



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

电机与电气控制技术

(电气运行与控制专业)

主编 赵承荻



高等教育出版社

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

电机与电气控制技术

(电气运行与控制专业)

主 编 赵承获
责任主审 吴锡龙
审 稿 高联辉 任永德

高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业教育国家规划教材,是根据2001年教育部颁发的《中等职业学校电气运行与控制专业教学指导方案》中主干课程《电机与电气控制技术教学基本要求》,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的。

本书的主要内容有:变压器、异步电动机、直流电机、特种电机、常用低压电器、继电器-接触器控制电路、常用机床的电气控制、交流桥式起重机的电气控制、交流电梯的电气控制、实验与实训等。内容上突出实践性、应用性,体现新知识、新技术、新产品、新应用。

本书可作为全国中等职业学校电气运行与控制专业及其他相关专业3、4年学制的教学用书,也可作为岗位培训用书或自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术/赵承荻主编. —北京:高等教育出版社,2002.8
中等职业教育国家规划教材
ISBN 7-04-010930-1

I.电… II.赵… III.①电机学-专业学校-教材②电气控制-专业学校-教材 IV.①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第039427号

电机与电气控制技术

赵承荻 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街55号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 北京市朝阳区北苑印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 19
字 数 440 000
插 页 1

版 次 2002年8月第1版
印 次 2002年8月第1次印刷
定 价 23.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向21世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1号)的精神,我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写,从2001年秋季开学起,国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想,从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发,注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本,努力为教材选用提供比较和选择,满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材,并在使用过程中,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

本书是中等职业教育国家规划教材,是根据2001年教育部颁发的《中等职业教育电气运行与控制专业教学指导方案》中主干课程《电机与电气控制技术教学基本要求》,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的,可作为全国中等职业学校电气运行与控制专业及其他相关专业的教学用书。

随着我国社会、经济、科技的发展和教育结构的调整,全国中等职业学校的培养目标和业务规格定位在以3年制为主的“高素质劳动者和中初级专门人才”上。因此本书在与以前传统的中专相关教材相比,在减少变压器、交直流电机及拖动理论分析及叙述方面作了较大的努力,把重点放在电机及电器结构特点分析、应用及检修等方面,并十分注意教材内容的更新,以适应当前技术水平不断发展需要。通过本书的教学使学生掌握变压器、交直流电机、常用低压电器的基本结构、工作原理及实践应用,掌握常用电动机的控制电路及生产机械控制电路,具有解决生产实际中电气控制一般问题的能力,并使学生了解电气控制技术的发展方向,使学生的素质得到全面提高。

本书配有实验实训内容,总教学时数为108~136学时,书中打*号的部分是供选学的内容,各校可根据专业设置情况、培养目标的要求及具体情况机动掌握。具体建议学时分配方案如表1及表2所示。

表1 136学时建议方案

| 章 | 内 容 | 学 时 数 | | | |
|---|--------------|-------|-----|------|----|
| | | 合计 | 讲授 | 实验实训 | 机动 |
| 一 | 变压器 | 14 | 10 | 4 | |
| 二 | 异步电动机 | 26 | 22 | 4 | |
| 三 | 直流电机 | 10 | 8 | 2 | |
| 四 | 特种电机 | 4 | 4 | | |
| 五 | 常用低压电器 | 8 | 8 | | |
| 六 | 继电器-接触器控制电路 | 16 | 12 | 4 | |
| 七 | 常用机床的电气控制 | 26 | 24 | 2 | |
| 八 | 交流桥式起重机的电气控制 | 8 | 4 | 4 | |
| 九 | 交流电梯的电气控制 | 16 | 14 | 2 | |
| | 机动 | 8 | | | 8 |
| | 总计 | 136 | 106 | 22 | 8 |

表 2 108 学时建议方案

| 章 | 内 容 | 学 时 数 | | | |
|---|---------------|-------|----|------|----|
| | | 合计 | 讲授 | 实验实训 | 机动 |
| 一 | 变压器 | 12 | 8 | 4 | |
| 二 | 异步电动机 | 20 | 16 | 4 | |
| 三 | 直流电机 | 8 | 8 | | |
| 四 | 特种电机 | 4 | 4 | | |
| 五 | 常用低压电器 | 8 | 8 | | |
| 六 | 继电器 - 接触器控制电路 | 14 | 10 | 4 | |
| 七 | 常用机床的电气控制 | 18 | 16 | 2 | |
| 八 | 交流桥式起重机的电气控制 | 6 | 4 | 2 | |
| 九 | 交流电梯的电气控制 | 14 | 12 | 2 | |
| | 机动 | 4 | | | 4 |
| | 总计 | 108 | 86 | 18 | 4 |

