

普通高等专科学校教育 / 高等职业技术教育 教学用书

# 电机及电力拖动

高敬德 主编

DIANJI  
JI  
DIANLI  
TUODONG

石油工业出版社

普通高等专科学校教育  
高等职业技术教育 教学用书

# 电机及电力拖动

高敬德 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书主要讲述了各类电机的结构、工作原理与主要特性, 电力拖动的基本知识、启动、调速与制动, 反映了交流调速的发展、变压器与异步电动机节电的意义和技术。书中例题紧密结合实际, 有较强的针对性。每章后有小结、思考题和习题, 便于读者复习和掌握所学知识。本书可作为高等专科学校、高等职业技术学校以及中等专业学校电气类相关专业的教学用书, 也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电机及电力拖动/高敬德主编.

北京: 石油工业出版社, 2001.12

普通高等专科学校教育、高等职业技术教育教学用书

ISBN 7-5021-3606-1

I. 电…

II. 高…

III. ①电机-高等学校: 技术学校-教学参考资料

②电力传动-高等学校: 技术学校-教学参考资料

IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 082948 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 400 千字 印 1—5000

2001 年 12 月北京第 1 版 2001 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3606-1/TE·2656 (课)

定价: 29.00 元

# 前 言

《电机及电力拖动》一书，自1993年出版以来，曾8次重印，印数达数万册，深受广大读者的欢迎。为了反映电机及电力拖动的技术进步，适应当前高等职业教育改革、发展的形势，应广大读者的要求，我们对该书进行了全面修订。

本书共分8章，内容包括：变压器、直流电机、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机及电力拖动、电力拖动系统电动机的选择和微电机。本书所述内容比第一版更为简练、准确，结构安排更为严紧。书中反映了由于电力电子技术、微电子技术和计算技术的进步，促使交流调速有了蓬勃的发展；指出变压器和异步电动机的节电潜力很大，介绍了变压器和异步电动机的节电技术和方法；还列举了应用最为广泛的异步电动机常见故障分析和处理方法。

本书由高敬德主编。第1章由张利成编写，第2章由严爱华编写，第3~6章由高敬德编写，第7章由王洪波编写，第8章由高振涛编写。本书在修订过程中，对有关量、单位、图形和符号，按国家标准的有关规定进行了修改；参考了近期出版的中等专业学校、高等职业技术学校 and 高等专科学校的有关教材及交流电机调速和节电技术方面的书籍，使本书在讲清传统内容的基础上，力求在知识的深化、更新方面做得更好。

天津大学电气自动化与能源工程学院吉崇庆教授仔细地审阅了全书，并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示深切谢意。

由于编者水平所限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2001年10月

# 目 录

绪论	(1)
第1章 变压器	(4)
1.1 变压器的用途、基本结构和额定值	(4)
1.2 单相变压器的运行分析	(10)
1.3 三相变压器	(29)
1.4 其它用途的变压器	(42)
小结	(46)
思考题	(47)
习题	(48)
第2章 直流电机	(50)
2.1 直流电机的基本原理和结构	(50)
2.2 电枢绕组	(55)
2.3 直流电机的磁场	(62)
2.4 直流电机的换向	(67)
2.5 直流发电机	(70)
2.6 直流电动机	(75)
小结	(80)
思考题	(81)
习题	(82)
第3章 直流电动机的电力拖动	(83)
3.1 电力拖动系统的运动方程式和多轴拖动系统的折算	(83)
3.2 生产机械的负载转矩特性	(88)
3.3 直流他励电动机的机械特性	(89)
3.4 电力拖动的稳定运行	(94)
3.5 电力拖动的过渡过程	(95)
3.6 直流他励电动机的起动	(97)
3.7 直流他励电动机的调速	(99)
3.8 直流他励电动机的制动	(103)
小结	(108)
思考题	(109)
习题	(110)
第4章 三相异步电动机	(112)
4.1 三相异步电动机的工作原理和结构	(112)
4.2 三相交流绕组与磁势和电势	(117)
4.3 三相异步电动机的运行分析	(134)
4.4 三相异步电动机的参数测定	(144)

4.5 三相异步电动机的工作特性 .....	(146)
小结 .....	(147)
思考题 .....	(148)
习题 .....	(148)
<b>第5章 三相异步电动机的电力拖动 .....</b>	<b>(150)</b>
5.1 三相异步电动机的机械特性 .....	(150)
5.2 三相异步电动机的起动 .....	(156)
5.3 三相异步电动机的调速 .....	(162)
5.4 三相异步电动机的电磁制动 .....	(170)
5.5 三相异步电动机的节电运行及维护 .....	(174)
小结 .....	(185)
思考题 .....	(186)
习题 .....	(187)
<b>第6章 同步电机及电力拖动 .....</b>	<b>(188)</b>
6.1 同步电机的基本原理与结构 .....	(188)
6.2 同步发电机 .....	(190)
6.3 同步电动机 .....	(194)
6.4 同步电动机的电力拖动 .....	(199)
小结 .....	(201)
思考题 .....	(202)
习题 .....	(202)
<b>第7章 电力拖动系统电动机的选择 .....</b>	<b>(204)</b>
7.1 电动机选择的一般原则 .....	(204)
7.2 电机的发热和冷却 .....	(205)
7.3 电机绝缘材料等级和电机的额定功率 .....	(206)
7.4 电动机容量的选择 .....	(208)
小结 .....	(214)
思考题 .....	(214)
习题 .....	(214)
<b>第8章 微电机 .....</b>	<b>(216)</b>
8.1 单相异步电动机 .....	(216)
8.2 微型同步电动机 .....	(221)
8.3 伺服电动机 .....	(224)
8.4 测速发电机 .....	(229)
8.5 步进电动机 .....	(231)
8.6 自整角机 .....	(235)
8.7 旋转变压器 .....	(239)
小结 .....	(242)
思考题 .....	(243)
主要参考资料 .....	(244)

