

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANJIXUE

电机学

翟庆志 李艳军 主 编
刘明丹 吴利斌
洪宝棣 副主编



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TM3/106

2008

DIANJIXUE

电机学

主 编 翟庆志 李艳军
刘明丹 吴利斌
副主编 洪宝棣
编 写 张筱慧 郝忠梅
主 审 崔皆凡



中国电力出版社

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



普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAOJIAOYU JIAOYU SHIYI WU GUIHUA JIAOCAI

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书除绪论外,分五篇共十七章,变压器篇包括变压器的类别和结构、变压器的运行原理和主要特性、三相变压器、电力系统中的特种变压器;交流电机绕组、电动势和磁动势篇包括交流电机绕组、交流电机绕组的磁动势;异步电机篇包括三相异步电动机的工作原理,异步电动机功率、转矩和运行分析,单相异步电动机和三相异步发电机;同步电机篇包括同步发电机的运行原理、同步发电机的特性及参数测定、同步发电机的并联运行及同步电动机、同步发电机的非正常运行;直流电机篇包括直流电机基本知识、直流发电机、直流电动机、特殊直流电机。主要内容配有例题,各章均配有习题。本书强调理论知识的应用和实际运行的分析,使读者掌握电机的基本理论知识和基本分析方法,提高解决各种电机实际问题的能力。

本书可作为普通高等院校电气信息类相关专业的教学用书,也可作为高职高专教育、函授教育的教学用书,还可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/翟庆志等主编. —北京:中国电力出版社,2008
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-5083-7637-0

I. 电… II. 翟… III. 电机学-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 094605 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 391 千字

定价 26.00 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书针对电气工程相关专业,按80学时(含实验)左右授课量编写。在保留电机学教材的基本内容体系的基础上,对各章主体内容进行了精炼。本书侧重稳态运行分析,突出基本理论、基本分析方法的学习,兼顾电工技术实验和动手能力的培养,力求便于自学。本书编写的基本思路如下:

(1) 面向电气工程类相关专业的本科生或工程技术人员,围绕对电机的控制、运行及其应用的实际需求,组织和编写;

(2) 在“基础与精髓不漏”的前提下,合并和调整各章节内容,对一些涉及设计、制造及在学时较少的情况下较难理解的内容(如交、直流电机绕组、变压器瞬变过程和时一空相量分析等)进行了删减,适当削减了正文篇幅;

(3) 适当精简了电机电磁理论的推导,结合原理,有对相关问题的分析、讨论及例题;

(4) 重点介绍各类电机、变压器稳态运行的基本知识、基本分析方法和基本计算,各类电机、变压器的非正常运行,以介绍物理概念、现象及其影响为主,注重定性分析;

(5) 书中介绍的特殊电机,作为电机基本知识的应用实例,以扩大读者视野,同时兼顾当前和今后的应用;

(6) 精选例题和习题,尽可能具有典型性、工程性和实用性,以检验读者的课程学习效果,并提高分析实际问题的能力。

本书由翟庆志、李艳军、刘明丹和吴利斌老师主编。中国农业大学翟庆志老师编写了绪论及第七、九章,东北农业大学李艳军老师编写了绪论及第一、二章,黑龙江工程学院刘述强老师编写了第三、四章,山东农业大学郝忠梅老师编写了第五、六章,中国农业大学张筱慧老师编写了第八章,内蒙古农业大学吴利斌老师编写了第十、十一章,内蒙古农业大学洪宝棣老师编写了第十二、十三章,四川农业大学刘明丹老师编写了第十四~十七章。翟庆志老师负责全书统稿工作。

本书由沈阳工业大学崔皆凡教授主审,大纲由华南理工大学陈世元教授审阅。崔皆凡教授提出的宝贵意见对完善和提高教材质量起到了重要作用。本书还参考了一些文献,在此一并致谢。