本书由湖南铁道职业技术学院赵承获主编,广州轻工业学校李乃夫、湖南铁道职业技术学院徐峰、武汉水运工业学校陈琰参编。具体编写分工是赵承获编写第一、二、三章,徐峰编写第五、六章,李乃夫编写第七、八章,陈琰编写第四、九章,附录为四人合编。

由于编者学识和水平有限,书中必然存在不少缺点、疏漏及其他不足之处,恳请使用本书的教师、学生及读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

目 录

| | | | |
|-------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 第一章 变压器 | 1 | 第一节 低压电器的基本知识 | 115 |
| 第一节 变压器的用途及分类 | 1 | 第二节 刀开关和组合开关 | 118 |
| 第二节 单相变压器的基本结构 | 3 | 第三节 低压断路器 | 121 |
| 第三节 单相变压器的工作原理 | 5 | 第四节 熔断器 | 125 |
| 第四节 变压器的运行特性 | 10 | 第五节 主令电器 | 130 |
| 第五节 三相变压器 | 12 | 第六节 接触器 | 135 |
| 第六节 其他用途变压器 | 22 | 第七节 继电器 | 138 |
| 思考题与习题 | 29 | 思考题与习题 | 146 |
| 第二章 异步电动机 | 31 | 第六章 继电器-接触器控制电路 | 148 |
| 第一节 三相异步电动机的工作原理 | 31 | 第一节 电气控制电路的原理图与接线图 | 148 |
| 第二节 三相异步电动机的结构 | 35 | 第二节 三相异步电动机直接起动控制电路 | 152 |
| 第三节 三相异步电动机定子绕组 | 46 | 第三节 三相异步电动机降压起动控制电路 | 158 |
| 第四节 三相异步电动机的运行原理与特性 | 55 | 第四节 三相异步电动机制动控制电路 | 163 |
| 第五节 三相异步电动机的起动 | 62 | 第五节 继电器-接触器控制电路的简单设计 | 167 |
| 第六节 三相异步电动机的调速 | 66 | 思考题与习题 | 171 |
| 第七节 三相异步电动机的制动 | 70 | 第七章 常用机床的电气控制 | 173 |
| 第八节 三相异步电动机的选用 | 72 | 第一节 CA6140型普通车床电气控制电路 | 174 |
| 第九节 单相异步电动机 | 74 | 第二节 M7130型平面磨床电气控制电路 | 180 |
| 思考题与习题 | 83 | 第三节 Z3040型摇臂钻床电气控制电路 | 186 |
| 第三章 直流电机 | 86 | 第四节 X62W型万能铣床电气控制电路 | 193 |
| 第一节 直流电机的工作原理 | 86 | 第五节 T68型卧式镗床电气控制电路 | 201 |
| 第二节 直流电动机的结构 | 87 | 第六节 组合机床单机电气控制电路 | 210 |
| 第三节 直流电机的电动势、转矩和功率 | 92 | 第七节 机床电气设备的日常维护、保养和检修 | 216 |
| 第四节 直流电动机的工作特性 | 94 | 思考题与习题 | 219 |
| 第五节 直流电动机的起动、调速、反转与制动 | 95 | 第八章 交流桥式起重机的电气控制 | 223 |
| 第六节 直流电动机的应用 | 100 | 第一节 交流桥式起重机的结构及控制要求 | 223 |
| 思考题与习题 | 101 | 第二节 交流桥式起重机的主要控制设备 | 226 |
| 第四章 特种电机 | 102 | 第三节 10t交流桥式起重机控制电路 | 228 |
| 第一节 伺服电机 | 102 | | |
| 第二节 步进电机 | 105 | | |
| 第三节 直线电动机 | 109 | | |
| 第四节 测速发电机 | 112 | | |
| 思考题与习题 | 114 | | |
| 第五章 常用低压电器 | 115 | | |