# 绪 论

## 一、电机及电力拖动在国民经济中的应用

电机是与电能的生产、传输和使用有着密切关系的电磁机械。如将水力、热力、风力和原子能等转换为电能需用发电机，发电机是电厂的主要电气设备。为了经济地传输和分配电能，需把电压从一个等级转变为另一个等级要用变压器，变压器是电力系统中的主要电气设备。在工业、农业、交通等各部门大量采用电动机作为原动机，用以拖动各种机床、轧钢机、风机和泵等机械设备，电动机用电占发电总量的 60% 以上。在军事和各种自动控制系统中，应用大量的控制电机，作为检测、执行和计算等元件。在医疗、文教和日常生活中，电机的应用也日趋广泛。随着经济的不断发展，电机及电力拖动在国民经济中的应用，会越来越广泛。

## 二、我国电机工业的发展简况

我国电机工业从仿制到自行研究设计，已建成自己的电机工业体系，生产厂家遍布全国。目前我国中小型电机约有 200 多个系列、1000 多个品种。产品已能基本满足国民经济各部门的要求，而且有些产品还出口国外。

小型直流电机由 Z 系列发展为 Z2 和 Z3 系列，现生产 Z4 系列直流电机。每一次改进设计，在体积、性能各方面都有改进和提高。Z4 系列小型直流电动机，定子磁轭为叠片式，绝缘等级为 F 级，体积小、性能好，符合国际电工委员会（IEC）标准，可与当今国际先进水平的电机相比。现阶段 Z2，Z3，Z4 系列电机都在应用中。Z4 系列为主导产品。

异步电动机是应用最广、需要量最大的一种电机。90% 的电力拖动中使用的是异步电动机，其中小型异步电动机占 70%，它的用电量约占发电总量的 40%。

我国小型异步电动机经过三次更新换代，从仿制到自行设计 J 和 JO 系列，20 世纪 60 年代更新为 J2 和 JO2 系列，1982 年 Y 系列定型投产。每次更新换代都标志着我国在材料、设计和工艺技术方面新的进步，每次都在不同程度上缩小了体积，减轻了重量，提高了效应和各项性能。Y 系列除在效率和起动性能方面有提高外，第一次提出噪声限制、功率等级和安装尺寸与 IEC 标准相符。Y 系列有两个基本系列、16 个派生系列和两个专用系列，共有 900 多个规格。国家规定自 1985 年停止生产和选用 J2 和 JO2 系列电机，推广使用 Y 系列电机。现在生产的 Y2 系列中小型低压异步电动机，已达到国际上同类产品的先进水平，将逐步取代 Y 系列成为主导产品。

变压器方面，现在已能生产 500kV，容量为 360MV·A 及以下的各种类型变压器，规格达 1000 余种。低损耗变压器 SL7 和 SZL7 系列较老变压器损耗平均下降 25%~35%。1985 年组织统一设计的 S9 系列变压器损耗更低，达到国际 20 世纪 80 年代水平。

大容量发电设备方面，1969 年制成 12.5 万 kW 的双水内冷汽轮发电机，现在已能生产 1000MVA 发电机。

我国的微电机工业是从 20 世纪 50 年代后期才发展起来的，由于自动控制系统的不断完善和宇航等科学技术的飞速发展，控制电机得到了很快地发展。控制电机的生产也经历了一个从仿制到自行研制的过程，现在产品的数量和品种已能基本满足需求。控制电机的品种繁

多，规格数以千计，有些产品达到国际先进水平。

我国电机工业的发展速度是相当迅速的，但在单机容量、品种和性能等方面，与世界先进水平还有一定的差距。

### 三、电力拖动

以电动机作为原动机拖动生产机械的拖动方式称为电力拖动。采用自动化的电力拖动，对提高劳动生产率和产品质量都具有重大意义。

电力拖动系统由电动机、传动机构、生产机械与自动控制及电源等部分组成。最初，电动机拖动生产机械是通过天轴来实现的，一台电动机拖动几台乃至整个车间所有的生产机械，称为“成组拖动”。后来，一台电动机拖动一台生产机械，称为“单电机拖动”，它与“成组拖动”相比，省去了大量的中间传动机构，提高了效率。随着生产技术的发展，制造了大型复杂的机械设备，在一台生产机械上有多种功能，运动形式也相应增多了，出现了“多电机拖动”。目前，较大型的生产机械，如组合机床、龙门刨床等都采用多电机拖动。

