

高职高专机电类专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN JIDIANLEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电机与控制

程书华 主 编
邹 珺 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专机电类专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN JIDIANLEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电机与控制

主 编 程书华

副主编 邹 珺

编 写 张 艳

主 审 赵君有

谭绍琼 王树春 王娟平



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为高职高专机电类专业规划教材。

全书共分八章，主要内容包括变压器、异步电动机、同步电机、直流电机、控制电机、常用低压电器、电动机控制线路和常用机床控制线路。本书的编写基于电气自动化工作过程，注重与工程实际相结合，编入了一些在工程实际中的应用实例，力求将概念、理论、知识、技能融为一体，深入浅出、循序渐进，使专业教材更加生动、形象，具有可操作性。

本书可作为高职高专机电类专业教学用书，也可以作为职业资格和岗位技能培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与控制/程书华主编. —北京：中国电力出版社，2009

高职高专机电类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8591 - 4

I. 电… II. 程… III. 电机—控制系统—高等学校：技术学校—教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 037112 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 6 月第一版 2009 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 369 千字

定价 24.50 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书是根据市场发展与社会需要,结合科学技术的新知识和教育部审定的电气自动化类专业主干课程标准编写而成。本书既可以作为电气自动化专业职业教育教学用书,也可以作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书体现了高等职业教育的性质、任务和培养目标;符合高等职业教育的课程标准和相关职业岗位(群)任职资格和技术要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性;紧密结合高等职业学校学生的素质、知识、能力结构特点,具有教学适应性,具有明显的高等职业教育特色;以电力生产岗位(群)所需要的综合职业能力为依据,以够用为度、实用为本,充分体现了“宽、浅、用、新、能、活”的原则。

在现代电力领域中,电机与控制技术有着广泛的应用,本书的编写基于电气自动化工作过程,注重与工程实际相结合,编入了一些在工程实际中的应用实例,力求将概念、理论、知识、技能融为一体,深入浅出、循序渐进,使专业教材更加生动、形象,具有可操作性。本书编写内容,依次以电机基本原理和基本概念、各类电机应用、低压电器、电机控制线路为顺序安排章节,各模块教学目标明确,针对性强,具有相对的独立性,既可以组合学习,又可以选择学习,有利于不同专业选学各自所需内容。

本书共分八章,第一、二、四章由山西电力职业技术学院程书华编写,第三章由山西电力职业技术学院王娟平与太原第一热电厂王树春工程师合编,第五章由江西电力职业技术学院张燕编写,第六章由江西电力职业技术学院邹珺编写,第七、八章由山西电力职业技术学院谭绍琼编写。全书由程书华统稿。

本书由沈阳工程学院赵君有副教授担任主审,并提出了许多宝贵的意见和建议。另外,在本书的编写过程中,得到了有关院校老师和电力企业工程技术人员的大力支持,在此一并表示感谢!

由于编写水平有限,错谬之处恳请广大读者批评指正。

编者

2009年3月

目 录

前言

第一章 变压器	1
第一节 变压器的工作原理及结构和额定值	1
第二节 单相变压器的空载运行分析	7
第三节 单相变压器的负载运行分析	13
第四节 等效电路参数的测定	17
第五节 标么值	19
第六节 变压器的运行特性	22
第七节 三相变压器	25
第八节 变压器的并联运行	30
第九节 变压器的瞬变过程	33
小结	36
思考题与习题	37
第二章 异步电动机	39
第一节 交流电机的绕组、电动势和磁动势	39
第二节 异步电动机的结构和工作原理	43
第三节 三相异步电动机的运行原理	49
第四节 三相异步电动机的等效电路	54
第五节 三相异步电动机的特性	57
第六节 三相异步电动机的起动和调速	63
第七节 单相异步电动机	72
第八节 异步电动机的异常运行	74
小结	75
思考题与习题	76
第三章 同步电机	78
第一节 同步发电机的工作原理及结构和额定值	78
第二节 同步发电机的电枢反应	83
第三节 同步发电机的电动势方程和相量图	87
第四节 同步发电机的运行特性	90
第五节 同步发电机的并列	93
第六节 同步发电机有功功率的调节和静态稳定	95
第七节 同步发电机无功功率的调节和 V 形曲线	99