| | | | |
|----------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 思考题与习题 | 232 | 与制动 | 269 |
| 第九章 交流电梯的电气控制 | 234 | 实验实训五 并励直流电动机的起动、 | |
| 第一节 交流电梯的结构及控制要求 | 234 | 调速和反转 | 272 |
| 第二节 交流电梯的基本控制电路及控制 | | 实验实训六 三相异步电动机正、反转 | |
| 环节 | 238 | 控制电路 | 276 |
| 第三节 交流电梯的安全保护系统及常见 | | 实验实训七 三相异步电动机星→三角降压 | |
| 故障分析 | 250 | 起动控制电路 | 279 |
| 思考题与习题 | 257 | 实验实训八 普通车床电气控制电路模拟 | |
| 附录 实验与实训 | | 安装 | 282 |
| 实验实训一 单相变压器的空载及短路 | | 实验实训九 凸轮控制器控制绕线转子异步 | |
| 试验 | 259 | 电动机电路 | 286 |
| 实验实训二 三相变压器的极性和联结 | | 实验实训十 交流桥式起重机现场参观 | 289 |
| 组别接线 | 262 | 实验实训十一 交流电梯现场参观 | 290 |
| 实验实训三 交流电动机的通用测试 | 265 | 参考文献 | 292 |
| 实验实训四 三相异步电动机的起动、反转 | | | |

第一章 变 压 器

第一节 变压器的用途及分类

变压器是一种常见的静止电气设备,它利用电磁感应原理,将某一数值的交变电压变换为同频率的另一数值的交变电压。变压器在许多方面都得到了广泛的应用,如电力系统中的输、配电和电子技术领域、测试技术领域、焊接技术领域等。

一、变压器的用途

变压器最主要的用途是在输、配电系统。由发电站发出的电能在向用户输送的过程中,通常需用很长的输电线,根据 $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$,在输送功率 P 和负载的功率因数 $\cos \varphi$ 一定时,输电线路上的电压 U 越高,则流过输电线路中的电流 I 就越小。这不仅减小了输电线的截面积,节约了导体材料,同时还可减小输电线路的功率损耗。因此,目前世界各国在电能的输送与分配方面都朝建立高电压、大功率的电力网系统方向发展,以便集中输送、统一调度与分配电能。这就促使输电线路的电压由高压(110~220 kV)向超高压(330~750 kV)和特高压(750 kV 以上)不断升级。目前我国高压输电的电压等级有 110 kV、220 kV、330 kV 及 500 kV 等多种。发电机本身由于其结构及所用绝缘材料的限制,不可能直接发出这样的高压,因此在输电时必须首先通过升压变电站,利用变压器将电压升高,其过程如图 1-1 上部所示。

高压电能输送到用电区后,为了保证用电安全和符合用电设备的电压等级要求,还必须通过各级降压变电站,利用变压器将电压降低。例如工厂输电线路,高压为 35 kV 及 10 kV 等,低压为 380 V、220 V 等。图 1-1 所示为三相电力系统输电的示意图。

综上所述可见,变压器是输、配电系统中不可缺少的重要电气设备,从发电厂发出的电压经升压变压器升压,输送到用户区后,再经降压变压器降压供电给用户,中间一般要经过 4~5 次,甚至是 8~9 次变压器的升降压。根据最近的统计资料显示,1 kW 的发电设备需 8~8.5 kV·A 变压器容量与之配套,由此可见,在电力系统中变压器是容量最多最大的电气设备。我们知道电能传输过程中会有能量的损耗,主要是输电线路的损耗及变压器的损耗,它占整个供电容量的 5%~9%,这是一个相当可观的数字。例如我国 2000 年发电设备的总装机容量约为 3.16 亿千瓦,则输电线路及变压器损耗的部分约为 1 600~2 800 万千瓦,它相当于目前我国 10 到 20 个装机容量最大的火力发电厂的总和。在这个能量损耗中,变压器的损耗最大,约占 60% 左右,因此变压器效率的高低成为输、配电系统中一个突出的问题,我国从 20 世纪 70 年代末期开始研制高效节能变压器,其换代过程为 SJ→S5→S7→S9→SCB→SH11。目前大批量生产的是 S9 低损耗节能变压器,并要求逐步淘汰正在使用中的旧型号变压器,据初步估算采用低损耗变压器所需的投资费用可在 4~5 年时间内从节约的电费中收回。