由于水平有限,书中难免有不妥、疏漏之处,敬请广大读者批评指正,以便改进。

编者

2008年4月

目 录

前言

绪论	1
第一节 电机的重要作用及主要类别	1
第二节 基本电磁现象及有关定律	1
第三节 铁磁物质的基本磁特性	4

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的类别和结构	7
第一节 变压器的主要类别	7
第二节 电力变压器的基本结构	8
第三节 变压器的额定值	12
小结	12
习题	12
第二章 变压器的运行原理和主要特性	14
第一节 变压器的空载运行	14
第二节 变压器的负载运行	19
第三节 变压器的等效电路	21
第四节 变压器参数的测定	25
第五节 标么值	27
第六节 变压器的主要运行特性	30
小结	32
习题	33
第三章 三相变压器	36
第一节 三相变压器的磁路系统	36
第二节 三相变压器的电路系统	37
第三节 三相变压器的空载电动势波形	40
第四节 变压器的并联运行	42
第五节 三相变压器的不对称运行	46
小结	52
习题	53
第四章 电力系统中的特种变压器	56
第一节 自耦变压器	56
第二节 三绕组变压器	62
第三节 互感器	67

小结	68
习题	68

第二篇 交流电机绕组、电动势和磁动势

第五章 交流电机绕组	70
第一节 交流电机的工作原理	70
第二节 交流绕组的基本概念	72
第三节 三相单层绕组	74
第四节 三相双层叠绕组	75
第五节 交流绕组的感应电动势	77
小结	84
习题	84
第六章 交流电机绕组的磁动势	86
第一节 单相交流绕组的磁动势——脉振磁动势	86
第二节 三相绕组的合成磁动势	89
小结	92
习题	92

第三篇 异步电机

第七章 三相异步电动机的工作原理	94
第一节 异步电动机基本知识	94
第二节 三相异步电动机的磁场及感应电动势	99
第三节 负载运行时的基本方程式、等效电路和相量图	102
第四节 异步电动机参数的实验测定	109
第五节 笼型转子的极数、相数和参数折算	111
小结	112
习题	112
第八章 异步电动机功率、转矩和运行分析	114
第一节 异步电动机的功率及转矩方程	114
第二节 异步电动机的机械特性	117
第三节 异步电动机的工作特性	122
第四节 异步电动机的起动	123
第五节 高起动转矩的笼型异步电动机	127
第六节 异步电动机调速方法简介	128
小结	132
习题	132
第九章 单相异步电动机和三相异步发电机	135
第一节 单相异步电动机	135
第二节 三相异步发电机	138

小结	142
习题	142

第四篇 同步电机

第十章 同步发电机的运行原理	143
第一节 同步电机的基本知识	143
第二节 空载和负载时同步电机的磁场	149
第三节 隐极同步发电机的电动势方程及同步电抗	158
第四节 凸极同步发电机的电动势方程及同步电抗	161
第五节 同步发电机功率及转矩方程	164
小结	165
习题	165
第十一章 同步发电机的特性及参数测定	167
第一节 同步发电机的空载特性和短路特性	167
第二节 零功率因数负载特性及漏电抗 x_σ 测定	169
第三节 稳态电抗的实验测定	171
第四节 同步发电机的外特性及调整特性	172
小结	173
习题	173
第十二章 同步发电机的并联运行及同步电动机	175
第一节 投入并联运行的条件和方法	175
第二节 同步发电机的功角特性	177
第三节 有功功率调节、稳定和振荡的概念	179
第四节 无功功率调节和 V 形曲线	181
第五节 同步电动机和同步调相机	182
小结	186
习题	187
第十三章 同步发电机的非正常运行	189
第一节 相序阻抗和相序等效电路	189
第二节 同步发电机不对称运行实例分析	191
第三节 同步发电机三相突然短路的物理情况	193
第四节 同步发电机突然短路的瞬变和超瞬变电抗	196
第五节 突然短路电流及其衰减	197
小结	198
习题	199

