

工 学 校 教 材



电 机 学

保定电力技工学校 罗慰擎 编

水利

ANG XUE YU

二 學 校 概 況

電 机 學

第 一 版 第 一 次 印 刷

技工学校教材

电 机 学

保定电力技工学校 罗慰攀 编

水利电力出版社

技工学校教材

电 机 学

保定电力技工学校 罗慰章 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20.5 印张 458 千字

1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷

印数00001—35610册 定价2.75元

书号 15143·5959

前 言

本书是根据水利电力部1982年颁发的技工学校《电机学》教学大纲编写的。

全书共分五篇，主要阐述变压器、同步电机、异步电机、直流电机的基本结构、工作原理、运行性能和实验方法。

电机学是电气类专业一门技术基础性质的课程，有较强的理论性和实践性。本书内容的选择，力求适应技工学校的教学要求，因此，既着重于基本概念、基本原理、物理现象和分析问题方法的阐述，又注意理论联系实际，加强对学生基本技能的培养。各章均附有小结、思考题与习题，以启发学生独立思考，掌握要点，加深理解所学内容。书中符号基本上采用国际较为通用的符号。使用的名词术语基本按国家标准的规定。

本书承丰满水电技术学校刘洪汉同志审阅，对书稿提出了不少宝贵的意见。编写工作中得到本校和兄弟学校以及有关制造厂、电厂、试验研究单位许多同志的支持和帮助，在此一并谨致谢意。

书中不妥和错误之处，恳请读者指正。

编 者

一九八五年三月

目 录

前 言

绪论	1
----	---

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本知识	5
第一节 变压器的简单工作原理	5
第二节 变压器电磁量正方向的规定	6
第三节 变压器的分类	7
第四节 变压器的基本结构	8
第五节 变压器冷却方式简述	13
第六节 变压器的铭牌	14
小结	16
思考题与习题	16
第二章 单相变压器的空载运行	17
第一节 变压器空载运行的基本电磁过程	17
第二节 变压器空载时的电势平衡方程式	19
第三节 空载电流和空载损耗	20
第四节 变压器空载时的向量图	22
第五节 变压器空载时的等值电路	23
第六节 变压器的空载试验	25
小结	26
思考题与习题	27
第三章 单相变压器的负载运行	27
第一节 变压器负载运行的基本电磁过程	28
第二节 变压器负载时的基本方程式	28
第三节 变压器负载时的等值电路和向量图	30
第四节 变压器的短路和短路试验	35
第五节 变压器的标么值和百分值	38
第六节 变压器的运行性能	40
小结	43
思考题与习题	
第四章 三相变压器	
第一节 三相变压器的磁路系统	

第二节 三相变压器绕组的连接方法	46
第三节 三相变压器的联结组标号	49
第四节 变压器联结组标号的测定	52
第五节 三相绕组连接方法和铁心磁路系统对相电势波形的影响	54
第六节 V/V联结的变压器	56
小结	57
思考题与习题	57
第五章 变压器的运行分析	58
第一节 变压器的并联运行	58
第二节 变压器空载合闸时的励磁过电流	63
第三节 变压器的突然短路电流	65
第四节 Y/Y ₀ 联结变压器的单相负载运行	66
小结	69
思考题与习题	69
第六章 其它变压器	70
第一节 三绕组变压器	70
第二节 自耦变压器	72
第三节 调压变压器	75
第四节 电焊变压器	76
小结	77
思考题与习题	77

第二篇 同步电机

第七章 同步电机的基本知识	79
第一节 同步发电机的简单工作原理	79
第二节 同步电机的主要类型	80
第三节 汽轮发电机的基本结构	81
第四节 水轮发电机的基本结构	85
第五节 同步电机冷却问题简述	88
第六节 同步发电机励磁方式简介	89
第七节 同步发电机的铭牌	90
小结	91
思考题与习题	92
第八章 同步发电机的电枢绕组和电势	92
第一节 同步发电机的磁路	92
第二节 电枢绕组的构成	93
第三节 电枢绕组的电势	96
第四节 三相双层绕组	100
第五节 电枢绕组中的高次谐波电势及其削弱方法	105

