



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

电厂及变电站电气运行专业

主编 叶水音



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



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

电厂及变电站电气运行专业

主 编 叶水音

责任主审 宗 伟

审 稿 杨学勤 林宪枢



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本教材是根据教育部《关于全面推进素质教育深化中等职业教育教学改革的意见》中对教材的编写要求编写的。

本书共分四个模块,内容有:变压器、同步电机、异步电机、直流电机。

全书各环节的要求、目的明确,条理清晰,论述严谨,文字通顺,便于教学和自学,并精选了一些有助于建立概念、掌握方法、联系实际的例题分列于各单元中。每单元之后有练习题便于检测学习的效果。

本书除作为中等职业教育教材外,还适用于各自学者作为提高专业知识的工具书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机/叶水音主编. -北京:中国电力出版社, 2001

中等职业教育国家规划教材

ISBN 7-5083-0756-9

I. 电... II. 叶... III. 电机-专业学校-教材
IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 066546 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 316 千字

印数 0001—4000 册 定价 16.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

电力中等职业教育国家规划教材

编委会

主 任 张成杰

副主任 杨昌元 宗 健 朱良镭

秘书长 尚锦山 马家斌

委 员 丁 雁 王玉清 王宝贵 李志丽 杨卫民

杨元峰 何定焕 宋文复 林 东 欧晓东

胡亚东 柏吉宽 侯林军 袁建文 涂建华

梁宏蕴

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

本书是根据国家教育部制定的“中等职业学校电厂及变电站电气运行专业电机学课程教学大纲”的要求编写的。编写内容着重阐述物理概念，尽量联系电力生产实践，力求克服以往教材内容存在“三偏”的缺点，做到重点突出，并在编写体例上尽可能改变过去教材过于注重学科系统性、完整性的倾向，采用模块结构，并以“课题”的方式阐述电机学的基本内容。

本书可作为中等职业学校电力类专业或相近专业的教材，亦可作为电力类中、高级工的培训教材。并可供从事电气类工作的技术人员和教学人员参考。

本书由泉州电力学校叶水音高级讲师担任主编，并编写同步电机部分，江西电力职工教育中心邹珺讲师编写变压器部分，泉州电力学校李启煌讲师编写异步电机和直流电机部分。

全书由保定电力学校刘景峰高级讲师担任主审。在编写过程中得到同行们的大力支持和帮助，在此谨致谢意。

由于编者水平有限，书中可能还有不少缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编 者

2001年8月



中等职业教育国家规划教材出版说明

前言

绪论	1
模块一 变压器	4
第一单元 变压器的基本知识和结构	4
第二单元 变压器的运行原理	10
第三单元 三相变压器	32
第四单元 电力系统中的特种变压器	40
第五单元 变压器的运行	48
模块二 同步电机	65
第一单元 同步发电机的基本工作原理和结构	65
第二单元 交流绕组及其电动势和磁动势	75
第三单元 同步发电机的运行原理和运行特性	103
第四单元 同步发电机的并列运行	119
第五单元 同步发电机的异常运行	139
模块三 异步电机	152
第一单元 异步电动机的基本工作原理和结构	152
第二单元 三相异步电动机的运行原理及工作特性	159
第三单元 三相异步电动机的起动与调速	176
第四单元 单相异步电动机	185
第五单元 异步电动机的异常运行	188
模块四 直流电机	191
第一单元 直流电机的基本工作原理和结构	191
第二单元 直流电机的基本理论	195
第三单元 直流发电机	205
第四单元 直流电动机	211

绪 论

本书以课题的形式讨论电力系统中常用的变压器、同步电机、异步电机和直流电机的基本结构、基本原理和运行性能。

下面简单介绍电机在国民经济建设中特别是电力系统中的作用、电机工业的发展以及电机学的特点。

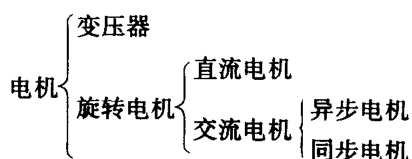
一、电机在电力系统中的作用

电能是现代最主要的能源。在发电厂中，发电机由汽轮机或水轮机驱动，把机械能转换成电能。为了经济地传输和分配电能，采用变压器升高电压，再把电能送到远距离的用电地区，然后再经过变压器降低电压供用户使用。