第五篇 直流电机

第十四章 直流电机基本知识	200
第一节 直流电机的工作原理、主要结构和额定值	200

第二节 直流电机的电枢绕组	204
第三节 直流电机的电枢反应	209
第四节 电枢绕组的感应电动势和电磁转矩	212
第五节 直流电机的换向	214
小结	217
习题	218
第十五章 直流发电机	220
第一节 直流发电机的基本方程	220
第二节 直流发电机的特性	222
第三节 并励直流发电机的自励	224
小结	225
习题	225
第十六章 直流电动机	227
第一节 直流电动机的基本方程	227
第二节 直流电动机的运行特性	228
第三节 直流电动机的机械特性	231
第四节 直流电动机的调速	232
第五节 电力拖动系统稳定运行条件	234
第六节 他励直流电动机的起动	235
第七节 他励直流电动机的制动	237
小结	238
习题	239
第十七章 特殊直流电机	241
第一节 直流伺服电动机	241
第二节 直流测速发电机	244
第三节 无刷直流电动机	245
第四节 永磁直流电动机	248
小结	249
习题	249
参考文献	250

绪 论

第一节 电机的重要作用及主要类别

一、电机的重要作用

现代的生产、生活都离不开电，而电能的生产、输送和使用都与电机密切相关。

在各种类型的发电厂中，发电机将机械能转换为电能；为了输送和分配电能，在电力系统中使用大量的升、降压变压器；在电能使用当中，电力用电占有较大的比重，绝大多数的生产机械都是由电动机拖动的，在家用电器中也大量使用着各种小容量的电动机。

二、电机的概念

电机是一种转换或传递能量（或信号）的电气装置，它区别于其他能量转换装置的根本特点是：①通过电磁感应进行能量转换；②完成机械能与电能或电能与电能之间的转换。

三、电机的种类

(一) 按电机的功能分类

- (1) 将机械能转换为电能——发电机；
- (2) 将电能转换为机械能——电动机；
- (3) 将电能转换为另一种形式的电能——变压器、互感器、移相等；
- (4) 在控制系统中转换和传递信号——控制电机。

(二) 按基本结构和工作原理分类

电机可分为直流电机、变压器、异步电机和同步电机四大类。其他种类的电机多是由这四种典型电机派生出来的。电机学课程的基本内容就是介绍这四种电机的结构、原理、特性和使用。

第二节 基本电磁现象及有关定律

各种电机都是靠电与磁的相互作用、相互转化而完成能量转换的，所以除电路知识外，电磁基本定律也是分析电机的重要理论基础。

一、载流导体周围的磁场

在电机中都是以线圈通电来建立磁场的，电流的大小和方向决定着它所产生磁场的强弱和方向。

(一) 右手定则

电流和它所产生的磁场，两者的方向关系用右手螺旋定则来判定。判定通电直导线所产生的磁场的方向时，用右手大拇指代表电流方向，其他四指所指的环绕方向则为磁力线方向 [见图 0-1 (a)]。判定通电线圈所产生的磁场的方向时，大拇指所指方向即为线圈内部的磁场方向 [见图 0-1 (b)]。

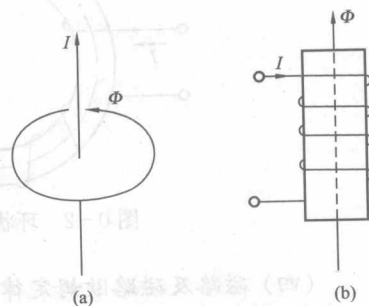


图 0-1 右手螺旋定则

(a) 磁力线方向；(b) 磁场方向

(二) 磁场的基本物理量

(1) 磁感应强度 B 。它是表征某点磁场强弱的物理量, 单位为 T (特斯拉) $= Wb/m^2$ (韦伯/ m^2)。

(2) 磁通 Φ 。它是表征一定范围内磁场总大小的物理量, 单位为 Wb (韦伯) $= V \cdot s$ (伏·秒), 在匀强磁场中, 穿过垂直于磁感应强度 B 的一定面积 S 的磁通量 Φ , 等于 B 与 S 乘积, 即

$$\Phi = BS \quad (0-1)$$

在非匀强磁场中应用式 (0-1) 时, 磁感应强度 B 应在整个面积 S 内取平均值。

(3) 磁导率 μ 。如果在图 0-2 所示的通电环状螺旋线管中放入一个铁环, 则铁环内各点的磁感应强度将会增大很多倍, 这说明铁的导磁性能比空气高很多。

物质按它们的磁性质可分为铁磁物质和非铁磁物质两大类。铁磁物质的磁导率远大于真空的磁导率, 而所有的非铁磁物质的磁导率都接近于真空的磁导率。磁导率的单位为 H/m (亨利/米) $= \Omega \cdot s/m$ (欧·秒/米)。