自动化电力拖动系统的控制方式是在手动控制的基础上发展起来的。最初用继电器和接触器及保护元件组成继电器—接触器控制系统，目前这种系统在工矿企业中还继续应用。随着电子技术的发展，无触点控制系统已被大量采用，从采用分离元件到集成电路，从开环控制到带反馈的闭环控制系统，从模拟量控制到数字量控制系统，直到微处理机控制系统，电力拖动自动化系统不断地向更高的方向发展。

调速是电力拖动的重要内容。因为直流电动机调速性能好，被广泛应用于调速系统中，但因换向问题，它的最高转速、单机容量和使用环境都受到一定的限制。由于电力电子技术、微电子技术、计算机技术和控制理论的发展，极大地促进了交流调速的发展，打破了直流电动机一统调速系统的局面。变频调速装置与异步电动机组成的交流调速系统在国民经济各行各业中的应用日益增多，并在一些领域开始取代直流调速系统。矢量控制的变频调速系统和直接转矩控制的调速系统，调速性能可以达到更高的水平。变频调速的永磁同步电动机是交流调速的新的生力军。不调速的拖动系统（如风机和泵类拖动系统）向调速拖动系统的转变，具有明显的节电效果。

### 四、变压器和电动机的经济运行

我国的电力系统庞大，低压配电变压器台数多，总容量大，节电潜力很大。电动机的耗电占总发电量的60%，其中小型异步电动机占75%。风机和泵类的电动机耗电占发电量的31%，其中70%是变负荷运行，多数采用挡板和阀门调节流量，电能浪费很大。异步电动机是节电的重点对象。

要提高节电意识，推广节电技术和方法、选用节能设备、确定合适的容量、选择最佳的运行方式、采用恰当的调速方案等，都可收到明显的节电效果。如风机和泵采用调速来调节流量，平均节电20%~30%。

### 五、课程的性质、内容和要求

本课程是电气化与自动化专业的一门技术基础课。

本课程内容包括：变压器、直流电机及拖动、异步电机及拖动、同步电机及拖动、电机容量选择和微电机。

本课程任务是使学生了解各类电机的基本结构；掌握其工作原理、分析方法与主要特性；掌握电力拖动的基本知识；具有使用和维护电机的一般技能；培养学生分析问题与解决问题的能力。



电机及电力拖动是一门理论性和实践性都比较强的课程，为了能较好地掌握这门课，需注意以下一些问题：电机比较复杂，但一定要了解它的结构，注意观察实物，增强感性知识。电机的理论性比较强，要很好地复习电和磁的基本定律，如电磁感应定律和电磁力定律、电路的基尔霍夫第一和第二定律、磁路的欧姆定律和全电流定律，熟练地运用这些定律分析电机的问题。注意电机研究中引入的一些方法，如把磁通分成主磁通与漏磁通，把场的问题化成路的问题；分析旋转电机的不对称运行时，可以采用双旋转磁场法；研究凸极电机常用双反应法等。电机及电力拖动与电工基础课的性质不同，在电工课中所要解决的问题多是理想化了的，比较单纯，而在电机中要用理论解决实际问题，实际问题往往是比较复杂的，分析时要进行必要的简化，这是工程上处理问题常用的方法。掌握电机知识要从物理现象入手，观察研究其中的主要电磁关系；要搞清每一个问题，但更重要的是掌握知识的联系，即知识的体系。要认真独立地做适量的习题，这有助于培养分析问题和解决问题的能力。要重视实验环节，这不单是验证理论，而且对培养应用型和技能型人材是非常重要的。

# 第 1 章 变 压 器

变压器是基于电磁感应原理而工作的静止的电磁器械，在电力系统及电源装置中有广泛的应用。

本章介绍变压器的基本结构，并以单相双绕组变压器为主要研究对象，通过对空载和负载运行的分析，导出变压器的方程式、相量图、等值电路及运行特性；因为三相变压器的对称运行可取其一相来研究，故只阐述三相变压器的磁路特点、连接组和并联运行；最后介绍互感器、自耦变压器及电焊变压器。

## 1.1 变压器的用途、基本结构和额定值

### 1.1.1 变压器的用途和分类

变压器是一种静止的电磁器械。它主要由铁心和线圈组成，通过磁的耦合作用把交流电从原边传到副边，利用绕在同一铁心柱上的原绕组和副绕组匝数的不等，把原绕组的电压与电流从某种数量等级改变为副绕组的另外一种等级的电压和电流。

变压器是输配电系统的主要电气设备。远距离输电，为了减少损耗，需要用高电压，例如 110, 220, 330kV 和 500kV。目前从发电机发出的电压，因受电机绝缘水平的限制，一般只有 10~20kV。发电机发出的电压需经变压器升压，然后再经高压输电线路输送到远地。到了用电地区，因电压太高不能直接用，还必须经变压器降压，大型动力设备的电压为 6kV, 3kV, 小型动力设备的电压为 380V, 单相设备和照明需用 220V。输配电系统需多次进行升压与降压，因而变压器的安装容量约为发电机安装容量的 4~7 倍。在电力系统中应用的变压器，称为电力变压器。电力系统示意图，如图 1-1 所示。

