

中等专业学校試用教科书

电 机 学

賴松年 鄔基烈 李煥章等編



中国工业出版社

中等专业学校試用教科书



电 机 学

賴松年 鄺基烈 李煥章等編

中国工业出版社

本书系中等专业学校“发电厂、电力网及电力系统”专业的试用教科书。全书分为四篇：一、变压器；二、同步电机；三、无换向器式异步电机；四、直流电机。书末附有习题和符号与缩语表。教学时酌加精简，本书也适用于和上述相近的专业。

本书初稿由西安电力学校赖松年、上海电力学校邬基烈、郑州电力学校李焕章编写，后经西安电力学校郭肇欽、陈正岳、李学博、张爱莲、张廷甫等改编，并由郭肇欽校对。

电 机 学

赖松年 邬基烈 李焕章等编

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑（北京阜外月坛南营房）

中国工业出版社出版（北京修脚园路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{2}$ ·印张 $10\frac{1}{2}$ ·字数276,000

1963年7月北京第一版·1963年7月北京第一次印刷

印数0001—3,240·定价(9-4)1.10元

*

统一书号：K15165·2178(水电-298)

目 录

緒論.....	7
---------	---

第一篇 变压器

第一章 变压器的基本知識.....	11
§1-1 变压器的基本原理和类型.....	11
§1-2 定額及額定值.....	12
§1-3 变压器的基本构造.....	13
第二章 单相变压器的空載情况.....	18
§2-1 空載时繞組中的感应电势.....	19
§2-2 空載損失.....	22
§2-3 空載电流.....	23
§2-4 变压器的变比.....	25
§2-5 变压器空載时的向量图.....	26
第三章 单相变压器負載时和短路时的情况.....	27
§3-1 单相变压器負載时的物理情况.....	27
§3-2 变压器負載时的向量图.....	29
§3-3 变压器的折算.....	30
§3-4 变压器的等值电路及負載时的簡化向量图.....	33
§3-5 变压器的短路.....	37
§3-6 变压器的电压变动和电压調整.....	39
第四章 变压器的空載試驗和短路試驗.....	43
§4-1 空載試驗.....	43
§4-2 短路試驗.....	44
§4-3 变压器的效率.....	46
第五章 三相变压器.....	48
§5-1 三相变压器的基本概念.....	48
§5-2 三相变压器的結綫組別.....	50

§5-3	三相变压器中的高次谐波与绕组联结方式的关系	54
§5-4	三相变压器在负载不平衡时的运行	57
§5-5	变压器的V/V联结	62
第六章	变压器的并列运行	63
§6-1	变压器并列运行的意义及条件	63
§6-2	短路电压不等时变压器的并列运行	64
§6-3	变比不等时变压器的并列运行	67
§6-4	联结组别不同时变压器的并列运行	69
第七章	变压器的过渡过电流	70
§7-1	概述	70
§7-2	突然短路过电流	70
§7-3	变压器的空载合闸电流	70
第八章	特种变压器	75
§8-1	自耦变压器	75
§8-2	三绕组变压器	77
§8-3	电焊变压器	81

第二篇 同步电机

第九章	同步电机的基本知識	82
§9-1	同步电机的定义及类型	82
§9-2	汽轮发电机和水轮发电机的基本构造	83
第十章	同步电机的电枢绕组及电势	90
§10-1	导体中的电势	90
§10-2	高次谐波的概念	93
§10-3	绕组中的电势	95
§10-4	单相绕组及其电势	99
§10-5	三相单层全节距绕组	105
§10-6	三相单层全节距绕组的实际线路图	106
§10-7	三相双层短节距绕组的安排	107
第十一章	同步电机电枢绕组的磁势	110
§11-1	电枢磁势及电枢磁场	110
§11-2	单相绕组的磁势	111

§11-3	三相繞組的磁勢	115
§11-4	三相繞組中电流不对称时的磁勢	118
§11-5	交流电机的漏磁感抗	119
第十二章	同步电机的电枢反应	119
§12-1	电枢反应的一般概念	119
§12-2	三相同步发电机在对称負載时的电枢反应	121
§12-3	单相电机的电枢反应	124
第十三章	同步发电机的向量图和参数	127
§13-1	負載时的电压变动	127
§13-2	基本电势向量图	128
§13-3	变换过的电势向量图	129
§13-4	簡化电势向量图	133
§13-5	电势向量图中各参数的求法	134
§13-6	实用电势向量图	142
第十四章	同步发电机的特性曲线	145
§14-1	外特性曲线和調整特性曲线	145
§14-2	同步发电机的损失和效率	147
第十五章	同步发电机的突然短路	149
§15-1	概述	149
§15-2	超导回路的概念	150
§15-3	三相短路电流	151
§15-4	过渡感抗和次过渡感抗	158
§15-5	三相突然短路电流的大小	161
第十六章	同步发电机的不对称稳定短路	162
§16-1	概述	162
§16-2	正序电抗、負序电抗和零序电抗	163
§16-3	单相短路	166
§16-4	两相短路	167
第十七章	同步发电机的并列运行	171
§17-1	概述	171
§17-2	准确同步法并列的条件和方法	172
§17-3	同步发电机的自同步并列法	176