第八节 同步电动机和同步调相机	101
小结	104
思考题与习题	104
第四章 直流电机	107
第一节 直流电机的工作原理及结构	107
第二节 直流电机的感应电动势和电磁转矩	111
第三节 电枢反应和换向	113
第四节 直流电机的运行特性	117
第五节 直流电动机的起动和调速	122
小结	125
思考题与习题	125
第五章 控制电机	128
第一节 伺服电动机	128
第二节 力矩电动机	133
第三节 测速发电机	134
第四节 自整角机	138
第五节 旋转变压器	145
第六节 步进电动机	148
第七节 直线电动机	153
小结	155
思考题与习题	157
第六章 常用低压电器	158
第一节 概述	158
第二节 低压开关	161
第三节 主令电器	164
第四节 保护电器	169
第五节 接触器	179
第六节 继电器	184
第七节 常用低压电器故障及排除	193
小结	195
思考题与习题	195
第七章 电动机控制线路	197
第一节 电气控制线路的基本知识	197
第二节 三相异步电动机直接起动的控制电路	199
第三节 三相异步电动机的降压起动控制电路	202
第四节 三相异步电动机电气制动及调速控制系统	208
小结	212
思考题与习题	213

第八章 常用机床控制线路..... 214

 第一节 摇臂钻床的电气控制..... 214

 第二节 万能铣床的电气控制..... 217

 第三节 电气控制线路的设计方法 223

 第四节 PLC 控制电动机的应用..... 227

 小结 234

 思考题与习题..... 234

参考文献..... 236

第一章

变 压 器

变压器是一种静止的电器，它是利用电磁感应原理将一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能，是转移电能而不改变其交流电源频率的静止的电能转换器。

变压器是电力系统中重要的电气设备。众所周知，发电机发出的电压不可能太高，一般只有 $10.5\sim 26\text{kV}$ 。输送一定的电能时，输电线路的电压越高，线路中的电流和损耗就越小。为此，电力系统中需要将交流发电机的输出电压用升压变压器升高到输电电压，通过高压输电线将电能经济地输送到用电地区，然后再用降压变压器逐步将输电电压降到用户需要的配电电压，供用户安全而方便地使用。此外，在其他工业部门中，变压器应用也很广泛。变压器的安装容量约为发电机安装容量的 $6\sim 8$ 倍，所以变压器的生产和使用具有重要的意义。

本章主要研究一般用途的电力变压器，对其他用途的变压器只作简单介绍。为便于分析，在不加说明的情况下，以单相降压变压器为例进行分析。

第一节 变压器的工作原理及结构和额定值

一、变压器的基本工作原理及分类

1. 工作原理

变压器是利用电磁感应原理来升高或降低电压的一种静止的电能转换装置，其主要结构是由两个相互绝缘且匝数不等的绕组套在一个闭合的铁芯上构成的，如图 1-1 所示，绕组之间只有磁的耦合，没有电的直接联系。

变压器工作时，一侧绕组接交流电源，另一侧绕组接负载。变压器接交流电源的一侧，即输入电能的一侧称为一次侧；接负载的一侧，即输出电能的一侧，称为二次侧。

当一次绕组接到交流电源时，一次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。铁芯中的交变磁通同时交链一、二次绕组，根据电磁感应原理，在一、二次绕组中分别感应出频率相同的电动势。根据楞次定律，在一、二次绕组中感应出的电动势之比等于一、二次绕组的匝数比。在一定条件下，一、二次电压之比等于一、二次绕组的电动势之比。由于一、二次绕组的匝数不等，所以一、二次电压不等，从而实现了变压的作用。此时二次绕组接上用电设备，便有电能输出，从而实现了电能的传递。

2. 分类

变压器的种类很多，可按其用途、相数、绕组数、冷却方式和冷却介质等来进行分类。

(1) 按用途分类有电力变压器（包括升压变压器、降压变压器、联络变压器、厂用变压器、发电机变压器），特种变压器（包括调压变压器、试验变压器、电炉变压器、整流变压器、

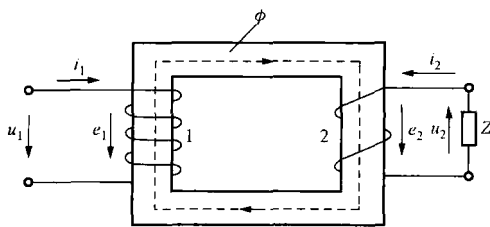


图 1-1 变压器工作原理示意图

电焊变压器等), 仪用互感器 (包括电压互感器、电流互感器) 等。

(2) 按绕组数分类有双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器以及自耦变压器等。

(3) 按铁芯结构分类有心式变压器、组式变压器等。

(4) 按相数分类有单相变压器、三相变压器、多相变压器等。

(5) 按冷却方式和冷却介质分类有油浸式变压器 (包括油浸自冷式变压器、油浸风冷式变压器、油浸强迫油循环式变压器), 干式变压器和充气式变压器等。

二、变压器的基本结构

图 1-2 为一台油浸式电力变压器的外形结构图, 该类变压器的主要部分有器身、油箱、变压器油、散热器、绝缘套管、分接开关、冷却装置及继电保护装置等部件。下面分别作简要介绍。