小结	108
思考题与习题	109
第九章 同步发电机的电枢磁势和电枢反应	109
第一节 单相绕组的磁势——脉振磁势	110
第二节 三相绕组的磁势——旋转磁势	117
第三节 对称负载时的电枢反应	120
小结	125
思考题与习题	125
第十章 同步发电机的电势方程式、向量图和运行特性	126
第一节 隐极同步发电机的电势方程式和向量图	126
第二节 凸极同步发电机的电势方程式和向量图	128
第三节 空载特性和短路特性	131
第四节 零功率因数负载特性	135
第五节 实测法测定同步电抗和漏抗	137
第六节 同步发电机的外特性和调整特性	138
第七节 同步发电机的损耗和效率	140
小结	141
思考题与习题	141
第十一章 同步发电机的运行分析	142
第一节 同步发电机并联运行的条件和投入方法	142
第二节 同步发电机的功角特性	146
第三节 同步发电机在无穷大电网上运行时有功功率的调节	149
第四节 同步发电机在无穷大电网上运行时无功功率的调节	152
第五节 两容量相近的同步发电机并联运行时的功率调节	156
第六节 调相运行	158
第七节 同步发电机不对称运行	160
第八节 同步发电机无励磁运行	164
第九节 同步发电机在电压、频率变动时的运行	165
小结	165
思考题与习题	166
第十二章 同步发电机的突然短路	167
第一节 分析方法概述	167
第二节 三相突然短路物理过程分析	169
第三节 瞬态参数	171
第四节 三相突然短路电流及其衰减	174
第五节 突然短路对同步发电机和电力系统的影响	177
小结	178
思考题与习题	

第三篇 异步电机

第十三章 异步电动机的基本知识	180
第一节 异步电动机的简单工作原理	180
第二节 异步电动机的分类和基本结构	181
第三节 异步电动机常见的几种绕组型式	184
第四节 异步电动机的铭牌	187
第五节 国产新系列异步电动机简介	189
小结	190
思考题与习题	190
第十四章 异步电动机的运行原理	191
第一节 异步电动机的电势方程式	191
第二节 转子电路分析	193
第三节 异步电动机的磁势平衡关系	196
第四节 异步电动机的等值电路	198
第五节 异步电动机的功率和转矩平衡方程式	202
第六节 异步电动机的电磁转矩	204
第七节 异步电动机的空载试验和短路试验	211
小结	213
思考题与习题	214
第十五章 异步电动机的起动和调速	215
第一节 异步电动机起动问题概述	215
第二节 笼型异步电动机的起动	215
第三节 绕线型异步电动机的起动	218
第四节 深槽和双笼型异步电动机	220
第五节 异步电动机的调速	221
小结	223
思考题与习题	224
第十六章 特种异步电动机	224
第一节 单相异步电动机	224
第二节 感应调压器	227
第三节 移相器	229
第四节 电磁调速异步电动机	229
小结	231
思考题与习题	232

第四篇 直流电机

第十七章 直流电机的基本知识	233
第一节 直流电机的简单工作原理	233

第二节	直流电机的基本结构	235
第三节	直流电机的励磁方式	237
第四节	直流电机的铭牌	238
小结		239
思考题与习题		239
第十八章	直流电机的电枢绕组	240
第一节	直流电枢绕组概述	240
第二节	单叠绕组	241
第三节	单波绕组	244
第四节	直流电机模型	246
第五节	电枢绕组电势	247
第六节	电磁转矩	249
小结		249
思考题与习题		250
第十九章	直流电机的电枢反应和换向	250
第一节	电枢反应	250
第二节	换向概述	253
第三节	改善换向的主要方法	256
小结		259
思考题与习题		259
第二十章	直流发电机	259
第一节	直流发电机的功率、转矩和电势平衡方程式	259
第二节	直流发电机的效率	261
第三节	他励发电机的运行特性	262
第四节	并励发电机的自励条件和运行特性	263
第五节	复励发电机的特性	266
小结		267
思考题与习题		267
第二十一章	直流电动机	268
第一节	直流电动机的功率、转矩和电势平衡方程式	268
第二节	直流电动机的特性	269
第三节	直流电动机的起动和转向改变	271
第四节	直流电动机的调速	272
小结		274
思考题与习题		275