(4) 磁场强度 H 。为了确定电流与它所产生的磁场之间的数量关系, 引入计算量 $H = B/\mu$, 称为磁场强度。

在图 0-2 中, 当通入环状螺旋线管的电流 I 一定时, 若管中放入铁环, 则环内各点的磁感应强度 B 很大; 如放入铜环, 则环内各点的 B 很小。但在这两种情况下各点的磁场强度 H 不变。可见磁场强度 H 只取决于产生磁场的电流及线圈的物理特征, 而与构成磁场的介质的磁性质无关, 真正代表磁场各点强弱的磁感应强度 B 与这两方面都有关, 即

$$B = \mu H \quad (0-2)$$

磁场强度 H 的单位为 A/m (安/米)。

(三) 全电流定律

在磁场中沿任意闭合曲线 L 作磁场强度矢量的线积分, 其值等于该闭合曲线所包围的电流的代数和, 即

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{L} = \sum I \quad (0-3)$$

在 $\sum I$ 当中, 与积分方向符合右手螺旋关系的电流取正号, 反之取负号。例如在图 0-3 中, 有

$$\sum I = I_1 + I_2 - I_3$$

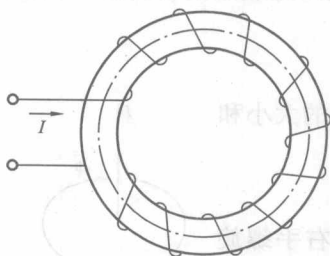


图 0-2 环状螺旋线管

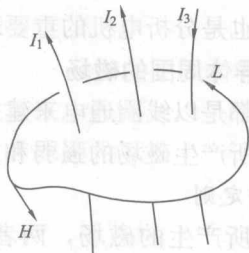


图 0-3 全电流定律

(四) 磁路及磁路欧姆定律

在电机中, 为了能利用较小的电流产生较强的磁场, 通常采用铁磁材料制成一定形状的铁心。有了铁心, 不仅能使磁场显著增强, 而且能使绝大部分的磁通按照设计者所要求的流

通路径闭合, 构成电机的主磁路。

图 0-4 所示为一简单磁路, 铁心长度为 L , 截面为 S , 线圈匝数为 N , 通入电流为 I 。根据全电流定律可得

$$HL = IN$$

设铁心的磁导率为 μ , 则 $H=B/\mu$, 而 $B=\Phi/S$, 所以

$$\frac{\Phi L}{\mu S} = IN$$

$$\Phi = \frac{IN}{\frac{L}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} \quad (0-4)$$

式中 F ——产生磁通 Φ 的原动力, 称为磁动势, $F=IN$;

R_m ——磁路的磁阻, $R_m = \frac{L}{\mu S}$ 。

式 (0-4) 称为磁路欧姆定律。

实际电机、电器的磁路, 根据材料和截面的不同常分成若干段, 这时应用全电流定律得

$$H_1 L_1 + H_2 L_2 + \cdots + H_n L_n = IN$$

经推导得

$$\Phi = \frac{IN}{\frac{L_1}{\mu_1 S_1} + \frac{L_2}{\mu_2 S_2} + \cdots + \frac{L_n}{\mu_n S_n}} = \frac{F}{\sum R_m} \quad (0-5)$$

式中 $\sum R_m$ ——各段磁路磁阻之和, 也就是整个闭合磁路的总磁阻。

二、电磁感应

英国科学家法拉第于 1821 年做了最早的电动机实验模型的尝试, 并于 1831 年发现了电磁感应定律——当磁场的磁力线发生变化时, 在其周围的导线中就会感应产生电流, 其数学表达式为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (0-6)$$