(一) 器身

变压器中最主要的部件是铁芯和绕组, 它们构成了变压器的器身。

1. 铁芯

变压器的铁芯既是磁路, 又是套装绕组的骨架。铁芯由芯柱和铁轭以及夹紧装置部分组成, 芯柱用来套装绕组, 铁轭将芯柱连接起来, 使之形成闭合磁路。图 1-3 所示为一台三相三柱式变压器铁芯结构图。

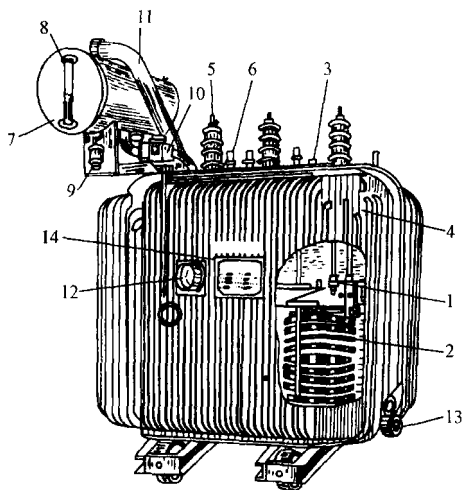


图 1-2 油浸式电力变压器外形结构图

1—铁芯; 2—绕组及绝缘; 3—分接开关; 4—油箱;
5—高压绝缘套管; 6—低压绝缘套管; 7—储油柜;
8—油位计; 9—呼吸器; 10—气体继电器; 11—安全
气道; 12—信号式温度计; 13—放油阀门; 14—铭牌

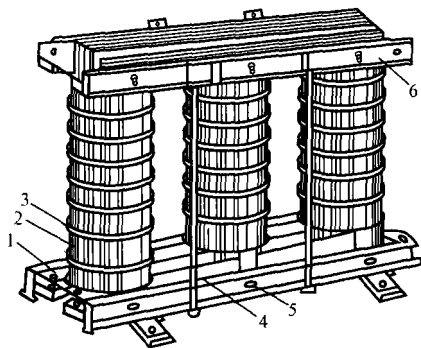


图 1-3 三相三柱式变压器铁芯结构图

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

铁芯的结构可分为心式、壳式、渐开线式、辐射式等。心式变压器的芯柱被绕组包围, 铁轭在上下两端, 如图 1-4 (a) 所示。壳式变压器则是铁芯包围绕组的顶面、底面和侧面, 如图 1-4 (b) 所示。心式结构的变压器的绕组和绝缘装配比较容易, 所以电力变压器常常采用这种结构。壳式结构变压器的机械强度较好, 常用于低压、大电流的变压器或小容量电力变压器, 其绕组能承受住巨大的电磁力。渐开线式铁芯用于成批生产的中、小型变压器, 辐射式铁芯结构一般用于特大型变压器。除此之外, 大容量的变压器由于运输的限制, 需要

降低铁芯高度,采用三芯柱旁轭式结构,如图 1-5 所示。旁轭的截面积与上下轭相同,也为芯柱的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。某些特殊需要的小容量单相变压器采用硅钢带卷制成环形铁芯,如图 1-6 所示,可以节省材料 15%~20%。