第五篇 电机实验

第二十二章	电机实验基本知识	276
第一节	电机实验的目的	

第二节 电机实验的一般注意事项	277
第三节 测取电机特性的方法	278
第四节 实验结果整理和实验报告	278
第五节 电机的几项基本测量	279
第二十三章 变压器实验	286
第一节 单相变压器的空载实验	286
第二节 单相变压器的短路实验	288
第三节 三相变压器联结组实验	291
第二十四章 同步发电机实验	296
第一节 同步发电机特性和稳态参数的测定	296
第二节 同步发电机与电网并联运行实验	300
第三节 零序电抗和负序电抗的测定	303
第四节 瞬态参数的测定	304
第二十五章 异步电动机实验	306
第一节 异步电动机的空载实验和短路实验	306
第二节 三相异步电动机的起动实验	309
第二十六章 直流电机实验	311
第一节 并励发电机的特性实验	311
第二节 并励电动机的起动和调速实验	314

绪 论

一、电机在电力系统和国民经济中的作用

电机，包括变压器和旋转电机，都是通过电磁感应进行能量转换的电气设备。旋转电机用来实现机械能和电能之间的转换，变压器用来实现不同形式电能之间的转换。

在电力系统中，电机是十分重要的电气设备。电能的产生、输送、分配、变换、使用和控制，无一而能离开电机。在发电厂里，发电机是最主要的设备之一，是发电厂的“心脏”，将机械能转换为电能；电动机是发电厂各种辅助设备的拖动机械。在变电站里，用变压器升高或降低电压，以便于电能的远距离传输和合理、安全的分配。技术的进步和经济的发展，向电力工业提出了愈来愈高的要求，而电力工业对发电机、变压器的容量要求愈来愈大，数量要求愈来愈多。目前，世界上的发电量绝大部分是由汽轮发电机和水轮发电机发出的。已制成投产的最大汽轮发电机单机容量为1300MW，水轮发电机单机容量为700MW，有些国家正在研制单机容量达1500MW的汽轮发电机。我国自己制造的300MW汽轮发电机和水轮发电机，360MVA的大型电力变压器，均已在电力系统运行。600MW双水内冷汽轮发电机正在研制。总之，大型发电机和大型变压器在容量、数量上的增长，必将有力地促进电力工业的发展和电力系统的扩大。

在机械、冶金、石油、煤炭、化学等工业企业以及交通运输业中，电动机被广泛用于各种机械的拖动和交通工具的牵引。随着农业机械化的进展，电机用于各种农业机械也日益普遍。在自动控制系统中，利用各种各样的微型控制电机作为检测、放大和执行元件。此外，在国防、文教、医疗以及社会生活的各领域，电机的应用也愈来愈广泛。随着四个现代化的发展，电机在我国的应用范围将不断扩大。

二、电机的主要类型

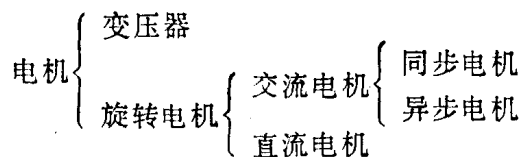
电机的类型繁多，用途迥异，分类方法也很多，但各种分类方法之间有着极为密切的内在联系，不能把它们机械地割裂开来。按照功能的不同，一般可将电机分为变压器和旋转电机两大类。

变压器是静止电器，它的输入和输出均为电能，与机械能无关，故无转动部分；旋转电机与机械能有关，故均有转动部分。旋转电机可作为发电机和电动机两种方式运行。发电机将机械能转换为电能；电动机将电能转换为机械能。