变压器除用于改变电压外,还可用来改变电流、变换阻抗以及产生脉冲等。

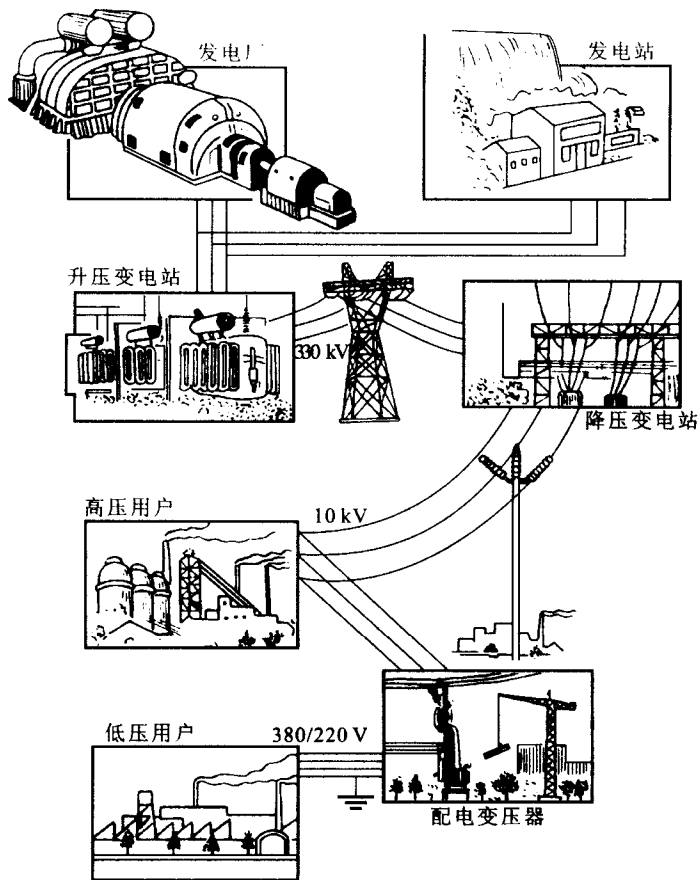


图 1-1 三相电力系统示意图

二、变压器的分类

变压器种类很多,通常可按其用途、绕组结构、铁心结构、相数和冷却方式等进行分类。

(一) 按用途分类

1. 电力变压器

用作电能的输送与分配,上面介绍的即属于电力变压器,这是生产量最多、使用最广泛的变压器。按其功能不同又可分为升压变压器、降压变压器和配电变压器等。

2. 特种变压器

在特殊场合使用的变压器,如作为焊接电源的电焊变压器、专供大功率电炉使用的电炉变压器和将交流电整流成直流电的整流变压器等。

3. 仪用互感器

用于电工测量领域,如电流互感器、电压互感器等。

4. 其他变压器

如试验用的高压变压器、输出电压可调的调压变压器和产生脉冲信号的脉冲变压器等。

(二) 按绕组构成分类

有双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器等。

(三) 按铁心结构分类

有心式变压器、壳式变压器。

(四) 按相数分类

有单相变压器、三相变压器和多相变压器。

(五) 按冷却方式分类

有干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器和充气式变压器等。

第二节 单相变压器的基本结构

单相变压器是指接在单相交流电源上用来改变单相交流电压的变压器,其容量一般都比较小,主要用作控制及照明。它主要由铁心和绕组(又称线圈)两部分组成。铁心和绕组也是三相电力变压器和其他变压器的主要组成部分。

一、铁心

铁心构成变压器磁路系统,并作为变压器的机械骨架。铁心由铁心柱和铁轭两部分组成,铁心柱上套装变压器绕组,铁轭起连接铁心柱使磁路闭合的作用。对铁心的要求是导磁性能要好,磁滞损耗及涡流损耗要尽量小,因此均采用 0.35 mm 厚的硅钢片制作。目前国产硅钢片有热轧硅钢片、冷轧无取向硅钢片、冷轧晶粒取向硅钢片。20 世纪 60~70 年代我国生产的电力变压器主要用热轧硅钢片,由于其铁损耗较大,导磁性能相应地比较差,且铁心叠装系数低(因硅钢片两面均涂有绝缘漆),现已不用。目前国产低损耗节能变压器均用冷轧晶粒取向硅钢片,其铁损耗低,且铁心叠装系数高(因硅钢片表面有氧化膜绝缘,不必再涂绝缘漆)。

根据变压器铁心的结构形式可分为心式变压器和壳式变压器两大类。心式变压器是在两侧的铁心柱上放置绕组,形成绕组包围铁心的形式,如图 1-2 所示。壳式变压器则是在中间的铁