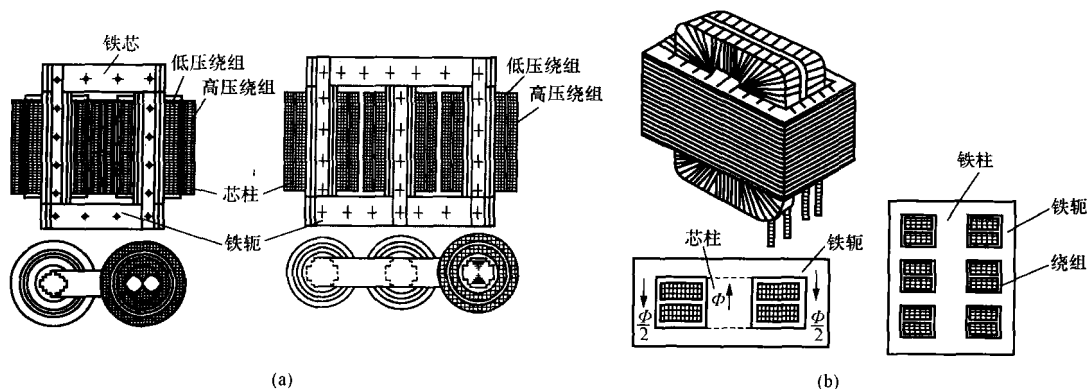


图 1-4 变压器的铁芯绕组装配图

(a) 心式变压器的铁芯绕组装配图; (b) 壳式变压器的铁芯绕组装配图

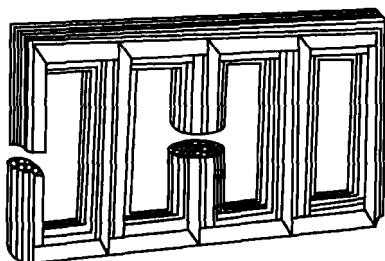


图 1-5 三芯柱旁轭式变压器

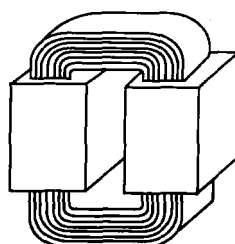


图 1-6 环形式变压器

为减少变压器铁芯损耗,铁芯用单片厚度为 0.35~0.5mm 厚的、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。硅钢片上涂以绝缘漆是为了避免片间短路。在大型电力变压器中,为提高磁导率和减少铁芯损耗,常采用冷轧硅钢片;为减少接缝间隙和励磁电流,有时还采用由冷轧硅钢片卷成的卷片式铁芯。为减小接缝间隙以减小励磁电流,一般采用交错式叠装,使相邻的接缝错开。铁芯的交叠式装配如图 1-7 所示。最近研制采用铁硼系列非晶合金材料制作的铁芯,空载损耗可降低 75%左右,有取代硅钢片的趋势。容量很小的变压器铁芯柱的截面采

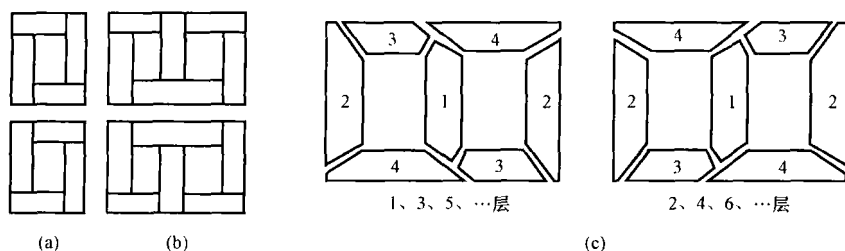


图 1-7 铁芯的交叠式装配

(a) 单相变压器; (b) 三相变压器; (c) 冷轧硅钢片

用正方形,容量较大的变压器一般做成阶梯形。容量越大,铁芯截面越大,所用的级数就越多,越接近圆形,利用率越高。渐开线式铁芯柱的截面为圆形。铁轭的截面有矩形的、T形的、阶梯形的。采用热轧硅钢片时,为了减少励磁电流和铁芯损耗,铁轭的截面一般比芯柱大5%~10%;若采用冷轧硅钢片全斜接缝时,则两者相等。在容量较大的变压器中,为了限制铁芯温度,常在铁芯的叠片之间设置油槽,以增强散热效果。

2. 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圆形或矩形的铜线或铝线绕成。其中输入电能的绕组称为一次绕组,输出电能的绕组称为二次绕组。它们通常套装在同一芯柱上。一次绕组和二次绕组具有不同的匝数、电压和电流,其中电压较高的绕组称为高压绕组,电压较低的称为低压绕组。对于升压变压器,一次绕组为低压绕组,二次绕组为高压绕组;对于降压变压器,情况恰好相反。为了使绕组具有良好的机械性能,同时绕制方便,其外形一般为圆筒形状,从高、低压绕组的相对位置来看,变压器的绕组可分成同心式和交叠式两种基本类型。

芯式变压器都采用同心式绕组,同心式绕组的高、低压绕组同心地套装在芯柱上,为了便于绝缘和易于与分接开关连接,低压绕组靠近铁芯,高压绕组套在外面,高压绕组的匝数多、导线细,低压绕组的匝数少、导线粗。两个绕组之间留有油道以利于冷却。同心式绕组结构简单、制造方便,国产电力变压器均采用这种结构。为了适应不同容量与电压等级的需要,变压器同心式绕组有多种不同的结构型式,如圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等,如图1-8所示。

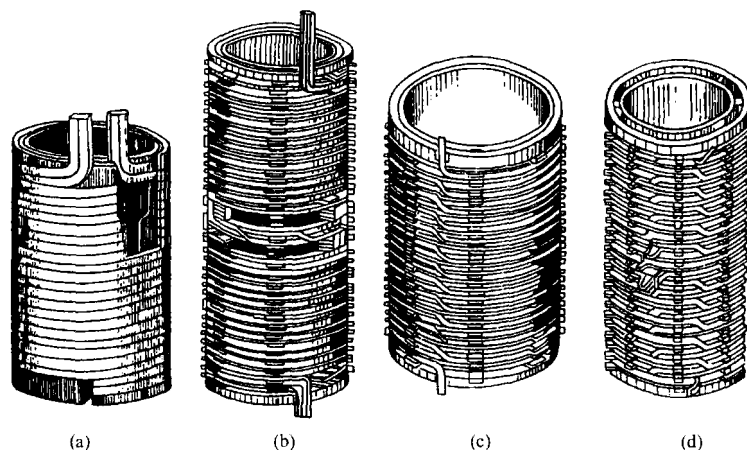


图1-8 同心式绕组型式

(a) 圆筒式; (b) 螺旋式; (c) 连续式; (d) 纠结式

交叠式绕组又称饼式绕组,由饼式元件构成,仅用于壳式变压器。交叠式绕组的高、低压绕组沿芯柱高度方向互相交叠地放置,如图1-9所示。为了减小绝缘距离,通常低压绕组靠近铁轭。交叠式绕组机械强度好,引出线布置方便,多用于低电压、大电流的电焊、电炉变压器及壳式变压器中。