式中 Ψ ——磁通总量, 当其通过具有 N 匝的线圈时, 有 $\Psi=N\Phi$, Φ 为单匝线圈中通过的磁通量。

式 (0-6) 可写为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-7)$$

(一) 磁通变化感生电动势

在图 0-5 中, 当穿过线圈的磁通 Φ 发生变化时, 在线圈中将产生电动势 e , 其大小与磁通变化率成正比, 还与线圈的匝数 N 成正比; e 的方向总是企图产生一个阻碍原磁通变化的电流。

在图 0-5 中, Φ 增大时, e 的方向由 b 到 a; Φ 减小时, e 的方向由 a 到 b。为了便于分析计算, 必须规定 e 的正方向。按照电工惯例, Φ 与 e 两者的正方向应符合右手螺旋定则, 所以在图 0-5 中 e 的正方向应是从 a

到 b。可见, 当 Φ 减小 ($\frac{d\Phi}{dt} < 0$) 时, e 的真实方向与其正方向一致 (即 $e > 0$);

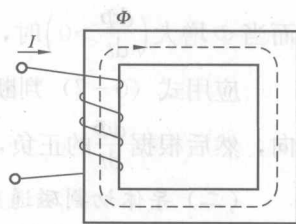


图 0-4 简单磁路

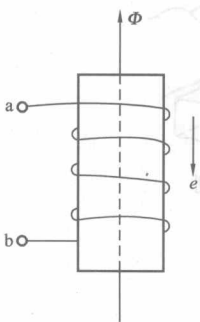


图 0-5 电磁感应

而当 Φ 增大 ($\frac{d\Phi}{dt} > 0$) 时, e 的真实方向与其正方向相反 (即 $e < 0$)。

应用式 (0-7) 判断感应电动势 e 的方向时, 必须先按右手螺旋定则规定 Φ 与 e 的正方向, 然后根据 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的正负, 由上式确定 e 的符号。

(二) 导体切割磁通感生电动势

直导体在磁场中做切割磁力线的运动时, 在导体中将产生感应电动势 e 。如果磁场方向、导体放置方向和导体运动方向三者相互垂直, 则感应电动势 e 的大小为

$$e = BLv \quad (0-8)$$

式中 B ——磁感应强度, T;

L ——导体有效长度, m;

v ——运动速度, m/s;

e ——感应电动势, V。

感应电动势 e 的方向可用右手定则来判定 (见图 0-6), 手心迎着磁场方向, 大拇指指向导体运动方向, 则其他四指所指方向为 e 的方向。

三、电磁力

通电导体在磁场中将受到力的作用, 这种力称为电磁力, 当电流方向与磁场方向相互垂直时, 电磁力的大小为

$$F = BLI \quad (0-9)$$

式中 B ——磁感应强度, T;

L ——导体有效长度, m;

I ——导体中电流, A;

F ——电磁力, N。

电磁力 F 的方向用左手定则来判定 (见图 0-7), 手心迎着磁场方向, 四指代表电流方向, 则大拇指所指方向为电磁力方向。

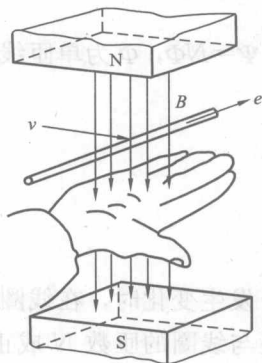


图 0-6 右手定则

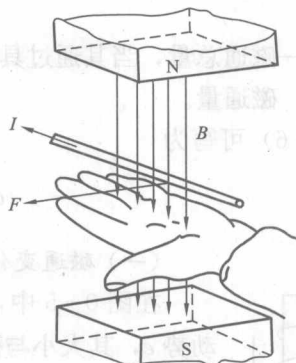


图 0-7 左手定则

第三节 铁磁物质的基本磁性

作为电机重要结构部件的铁心都是用铁磁物质制成的, 铁磁物质还包括铁、钴、镍以及

它们的合金。

一、铁磁物质的主要性质

(一) 高导磁性

如果在图 0-2 的环状螺旋线管中放入一个用铁磁物质制成的圆环, 管中各点的磁感应强度就可能增强数百倍, 这说明铁磁物质的磁导率远远大于非铁磁物质。铁磁物质具有高导磁性, 是因为在铁磁物质内部存在着大量的被称作磁畴的微小磁体。当铁磁物体未处于磁场中时, 其内部的磁畴呈杂乱无章的排列状态, 见图 0-8 (a), 对外不显现磁性。当将铁磁物体放入磁场时, 在外磁场作用下, 磁畴将按外磁场的方向取向排列, 如图 0-8 (b) 所示, 形成一个比原外磁场大许多倍的附加磁场, 这个过程称为铁磁物质的磁化。