旋转电机的静止部分称为定子，旋转部分称为转子。按照定子和转子绕组中流过的电流的不同，旋转电机又可分为：

- (1) 直流电机 定子和转子绕组中都是直流电流；
- (2) 同步电机 定子和转子绕组中，一个是交流电流，另一个是直流电流；
- (3) 异步电机 定子和转子绕组中都是交流电流。

上述分类可作如下归纳。



本书将按此分类来分析各种电机。

三、电机分析中常用的基本定律

既然电机是根据电磁感应原理而制成的电气设备，那么，在电机里，电生磁、磁生电以及电与磁相互作用的现象总是并存的。但是，不同类型或不同用途的电机，各种电磁现象却有着主与从、隐与显的不同。在分析电机问题时，要牢固掌握经常用到的一些基本定律。

1. 基尔霍夫定律

(1) 基尔霍夫第一定律 此定律又称结点电流定律。它表明电路中任一结点的电流的代数和为零，也就是说流入结点的电流之和等于流出结点的电流之和。如果我们规定流向结点的电流为正，流出结点的电流为负，则

$$\sum i = 0$$

基尔霍夫第一定律表明了电路中任一结点上的电荷都不能自生或消灭，“流入”必等于“流出”，这就是电流的连续性原理。

(2) 基尔霍夫第二定律 此定律又称回路电压定律。它表明电路的任一闭合回路，各电势的代数和等于各电压降的代数和，即

$$\sum e = \sum u$$

如果把回路中的电压降视为负的电势，则回路中电势的总和等于零，即

$$\sum e = 0$$

基尔霍夫第二定律表明，沿任一闭合回路绕行一周，其电位的升与降必然相等，电路中的任何一点只有一个电位值，这就是电位的单值性原理。

2. 全电流定律

全电流定律是指在载流导体产生的磁场中，若任意闭合回线上微小线段 Δl 处磁场强度为 H ，则 H 、 Δl 及 H 与 Δl 正方向夹角的余弦($\cos\theta$)三者乘积的代数和，等于穿过该闭合回线的电流代数和，其表达式为

$$\sum H \cos\theta \Delta l = \sum I$$

应用上式时，凡电流方向与回线绕行方向之间符合右手螺旋定则，载流导体的电流为正，反之为负。全电流定律反映了电生磁的规律。

将全电流定律应用到闭合的多段磁路，可得磁路的基尔霍夫第二定律，即磁路任意回路的磁势 NI 的代数和等于各段磁压降 HI 的代数和，其表达式为

$$\sum NI = \sum HI$$

需要指出，使用上式时，线圈电流的方向和磁路绕行方向之间若符合右手螺旋定则，则这个线圈的磁势为正，反之为负。

磁路基尔霍夫第二定律在一段磁路上的应用，就是磁路的欧姆定律，它的表达式为

$$\phi = \frac{F}{R_m}$$

式中 F ——作用在磁路上的磁势，即励磁安匝， $F=IN$ ，

R_m ——磁路的磁阻，

ϕ ——磁路中的磁通。

3. 电磁感应定律

磁场与导体之间有相对运动，则导体的感应电势为

$$e = Blv$$

式中 e ——导体内的感应电势，

B ——磁场的磁通密度，

l ——导体的有效长度，

v ——导体与磁场的相对运动速度。

应用上式时要注意， B 、 l 、 v 三者是互相垂直的。

当环链线圈的磁通有变化，则线圈的感应电势为

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

式中 N ——线圈的匝数，

ϕ ——环链线圈的磁通。

电磁感应定律反映了磁生电的规律。前一种表达形式用于旋转电机较为方便，后一种表达形式用于变压器较为方便。

4. 电磁力定律

磁场的主要特征之一是置于磁场内的载流导体会受到电磁力的作用。载流导体所受作用力为

$$F = Bli$$

式中 B ——磁场的磁通密度，

l ——载流导体的有效长度，

i ——导体中的电流。

运用电磁力定律不仅可分析电机绕组的受力情况，还可计算旋转电机的电磁转矩。

四、电机学的任务与学习方法

电机学是电气类专业的一门主要技术基础课。它的任务是使学生掌握变压器、同步电机、异步电机、直流电机的基本结构、工作原理和运行性能；熟悉电机中的基本电磁规律，并获得运用电磁理论来分析、解决电机实际问题的能力；学会正确使用电力变压器和交直流电机，掌握电机实验方法，并结合现场实习熟悉电机的维护和检修知识。