§17-4	同步电机的电磁功率	178
§17-5	同步发电机与无穷大容量电网并列运行	180
§17-6	同步发电机并列运行时负载的转移	185
§17-7	整步功率	186
§17-8	静态稳定与动态稳定的概念	187
§17-9	同步发电机并列运行时的振荡	188
第十八章	同步电动机	190
§18-1	同步电动机的基本知識	190
§18-2	同步电动机的向量图	190
§18-3	同步电动机的电磁功率	192
§18-4	同步电动机在轉矩不变而改变激磁电流时的 运行、U形曲綫	193
§18-5	激磁电流不变而改变轉矩时的工作特性曲綫	194
§18-6	同步补偿机	196

第三篇 无换向器式异步电机

第十九章	异步电机的基本知識	198
§19-1	异步电机的定义和类型	198
§19-2	三相异步电机的基本构造	199
§19-3	三相异步电机的工作原理及工作状态	201
第二十章	异步电机的运行情况	203
§20-1	轉子不动时的异步电机	203
§20-2	轉子旋轉时的异步电机	208
§20-3	异步电机的等值电路	210
§20-4	异步电动机的向量图	212
第二十一章	异步电动机的轉动力矩	213
§21-1	异步电动机的能量图	213
§21-2	异步电动机的轉矩公式	214
§21-3	异步电机的机械特性	216
第二十二章	异步电机的工作特性及圖图	221
§22-1	异步电机的工作特性	221
§22-2	异步电机的簡化圖图	222

§22-3 简化圆图的作法及应用	226
第二十三章 异步电机的起动和调速	230
§23-1 异步电动机的起动特性	230
§23-2 异步电动机的起动方法	231
§23-3 双鼠笼电动机和深槽电动机	234
§23-4 异步电动机的速度调节	237
第二十四章 异步电机的特殊工作状态	240
§24-1 异步发电机	240
§24-2 移相器	242
§24-3 三相感应调压器	243
§24-4 单相异步电动机	244
 第四篇 直流电机	
第二十五章 直流电机的基本知識	249
§25-1 直流电机的工作原理	249
§25-2 直流电机的基本构造	249
§25-3 直流电机的损失和效率	253
第二十六章 直流电机的电枢绕组及其电势	255
§26-1 有关绕组的基本知識	255
§26-2 单迭绕组	257
§26-3 复迭绕组	259
§26-4 单波绕组	260
§26-5 复波绕组	263
§26-6 直流电机的电势	264
第二十七章 直流电机的电枢反应	266
§27-1 电枢磁势	266
§27-2 直流发电机的电枢反应	267
§27-3 直流电动机的电枢反应	270
第二十八章 换向	270
§28-1 换向过程的本质	270
§28-2 $b_{u\kappa} = b_{\kappa}$ 时换向回路的电流方程式	272
§28-3 $b_{u\kappa} = b_{\kappa}$ 时的电阻换向	274

§28-4	$b_u = b_k$ 时的曲线换向	274
§28-5	改善换向的主要方法	275
第二十九章 直流发电机		279
§29-1	直流发电机的分类	279
§29-2	直流发电机的能量图及电势方程式	280
§29-3	电磁转矩及转矩平衡方程式	281
§29-4	直流发电机的特性	283
§29-5	他激发电机	284
§29-6	并激发电机	286
§29-7	串激发电机	289
§29-8	复激发电机	290
§29-9	并激直流发电机的并列运行	291
第三十章 直流电动机		293
§30-1	直流电机的可逆原理和直流电动机的分类	293
§30-2	直流电动机的能量图和电势方程式	294
§30-3	电动机的转矩和转矩平衡方程式	295
§30-4	直流电动机的特性	296
§30-5	并激电动机的特性	298
§30-6	串激电动机的特性	305
§30-7	复激电动机的特性	308
第三十一章 电机的发热与冷却		310
§31-1	概述	310
§31-2	均质固体的发热理论	310
§31-3	电机温升的测定方法	313
§31-4	绝缘材料的分级	314
§31-5	电机各部分的温升限度	315
§31-6	电机的主要工作方式	319
§31-7	电机的冷却与通风	320
练习题		325
主要符号与缩语		332