随着我国现代化事业的发展，各种不同类型的电机在工农业、国防、文教、医疗以及日常生活中的应用愈来愈广泛。

二、电机制造工业的发展简况

电机的发展是从 19 世纪初开始的，1821 年法拉第进行通电导体在磁场中产生电磁力的实验，发现了电动机的作用原理之后，又在 1831 年提出了电磁感应定律，从而奠定了发电机的理论基础。经过一个半世纪的发展，目前电机的制造技术已相当完善，电机应用也十分普遍，其类型也相当齐全。电机种类虽然繁多，但大致可归纳为：



上述各类电机就其工作原理来说，都是建立在电磁感应定律和电磁力定律之上的。电机一般采用良好的导磁材料和导电材料制成相应的磁路和电路系统，用以进行电磁感应和产生电磁力，从而产生电磁功率和电磁转矩，达到转换和传递能量的目的。

随着科学技术和电力工业的不断发展，电机制造工艺目前已发展到相当完善的阶段。电机的容量也不断地增大，这已成为电机制造工业的重要趋势。

电机的体积、重量、所需材料、损耗和造价等与电机本身的容量并不成正比关系。机组容量愈大，单位容量所用材料、损耗和造价就愈低，综合管理的经济效益也愈高。单机容量的不断提高是与导磁、导电和绝缘材料的改进，以及电机冷却技术的进步紧密相关的。电机的冷却方式已由外冷发展到内冷，相继制成了使用空气、氢气和 water 等不同冷却介质的发电机。值得提出的是定子和转子导体内部都采用水冷的技术（简称双水内冷），首先是在我国取得成功的，以后不少国家也相继采用。

我国电机制造工业的发展是十分迅速的，1970 年制成了 330kV、360MVA 的大型电力变压器，1972 年制造了 300MW 双水内冷汽轮发电机。目前已能制造 550MVA、500kV

的变压器和 600MW 汽轮发电机。随着我国国民经济的迅速发展,我国电机制造工业即将进入世界先进行列。

三、电机学的特点

电机学中的问题,既有单相的又有三相的,既有电的又有磁的,既有时间的又有空间的,既有对称又有不对称的,既有饱和又有不饱和的,既有静止的又有旋转的,既有稳态的又有暂态的等等。为了突出主要矛盾通常采用忽略次要因素,作某些假定的处理方法,使思路更加清晰,物理概念更加明确。

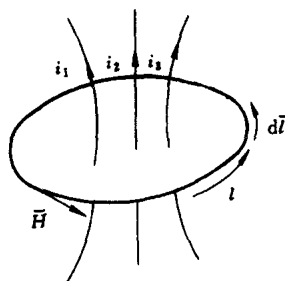
中等职业学校电力类的电机学的内容主要是结合电机的结构,介绍各类电机的基本原理,分析其内部的电磁关系和规律,并作定性或定量的分析。着重突出物理概念,并以稳态运行为主。

四、本教材的特点和教学方法

本教材以“课题”的形式介绍各类电机的基本结构和运行理论,改变过去中等职业教育以“学科体系”的教学模式。可根据专业、职业的需要有针对性地选择有关的“课题”,体现了实用原则,尽量避免学科系统化的倾向,教学中注意删繁就简,简化某些推导和论证。注意技能的培养,把讲授、实习、实验作为学好本课程三个必不可少的方面。

五、分析电机原理常用的基本定律

1. 全电流定律



如图 0-1 所示,设空间有多根载流导体,导体中的电流分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 ……,则沿任何闭合路径 L ,磁场强度 $\vec{H}$ 的线积分 $\oint_L \vec{H} d\vec{l}$,等于该闭合回路包围的所有导体电流的代数和,即

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = i_1 + i_2 + i_3 + \dots = \sum i \quad (0-1)$$

全电流定律在电机原理的研究中,应用很频繁,是各类电机的磁路计算基础。根据电机和变压器磁路均由多段组成的特点,式 (0-1) 可写成

$$\sum_k^n H_k L_k = \sum I = NI \quad (0-2)$$

式中 H_k ——第 k 段磁路的磁场强度, A/m;

L_k ——第 k 段磁路的平均长度, m;