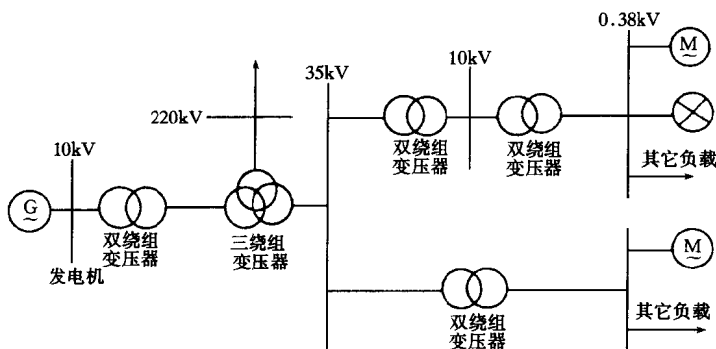


图 1-1 电力系统示意图

除电力变压器外，还有供特殊电源用的变压器，如电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等；供测量用的变压器，如电压互感器、电流互感器；以及其它变压器，如高压试验用变压器，自动控制系统中的小功率变压器等。

变压器按相数可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器；按绕组数目可分为双绕组

变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器；按冷却方式可分为油浸式变压器、充气式变压器和干式变压器。油浸式变压器又可分为：油浸自冷式、油浸风冷式和强迫油循环变压器。

### 1.1.2 变压器的基本结构

在各种变压器中，以油浸自冷式双绕组变压器应用最广泛，下面主要介绍这种变压器的基本结构。

变压器的主要部件是铁心和绕组，铁心是磁路部分，绕组是电路部分。铁心和绕组构成变压器的主体，它们装配在一起，称为变压器的器身。油浸式变压器还有油箱及其它附件。三相油浸自冷式变压器，如图 1-2 所示。

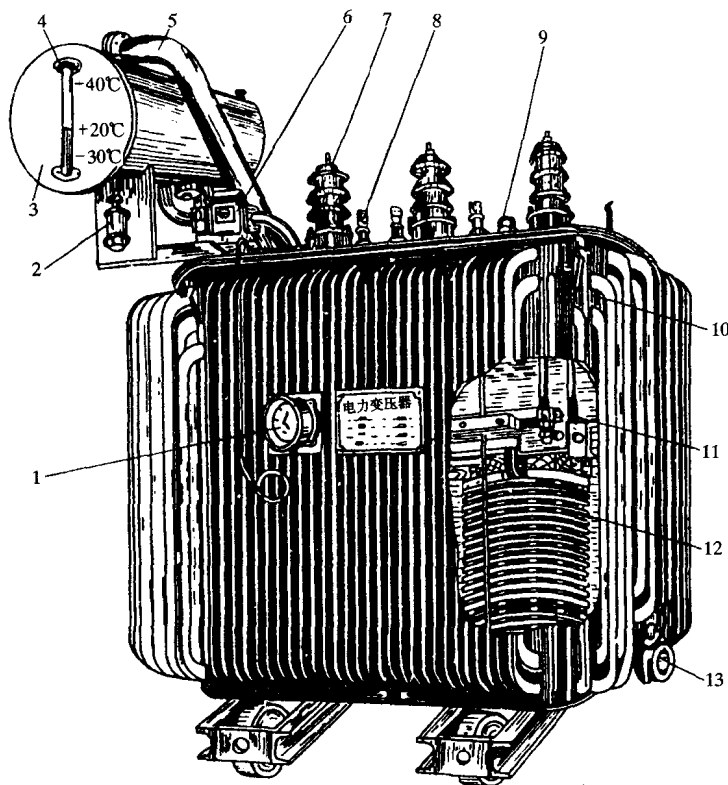


图 1-2 油浸式电力变压器

- 1—信号式温度计；2—吸湿器；3—储油柜；4—油表；5—安全气道；6—气体继电器；7—高压套管；  
8—低压套管；9—分接开关；10—油箱；11—铁心；12—线圈；13—放油阀门

#### 1. 铁心

变压器铁心是由 0.28 ~ 0.35mm 厚的硅钢片叠成的。叠片的两面涂以绝缘漆，使片间绝缘，以减小涡流损耗。为了减小磁阻与励磁电流，铁心不能有明显的间隙，每层叠片的接缝要互相错开，如图 1-3 所示。现在多采用全斜接缝，避免磁力线与硅钢片辗压方向直交，因为顺轧制方向有较高磁导率和较小损

