



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电机学

赵君有 徐益敏 张 玲 李建兴 合编



中国电力出版社

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



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电机学

赵君有 徐益敏 合编
张 玲 李建兴
王广慧 张爱玲 主审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 简 介

本书为职业教育与成人教育司推荐教材。

全书共有 13 章, 主要内容包括变压器、异步电机、同步电机和直流电机四大部分, 侧重讨论电机的基本结构、运行原理、参数及运行性能, 并根据需要增加一些电力系统中常见的电机运行问题的介绍。

本书可作为高职高专学校的发电厂及电力系统、继电保护、供用电技术、电气技术等专业的教材, 也可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/赵君有等编. —北京: 中国电力出版社, 2005
教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-3414-0

I. 电... II. 赵... III. 电机学—成人教育: 高等教育—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 061767 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 6 月第一版 2005 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 309 千字

印数 0001—3000 册 定价 19.50 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)

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，同意列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书的编写注重突出以下特点：

(1) 重点突出。本书侧重于稳态部分基本原理和基本概念的阐述，力求做到概念准确，同时强调基本理论的应用，使学生掌握分析电机的基本方法，建立牢固的物理概念，为学习后续课程和解决今后遇到的工程问题做好准备。

(2) 力求简洁。本书简化了一些复杂的数学推导过程，追求基本理论及其应用的表述。

(3) 理论联系实际。本书的编写注重与工程实际相联系，编入了一些电力系统中常见的电机运行内容。

(4) 内容模块化。各模块教学目标明确，针对性强，具有相对而言的独立性，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。

(5) 便于自学。为了便于巩固及应用所学内容，每章配有思考题与习题（附有部分习题答案，以便参考），每篇末还有自测题，学生可以自测自检。

本书共分四篇十三章。第一、二、三章由郑州电力高等专科学校张玲老师编写，第四、五、六、七、八章由西安电力高等专科学校徐益敏老师编写，第十二、十三章由西安电力高等专科学校李建兴老师编写，其余部分由沈阳工程学院赵君有老师编写。全书由赵君有统稿。

本书由山西大学的王广慧老师和太原理工大学的张爱玲老师担任主审。在审阅过程中王广慧老师提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，编写时间紧迫，书中难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

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 变压器的基本工作原理及分类 5

第二节 变压器的基本结构 6

第三节 变压器的型号和额定值 8

小结 9

思考题与习题 9

第二章 变压器的运行原理与运行分析 10

第一节 单相变压器的空载运行 10

第二节 单相变压器的负载运行 15

第三节 变压器的参数测定 20

第四节 标么值 24

第五节 变压器的运行特性 26

第六节 三相变压器的磁路系统和电路系统 29

第七节 三相变压器磁路系统和电路系统对电动势波形的影响 33

第八节 变压器的并联运行 35

小结 38

思考题与习题 39

第三章 变压器的不对称运行和瞬变过程 41

第一节 三相变压器的不对称运行 41

第二节 变压器的瞬变过程 45

小结 49

思考题与习题 50

本篇自测题 50

第二篇 异 步 电 机

第四章 交流电机的绕组、电动势和磁动势 52

第一节 交流绕组简介 52

第二节 交流绕组的感应电动势 57

第三节 交流绕组的基波磁动势 63

小结 67

思考题与习题 68

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 第五章 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理 | 69 |
| 第一节 三相异步电动机的基本结构 | 69 |
| 第二节 三相异步电动机的基本工作原理 | 71 |
| 第三节 三相异步电动机的型号和额定值 | 73 |
| 小结 | 74 |
| 思考题与习题 | 74 |
| 第六章 三相异步电动机的运行原理 | 75 |
| 第一节 三相异步电动机的空载运行 | 75 |
| 第二节 三相异步电动机的负载运行 | 77 |
| 第三节 三相异步电动机的等效电路 | 81 |
| 第四节 三相异步电动机的功率平衡和转矩特性 | 84 |
| 第五节 三相异步电动机的工作特性 | 90 |
| 小结 | 91 |
| 思考题与习题 | 92 |
| 第七章 三相异步电动机的起动和调速 | 94 |
| 第一节 三相异步电动机的起动 | 94 |
| 第二节 深槽式和双鼠笼式异步电动机 | 98 |
| 第三节 三相异步电动机的调速方法简介 | 100 |
| 小结 | 102 |
| 思考题与习题 | 102 |
| 第八章 三相异步电动机在不对称电压下运行 | 104 |
| 第一节 三相异步电动机在不对称电压下运行 | 104 |
| 第二节 单相异步电动机 | 105 |
| 小结 | 107 |
| 思考题与习题 | 107 |
| 本篇自测题 | 107 |