NI ——磁动势, 安匝。

2. 电磁感应定律

设磁场中有一 N 匝的线圈,当线圈交链的磁通 Φ 发生变化时,线圈中就会产生感应电动势。如果感应电动势假定的正方向与交链的磁通的正方向符合右螺旋定则,如图 0-2 所示,则感应的电动势为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-3)$$

$$\psi = N\Phi$$

式中 ψ ——磁链。

3. 节点电流定律

在电路中的任一节点，各支路电流的代数和为零，

$$\sum i = 0 \quad (0-4)$$

即流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和。

4. 回路电压定律

在电路中，对任一回路，沿任意选定的方向环巡一周，则该回路中所有电动势的代数和等于该回路中所有电压降的代数和，即

$$\sum e = \sum u \quad (0-5)$$

5. 电磁力定律

在磁场中，通电导体将受到电磁力的作用，如果导体与磁场相互垂直，则导体受到的电磁力为

$$f = BLi \quad (0-6)$$

式中 f ——导体受到的电磁力，N；

B ——磁通密度，T；

L ——处在磁场中的导体有效长度，m；

i ——导体中的电流，A。

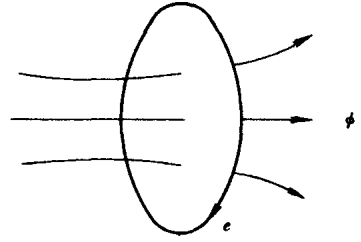


图 0-2 电磁感应定律

变 压 器

变压器是一种静止电器，它利用电磁感应原理，把一种电压、电流的交流电能，变成为同频率的另一种电压、电流的交流电能。

在电力系统中，利用升压变压器将电能经济地输送到用电地区，再用降压变压器把电压降低，以供用户使用。

变压器有许多种类，在国民经济各部门中得到广泛应用，本模块主要讲述在电力系统中作输、配电用的电力变压器，其基本原理也适用于其他变压器。

第一单元 变压器的基本知识和结构

本单元主要介绍变压器的基本原理、主要部件及铭牌。

课题一

基本原理

变压器的基本原理如图 1-1 所示。

两个互相绝缘且匝数不等的绕组，套装在由良好导磁材料制成的闭合铁芯上，其中一个绕组接到交流电源，另一个绕组接负载。

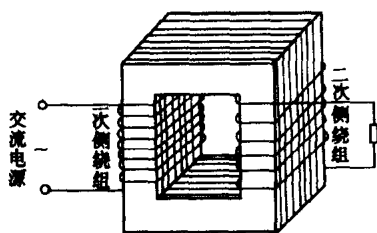


图 1-1 变压器基本原理图

接交流电源的绕组称为一次侧绕组，也称为一次侧；接负载的绕组称为二次侧绕组，也称二次侧。

当一次侧绕组接到交流电源时，一次侧绕组中流过交流电流，并在铁芯中产生交变磁通，其频率与电源电压频率相同。铁芯中的磁通同时交链一次侧、二次侧绕组，根据电磁感应定律，一次侧、二次侧绕组中分别感应出相同频率的电动势，二次侧绕组接上用电设备，便有电能输出，实现了电能的传递。

一次侧、二次侧绕组中感应电动势的大小正比于各自的匝数，同时也近似地等于各自侧的电压。只要一次侧、二次侧绕组匝数不等，便可使一、二次侧具有不同的电动势和电压，变压器就是利用一、二次侧绕组匝数不等实现变压的。

变压器在传递电能的过程中，一、二次侧的电功率基本相等。当两侧电压不等时，两侧电流势必不等，高压侧的电流小，低压侧的电流大，故变压器在改变电压的同时，也改变了电流。

课题三

变压器的分类

为了适应不同的使用目的和工作条件, 变压器有许多种类型, 且各种类型的变压器在结构上、性能上差异也很大。

变压器有许多种分类方法。

按用途分主要有: 电力变压器、调压变压器、仪用互感器、矿用变压器、实验用变压器及特殊变压器 (如整流变压器、电焊变压器、脉冲变压器等);

按绕组数目分有: 双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器;

按冷却方式分有: 干式变压器、油浸式变压器;

一般称 8000~63000kVA 的变压器为大型变压器; 90000kVA 及以上的变压器为特大型变压器。中小型变压器一般没有准确的界限。

课题三

变压器的基本结构

变压器中的最主要部件是铁芯和绕组, 铁芯和绕组装配在一起称为器身。油浸式变压器的器身放在油箱里, 油箱中注满了变压器油。油箱外装有散热器, 油箱上部还装有储油柜、安全气道、套管等。图 1-2 是变压器结构图, 图 1-3 是器身结构示意图。