可见, 铁磁物质具有高导磁性的实质是它能被磁化。人们利用它的这种性质构成各种各样所需的磁路。

(二) 磁饱和

对于上述带有铁心的环状螺线管, 当通入其中的电流 I 从零逐渐增大时, 铁心中各点的磁场强度 H 和磁感应强度 B 也都将随之增大, 然而 H 和 B 的增长规律却不完全相同。图 0-9 所示为 $B=f(H)$ 曲线, 称作铁磁物质的磁化曲线。在曲线中 oa 段上, 当 H 值随电流 I 成正比增大时, B 值增大较快, 且大致和 H 成正比。在 ab 段上, B 值增长逐渐缓慢, 这是因为大部分磁畴已按 H 的方向排列, 可以转向的磁畴越来越少。在 b 点以后, 磁化过程基本结束, B 值增加更加缓慢, 因为这时只有螺线管中电流起增强磁场的作用, B 值增加的速度与无铁心时一样。由于磁化趋于结束和完全结束而使铁心中 B 值增长变缓的现象称为磁饱和。磁饱和使铁心的导磁系数 $\mu = \frac{B}{H}$ 变小, 磁阻 $R_m = \frac{L}{\mu S}$ 变大。磁饱和程度越高, μ 值越小, R_m 值越大。可见磁饱和造成了磁路的非线性 (磁通和磁动势不成正比), 给磁路的分析、计算增加了难度。

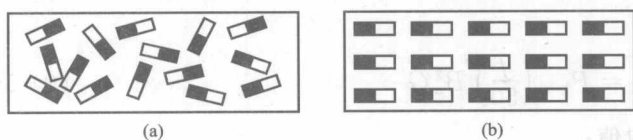


图 0-8 磁畴

(a) 磁畴杂乱无章的排列状态; (b) 磁畴按外磁场方向排列

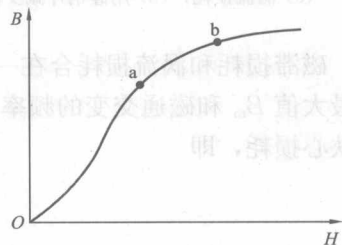


图 0-9 $B=f(H)$ 曲线

(三) 磁滞

当螺线管通入交变电流时, 铁心中的磁场强度 H 和磁感应强度 B 也将随之交变。这时铁心中的磁畴也将不断地翻转, 以改变方向。由于磁畴之间的相互摩擦, 使得它们取向排列的步调跟不上外磁场的变化步调, 即 B 的变化滞后于 H 的变化, 这种现象称为磁滞。 B 随 H 的变化关系曲线称为磁滞回线, 如图 0-10 所示。

在图 0-10 中, 当 H 由 $+H_m$ 减少为零时, B 仍将保持一定数值, 称为剩磁感应强度。如果回线横向

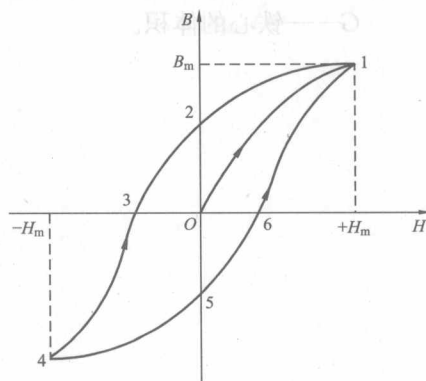


图 0-10 铁磁材料的磁滞回线

宽度较宽,铁磁物质的磁滞性越强,剩磁越大,称为硬磁材料,工程上多用此材料制成永久磁铁。如果回线横向宽度较窄(回线所围成的面积较小),磁滞性较弱,则称为软磁材料,电机、变压器等铁心是用软磁材料制成的。磁滞现象将影响通过电流调节磁场强弱的效果,同时磁滞还将在铁心中产生能量损耗。