第三篇 同 步 电 机

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第九章 同步发电机的基本工作原理和结构 | 109 |
| 第一节 三相同步发电机的基本工作原理及其分类 | 109 |
| 第二节 汽轮同步发电机的基本结构 | 111 |
| 第三节 三相同步发电机的型号和额定值 | 113 |
| 小结 | 113 |
| 思考题与习题 | 113 |
| 第十章 同步发电机的运行原理 | 115 |
| 第一节 同步发电机电枢反应 | 115 |
| 第二节 同步发电机的电动势方程和相量图 | 120 |
| 第三节 同步发电机的运行特性 | 124 |
| 第四节 同步发电机的并列 | 128 |
| 第五节 同步发电机的有功功率功角特性和静态稳定 | 131 |
| 第六节 同步发电机的无功功率功角特性及 V 形曲线 | 137 |
| 第七节 同步调相机和同步电动机 | 142 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 小结 | 145 |
| 思考题与习题 | 146 |
| 第十一章 同步发电机的三相突然短路和异常运行 | 148 |
| 第一节 同步发电机的三相突然短路 | 148 |
| 第二节 同步发电机的不对称运行 | 155 |
| 第三节 同步发电机的失磁运行 | 158 |
| 第四节 同步发电机的振荡 | 160 |
| 小结 | 162 |
| 思考题与习题 | 162 |
| 本篇自测题 | 163 |

第四篇 直 流 电 机

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第十二章 直流电机的基本工作原理和结构 | 165 |
| 第一节 直流电机的基本工作原理 | 165 |
| 第二节 直流电机的基本结构 | 166 |
| 第三节 直流电机的励磁方式 | 167 |
| 第四节 直流电机的型号和额定值 | 168 |
| 小结 | 168 |
| 思考题与习题 | 169 |
| 第十三章 直流电机的电磁原理及运行特性 | 170 |
| 第一节 电枢绕组简介 | 170 |
| 第二节 电枢电动势和电磁转矩 | 174 |
| 第三节 电枢反应 | 176 |
| 第四节 换向简介 | 178 |
| 第五节 直流发电机 | 179 |
| 第六节 直流电动机 | 184 |
| 小结 | 191 |
| 思考题与习题 | 192 |
| 本篇自测题 | 193 |
| 部分习题与思考题答案 | 195 |
| 参考文献 | 197 |

绪 论

电机是指以电磁感应为理论基础进行机电能量转换或信号转换的一种电磁机械装置。

电机的种类很多,本书将要介绍的电机有同步发电机、变压器、异步电动机和直流电机四种。

电机学是一门既有基础性又有专业性的课程,研究电机这一特定机械中电和磁之间错综复杂的关系。本课程将讨论电机的主要结构、工作原理、工作性能和实验方法等,主要是电、磁、机械方面的问题。学习的重点是分析电机内部的电磁过程。

电机学也是一门理论性很强的课程,为了学好这门课程,首先要抓住主要矛盾,有条件地略去一些次要因素,找出问题的本质,不能只满足于公式中的数学关系,要着重理解物理意义,进行定性分析,适当进行定量计算;其次要注重理论联系实际,重视实验和工程实践,善于用理论分析生产实践中的问题;然后要善于运用对比的方法,分析各种电机之间密切的内在联系,比较它们的共同点和不同点,加强对各种电机性能和原理的理解。

一、电机学中常用的几个基本电磁定理

1. 全电流定律 (安培环流定律)