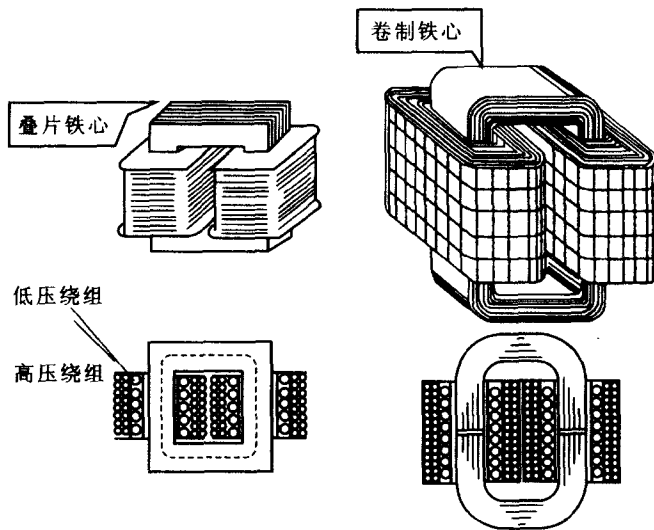


图 1-2 心式变压器结构

心柱上放置绕组,形成铁心包围绕组的形状,如图 1-3 所示。

根据变压器铁心的制作工艺可分叠片式铁心和卷制式铁心两种。

叠片式铁心的心式及壳式变压器的制作顺序是:先将硅钢片冲剪成如图 1-4 所示的形状,再将一片片硅钢片按其接口交错地插入事先绕好并经过绝缘处理的线圈中,如图 1-5 所示,最后用夹件将铁心夹紧。为了减小铁心磁路的磁阻以减小铁心损耗,要求铁心装配时,接缝处的空气隙应越小越好。

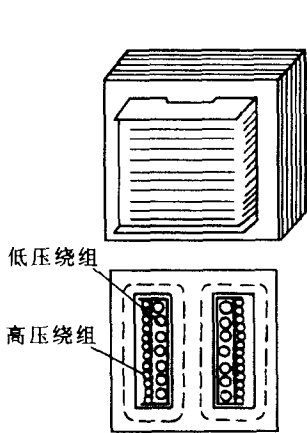


图 1-3 壳式变压器结构

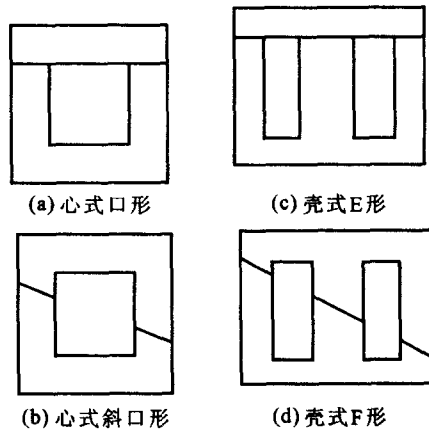


图 1-4 单相小容量变压器铁心形式

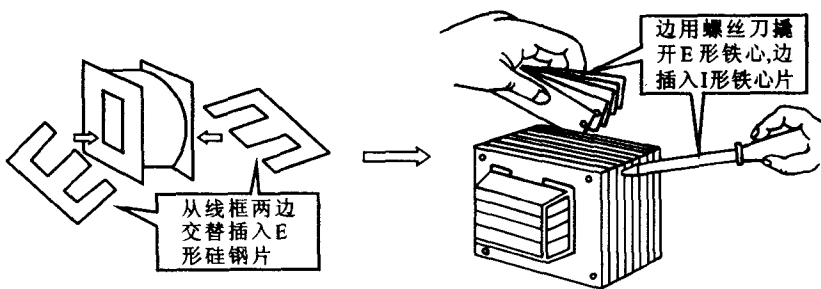


图 1-5 壳式变压器 E 形铁心的装配

卷制式铁心系用整张硅钢片剪裁成一定宽度的硅钢片带后再卷制成“O”字形,固紧后再切割成两个“U”字形。由于其制作工艺简单,正在小容量的单相变压器中逐渐普及。随着制造技术的不断成熟,用卷制铁心的三相电力变压器(500 kV·A 以下)将逐步代替传统的叠片式变压器,其主要优点是重量轻、体积小、空载损耗小、噪声低、生产效率高和质量稳定。

此外,在 20 世纪 60~70 年代,还出现过渐开线式的铁心结构,由于铁心制作工艺较复杂,而未能广泛应用。

二、绕组(线圈)

变压器的线圈通常称为绕组,它是变压器中的电路部分,小型变压器一般用具有绝缘的漆包圆铜线绕制而成,对容量稍大的变压器则用扁铜线或扁铝线绕制。

在变压器中,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。按高压绕组和低压绕组的相互位置和形状不同,绕组可分为同心式和交叠式两种。

