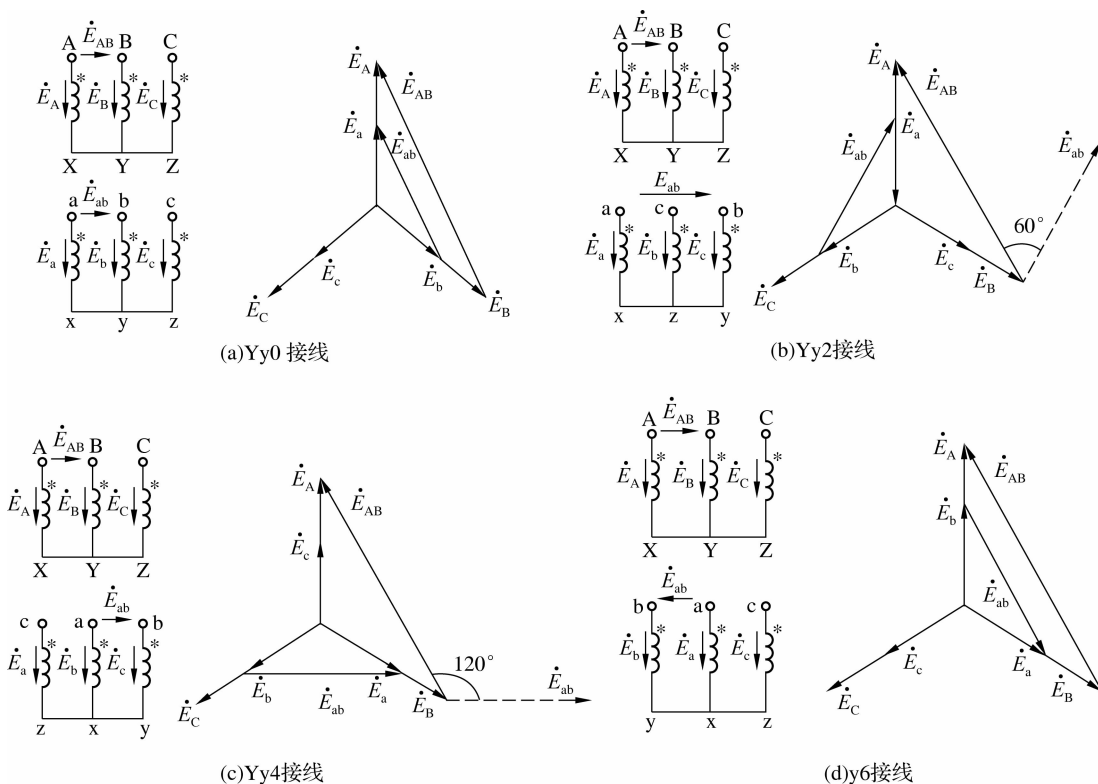
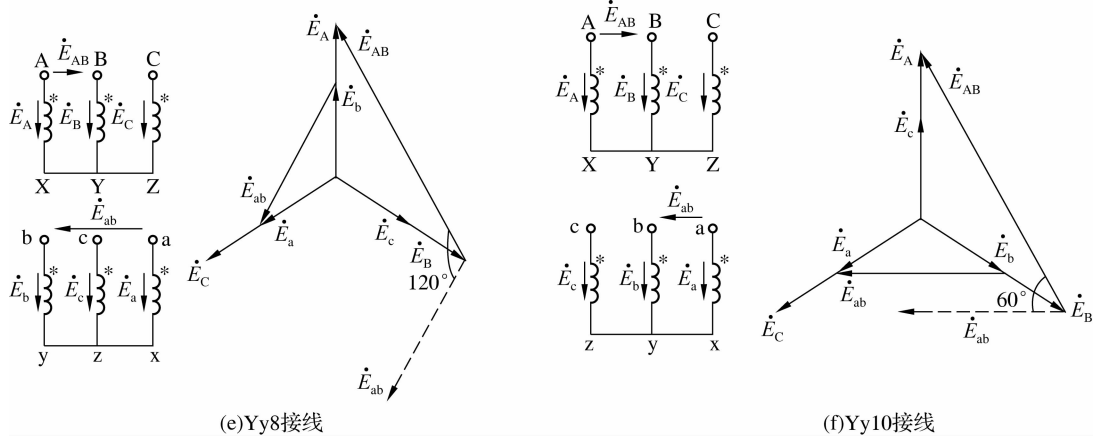


图 1-2-11 Yy 6 种联结组示意图



续图 1-2-11 Yy 6 种联结组示意图



微课  
三相变压器的  
联结组

(2) Yd 联结(6 种)。

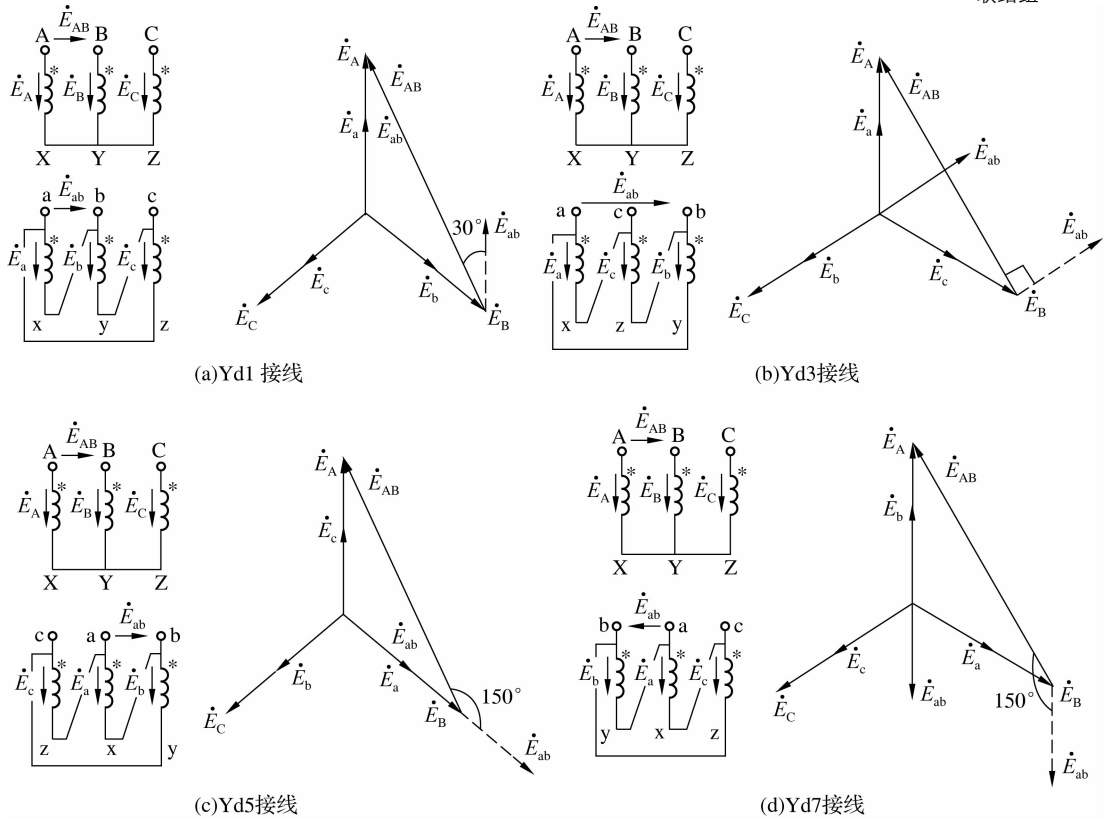


图 1-2-12 Yd 6 种联结组示意图