全电流定律指的是磁场强度 H 沿空间任意闭合路径 l 的线积分等于该闭合回路所包围的全部电流的代数和,其数学表达式为

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum i \quad (0-1)$$

式中,当电流的方向与闭合路径中 H 的方向(即闭合路径 l 的方向)符合右手螺旋时 i 取正值,否则取负值。

在工程中,式(0-1)可写为

$$\sum Hl = \sum i \quad (0-2)$$

图0-1(a),应用全电流定律可写成

$$\oint Hdl = I_1 + I_2 - I_3$$

图0-1(b),应用全电流定律可写成

$$\oint Hdl = Ni$$

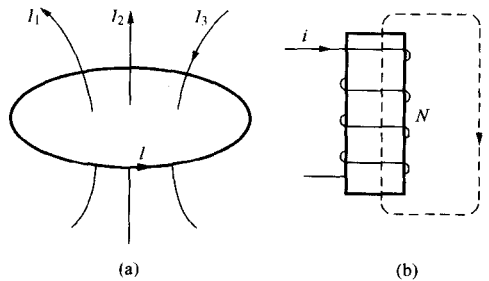


图0-1 全电流定律的应用

2. 磁路的基尔霍夫第一定律 (磁通的连续性定律)

磁路的基尔霍夫第一定律指的是磁路中任一闭合面,在任一瞬间,穿过该闭合面的各支路磁通的代数和恒等于零,表达式为

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-3)$$

如图 0-2 所示, 任取一闭合面 A, 令进入 A 面的磁通为正, 穿出的为负, 则有

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

3. 磁路的基尔霍夫第二定律

由全电流定律的演变得

$$\sum Hl = \sum iN \quad (0-4)$$

式中 Hl ——磁压降;

iN ——作用在磁路上的安匝数, 用 $F = iN$ 表示, 称为磁动势。

式 (0-4) 表明, 沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁压降的代数和, 这就是磁路的基尔霍夫第二定律。

4. 磁路的欧姆定律

若 Φ 为磁路中的磁通, R_m 为磁路的磁阻, l 为磁路的平均长度, μ 为磁路材料的磁导率, S 为磁路的截面积, $F = iN$ 为作用在磁路上的磁动势, 则磁路的欧姆定律为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{iN}{R_m} \quad (0-5)$$

式中

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (0-6)$$

二、常用的铁磁材料及其特性

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场, 电机的铁心常用磁导率较高的铁磁材料制成。

1. 铁磁材料的磁化特性

铁磁材料包括铁、镍、钴等以及它们的合金。将这些材料作为磁路的介质, 磁场会显著增强。铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性, 这种现象称为铁磁物质的磁化。

由式 (0-5) 和 (0-6) 得

$$\frac{\Phi}{S} = \mu \frac{iN}{l} = \mu \frac{F}{l}$$

$$B = \frac{\Phi}{S}, H = \frac{F}{l} \quad (0-7)$$

或

$$B = \mu H$$

式中 B ——磁通密度, 也称磁感应强度, 是表征磁场强弱的物理量;

H ——磁场强度, 它是进行磁场分析时引用的一个辅助物理量, 仅与磁动势和磁路的长度有关, 与磁路的介质无关。

在非铁磁材料中, 磁通密度 B 和磁场强度 H 之间的关系 $B = \mu_0 H$ 为线性关系, 直线的斜率 μ_0 很小, 如图 0-3 中虚线所示。

铁磁材料的磁通密度 B 和磁场强度 H 之间的关系

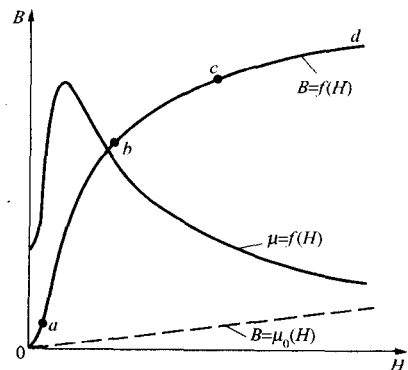


图 0-3 铁磁材料的磁化曲线

$B = \mu H$ 为非线性关系。将一块尚未磁化的铁磁材料进行磁化, 磁场强度 H 由零逐渐增大时, 磁通密度 B 将随之增大, 如图 0-3 所示。在 $0ab$ 段, B 随着 H 的增大而增大, b 点称为膝点。在 bc 段, B 随着 H 增大的速率变慢, 这种现象称为磁路饱和。 c 点以后, 曲线基本是与 $B = \mu_0 H$ 平行的直线, B 几乎不随着 H 增大。