(二) 其他部件

1. 变压器油箱及变压器油

(1) 变压器油箱。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。小容量变压器采用平板式油箱,大容量变压器采用散热器式油箱。油箱一般做成椭圆形,具有较高的机械强度,而且需油量较少。小容量变压器采用揭开箱盖起吊器身的普通箱式油箱;大容量变压器器身质量大,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。

(2) 变压器油。变压器油为矿物油,由石油分馏而得。变压器油的作用有两个:一是油的绝缘性能比空气好,可以提高绕组的绝缘强度,起绝缘作用;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。因此,要求变压器油介电强度高、燃点高、运动黏度低、凝固点低、酸碱度低、杂质和水分少。若变压器油受潮或氧化,则需要过滤。

2. 绝缘套管

变压器的引出线从油箱内部引到箱外时必须经过绝缘套管,以使带电的引线与接地的油箱绝缘。绝缘套管由瓷质的绝缘套筒和导电杆组成,如图 1-10 所示。为了增大外表面放电距离,套管外形为多级伞形裙边,电压越高,级数越多。

3. 调压装置

调压装置是通过改变高压绕组的匝数,使变压器的输出电压在小范围内调整的装置。

一般在高压绕组的某个部位(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,使得输入电压略有变动时,可以保持输出电压接近额定值。

4. 保护装置

(1) 储油柜,又称油枕或膨胀器。储油柜安装在油箱的上部,通过管道与油箱接通。储油柜中的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。

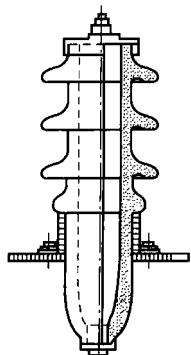


图 1-10 瓷质充油式绝缘套管

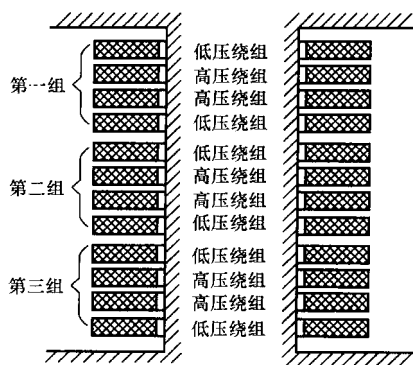


图 1-9 交叠式绕组

(2) 安全气道。安全气道安装在油箱的顶盖上,它是一个长的钢管,下面与油箱相通,上部出口处盖以玻璃或酚醛纸板。当变压器内部发生严重故障而产生大量气体时,油箱内压力迅速增大,油和气体将冲破气道上端的玻璃或酚醛纸板向外喷出,避免油箱受到强大压力而爆裂。目前,部分变压器采用压力释放阀代替安全气道,当变压器内部发生故障使压力升高时,压力释放阀动作并接通触点报警。

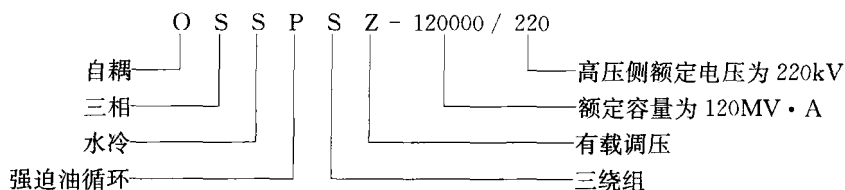
(3) 气体继电器。气体继电器安装在储油柜与油箱的连接管道中,当变压器内部发生故障产生气体或油箱漏油使油面下降过多时,它可以发出报警信号或自动切断变压器电源,是变压器内部故障的保护装置。

三、型号与额定值

制造厂按照国家标准和设计、试验数据规定的变压器的正常运行状态，称为额定运行情况。标注在变压器各类产品上的、用来表示该产品在规定条件下运行特征的一组参数的数值为额定值。在额定状态下运行可以保证变压器长期可靠地工作，并具有优良的性能。额定值亦是产品设计和试验的依据。额定值通常标在变压器的铭牌上，亦称为铭牌值。