二、铁心损耗

(一) 磁滞损耗

当通过铁心的磁通交变时,由于不断翻转的磁畴之间的相互摩擦而使铁心发热,由此引起的能量损失称为磁滞损耗。

(二) 涡流损耗

当通过铁心的磁通交变时,在铁心的表面上将产生感应电动势,并形成漩涡状的电流,

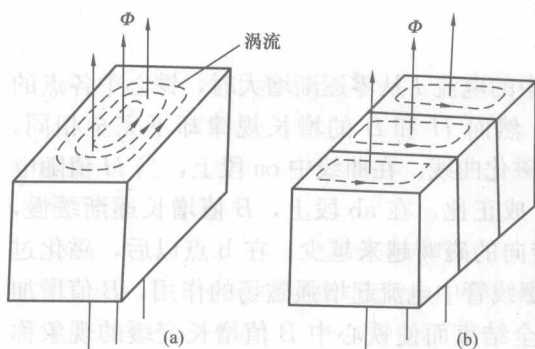


图 0-11 涡流

(a) 涡流损耗; (b) 用硅钢片减少涡流损耗

称为涡流 [见图 0-11]。涡流在铁心中流动造成能量损失,使铁心发热,称为涡流损耗,如图 0-11 (a) 所示。为了减少涡流损耗,常通过交变磁通的铁心不用整块的钢,而是用相互绝缘的硅钢片叠压制成,如图 0-11 (b) 所示。硅钢片的厚度一般为 0.35~0.5mm,这样涡流就无法顺畅地通过整个铁心横截面闭合,而只能在每片内构成局部涡流。由于穿过每片的磁通很小,再加上涡流的路径很窄,电阻很大,从而使涡流大为削弱。钢中加入硅,使电阻率变大,可进一步减少涡流和涡流损耗。

磁滞损耗和涡流损耗合在一起,称为铁心损耗,它的大小取决于铁心中交变磁感应强度的最大值 B_m 和磁通交变的频率 f 。工程上采用下列经验公式计算包括磁滞和涡流损耗在内的铁心损耗,即

$$p_{Fe} = P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} B_m^2 G \quad (0-10)$$

式中 β ——指数,在 1.3~1.6 之间取值;

$P_{1/50}$ ——与材料有关的系数,同时又取决于所用单位;

G ——铁心的体积。

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的类别和结构

第一节 变压器的主要类别

变压器是一种静止的电力机械,它的主要作用是通过电磁感应把一种电压等级的交流电能转变为同频率的另一种电压等级的交流电能。在电力系统中,变压器对电能的经济传输、灵活分配和安全使用具有重要意义。此外,在电量测试、控制和某些特殊用电设备上也大量地应用着各种类型的变压器。

为了适应不同的使用目的和工作条件,不同类型的变压器在结构和性能上有很大的差异。通常可按用途、相数、结构特点和冷却方式进行分类。

一、按用途分类

(1) 电力变压器:用于电力系统中,可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器等。

(2) 特殊变压器:如整流变压器、电炉变压器、电焊变压器。

(3) 仪用互感器:包括电压互感器和电流互感器。

(4) 试验用变压器:主要包括调压变压器以及电压很高、电流很小的高压试验用变压器。

二、按相数分类

(1) 单相变压器:用于改变单相交流电压。

(2) 三相变压器:用于改变三相交流电压。

(3) 多相变压器:用于特殊场合。

三、按每相绕组数目分类

(1) 双绕组变压器:每相有一个高压绕组和一个低压绕组。

(2) 自耦变压器:每相只有一个绕组,低压绕组是高压绕组的一部分。

(3) 三绕组变压器:每相有高压、中压、低压三个绕组。

(4) 多绕组变压器:每相绕组多于三个。

四、按冷却方式分类

(1) 干式变压器:变压器的铁心和绕组直接与空气接触,通过空气的对流将产生的热量散掉。

(2) 油浸式变压器:变压器的铁心和绕组全浸在变压器油中,通过变压器油的流动将热量传至油箱壁,再散到空气中。

变压器虽然种类繁多,但他们的基本工作原理都是相似的,本篇重点讨论双绕组的电力变压器,对其他的常见变压器只做简单介绍。

第二节 电力变压器的基本结构

通常的电力变压器多为油浸式的，其主要结构部件包括铁心、绕组、油箱及其他附件。铁心和绕组是变压器完成能量转换的核心部分，称为变压器的器身。油浸式变压器的器身安放在充满变压器油的油箱内。下面分别对每种部件进行简要介绍。