铁磁材料的这种现象可以解释如下: 铁磁物质能被磁化, 是因为在它内部存在着许多很小的天然磁化区, 称为磁畴。在图 0-4 中磁畴用一些小磁铁表示。铁磁物质未放入磁场时, 磁畴杂乱无章地排列着, 磁效应互相抵消, 对外部不呈磁性, 如图 0-4 (a) 所示。将铁磁物质放入磁场, 在外

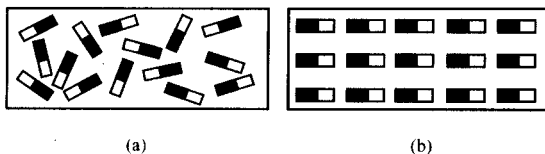


图 0-4 磁畴

(a) 铁磁物质未放入磁场; (b) 铁磁物质放入磁场

磁场作用下, 磁畴的极性将趋于同一方向, 如图 0-4 (b) 所示, 由此形成一个附加磁场, 叠加在外磁场上, 磁畴所产生的附加磁场将比非铁磁物质在同一磁场强度下所激励的磁场强得多, 使铁磁材料内磁场大为增强。当磁畴全部沿外磁场方向排列后, 即使外磁场再增加, 铁磁材料内磁场几乎不再增加, 即进入磁饱和状态。

设计电机时, 为使主磁路的磁通密度较大而又不过分增大励磁磁动势, 通常把铁心内的工作磁通密度选择在膝点附近。

2. 磁滞回线和基本磁化曲线

若将铁磁材料进行周期性磁化, B 和 H 之间的关系就会变成如图 0-5 中曲线 $abcdefa$ 所示。当 H 从零开始增加到 H_m 时, B 相应地从零增加到 B_m 。以后如果逐渐减小磁场强度 H , B 值将沿曲线 ab 下降。当 $H=0$ 时, $B = B_r \neq 0$, B_r 称为剩余磁通密度, 简称剩磁。要使 B 值从 B_r 减小到零, 必须加上相应的反向外磁场, 此反向磁场强度称为矫顽力, 用 H_c 表示。铁磁材料所具有的这种磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 变化的现象, 叫做磁滞。呈现磁滞现象的 $B-H$ 闭合回线, 称为磁滞回线, 如图 0-5 中 $abcdefa$ 所示。磁滞现象是铁磁材料的另一个特性。

同一铁磁材料在不同的磁场强度 H_m 下有不同的磁滞回线, 如图 0-6 所示。将各磁滞回线的顶点连接起来, 所得的 $B-H$ 曲线称为基本磁化曲线。

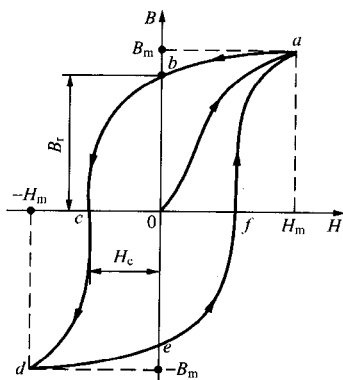


图 0-5 铁磁材料的磁滞回线

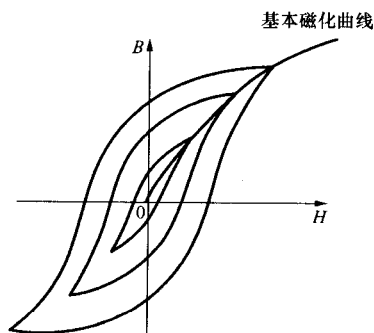


图 0-6 基本磁化曲线

磁滞回线窄、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的材料，称为软磁材料，如铸钢、硅钢、铸铁等，它们容易被磁化，常用来制造电机的铁心。磁滞回线宽、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都大的材料，称为硬磁材料，如铝镍钴合金等，常用来制造永久磁铁。

3. 磁滞损耗和涡流损耗

在交流磁路中，磁场强度的大小和方向不断变化，铁磁材料磁化方向反复变化，使磁畴方向也不断来回排列。磁畴彼此之间摩擦引起的损耗，称为磁滞损耗。由实验和数学分析证实，单位体积铁心中的磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积及交变频率成正比。当频率一定时，磁滞损耗大约与磁感应强度最大值的平方成正比。电机中的铁心采用软磁材料，目的之一就是减少磁滞损耗。