緒 論

一、电机的定义和分类

电机是把一种能量形态轉換为另一种适合要求和便于利用的能量形态的机构；且輸出或輸入的能量，至少有一方为电能，或者两方都为电能，但具有不同的电压、波形、頻率或相角。可是，通常所指的电机，并不包括与电能有关的一切机械，而仅指以电磁感应为基本原理的那一部分。严格地说，它們应叫做电磁机。这一部分电机，目前在产生、控制和利用电能方面占有重要地位。

电机的分类方法很多，但为了在理論上叙述方便，通常分为：

1. 变压器；
2. 同步电机；
3. 异步电机；
4. 直流电机。

二、电机在电力系统中的地位和工业上的应用

因为电能便于远距离輸送，而且效率很高，可以改变工业为靠近动力資源而不能合理分布的情况；电能的广泛应用又改进了生产技术，使生产效率显著提高，所以近二、三十年来，世界各国的发电量成几倍、几十倍地增加，巨大的电力系统也迅速形成。

在电力系统中，电机是主要元件。要将机械能变为电能須用发电机；为远距离輸送电能并进行分配，需要能升压和降压的**变压器**；而应用电能的受电器則主要是**电动机**。

电机除了是发电厂和变电所的主要設備外，在工业企业、农业、国防和交通运输业中的应用也十分广泛。如在机器制造业中，工作母机需要电动机拖动。在冶金工业中，高炉和平炉都要用

电动机操作和控制。拖动大型軋鋼机常需 5,000 千瓦或更大的直流电动机。在化学工业中，拖动大型压缩设备的同步电动机和感应电动机单机容量也高达数千千瓦。用于电解的直流发电机可以供给数万安的巨大电流。在交通运输方面，城市电车、铁路电气机车等又需要满足各种特殊要求的牵引电动机。此外，现代工业的自动化装备中，则需要各种容量极小的微电机。

三、电机的作用原理

电机的作用原理是以**电磁力**和**电磁感应**的物理现象为基础的。这些现象已在物理学和电工理论中详加说明，并已写成了相应的定律。

作用于在磁场中移动的电荷上的力，叫做电磁力。在磁感应为 B 的均匀磁场中，垂直于磁力线放置一根长为 l 、通以电流 I 的导体，则导体受到的电磁力

$$F = BlI.$$

电磁感应定律有两种表达方式——法拉第公式和馬克斯威尔公式。

长为 l 的导体，垂直于磁感应为 B 的均匀磁场，以速度 v 运动时，在导体中感应而生的电势

$$e = Blv,$$

这是法拉第公式。

闭合回路中，在 dt 时间内穿过它的磁通发生 $d\Phi$ 的变化，则在此回路中的感应电势

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

这是馬克斯威尔公式。

四、电机制造发展的几个主要阶段和近代的电机制造业

1831年，即距今一百三十多年以前，法拉第发现电磁感应定

律。

1832年，皮克西兄弟制成第一台发电机。

1834年，雅可比制成第一台可供实用的直流电动机。

1878年，亚布洛契可夫創造了第一台实用的交流电机；同时期他还发明了变压器。

1889年，多里沃-多布罗沃尔斯基制成三相异步电动机；同时期他还发明了三相变压器。

距今七十多年以前，各种主要型式的电机皆已陸續出現。

进入本世紀以来，电机的結構設計和制造工艺有了很大的改进，并不断地应用了新的磁性材料和絕緣材料，使电机的外廓尺寸和重量迅速减小。仅在1900~1920年的二十年間，按单位容量計算，发电机重量就下降至56%，电动机下降至41%，变压器下降至41.5%。

在单机容量的提高方面，以汽輪发电机为例，1900年还不超过5,000千伏安，1920年已达60,000千伏安。1937年苏联制成100,000千瓦的发电机。同年，应用氢冷却后，单机容量达150,000千瓦。近年，在繞組导体内部采用气冷、油冷和水冷后，已制成500,000千伏安的发电机，而750,000千瓦的发电机苏联已設計成功。