下面主要介绍变压器的结构部件。

一、铁芯

铁芯是变压器中耦合磁通的主磁路, 应采用磁导率高、磁滞和涡流损耗小的铁磁性材料。目前变压器铁芯大都由单片厚为 0.35mm 和 0.5mm, 其表面涂有绝缘漆的硅钢片叠装而成。

铁芯由硅钢片叠装成型时, 要用交错式叠片法, 使相邻层的接缝处错开, 如图 1-4 所示。

叠装成型后的铁芯, 分为铁芯柱和铁轭两部分。铁芯柱上套装一、二次侧绕组, 上、下铁轭将铁芯柱连接起来, 形成闭合的主磁路。图 1-5 表示铁芯经绑扎、紧固后的情况。

二、绕组

绕组是变压器传递交流电能的电路部分, 常用包有绝缘材料的铜或铝导线绕制而成。

为了使绕组便于制造且具有良好的机械性能, 一般把绕组做成圆筒形。高压绕组的匝数多, 导线细, 低压绕组的匝数少、导线粗。

高、低压绕组同心地套装在铁芯柱上, 低压绕组靠近铁芯柱, 高压绕组再套在低压绕组外面, 高、低压绕组之间以及绕组与铁芯柱之间要可靠地绝缘。

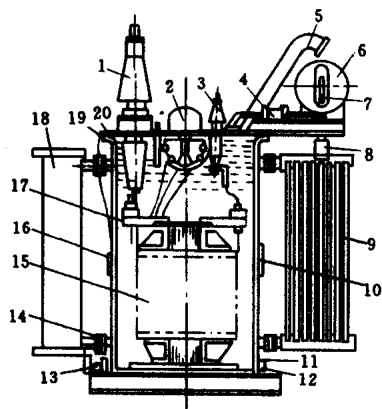


图 1-2 变压器结构

- 1—高压套管; 2—分接开关; 3—低压套管; 4—气体继电器; 5—安全气道 (防爆管); 6—油枕 (储油柜); 7—油位计; 8—呼吸器 (吸湿器); 9—散热器; 10—铭牌; 11—接地螺栓; 12—油样活门; 13—放油阀门; 14—阀门; 15—绕组 (线圈); 16—信号温度计; 17—铁芯; 18—净油器; 19—油箱; 20—变压器油

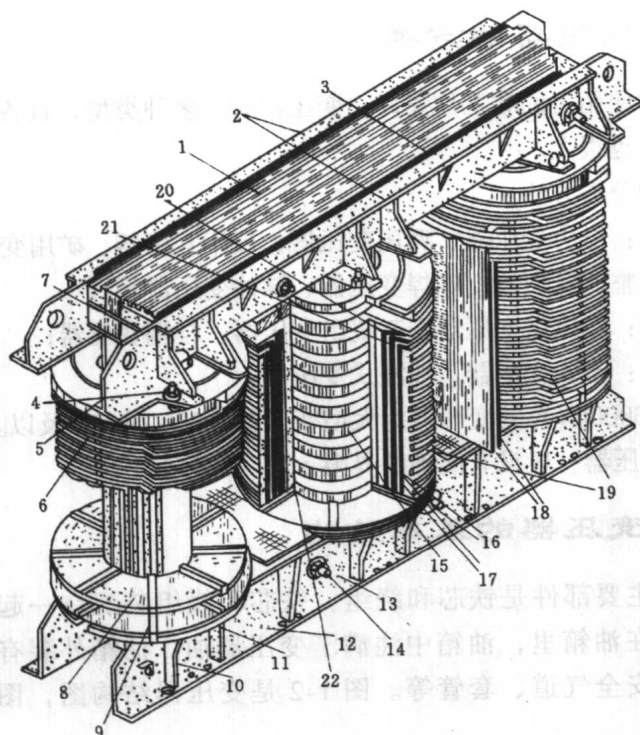


图 1-3 变压器器身结构

- 1—铁轭;2—上夹件;3—上夹件绝缘;4—压钉;5—绝缘纸圈;6—连接片;7—方铁;8—下铁轭绝缘;9—平衡绝缘;10—下夹件加强筋;
11—下夹件上肢板;12—下夹件下肢板;13—下夹件腹板;14—铁轭。
螺杆;15—铁芯柱;16—绝缘纸筒;17—油隙撑条;18—相间隔板;
19—高压绕组;20—角环;21—静电环;22—低压绕组

为了适应不同容量与电压等级的需要,变压器绕组有多种形式,如圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等,如图 1-6 所示。