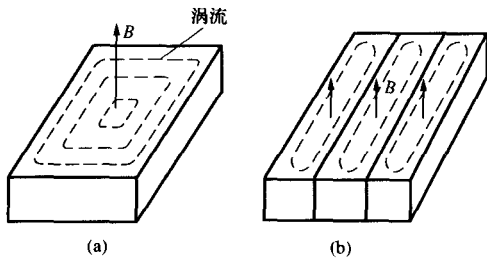


图 0-7 涡流路径

铁心是导电的，交变的磁通也能在铁心中感应电动势，并引起环流。这些环流在铁心内部围绕磁通作涡流状流动，称为涡流，如图 0-7 (a) 所示。涡流在铁心中引起的损耗，称为涡流损耗。由实验和数学分析证实，涡流损耗与频率的平方及磁感应强度的最大值的平方成正比。为了减小涡流，电机的铁心均采用 0.35 ~ 0.5mm 厚、两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成，如图 0-7 (b) 所示。

磁滞损耗和涡流损耗，总称为铁心损耗。对于一般的电工钢片，在正常的工作磁通范围内 ($1\text{T} < B_m < 1.8\text{T}$)，铁心损耗可近似为

$$P_{Fe} \approx C_{Fe} B_m^2 f^{1.3} G \quad (0-8)$$

式中 C_{Fe} ——铁心损耗系数；

G ——铁心重量。

式 (0-8) 表明，铁心损耗与 B_m 的平方、 f 的 1.3 次方及铁心重量成正比。

第一篇 变 压 器

变压器是一种静止的电气设备，它利用电磁感应原理，把一种电压等级的交流电能转换成频率相同的另一种电压等级的交流电能。

变压器是电力系统的重要设备，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，供用户使用，变压器在国民经济各部门得到了广泛的应用。本篇主要分析一般用途的电力变压器。首先简要地介绍变压器的结构，然后着重分析变压器的运行原理和特性、三相变压器的联结组和变压器的并联运行，最后简要介绍不对称运行和瞬变过程。

第一章

变压器的基本知识

第一节 变压器的基本工作原理及分类

一、变压器的基本工作原理

变压器工作原理的基础是电磁感应定律。两个互相绝缘的绕组套在同一个铁心上，绕组之间只有磁的耦合而没有电的联系，如图 1-1 所示。其中绕组 1 接交流电源，称为一次绕组；绕组 2 接负载，称为二次绕组。

当一次绕组接到交流电源时，绕组中有交流电流流过，在铁心中产生与外加电压频率相同的交变磁通 Φ 。交变磁通 Φ 同时交链一、二次绕组，根据电磁感应定律，交变磁通 Φ 在一、二次绕组中感应出相同频率的电动势 e_1 、 e_2 。

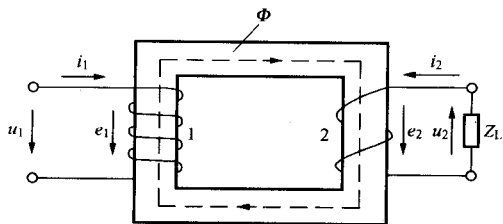


图 1-1 变压器工作原理示意图

$$e_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

式中 N_1 、 N_2 ——一、二次绕组的匝数。

若把负载接到二次绕组，在电动势 e_2 作用下，变压器就能向负载输出电能，实现了不同电压等级电能的传递。由于感应电动势的大小与绕组的匝数成正比，绕组的感应电动势又近似等于各自的电压，因此，改变一、二次绕组的匝数比即可改变变压器电压，这就是变压

器的变压原理。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，可按其用途、结构、相数、冷却方式等不同来进行分类。

按用途可分为电力变压器（主要用在输配电系统中，又分为升压变压器、降压变压器、联络变压器和厂用变压器）、仪用互感器（电压互感器和电流互感器）、特种变压器（如调压变压器、试验变压器、电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等）；

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等；

按磁路系统可分为心式变压器和组式变压器等；

按相数可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器等；

按冷却介质和冷却方式可分为油浸式变压器（包括油浸自冷式、油浸风冷式、油浸强迫油循环式）、干式变压器、充气式变压器等；

电力变压器按容量大小通常分为小型变压器（容量为 10 ~ 630kVA）、中型变压器（容量为 800 ~ 6300kVA）、大型变压器（容量为 8000 ~ 63000kVA）和特大型变压器（容量在 90000kVA 及以上）。