(一) 同心式绕组

同心式绕组是将高、低压绕组同心地套装在铁心柱上,如图 1-6 所示。为了便于与铁心绝缘,把低压绕组套装在里面,高压绕组套装在外面。对低压大电流大容量的变压器,由于低压绕组引出线很粗,也可以把它放在外面。高、低压绕组之间留有空隙,可作为油浸式变压器的油道,既利于绕组散热,又作为两绕组之间的绝缘。

同心式绕组按其绕制方法的不同又可分为圆筒式、螺旋式和连续式等多种。同心式绕组的结构简单、制造容易,常用于心式变压器中,这是一种最常见的绕组结构形式,国产电力变压器基本上均采用这种结构。

(二) 交叠式绕组

交叠式绕组又称饼式绕组,它是将高压绕组及低压绕组分成若干个线饼,沿着铁心柱的高度交替排列着。为了便于绝缘,一般最上层和最下层安放低压绕组,如图 1-7 所示。

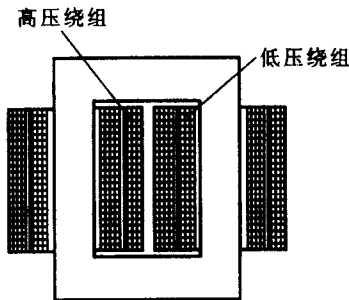


图 1-6 同心式绕组

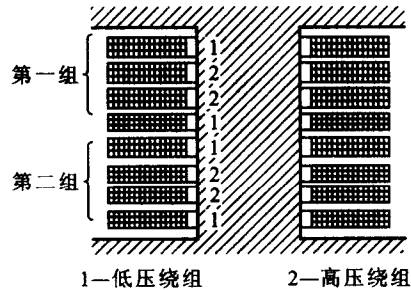


图 1-7 交叠式绕组

交叠式绕组的主要优点是漏抗小、机械强度高、引线方便。这种绕组形式主要用在低电压、大电流的变压器上,如容量较大的电炉变压器、电阻电焊机(如点焊、滚焊和对焊电焊机)变压器等。

第三节 单相变压器的工作原理

图 1-8 为单相变压器的原理示意图,为了分析问题方便起见,将互相绝缘的两个绕组分别画在两个铁心柱上。和电源相连的绕组称为一次绕组,与其有关的各电量的符号均标有下标“1”,如 e_1 、 E_1 、 u_1 、 U_1 、 i_1 、 I_1 等。和用电设备相连接的绕组称为二次绕组,与其有关的各电量的符号均标有下标“2”。

当一次绕组接上交流电源后,交变电流即在铁心中产生交变磁场,磁感线绝大部分都在闭合

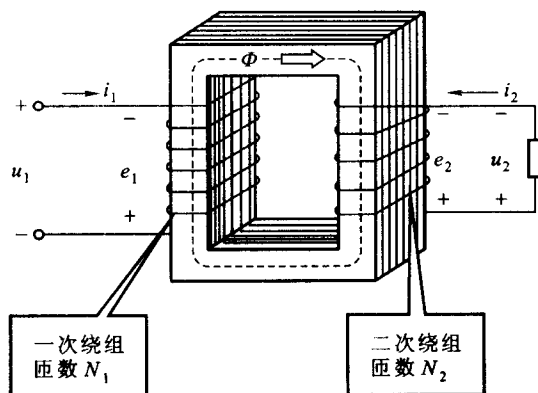


图 1-8 单相变压器原理图

的铁心中通过,由于磁感线穿过二次绕组,从而在二次绕组中产生感应电动势,所以变压器是利用电磁感应原理,将能量从一个绕组传输到另一个绕组而进行工作的。下面我们分别讨论变压器的两种不同工作情况。

一、变压器的空载运行

变压器一次绕组接额定频率和额定电压的电网上,而二次绕组开路,即 $I_2 = 0$ 的工作方式称变压器的空载运行。为了简便起见,将立体图改画成平面图,如图 1-9 所示。

由于变压器接在交流电源上工作,因此通过变压器中的电压、电流、磁通及电动势的大小及方向均随时间在不断地变化,为了正确地表示它们之间的相位关系,必须首先规定它们的参考方向。

原则上可以任意规定参考方向,但是如果规定的方法不同,则同一电磁过程所列出的方程式,其正、负号也将不同。为了统一起见,习惯上都按照“电工惯例”来规定参考方向:

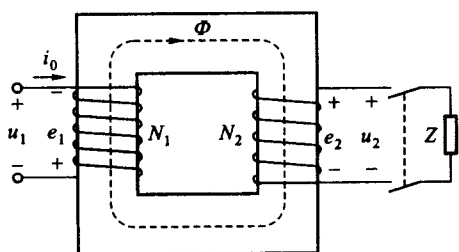


图 1-9 单相变压器空载运行

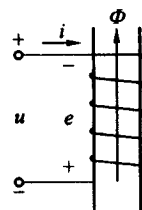


图 1-10 参考方向的规定

(一) 电压的参考方向

在同一支路中,电压的参考方向与电流的参考方向一致。

(二) 磁通的参考方向

磁通的参考方向与电流的参考方向之间符合右手螺旋定则。

(三) 感应电动势的参考方向

由交变磁通 Φ 产生的感应电动势 e , 其参考方向与产生该磁通的电流参考方向一致(即感应电动势 e 与产生它的磁通 Φ 之间符合右手螺旋定则), 如图 1-10 所示。按此参考方向列出的电磁感应定律方程为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

下面分析变压器空载运行时, 各物理量之间的关系。

空载时, 在外加交流电压 u_1 作用下, 一次绕组中通过的电流称为空载电流 i_0 。在电流 i_0 的作用下, 铁心中产生交变磁通 Φ (称为主磁通), 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 , 其大小正比于 $\frac{d\Phi}{dt}$ 。

设
$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

则
$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = -\omega N \Phi_m \cos \omega t$$

$$= 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

可见在相位上, e 滞后于 $\Phi 90^\circ$; 在数值上, 其有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N \Phi_m$$

由此可得

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

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-2)$$

式中, Φ_m 为交变磁通的最大值, N_1 为一次绕组匝数, N_2 为二次绕组匝数, f 为交流电的频率。

由式(1-1)及(1-2)可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

如略去一次绕组中的阻抗不计, 则外加电源电压 U_1 与一次绕组中的感应电动势 E_1 可近似看作相等, 即

$$U_1 \approx E_1$$

而 U_1 与 E_1 的参考方向正好相反, 即电动势 E_1 与外加电压 U_1 相平衡。

在空载情况下, 由于二次绕组开路, 故端电压 U_2 与电动势 E_2 相等, 即

$$U_2 = E_2$$

因此

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-3)$$

$$U_2 = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-4)$$

及

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_u = K \quad (1-5)$$

式中, K_u 称为变压器的变压比, 简称变比, 也可用 K 来表示, 这是变压器中最重要的参数之一。

由式(1-5)可见: 变压器一、二次绕组的电压与一、二次绕组的匝数成正比, 也即变压器有变

换电压的作用。

由式(1-3)可见:对某台变压器而言, f 及 N_1 均为常数,因此当加在变压器上的交流电压有效值 U_1 恒定时,则变压器铁心中的磁通 Φ_m 基本上保持不变。这个恒磁通的概念很重要,在以后的分析中经常会用到。

变压器空载运行时的电路原理图如图1-11。其中一次绕组的两个接线端用“U1”、“U2”表示,二次绕组的两个接线端用“u1”、“u2”表示。

在不计一次绕组的阻抗及变压器中的损耗时,图1-9中的空载电流 I_0 只用来产生磁通 Φ_m ,一次绕组电路为纯电感电路,空载电流 I_0 滞后于电压 U_1 90°,又由于感应电动势 E_1 滞后于电压 U_1 180°,故 E_1 滞后于电流 I_0 90°。另外由前面分析知道 E_1 也滞后于 Φ_m 90°,故 I_0 与 Φ_m 同相位,由此可以作出理想变压器(不计损耗的变压器)空载运行时的相量图,如图1-12所示。

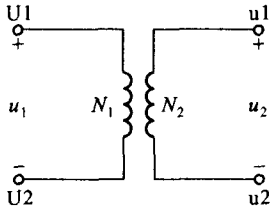


图1-11 单相变压器电路原理图

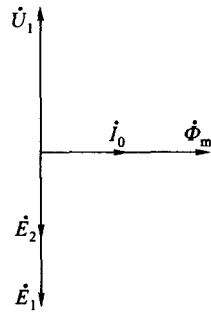


图1-12 理想变压器空载运行相量图

例1-1 如图1-11所示,低压照明变压器一次绕组匝数 $N_1 = 660$ 匝,一次绕组电压 $U_1 = 220$ V,现要求二次绕组输出电压 $U_2 = 36$ V,求二次绕组匝数 N_2 及变比 K_u 。