学习电机学要求运用电磁理论来分析和处理有关电机的实际问题，而电机的实际问题往往又是错综复杂的。因此，学习本课程时，需要注意以下几点。

- 1) 熟悉并掌握对电机分析十分有用的电磁基本定律。
- 2) 在分析电机的电磁关系时，一般先将问题简化，找出主要矛盾，运用电磁理论加

以分析，从中得到虽是近似但能反映客观规律的结论，再逐步深入分析次要因素，进而取得更加完整的解答。

3) 分析电机的一般步骤是先分析电机的内部物理情况，接着根据物理情况，运用电磁基本定律列出电机的方程式，然后求解或分析电机的工作特性和运行性能。

4) 学习电机要注意弄清物理概念，不要满足于知道公式中的数量关系，更重要的是理解每一公式所表达的各物理量之间的关系。

5) 学习基本原理应以弄清电磁关系为主。各种电机有其共同点，也有其各自的特点。我们既要通过对比方法认识各种电机的特点，又要通过综合分析，掌握电机的一般电磁规律。

6) 实验不仅是研究电机的重要方法，而且是培养实际技能的一个重要环节，在学习过程中应予充分的重视。

第一篇 变 压 器

变压器是一种静止的电气设备，它通过电磁感应的作用，把一种电压的交流电能转换成频率相同的另一种电压的交流电能。在电力系统中，变压器占有很重要的地位。利用变压器具有变换电压的功用，人们就可以根据输电距离的远近和用电要求的不同，来决定输电配电线路合适的电压等级，从而实现电能的经济传输、合理分配和安全使用。此外，在工业企业的特殊用电设备上，在电能的测试和控制方面，变压器的应用也十分广泛。

变压器中虽然不发生机电能量的转换，但对它的性能进行研究，在整个电机学中仍有重要的理论意义。因为变压器不仅可以清楚地说明磁场在能量转换中的媒介作用，磁路在能量转换装置中的具体应用，而且它的基本电磁理论和分析方法是研究旋转电机，特别是研究异步电机的基础。本篇主要论述普通电力变压器的工作原理、基本特性和运行性能对其它变压器仅作简单介绍。

研究变压器问题可采取如下步骤：首先分析变压器内部的物理情况和基本电磁关系，弄清物理概念；然后导出基本方程式和等值电路，掌握分析工具；最后利用基本方程式和等值电路对变压器的运行性能进行讨论。

第一章 变压器的基本知识

为了逐步深入研究变压器的电磁关系、工作特性和运行性能，这里先简要介绍变压器的一些基本知识，如变压器的分类、工作原理和基本结构等。关于变压器的基本结构，将着重从电磁方面介绍其主要部件的构成和功用。

第一节 变压器的简单工作原理

变压器是通过电磁感应实现两个电路之间能量传递的，因此它必须具有电路和磁路两个基本组成部分。作为电路的是两个(或几个)匝数不同且彼此绝缘的绕组；作为磁路的是一个闭合铁心。绕组套装在铁心上，与铁心之间是绝缘的。图1-1(a)为一台单相双绕组变压器的示意图。在实际的变压器中，两个彼此绝缘、没有电的连接绕组是套装在同一个铁心柱上的，为了分析问题清楚起见，常常将两个绕组分别画在两个铁心柱上，如图1-1(b)所示。