第二节 变压器的基本结构

变压器中最主要的部件是铁心和绕组，铁心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、绝缘套管等。图 1-2 所示是油浸式变压器的结构图。

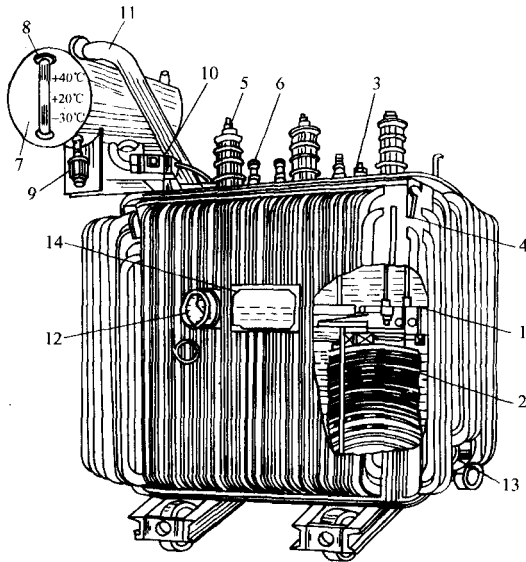


图 1-2 油浸式电力变压器结构图

1—铁心；2—绕组及绝缘；3—分接开关；4—油箱；5—高压套管；6—低压套管；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

一、铁心

铁心是变压器中耦合磁通的主磁路，又是机械骨架。铁心由铁心柱和铁轭两部分构成，铁轭将铁心柱连接起来形成闭合磁路。

为了提高磁路的导磁性能，减少铁心中的磁滞、涡流损耗，铁心一般用高磁导率的磁性材料制成。目前变压器铁心大部分由单片厚为 0.35 ~ 0.5mm、其表面涂有绝缘漆的硅钢片剪成一定形状叠装而成。为了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。如图 1-3 所示。铁心柱的截面一般作成阶梯形，以充分利用绕组内圆空间。

容量较大的变压器，铁心中常设有油道，以改善铁心内部的散热条件。

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线或铝线绕制而成。为了使绕组具有良好的机械性能，其外形一般为圆筒形状，高压绕组的匝数多、导体细，低压绕组的匝数少、导体粗，绕组套在铁心柱上，如图 1-4 所示。变压器的绕组可分为同心式和交叠式两类。同心式绕组的高、低压绕

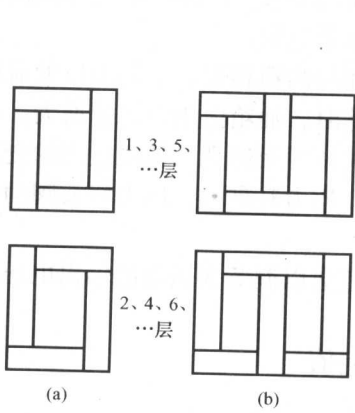


图 1-3 叠片式铁心交错的叠装方式
(a) 单相；(b) 三相

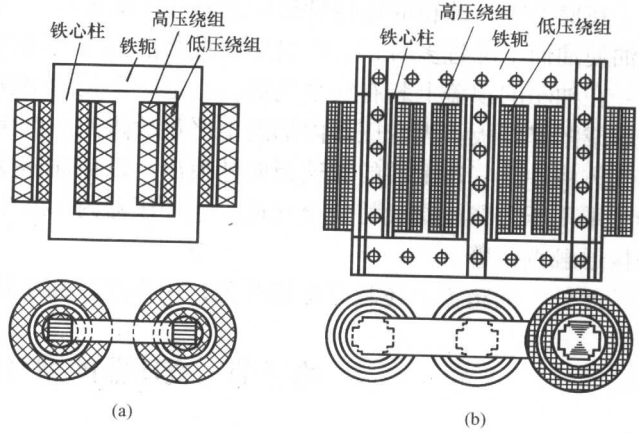


图 1-4 心式变压器绕组和铁心的装配示意图
(a) 单相；(b) 三相

组同心地套在铁心柱上。为了便于绝缘和高压绕组易于与分接开关连接，低压绕组靠近铁心柱，高压绕组套在低压绕组外面，两个绕组之间留有油道以利于冷却。同心式绕组尚有多种不同的结构形式，如圆筒式、螺旋式、连续式、纠结式等。同心式绕组结构简单，制造方便，电力变压器大部分采用这种结构。交叠式绕组的高、低压绕组沿铁心柱高度方向交替放置，如图 1-5 所示。为减小绝缘距离，通常低压绕组靠近铁轭。交叠式绕组机械强度高，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。