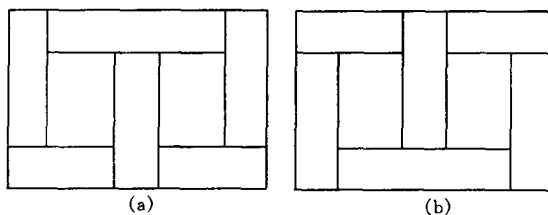


图 1-3 硅钢片的排法  
(a) 奇数层叠片；(b) 偶数层叠片

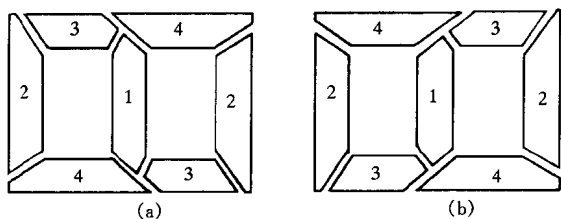


图 1-4 斜接缝叠片的排法  
(a) 奇数层叠片; (b) 偶数层叠片

耗, 这样可使空载电流降低 20%~30%, 铁心损耗降低 7%~10%。叠片的全斜接缝, 如图 1-4 所示。小型变压器的铁心柱截面是方形或矩形的, 大型变压器的铁心柱截面是阶梯形状的, 如图 1-5 所示。铁心柱套装绕组, 连接铁心柱的部分称为磁轭。磁轭的截面比铁心柱的截面大 5%~10%, 以减小空载电流和空载

损耗。

## 2. 绕组

变压器的绕组是在绝缘筒上用铜线或铝线绕成, 并要很好地进行绝缘。电压高的线圈称为高压绕组, 电压低的线圈称为低压绕组。从高、低绕组的装配位置看, 可分为同心式和交叠式绕组。同心式绕组的高、低线圈同心地套在铁心柱上, 为了便于对地绝缘, 一般是低压绕组靠近铁心柱, 高压绕组在低压绕组的外边。同心式绕组结构简单, 制造方便, 电力变压器均采用这种结构。绕组套在铁心柱外面的称为心式变压器, 如图 1-6 所示。

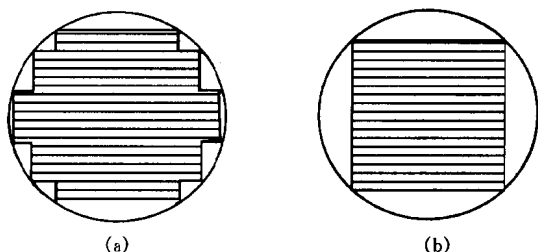


图 1-5 铁心柱截面  
(a) 大型铁心柱截面; (b) 小型铁心柱截面

## 3. 油箱及其附件

变压器的器身放置在装有变压器油的油箱内。小容量变压器做成平面式油箱, 较大容量的变压器为了增加散热的表面积用排管式油箱或外装散热器。

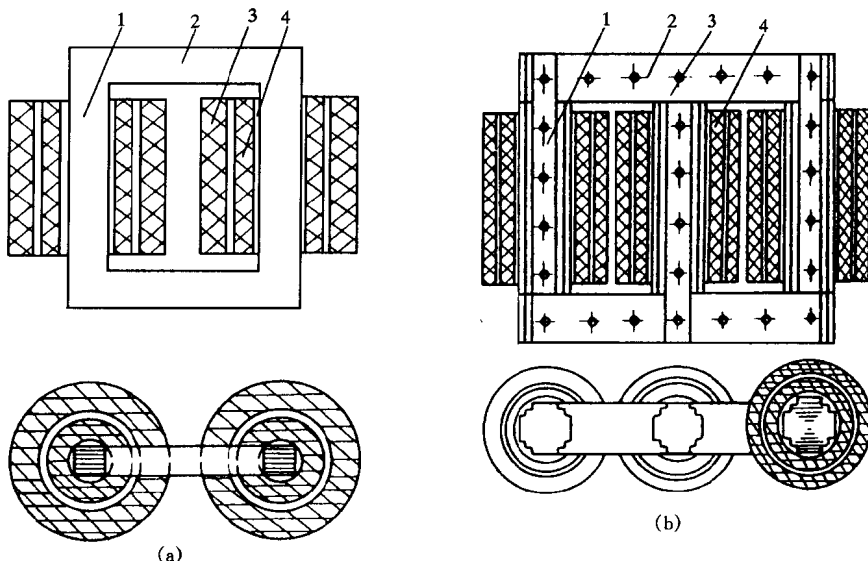


图 1-6 心式变压器  
(a) 单相心式变压器; (b) 三相心式变压器  
1—铁心柱; 2—铁轭; 3—高压绕组; 4—低压绕组

变压器油是一种从石油中提炼出来的矿物油，它的绝缘强度高、燃点高、灰尘及杂质都很少。在变压器中，变压器油既是电绝缘介质，又是导热介质。变压器油中只要含有少量的水分就会使绝缘强度大为降低。变压器油在较高温度下长期运行会老化。

在变压器的油箱上装有储油柜（也称油枕），它通过连通管与油箱相通。储油柜内油面高度随变压器油的热胀冷缩而变动。储油柜限制了油与空气的接触面积，从而减少水分的侵入与油的氧化。储油柜上装有吸湿器，吸湿器中装有氯化钙或硅胶等干燥剂，以防止潮气进入储油柜。储油柜的底部还装有放水塞，以便定期排除水和沉淀杂物。为了观察油面的变化，在储油柜的一侧装有油位计，上面标有允许的最高和最低油面线。容量在 3150kV·A 及以上的变压器装有净油器。净油器是一个金属圆桶，里面装有吸附剂，两端通过法兰与油箱上下部接通。它是利用上层与下层油之间的温差，使变压器油经净油器形成对流，油与吸附剂接触后，其水分和杂质被吸附，从而保持油的清洁，延长油的使用年限。储油柜、吸湿器和净油器为油的保护装置。