(一) 变压器的型号

变压器的型号由数字和字母两部分组成，用来表示一台变压器的结构、额定容量、电压等级、冷却方式等内容，表示方式如下：



(二) 变压器的额定值

1. 额定容量 S_N

在铭牌规定的额定状态下变压器输出视在功率的保证值，称为额定容量。额定容量用 $V \cdot A$ (伏·安) 或 $kV \cdot A$ (千伏·安) 表示。对于三相变压器，额定容量是指三相容量之和。

2. 额定电压 U_{1N}/U_{2N}

额定电压是指变压器长期运行时所能承受的工作电压。一次额定电压是正常运行时加在一次侧的端电压的允许值，二次额定电压是当一次侧加额定电压时二次侧的空载电压。额定电压用 V (伏) 或 kV (千伏) 表示。对于三相变压器，额定电压是指线电压。

3. 额定电流 I_N

根据额定容量和额定电压算出的电流称为额定电流，以 A (安) 表示。对于三相变压器，额定电流是指线电流。

对于单相变压器，一次侧和二次额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} \quad (1-1)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} \quad (1-2)$$

对于三相变压器，一次侧和二次额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} \quad (1-3)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} \quad (1-4)$$

当变压器的二次电流达额定值时，这时变压器的负载叫做额定负载。需要注意的是，变压器实际使用时，二次电流不一定就是额定电流，同时二次电压也是变化的。

4. 额定频率 f_N

我国的标准工频规定为 50Hz (赫)。

除此以外, 额定工作状态下变压器的效率、温升等数据亦属于额定值。

【例 1-1】 一台三相双绕组变压器, Yd (Y/△) 接线, 额定容量 $S_N = 100 \text{ kV} \cdot \text{A}$, 一、二次侧额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 6000 \text{ V}/400 \text{ V}$, 试求出一、二次额定电流及一、二次额定相电流。

$$\text{解} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 9.63 (\text{A})$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 144 (\text{A})$$

$$I_{1\text{Nph}} = I_{1N} = 9.63 (\text{A})$$

$$I_{2\text{Nph}} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = 83.14 (\text{A})$$

第二节 单相变压器的空载运行分析

本节主要讲述单相变压器空载运行时的物理状况, 分析各物理量及它们之间的关系, 从而建立变压器空载运行时的基本方程式、等效电路和相量图。

变压器的一次绕组接到额定频率、额定电压的交流电源上, 二次绕组开路, 负载电流为零 (即空载) 时的运行状态, 称为空载运行。

一、空载运行时的电磁关系

图 1-11 所示为单相变压器空载运行的示意图, 图中 N_1 和 N_2 分别表示一次和二次绕组的匝数。当一次绕组外施交流电压 $\dot{U}_1$, 二次绕组开路时, 一次绕组内将流过一个很小的电流 $\dot{I}_0$, 称为变压器的空载电流。空载电流 $\dot{I}_0$ 产生交变磁动势 $\dot{I}_0 N_1$, 并建立交变磁通。

根据磁通所经路径的不同, 可把磁通分为主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 和漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 。主磁通沿着铁芯闭合, 并且同时与一次绕组及二次绕组交链。漏磁通通过一次绕组附近的变压器油或空气等非磁性物质构成磁通回路。漏磁通仅与一次绕组交链。主磁通在一、二次绕组中产生感应电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$, 称为主电动势, 当二次侧接上负载时就有电功率向负载输出, 所以主磁通是能量传递的媒介。漏磁通仅在一次绕组中产生感应漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$, 不能传递能量, 仅起电抗压降的作用。

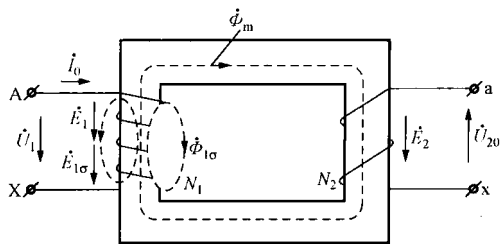
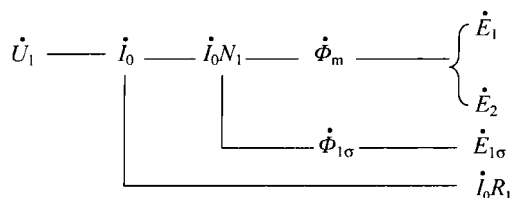


图 1-11 单相变压器空载运行示意图

另外, 空载电流还在一次绕组电阻 R_1 上形成一个很小的电阻压降, 归纳起来, 变压器空载时, 各物理量之间的关系可表示如下:



二、正方向的选定

变压器中各物理量都是时间的正弦或余弦函数，列写它们之间的有关电磁方程式时，若同一物理量的正方向选用不同，则列写的电磁关系式的符号不同，得出的结果的符号也不同。但是，当将分析的结果与规定的正方向相对照时，能够给出同样的瞬时值结果，因此各物理量的存在有其必然的客观规律性，不会因为采取不同的分析方法而得出不同的分析结果。所以正方向的选择是随意的，但一经选定就不得再作变动。然而选取正方向，有一定的习惯，叫做惯例。国际上所用的惯例也不统一，一般可选常用的惯例，即在消耗电能的电路里采用电动机惯例、在产生电能的电路里采用发电机惯例。对于变压器而言，其一次侧属于前者，二次侧属于后者。具体规定如下：

(1) 在负载支路，电流的正方向与电压降的正方向一致；在电源支路，电流的正方向与电动势的正方向一致。

(2) 电流的正方向与它产生的磁通的正方向符合右手螺旋定则。

(3) 磁通的正方向与感应的电动势的正方向符合右手螺旋定则。

根据这些规定，变压器各物理量的正方向规定如图 1-11 所示。图中， $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 的正方向表示电位降低，电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 的正方向表示电位升高。在一次侧， $\dot{U}_1$ 由首端指向末端， $\dot{I}_0$ 由首端流入，当 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_0$ 同时为正或负时，表示电功率从一次侧输入，称为电动机惯例。在二次侧， $\dot{U}_2$ 的正方向是由 $\dot{E}_2$ 的正方向决定的。当二次侧带负载时，若二次侧电压和二次侧电流同时为正或负时，电功率从二次侧输出，称为发电机惯例。

三、空载时的各物理量

1. 空载电流

变压器空载运行时，一次绕组中的电流 $\dot{I}_0$ 。绝大部分用来产生主磁通，这部分电流属于感性无功性质，用励磁电流 $\dot{I}_\mu$ 表示；另有很少部分用来提供变压器的铁芯损耗，这部分电流属于有功性质，用铁损耗电流 $\dot{I}_{Fe}$ 表示，所以空载电流中包括两个分量，即无功分量和有功分量，用向量表示时，空载电流 $\dot{I}_0$ 为

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} \quad (1-5)$$

$$\text{或} \quad I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2} \quad (1-6)$$

空载电流的无功分量远大于有功分量，即 $\dot{I}_\mu$ 远大于 $\dot{I}_{Fe}$ ，所以空载电流主要是感性无功性质的，我们也常称空载电流为励磁电流，它会使电网的功率因数降低，输送的有功功率减少，因此，变压器运行规程规定，不允许变压器长期在电网中空载运行。

空载电流的数值不大，一般约为额定电流的 2%~10%。一般变压器的容量越大，空载电流的百分数越小，大型变压器还不到额定电流的 1%，如 SFP7-370000/220 三相电力变压器的 I_0 仅为额定电流的 0.22%。

由于铁磁性材料有饱和现象，所以当磁路饱和时，主磁路的磁阻不是常数，主磁通与建立它的电流之间呈非线性关系，即 Φ 与 i_0 是非线性的。当电源电压 u 为正弦波， Φ 也为正弦波， i_0 畸变为尖顶波。当磁路不饱和时， Φ 与 i_0 是线性关系，若 u 为正弦波，则 Φ 为正弦波， i_0 也是正弦波。漏磁通的磁路大部分是由非铁磁性材料组成的，所以漏磁路的磁阻基本上是常数，漏磁通与建立它的电流之间呈线性关系。

铁芯磁路愈饱和,励磁电流波形畸变愈严重。因为变压器正常工作时磁路都是较为饱和的,为能够获得正弦波电动势,需要正弦波的磁通,因此励磁电流必须是尖顶波,如图 1-12 所示。从图中可以看出,当主磁通随时间正弦变化时,由磁路饱和而引起的非线性将导致磁化电流成为与磁通同相位的尖顶波;磁路越饱和,磁化电流的波形越尖,即畸变越严重。但是无论 i_0 怎样畸变,用傅里叶级数分解可知其基波分量始终与主磁通的波形同相位;换言之, i_0 是无功电流。为便于计算,通常用一个有效值与之相等的等效正弦波电流来代替非正弦的磁化电流。

2. 空载磁动势

空载磁动势是指一次侧空载电流 $\dot{I}_0$ 建

立的磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$, 由它产生主磁通和一次侧漏磁通。变压器空载运行时,只有空载磁动势产生磁场。空载磁场的实际分布情况是很复杂的,为了便于分析,根据磁通所经磁路的不同,等效地将磁路分成主磁路和漏磁路两部分,以便把非线性问题和线性问题分别处理。

3. 主磁通 $\dot{\Phi}_m$

通过铁芯闭合,并同时与一、二次绕组相交链的磁通叫做主磁通,用 $\dot{\Phi}_m$ 表示。由于铁芯是由具有良好导磁性能的铁磁性材料制作的,所以主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 占总磁通的绝大部分。又由于铁芯具有饱和特性,因而主磁通与励磁电流之间为非线性关系。主磁通同时交链一、二次绕组,在一、二次绕组中分别感应出电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$, 二次绕组中的 $\dot{E}_2$ 相当于负载的电源。