三、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，使带电的引线与接地的油箱绝缘。为了增大外表面放电距离，套管外形成多级伞形裙边。电压愈高，级数愈多。绝缘套管一般是瓷质的，其结构取决于电压等级。1kV 以下采用实心瓷套管；10~35kV 采用空心充气或充油式套管；110kV 及以上采用电容式套管。

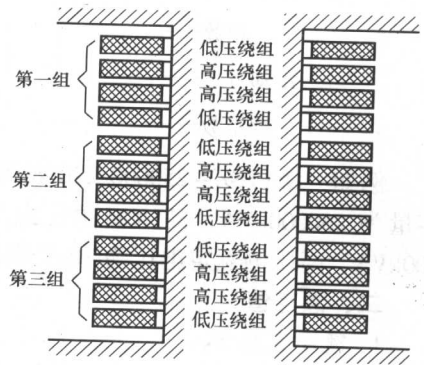


图 1-5 交叠式绕组

四、油箱及其他附件

油浸式变压器的器身浸在充满变压器油的油箱中，变压器油既是绝缘介质，又是冷却介质。它通过受热后的对流，将铁心和绕组中的热量带到箱壁及冷却装置，再散发到周围空气中。

变压器的油箱一般做成椭圆形，油箱有较高的机械强度，而且需油量较少。油箱用钢板

焊成。容量很小的变压器采用平板式油箱；中、小型变压器为增加散热表面采用管式油箱；大容量变压器采用散热器式油箱。

在油箱盖上安装有储油柜（亦称膨胀器或油枕），储油柜通过管道与油箱接通，使变压器的油面的升降限制在储油柜中。

在储油柜与油箱的连接管道中装有气体继电器。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。

在油箱的顶盖上装有安全气道，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板向外喷出，以免油箱受到强大压力而爆裂。最近生产的变压器已采用压力释放阀代替安全气道。当变压器内部发生故障，压力升高时，压力释放阀动作并接通触点报警。

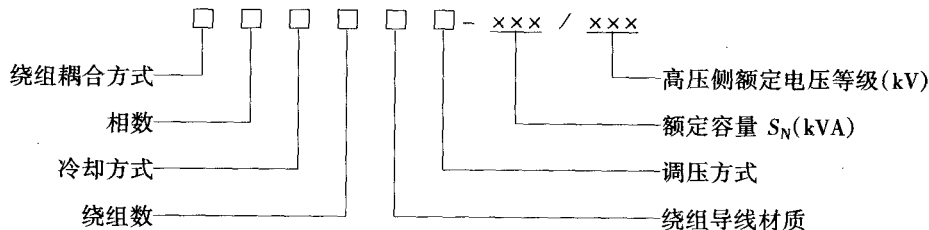
此外，油箱盖上还装有分接开关，用来改变高压绕组的匝数以调节变压器的输出电压。

第三节 变压器的型号和额定值

制造厂根据国家标准和设计、试验数据规定变压器的正常运行状态，称为额定运行情况。表征额定运行情况下各物理量的数值为额定值，额定值通常标注在变压器的铭牌上。

一、变压器的型号

变压器的型号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，表示方法如下：



例如：OSFPSZ - 250000/220 表明是自耦三相强迫油循环风冷三绕组铜线有载调压、额定容量为 250000kVA、高压侧额定电压为 220kV 的电力变压器；S7 - 500/10 为额定容量为 500kVA、高压侧额定电压为 10kV 级的低损耗三相油浸式自冷电力变压器。

二、额定值

1. 额定容量 S_N

额定容量是指变压器额定运行时的视在功率，由于变压器的效率很高，通常一、二次侧的额定容量设计成相等。对于三相变压器而言是指三相的总功率。

2. 一、二次侧额定电压 U_{1N} 和 U_{2N}

正常运行时加在一次侧的端电压的允许值称为变压器一次侧的额定电压 U_{1N} 。二次侧的额定电压 U_{2N} 是指变压器一次侧加额定电压时二次侧的空载电压。对三相变压器而言，额定电压是指线电压。