变压器的两个绕组分别接于电源和负载。接电源的绕组，亦即自电网吸取电能的绕组，称为原绕组，又称原边或一次侧；接负载的绕组，亦即向外电路输出电能的绕组，称

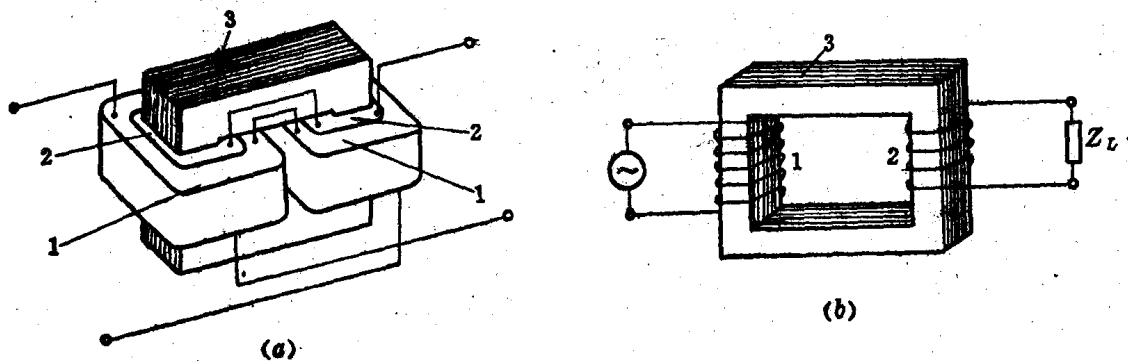


图 1-1 变压器原理

1—原绕组；2—副绕组；3—铁心； Z_L —负载

为副绕组，又称副边或二次侧。A、X和a、x分别为原、副绕组的两个出线端的标志。如图1-2所示，当原绕组的线端A、X接至交流电源时，在外施电压 u_1 作用下，原绕组中就有交流电流 i_1 流过并且建立交变磁势，变压器的铁心中产生交变磁通。沿铁心磁路而闭合的磁通称为主磁通 ϕ ，它不仅穿过原绕组的全部匝数 N_1 ，而且同副绕组的全部匝数 N_2 相交链。由电磁感应定律 $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ 可知，主磁通的变化将在原、副绕组中感生同频率的电势 e_1 和 e_2 。假如副绕组线端a—x接入负载，那么在电势 e_2 的作用下，将使副绕组内流

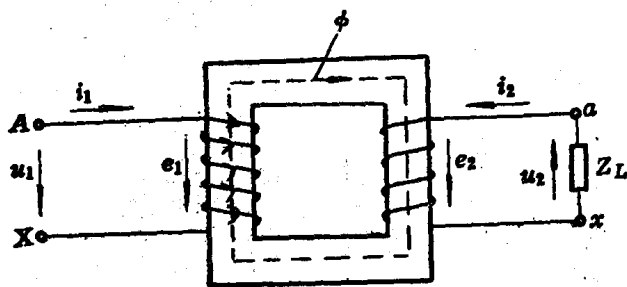


图 1-2 变压器的原理电路图

过电流 i_2 ，并向负载送出电功率。这样，就实现了交流电能从原边向副边的传递。在这种传递过程中，由于主磁通在原、副绕组的每一匝中所感生的电势是相等的，因此两个匝数不同的绕组就分别得到不同大小的感应电势。以后将证明，一般电力变压

器原绕组的感应电势接近于外施电压，副绕组的感应电势则接近于副绕组输出端的电压。改变原、副绕组的匝数比，就能够在副绕组得到不同的电压值，达到变换电压的目的。这就是变压器利用电磁感应实现电能传递并且变换电压的简单工作原理。

第二节 变压器电磁量正方向的规定

从变压器的基本工作原理可知，变压器接至交流电源后，其内部各种电磁量都是交变的。如果在交变的电路或磁路中，不预先给这种交变的电磁量规定一个正方向作为参考，那么它的正、负值就没有明确的意义。

为了把交变电磁量的正、负同它在电路或磁路中的方向联系起来，就必须预先规定它们的正方向。当某电磁量的瞬时实际方向与规定正方向一致时，该量定为正值，否则就定为负值。这样，只要知道某电磁量在某瞬间的正负，便可以确定该量在此瞬间的实际