水輪发电机方面，苏联布拉茨克水电站的单机容量为200,000千瓦，而克拉斯諾揚斯克水电站单机容量則設計为300,000千瓦。

苏联古比雪夫-莫斯科輸电綫应用了容量为123.5兆伏安、电压为400千伏的单相变压器。德意志民主共和国已生产了容量为125兆伏安、电压为220千伏的三相变压器。

自本世紀30年代起，随着生产过程自动化和遙控技术的发展，出現了各种型式的电机放大机。此外，作为控制元件应用的微电机也迅速发展。

五、我国的电机制造业

解放前，半封建半殖民地的旧中国，只能制造不超过200千

瓦的直流发电机,不超过300馬力的电动机,最大容量不超过2,000千伏安、最高电压不超过30千伏的变压器。汽輪和水輪发电机則从未生产过。

新中国誕生后, 1949~1952年經濟恢复时期,即能生产3,000千瓦的水輪发电机, 300千瓦的直流电机和940千瓦的感应电动机。

1953~1957年第一个五年計劃期間,我国已制成15,000千瓦的水輪发电机, 12,000千瓦的汽輪发电机, 2,200千瓦的感应电动机, 1,500千瓦的直流电机, 40,500千伏安、154千伏的三相变压器和20,000千伏安、200千伏的单相变压器。

1958年以后,已制成容量远超过上述数字的产品,其中包括72,500千瓦的水輪发电机和50,000千瓦的汽輪发电机。

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本知識

§1-1 变压器的基本原理和类型

1. 定义：变压器是一种静止的电器，能够把一种交流电的电压和电流，变为另一种或几种频率相同但数值不同的电压和电流。

2. 工作原理：变压器的工作原理基于电磁感应定律。图 1-1 是变压器的原理图。在构成闭合回路的铁心上，绕有绕组 1 和 2，两个绕组有着不同的匝数 w_1 和 w_2 。如果对某一绕组——例如绕组 1，施以交变电压 U_1 ，

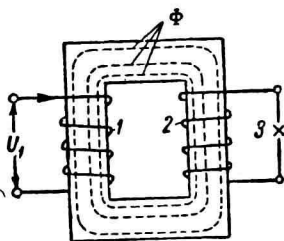


图 1-1 变压器的原理图

则有交变电流通过这个绕组。由电流产生的磁势在铁心中建立交变磁通 Φ ，它穿过两个绕组，使两个绕组发生电磁耦合。根据电磁感应定律，磁通 Φ 随时间变化时，便在绕组 1 和 2 中分别感生电势 e_1 和 e_2 ； $e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$ ，而 $e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$ 。也就是说，绕组中的感应电势正比于绕组的匝数。通常 $w_1 \neq w_2$ ，所以两绕组的电压不同。如果把用电器具 3（称为负载）与绕组 2 接通，则沿绕组 2 和负载 3 组成的回路中便流过电流，这时绕组 1 便从电源吸取电能供给负载 3 的消耗。

3. 一些常用术语及其含义：在变压器中吸取能量的绕组叫作一次绕组或原绕组；输出能量的绕组叫作二次绕组或副绕组（一次和二次并非固定的）。有关一次侧的各量，例如功率、电流、电压、阻抗等，称为一次量，并在代表符号的右下方注以下标 1，如 U_1 、 I_1 等；有关二次侧的各量，则称为二次量，并在代表符号

号的下方注以下标 2。

如果一次侧是高压，而二次侧是低压，这种变压器叫作**降压变压器**；反之，叫作**升压变压器**。

如果变压器有两个绕组，便称为**两绕组变压器**，一侧是高压(BH)，一侧是低压(HH)；在大容量的变压器中有**三绕组变压器**，它具有高压(BH)、中压(CH)、和低压(HH)三组绕组；一次和二次绕组有共同部分的变压器，称为**自耦变压器**；有几个副绕组的变压器，称为**多绕组变压器**，主要应用于电子和离子仪器中。依据相数的不同，变压器有**单相**、**三相**和**多相**之分。

4. 主要类型：按变压器的用途，可分为下列主要类型：

(1) 电力变压器——输电和配电用；

(2) 感应调压器——调整配电网中的电压用；

(3) 自耦变压器——用于交流电动机的起动，或在一定范围内调整电压；

(4) 仪表用互感器——用于测量仪表的电路中，分电压互感器和电流互感器；

(5) 特种用途的变压器——如电焊用、试验用、水银整流器或引燃管用、医疗设备用的变压器等。

变压器的应用很广，因而构造型式也极多，但其运用的基本原理及研究的方法都是相同的。本篇将着重讨论最基本的单相和三相两绕组电力变压器。

§1-2 定额及额定值

制造厂为了确定电机或电器在给定条件下的性能，所规定的有关电气和机械的量，包括冷却介质的条件，称为**定额**。定额规定的量值是**额定值**，全部标明在铭牌上。

变压器的额定值包括容量、电压、电流、频率以及冷却介质的额定要求等。

变压器的额定容量，是二次绕组的额定电压和额定电流所决定的视在功率，通常用千伏安表示。三绕组变压器的额定容量在

§8-2中討論。

变压器額定一次电压是指規定的加到一次繞組的电压。如果变压器一次繞組有分接头，則額定电压是指特別标明的一个电压值；**額定二次电压**是指当变压器空載而一次側加額定电压时二次側的端电压。