3. 额定电流 I_{1N} 和 I_{2N}

变压器一、二次的额定电流，是根据额定容量和额定电压计算出来的电流。对三相变压

器而言，额定电流是指线电流。

对单相变压器

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

对三相变压器

$$S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$

4. 额定频率 f_N

我国的标准规定工业频率 $f_N = 50\text{Hz}$ 。

此外，额定运行时的效率、温升等数据也是额定值。

除额定值外，变压器的相数、绕组联结方式及联结组别、短路电压、运行方式和冷却方式等均标注在铭牌上。

小 结

变压器是以电磁感应为原理工作的电器。由于变压器绕组交链于同一铁心磁通，故每匝感应电动势相等，利用绕组匝数的不同，可以把一种电压等级转变成同频率的另一种电压等级，满足电能传输、分配和使用的需要。

变压器的主要部件是绕组和铁心，另外还有一些附属部件。

变压器的额定值是运行的依据，重点掌握额定值的意义。

思考题与习题

- 1-1 变压器是根据什么原理进行电压变换的？电力变压器的主要用途有哪些？
- 1-2 变压器有哪些主要部件？各部件的作用是什么？
- 1-3 铁心在变压器中起什么作用？如何减少铁心中的损耗？
- 1-4 变压器有哪些主要额定值？一、二次额定电压的含义是什么？
- 1-5 变压器一次绕组若接在直流电源上，二次侧会有稳定的直流电压吗？为什么？
- 1-6 一台单相变压器， $S_N = 5000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3\text{kV}$ ，试求一、二次绕组的额定电流。
- 1-7 一台三相变压器， $S_N = 5000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 35/10.5\text{ kV}$ ，Y，d接法，试求：变压器一、二次绕组的额定电压和额定电流。

变压器的运行原理与运行分析

变压器的用途非常广泛，尽管类型和结构不完全相同，但其基本原理和分析方法是相同的。本章以单相双绕组电力变压器为例，分析稳定运行时的基本电磁关系，导出基本方程、等效电路和相量图，并在此基础上分析其参数测定方法、运行特性及三相变压器的几个特殊问题（即三相变压器的磁路系统和电路系统），最后分析变压器并联运行情况。

第一节 单相变压器的空载运行

空载运行是指变压器一次绕组接到额定电压、额定频率的电源上，二次绕组开路时的运行状态。图 2-1 所示是单相变压器空载运行的示意图。一、二次电路的各物理量和参数分别用下标“1”和“2”标注，以示区别。

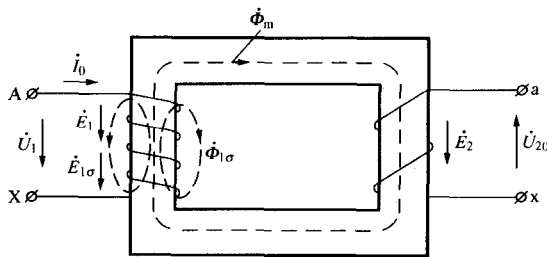


图 2-1 变压器空载运行示意图

一、空载运行时的电磁关系

1. 电磁过程

当一次绕组接上电源后，绕组中有电流 \dot{I}_0 流过，称为空载电流。 \dot{I}_0 在一次绕组中建立交变磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ ，在 \dot{F}_0

作用下产生交变磁通。根据所经过的路径不同，可把磁通分为主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 和漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ ，主磁通沿铁心闭合，同时交链一、二次绕组，在一、二次绕组中感应电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 ，称作主电动势，当二次侧接上负载时就有电功率向负载输出。故主磁通起传递能量的作用。由于铁磁材料有饱和现象，所以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；漏磁通通过一次绕组附近的空气或变压器油等非磁性介质构成磁通回路，仅在一次绕组中感应电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ ，不能传递能量，仅起电抗压降作用。由于漏磁通的磁路大部分是非铁磁材料组成，所以漏磁路的磁阻基本上是常数，漏磁通与产生它的电流呈线性关系。由于铁心的磁导率远比铁心外非铁磁材料的磁导率大，故磁通中的绝大部分是主磁通，而漏磁通只占总磁通的一小部分（约 0.1% ~ 0.2%），同时一次侧电流在一次绕组中产生电阻压降。以上就是变压器空载运行时的电磁过程。电磁关系如下：