在油箱和储油柜的连通管中装有气体继电器。当变压器内部发生故障时，产生气体使气体继电器动作，发出信号，示意工作人员及时处理或令其开关跳闸。容量在 800kV·A 以上的变压器，油箱盖上装有防爆管，其管口用 3~5mm 厚的玻璃片封住。当变压器内部发生故障，保护装置失灵时，箱内产生大量气体将冲破玻璃片喷出，不致损坏箱体。最近生产的变压器采用压力释放阀代替防爆管，当内部故障引起压力升高时，压力释放阀动作，接通接点报警或令开关跳闸。气体继电器、防爆管和压力释放阀为安全保护装置。

变压器绕组的引出线是通过箱盖上的瓷质绝缘套管引出的。电压等级不同，绝缘套管的型式也不同，10~35kV 采用空心充气式或充油式套管，110kV 及以上采用电容式套管。为了增加表面放电距离，高压套管外部做成多级伞形，电压愈高、级数愈多。

变压器油箱上还装有分接开关。由于变压器接在电网上的不同地点，电网电压可能偏离额定值。为了适应各点不同的电网电压，高压绕组有抽头引出，借分接开关改变高压绕组的匝数，从而使输出电压接近额定值。容量在 1800kV·A 及以下的变压器，一般有三个抽头；容量再大的变压器一般有五个抽头。分接开关可分为无励磁调压分接开关和有载调压分接开关。无励磁调压分接开关的原理如图 1-7 所示。无励磁调压分接开关不经常操作，且只许在变压器开路时操作。电网电压偏高时，调至匝数多的一挡；电网电压偏低时，调至匝数少的一挡。

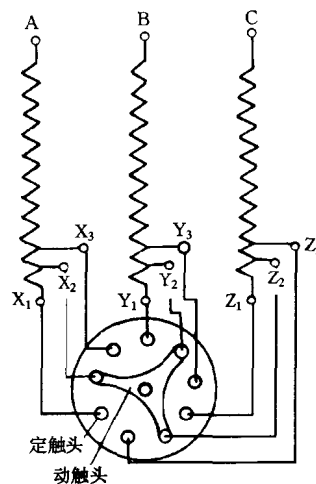


图 1-7 无励磁调压分接开关

有载调压就是变压器在带负荷运行中，可手动或电动变换一次绕组的分接头，以改变一次线圈的匝数进行调压。有载调压需用有载分接开关，在变换分接头过程中，保持电路不断开，同时用电阻或电抗限制有害的短接电流。有载调压分接开关的动作全过程，如图 1-8 所示。图 1-8 (a) 表示有载调压分接开关的主触头接通分接头 1，负载电流由分接头 1 输出。当变压器的低压侧电压降低时，这就需要将分接开关从分接头 1 换接到分接头 2。在换接过程中，如图 1-8 (b) 所示，由串联着过渡电阻  $R$  的辅助触头接通分接头 2，这时主触头仍然接在分接头 1 上，负载电流仍由主触头输出，而分接头 1 和 2 被主触头和辅助触头像桥一样的连接起来。在这个回路里，由于两个分接头之间的线圈感应电势的作用，将会出

现短接电流，但由于电阻  $R$  的限流作用，短接电流不会很大。然后如图 1-8 (c) 所示，主触头脱离分接头 1，负载电流经分接头 2 从辅助触头输出。图 1-8 (d) 为辅助触头与主触头同时接通分接头 2，这时负载电流基本上由主触头输出，而辅助触头只通过很小的电流。如图 1-8 (e) 所示，当辅助触头从分接头 2 断开时，基本上不产生电弧。这就是有载分接开关的换接过程，整个切换时间约为十几秒。