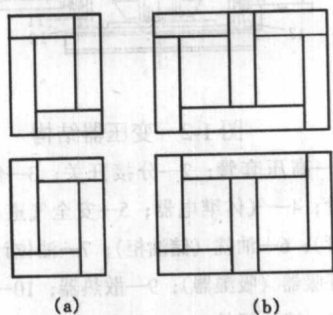


图 1-4 变压器铁芯的交叠装配
(a) 单相变压器; (b) 三相变压器

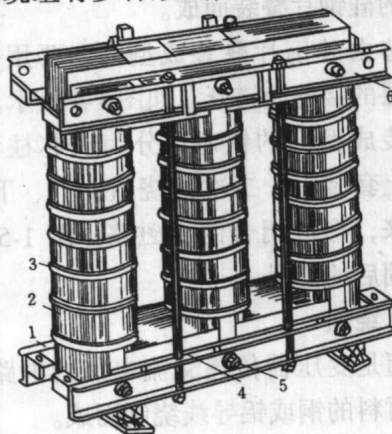


图 1-5 三相三柱式变压器铁芯

- 1—下夹件;2—铁芯柱;3—铁柱绑扎;4—拉
螺杆;5—铁轭螺杆;6—上夹件

三、油箱及变压器油

油浸式变压器的器身,放在充满变压器油的油箱中。油箱用钢板焊成,为了增强冷却

效果，油箱壁上焊有散热管或装设散热器。

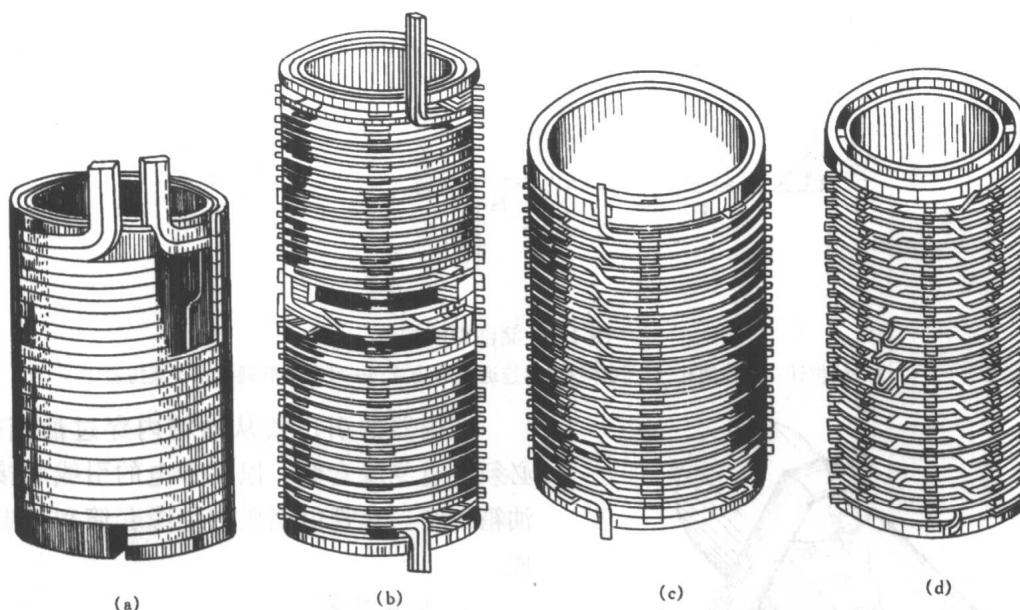


图 1-6 变压器绕组形式

(a) 圆筒式；(b) 螺旋式；(c) 连续式；(d) 纠结式

小容量变压器，采用揭开箱盖起吊器身的普通油箱；大容量变压器器身的重量大，起吊困难，多采用“钟罩”式油箱，即把上节油箱吊起，器身及下节油箱固定不动。

变压器油为矿物油，由石油分馏而得。其作用：一是油的绝缘性能比空气好，可以提高绕组的绝缘强度；二是通过油箱中油的对流作用或强迫油循环流动，使绕组及铁芯中因功率损耗而产生的热量得到散逸，起冷却作用。