4. 一、二次绕组的感应电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$

假设电源频率为 f , 主磁通按正弦规律变化,即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-7)$$

则在规定的正方向前提下,一、二次绕组感应电动势的瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-8)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_2 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-9)$$

则感应电动势的有效值为

$$E_1 = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-10)$$

$$E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-11)$$

用相量表示为

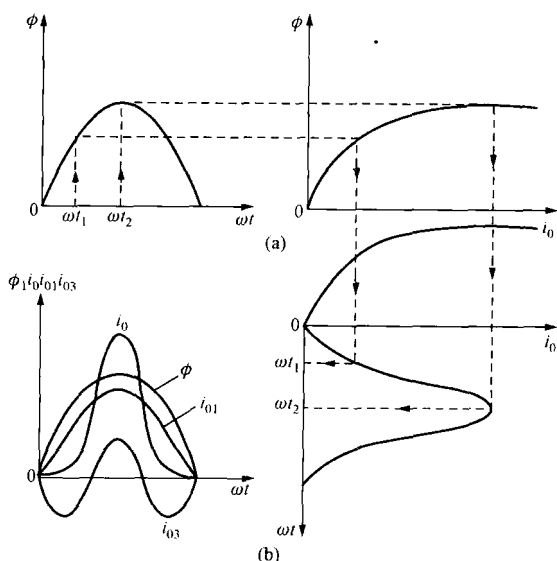


图 1-12 忽略铁损耗时的空载电流波形

(a) 图解法; (b) 波形分析

$$\dot{E}_1 = -j4.44fN_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-12)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44fN_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-13)$$

由以上分析可知, 感应电动势有效值的大小, 分别与主磁通的频率、绕组的匝数及主磁通最大值成正比, 感应电动势的频率与主磁通的频率相同, 感应电动势的相位滞后于产生它的主磁通 90° 。

5. 一次绕组漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$

由前面的分析知道, 空载电流 $\dot{I}_0$ 产生交变磁动势为 $\dot{I}_0 N_1$, 并建立交变磁通。其中的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$, 仅与一次绕组交链, 仅在一次绕组中感应漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$, 仿照前面的分析方法可知, 感应漏电动势瞬时值、有效值、相量式分别为

$$e_{1\sigma} = \sqrt{2}E_{1\sigma}\sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-14)$$

$$E_{1\sigma} = 4.44fN_1\Phi_{1\sigma m} \quad (1-15)$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44fN_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad (1-16)$$

式中 $\Phi_{1\sigma m}$ ——一次绕组漏磁通的最大值。

由于漏磁通不能传递能量, 仅起电抗压降的作用, 且漏磁通的磁路大部分是非铁磁性材料组成, 所以漏磁路的磁阻基本上是常数, 漏磁通与建立它的电流之间呈线性关系。所以, 漏电动势可以用漏电抗压降来表示, 即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \dot{I}_0 X_1 \quad (1-17)$$

其中, 比例系数 X_1 反映了一次侧漏磁场对一次侧电路的影响, 故称之为一次漏电抗, 它是一个常数 (漏磁路磁导率为常数)。

6. 空载损耗 p_0

变压器空载时, 输出功率为零, 但需要从电源中吸取一小部分有功功率, 用以补偿变压器内部的功率损耗, 这部分功率都以热能的形式散逸出去, 称之为空载损耗, 用 p_0 表示。

空载损耗包括两部分: 一部分是一次绕组的空载铜损耗, 另一部分是铁损耗, 即交变磁通在铁芯中产生的磁滞损耗和涡流损耗。

由于空载电流 I_0 很小, 绕组电阻 R_1 也很小, 所以空载铜损耗可以忽略不计, 故空载损耗近似等于铁损耗, 即 $p_0 \approx p_{Fe}$ 。空载损耗的数值并不大, 约占额定容量的 $0.2\% \sim 1\%$, 且随着容量的增大而减小。但是因为变压器在电力系统中的用量很大, 且常年接在电网上, 所以降低变压器空载损耗的经济意义非常重大。为了减少铁损耗, 变压器可采用优质铁磁材料, 如优质电工钢片、应用非静态合金等。

四、空载时的基本方程式

1. 一次侧的电动势平衡方程式

根据基尔霍夫第二定律和图 1-11 中规定的正方向, 可写出变压器一次侧的电压方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-18)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

式中 Z_1 ——一次绕组的漏阻抗, 为常数。

式 (1-18) 表明空载时, 外施电源电压 $\dot{U}_1$ 与一次绕组内的反电动势 $-\dot{E}_1$ 和漏阻抗压降 $\dot{I}_0 Z_1$ 相平衡。