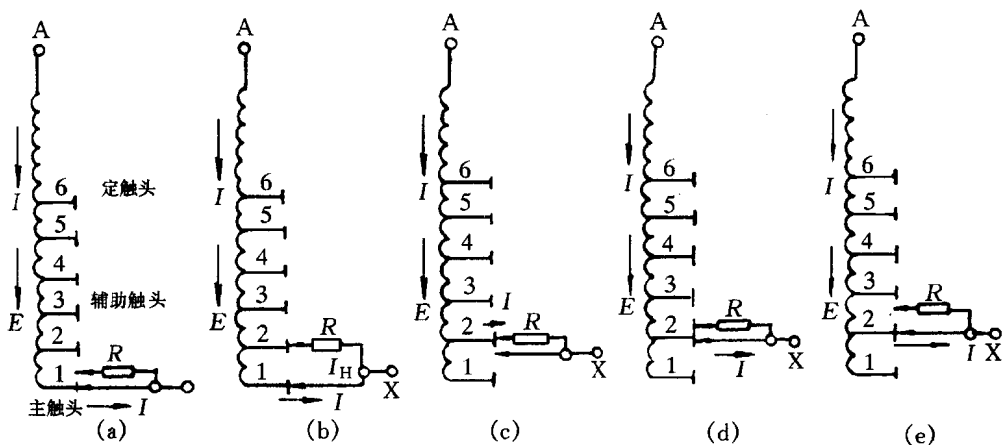


图 1-8 有载分接开关的换接过程

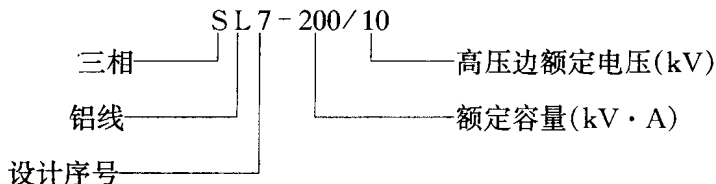
变压器上还装有温度计，用以监视油的温度。容量大的变压器上装带电接点的信号温度计，当油温达到限值时能发出信号。大型变压器上还要装置电阻温度计，以便于远距离测温。

除油浸式变压器外，还有全密封变压器、干式变压器等。顾名思义，全密封变压器是一种与外界空气完全隔绝的变压器。这种变压器取消了储油柜，有两种型式：一种是油的上部充氮气，利用氮气的可压缩性作为油体积发生变化的补偿；另一种是完全充油式的，油箱壁是波纹形式的，油体积的变化由波纹箱壁的弹性形变来补偿。全密封变压器使外界空气和潮气无法进入油箱，从而使绝缘油的老化速度减慢，基本上免除维护与保养。我国现在生产的出口变压器几乎都是全密封变压器。干式变压器不用矿物油，分空气自冷和环氧浇注式两大类。环氧浇注的干式变压器结构简单、体积小、难燃、机械强度高、噪音小、短时过载能力大，广泛用于对安全运行有较高要求的场所。国内现在能生产电压为 10kV、容量为 2500 kV·A 的干式变压器。

### 1.1.3 变压器的型号和额定值

#### 1. 变压器的型号

变压器的型号说明变压器的系列型式和产品规格。变压器的型号是由字母和数字组成的：第一个字母表示相数，后面的字母分别表示导线材料、冷却介质和方式等；斜线前边的数字表示额定容量 (kV·A)，斜线后边的数字表示高压绕组的额定电压 (kV)。变压器型号中代表符号的含义见表 1-1，其表示方法举例如下：



SL7-200/10 表明该变压器为三相矿物油浸自冷式双绕组铝线无励磁调压、第 7 次统一设计、额定容量为 200kV·A、高压边额定电压为 10kV。

表 1-1 变压器型号中代表符号的含义

类别项目	代表符号	类别项目	代表符号
自耦变压器	O	强迫油循环	P
单相变压器	D	强迫油导向循环	D
三相变压器	S	双绕组	—
油绝缘介质	—	三绕组	S
空气绝缘介质	G	双分裂绕组	F
空气自冷式	—	无励磁调压	—
风冷式	F	有载调压	Z
水冷式	W	铜导线	—
油自然循环	—	铝导线	L

除电力变压器外，还有电炉变压器、整流变压器、矿用变压器、船用变压器等。这些不同类型的产品，根据电压等级、所采用的主要材料、容量等级和电压组合的不同，分为许多系列和品种，目前变压器的品种已不少于 1000 种。

容量为 630kV·A 及以下的变压器称为小型变压器；容量为 800~6300kV·A 的变压器称为中型变压器；容量为 8000~63000kV·A 的变压器称为大型变压器；容量在 90000kV·A 及以上的变压器称为特大型变压器。

新标准的中小型变压器的容量等级为：10, 20, 30, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300kV·A。

我国从 1985 年组织设计 S9 系列变压器，S9 系列的主要特点是损耗更低，与 SL7 和 S7 系列相比，空载损耗降低 7%，负载损耗平均降低 21%，总损耗降低 20% 左右（总损耗达到意大利同类产品 20 世纪 80 年代初期水平）。S9 系列变压器已成为主导产品。

## 2. 变压器的额定值

变压器的额定值是制造厂家设计制造变压器和用户安全合理地使用变压器的依据。

变压器的额定值主要有：

(1) 额定容量  $S_N$  是指变压器的视在功率，对三相变压器是指三相容量之和。由于变压器效率很高，可以近似地认为高、低压侧容量相等。额定容量的单位是 V·A, kV·A, MV·A。

(2) 额定电压  $U_{1N}/U_{2N}$  是指变压器空载时，各绕组端头电压的保证值，对三相变压器指的是线电压，单位是 V 和 kV。

(3) 额定电流  $I_{1N}/I_{2N}$  是指变压器允许长期通过的电流，单位是 A。额定电流可以由额定容量和额定电压计算。

对于单相变压器

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

对于三相变压器

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

(4) 额定频率  $f$  我国规定标准工业用频率为 50Hz。

除上述额定值外，变压器的铭牌上还标有变压器的相数、连接组和接线图、短路电压（或短路阻抗）的百分值、变压器的运行及冷却方式等。为了考虑运输和吊心，还标出变压器的总质量、油质量、器身的质量等。