四、其他附件

1. 储油柜（或称油枕）

储油柜装在油箱的上部，用连通管与油箱接通，储油柜中储油量一般为油箱中总油量的 8%~10%。

储油柜能容纳油箱中因温度升高而膨胀的变压器油，并限制变压器油与空气的接触面积，减少油受潮和氧化的程度。此外，通过储油柜注入变压器油，还可防止气泡进入变压器内。

储油柜上装有吸湿器，使储油柜上部的空气通过吸湿器与外界空气相通。吸湿器内装有硅胶等吸附剂，用以过滤吸入储油柜内空气中的杂质和水分。图 1-7 为储油柜的构造图。

2. 安全气道（或称防爆管）

安全气道是一根钢质圆管，顶端出口封有一块玻璃或酚醛薄膜片，下部与油箱连通。当变压器内部发生故障时，油箱内压力升高，油和气体冲破玻璃或酚醛薄膜片向外喷出，保护了油箱以免破裂。图 1-8 为安全气道及其连接图。

3. 气体继电器

气体继电器是安装在储油柜与油箱之间的连通管里，是变压器内部故障的保护装置。

4. 绝缘套管

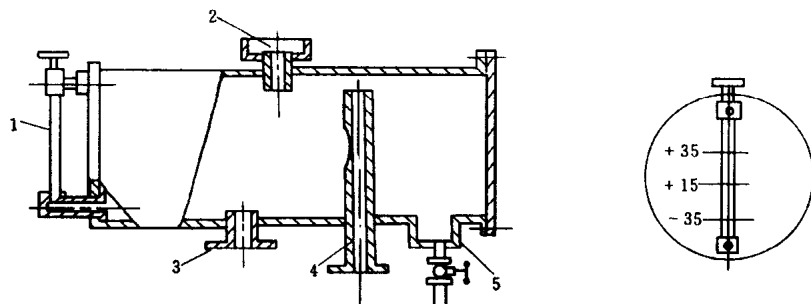


图 1-7 储油柜的构造

1—油位计;2—注油孔;3—气体继电器连通管的法兰;4—呼吸器联通管;5—集污盒

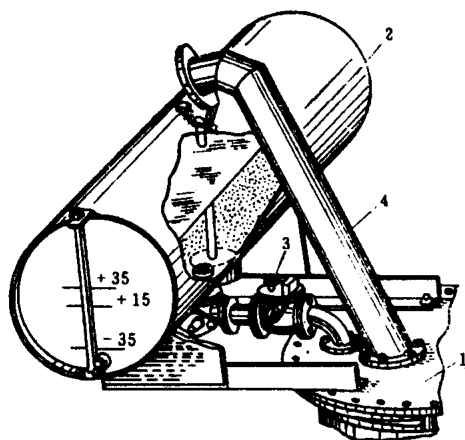


图 1-8 安全气道及其连接图

1—油箱;2—储油柜;
3—气体继电器;4—安全气道

变压器的引出线从油箱内穿过油箱盖时,必须经过绝缘套管,以使带电的引线和接地的油箱绝缘。套管由瓷质的绝缘套筒和导电杆组成。

5. 调压装置

为调节变压器的输出电压,可改变高压绕组的匝数进行小范围内调压。

一般在高压绕组某个部位(如中性点、中部或端部)引出若干个抽头,并把这些抽头连接在可切换的分接开关上。

课题四

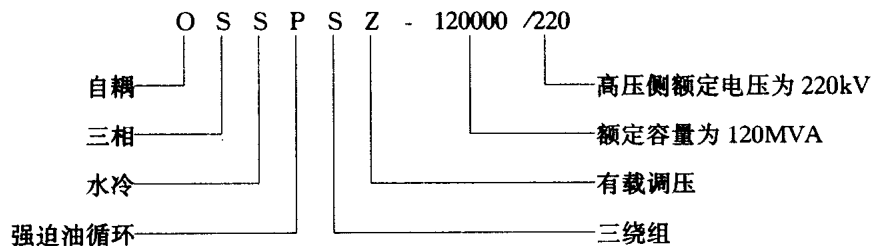
变压器的铭牌数据

每台变压器都在醒目的位置上装有一个铭牌,上面标明了变压器的型号和额定值。所谓

额定值,是指制造厂按照国家标准,对变压器正常使用时的有关参数所做的限额规定。在额定值下运行,可保证变压器长期可靠地工作,并具有优良性能。

一、型号

变压器型号由字母和数字两部分组成,字母代表变压器的基本结构特点,数字代表额定容量(kVA)和高压侧的额定电压(kV),例如:



二、额定值

1. 额定容量 S_N

S_N 指变压器额定运行状态下的视在功率, 单位为 kVA 或 MVA。对于双绕组变压器, 一、二次侧绕组的额定容量相等, 即是变压器的额定容量。

2. 额定电压 U_{1N} / U_{2N}

U_{1N} 为一次侧额定电压。 U_{2N} 为二次侧额定电压, 是指当一次侧接额定电压而二次侧空载 (开路) 时的电压。单位为 kV。三相变压器额定电压指线电压。

3. 额定电流 I_{1N} / I_{2N}

I_{1N} 和 I_{2N} 是分别根据额定容量、额定电压计算出来的一、二次侧电流, 单位为 A。对于三相变压器, 额定电流指线电流。一、二次侧额定电流可用下式计算。

对于单相变压器, 得

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

对于三相变压器, 得

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}}$$

4. 额定频率 f_N

我国规定电力系统的额定频率为 50Hz。

除上述额定值外, 名牌上还标明了温升、连接组、阻抗电压等。



单元小结

1. 电力变压器是依据电磁感应定律进行交流电能传递的静止电器。它是利用一、二次侧匝数不等实现变压的; 但一、二次侧的频率是相同的, 等于电源的频率。

2. 变压器的基本结构部件是铁芯和绕组。铁芯用导磁性能良好的铁磁性材料制成; 一、二次侧绕组套装在铁芯柱上, 它们之间没有电的连接, 只有磁耦合。

3. 变压器铭牌上的额定值, 是正确、安全、可靠地使用变压器的依据。对于三相变压器, 额定电压及额定电流均指线电压和线电流。

习 题

1. 简述变压器的基本工作原理, 为何能改变电压?
2. 变压器一、二次侧电压不相等时, 电流是否相等? 为什么?

3. 把变压器接在直流电源上能工作吗？为什么？
4. 变压器有哪些主要结构部件？各部分有何作用？
5. 一台单相变压器， $S_N = 50\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 10/0.23\text{kV}$ ，试求一、二次侧额定电流。
6. 一台三相变压器， $S_N = 1000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 35/6.3\text{kV}$ ，Y，d (Y/ Δ) 连接，试求一、二次侧额定电流及额定相电流。

第二单元 变压器的运行原理

本单元讲述变压器空载、负载运行时的物理情况，分析各物理量和它们之间的关系，从而建立变压器的基本方程式、等值电路和相量图，继而讲述变压器的空载、短路实验，最后讨论变压器的运行特性，即电压变化率和效率。

本单元以单相降压变压器为例，所得结论完全适用于三相变压器在对称负载下运行时的情况。

在变压器运行分析中，以一次侧电压保持不变为前提，即认为一次侧电压具有额定频率、额定数值和正弦波形的交流电源。

课题一

变压器的空载运行

变压器一次侧绕组接额定频率、额定电压的交流电源，二次侧绕组开路时的运行状态称为空载运行。

一、变压器空载运行时的一般物理状况

图 1-9 为单相降压变压器空载运行时的示意图。A—X 端接入额定频率的额定电压 $\dot{U}_1$ ，二次侧绕组 a—x 端开路。一、二次侧绕组匝数为 N_1 、 N_2 。

当一次侧绕组接交流电压为 $\dot{U}_1$ 的电源时，一次侧绕组便有空载电流 $\dot{I}_0$ 流过。 $\dot{I}_0$ 建立空载磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ ，该磁动势产生空载磁通。为便于研究问题，把磁通等效地分成两部分，如图 1-9 所示：一部分磁通 $\dot{\Phi}_m$ 沿铁芯闭合，同时交链一、二次侧绕组，称为主

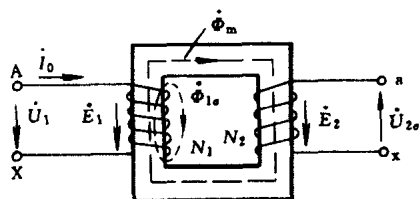


图 1-9 单相变压器空载运行时的示意图

磁通；另一部分磁通 $\dot{\Phi}_{l\sigma}$ 主要沿非铁磁材料（变压器油或空气）闭合，仅与一次侧绕组交链，称为一次侧绕组漏磁通。根据电磁感应定律可知，交变的磁通分别在一、二次侧绕组感应出电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ ；漏磁通在一次侧绕组感应出漏电动势 $\dot{E}_{l\sigma}$ 。

此外，空载电流还在原绕组电阻 r_1 上形成一很