变压器一次側和二次側的**額定电流**，是从相对应繞組的額定电压和变压器的額定容量計算出来的电流值。由于变压器的效率很高，在两繞組变压器中，計算額定电流时，可以认为两繞組的額定容量是相等的；在三繞組变压器中，三个繞組的額定容量另有規定(§8-2)。在**額定电流时的負載**称为**額定負載**。

变压器的額定頻率，在我国規定为50赫芝。

§1-3 变压器的基本构造

变压器由鉄心、繞組、油箱(油浸式变压器)和絕緣套管四个主要部分构成。

1. 鉄心：按鉄心型式，变压器可分为**內鉄式**(图1-2、图1-3)和**外鉄式**(图1-4)两种。在結構上內鉄式較外鉄式簡單，并且鉄心与繞組間也容易絕

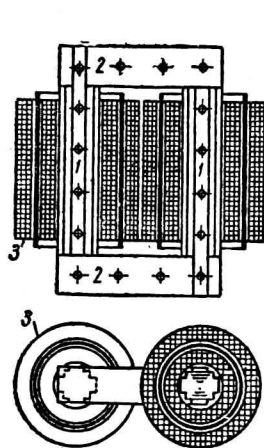


图 1-2 单相內鉄式变压器的鉄心和繞組

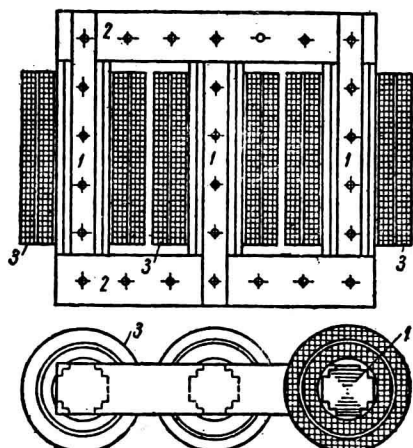


图 1-3 三相內鉄式变压器的鉄心和繞組

緣，所以得到广泛应用。图1-2至图1-4中，1是鉄心柱，2是鉄軛，3是繞組。

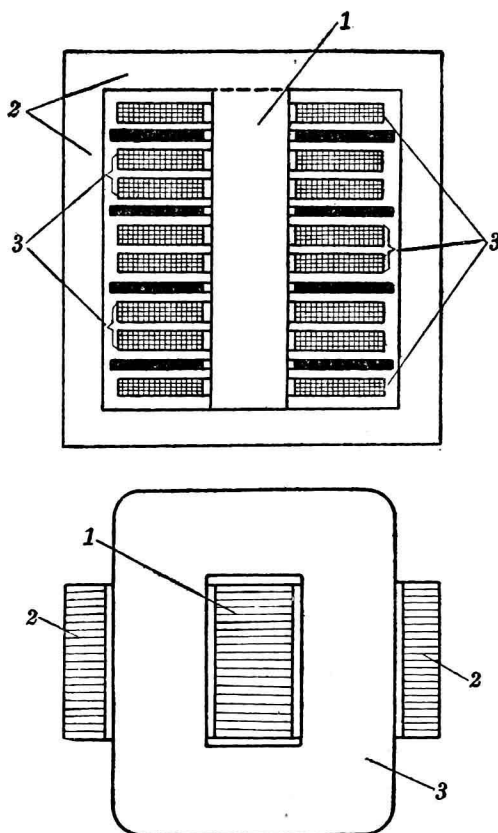


图 1-4 单相外鉄式变压器的鉄心和繞組

(1)鉄心材料：变压器的鉄心由厚度为0.35或0.5毫米的高合金硅鋼片装配而成。这种鋼片含硅量达4~5%，因而单位重量的鉄心损失低。近年来更采用冷轧的晶粒取向的硅鋼片，它的单位重量损失是含硅量相同的热軋鋼片的1/1.5，在相同的磁場强度 H 值下，磁感应 B 約大20%，矯頑力减小至1/2~1/4。它的这些优点只有在沿軋軋方向磁化时才存在。由于应用冷轧鋼片，变压器的体积和重量显著地减小。为了减小渦流损失，片与片間用0.04~0.06毫米厚的絕緣紙或絕緣漆（*302或*303絕緣清漆）互相絕緣。