解 由式(1-5)可得

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1 = \frac{36}{220} \times 660 \text{ 匝} = 108 \text{ 匝}$$

$$K_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{36} = 6.1$$

通常我们把 $K_u > 1$ (即 $U_1 > U_2, N_1 > N_2$)的变压器称为降压变压器; $K_u < 1$ 的变压器称为升压变压器。

二、变压器的负载运行

变压器一次绕组接额定电压,二次绕组与负载相连的运行状态称为变压器的负载运行,如图1-13所示。此时二次绕组中有电流 i_2 通过,由于该电流是依据电磁感应原理由一次绕组感应而产生,因此一次绕组中的电流也由空载电流 i_0 变为负载

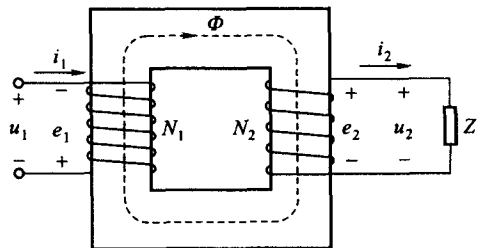


图1-13 单相变压器负载运行

电流 i_1 。下面分析一、二次绕组中电流的关系。

二次绕组中的电流 i_2 所产生的磁通势 $N_2 i_2$ 将在铁心中产生磁通 Φ_2 ，它力图改变铁心中的主磁通 Φ_m ，但由前面分析的恒磁通的概念可知，由于加在一次绕组上的电压有效值 U_1 不变，因此主磁通 Φ_m 基本不变，故随着 i_2 的出现，一次绕组中通过的电流将从 i_0 增加到 i_1 ，一次绕组的磁通势也将由 $N_1 i_0$ 增加到 $N_1 i_1$ ，它所增加的部分正好与二次绕组的磁通势 $N_2 i_2$ 相抵消，从而维持铁心中的主磁通 Φ_m 的大小不变。由此可得变压器负载运行时的磁通势平衡方程式为

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0 \quad (1-6)$$

由于变压器的空载电流 \dot{I}_0 很小，特别是在变压器接近满载时， $N_1 \dot{I}_0$ 相对于 $N_1 \dot{I}_1$ 或 $N_2 \dot{I}_2$ 而言基本上可以忽略不计，于是可得变压器一、二次绕组磁通势的有效值关系为

$$N_1 I_1 \approx N_2 I_2$$

即

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

式中， K_i 称为变压器的变流比。

式(1-7)表明，变压器一、二次绕组中的电流与一、二次绕组的匝数成反比，即变压器也有变换电流的作用，且电流的大小与匝数成反比。

由式(1-7)可得出：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；反之低压绕组匝数少，通过的电流大，所用的导线较粗。

三、变压器的阻抗变换

变压器不但具有电压变换和电流变换的作用，还具有阻抗变换的作用，如图 1-14 所示，当变压器二次绕组接上阻抗为 Z 的负载后，则

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

式中， $Z' = \frac{U_1}{I_1}$ 相当于直接接在一次绕组上的等效阻抗，如图 1-14 所示。故

$$Z' = K^2 Z \quad (1-9)$$

可见接在变压器二次绕组上的负载 Z 与不经过变压器直接接在电源上的负载 Z' 相比，减小到 $1/K^2$ 倍。换句话说也就是负载阻抗通过变压器接电源时，相当于阻抗增加到 K^2 倍。

在电子电路中，为了获得较大的功率输出往往对输出电路的输出阻抗与所接的负载阻抗之间有一定的要求。例如对音响设备来讲，为了能在扬声器中获得最好的音响效果(获得最大的功率输出)，要求音响设备输出的阻抗与扬声器的阻抗尽量相等。但在实际上扬声器的阻抗往往只有

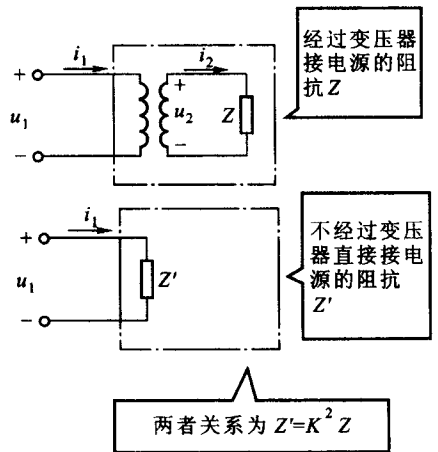


图 1-14 变压器的阻抗变换