## 1.2 单相变压器的运行分析

本节主要讨论单相电力变压器的基本原理和运行性能。用方程式、相量图和等值电路三种基本方法来说明变压器各电磁量间的关系，并利用它们导出变压器的电压变化率和效率。由单相变压器得出的方程式、相量图和等值电路等，也适用于三相变压器对称运行情况的分析，而且在分析异步电动机时也是很有用的。

### 1.2.1 单相变压器的空载运行

单相双绕组变压器，铁心上有两个绕组，接电源的绕组称为原绕组或一次绕组，向外供电的绕组称为副绕组或二次绕组。原绕组的匝数以  $N_1$  表示，副绕组的匝数以  $N_2$  表示。

变压器的空载运行，是指变压器的原绕组接在交流电压的电网上，副绕组开路的运行状态。单相变压器空载运行的原理如图 1-9 所示。

#### 1. 空载运行的电磁关系

当原绕组接交流电源时，原绕组中有电流；副绕组开路，无电流通过。空载时原绕组中的电流  $\dot{I}_0$  称为空载电流， $\dot{I}_0$  产生磁势  $\dot{I}_0 N_1$ ，并建立交变磁场。由于变压器的铁心采用高导磁的硅钢片叠成，所以绝大部分磁通经铁心闭合，这部分磁通称为主磁通，用  $\Phi$  表示；有少量磁通经油和空气闭合，这部分磁通称为漏磁通，原边的漏磁通用  $\Phi_{\sigma 1}$  表示。根据电磁感应定律可知，交变的磁通将在原、副绕组中产生感应电势。

由于变压器中的电压、电流、磁通和感应电势都是交变的，为了表明它们之间的内在关系，需要规定正方向。正方向本来是可以任意规定的，但正方向规定的不同，对同一电磁过程所列的方程式也就不同了。为了利用同样一个方程式表示同一电磁现象，通常都按惯例规定正方向，如图 1-9 所示：

- ① 电压降的正方向与电流的正方向一致；
- ② 磁通的正方向与产生该磁通的电流的正方向之间符合右手螺旋定则；
- ③ 感应电动势的正方向与磁通的正方向之间符合右手螺旋关系。

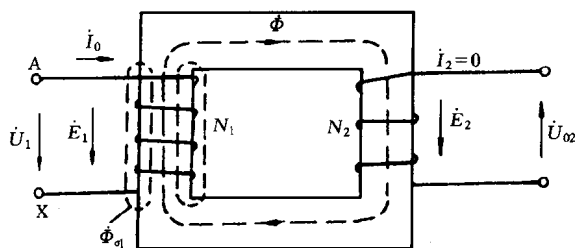


图 1-9 变压器空载运行原理图

若  $e$  和  $\Phi$  的正方向符合右手螺旋定则，如图 1-9 所示，当  $\frac{d\Phi}{dt} > 0$  时，A 点是高电位，X 点是低电位，感应电势  $e_1$  的实际方向与规定的正方向相反，即  $e_1 < 0$ ；当  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$  时， $e_1$  的实际方向与规定的正方向相同，即  $e_1 > 0$ 。这说明  $e$



的正方向与  $\Phi$  的正方向符合右手螺旋定则时,  $e$  与  $\frac{d\Phi}{dt}$  的符号总是相反的, 因而感应电势写成

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-3)$$

当原边电压按正弦规律变化时, 则磁通  $\Phi$  也按正弦规律变化, 此点后面将会说明。设磁通的瞬时值为

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-4)$$

式中  $\Phi_m$ ——主磁通的最大值, Wb。

将式 (1-4) 代入式 (1-3), 原绕组的感应电势为

$$\begin{aligned} e_1 &= N_1 \left[ \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} \right] = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \\ &= N_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中  $e_1$ ——原绕组感应电势, V;

$N_1$ ——原绕组匝数;

$\Phi_m$ ——主磁通最大值, Wb;

$\omega$ ——交流电的角频率, rad/s;

$E_{1m}$ ——原绕组感应电势的幅值, V。

同理可得副绕组感应电势为

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-6)$$

式中  $e_2$ ——副绕组的感应电势, V;

$N_2$ ——副绕组的匝数;

$E_{2m}$ ——副绕组感应电势的幅值, V。

原、副绕组中感应电势的有效值  $E_1, E_2$  为

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m \\ &= 4.44 f N_1 \Phi_m \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-8)$$

式中  $E_1, E_2$ ——原、副绕组感应电势的有效值, V;

$f$ ——电源频率, Hz;

$N_1, N_2$ ——原、副绕组的匝数;

$\Phi_m$ ——主磁通最大值, Wb。

以相量表示

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-9)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-10)$$

式 (1-9) 和式 (1-10) 表示,  $\dot{E}_1$  与  $\dot{E}_2$  在相位上比  $\Phi_m$  落后  $90^\circ$ 。

漏磁通也是交变的, 根据电磁感应定律, 同理可得原绕组的漏磁通感应电势  $e_{\sigma 1}$  为