一、铁心

铁心是变压器的磁路部分，包括铁心柱和铁轭。铁心柱上套装高、低压绕组，铁轭将铁心柱连接起来，使之形成闭合磁路。由于铁心的磁通为一交流磁通，为了减少涡流损耗，变压器铁心通常用厚度为 0.35mm、表面涂绝缘漆的硅钢片叠压而成。叠装前，先按铁心的尺寸将硅钢片剪成几种规格的长方形冲片。为了减少铁心的磁阻，在叠装时相邻两层的冲片接缝要错开，图 1-1 所示为三相变压器铁心相邻两层冲片的排列方法。

冷轧硅钢片的磁性能高于热轧硅钢片，但它有较强的方向性，即只有在磁通沿着轧碾方向流通时才有较高的导磁系数和较小的铁损耗。因此，当铁心采用冷轧硅钢片时，必须采用斜接缝，相邻两层的接缝也错开，如图 1-2 所示。这时如仍按图 1-1 所示下料和叠装，则在磁路拐角处，由于磁通和轧碾方向成 90° ，将引起磁阻增大、铁损耗增加。

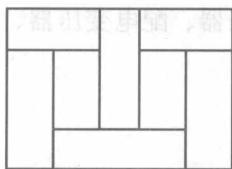


图 1-1 三相变压器铁心相邻两层冲片排列方法

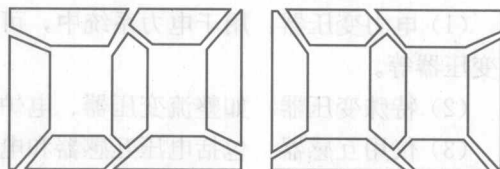


图 1-2 冷轧硅钢片的斜接缝叠装

为了使绕组便于制造和在电磁力作用下受力均匀并具有较高的机械强度，一般都把绕组制成圆筒形。而铁心柱的截面则做成图 1-3 所示的阶梯状多边形，以便充分利用绕组内的圆柱形空间。阶梯的级数越多，截面越接近于圆形，空间利用率越高，但制造工艺也越复杂。在实际生产中，变压器的容量越大，所取阶梯的级数越多，而小容量变压器有时还采用正方形截面的铁心柱。

铁轭的截面有矩形、阶梯形等几种，如图 1-4 所示。为了减少变压器的空载电流和铁损耗，铁轭截面一般比铁心柱截面大 5%~10%。

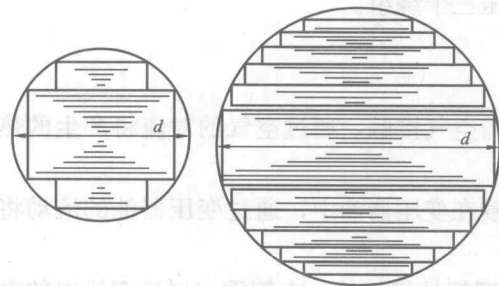


图 1-3 铁心柱截面的形状

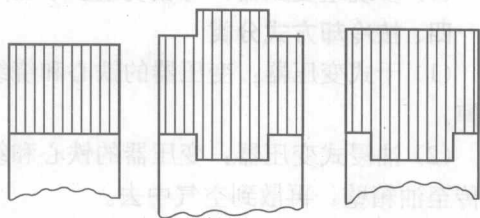


图 1-4 铁轭截面的各种形状

二、绕组

绕组是变压器的电路部分，一般用有绝缘包皮的铜线或是铝线绕制而成。变压器工作时接到高压电网的绕组称为高压绕组，接低压电网的绕组称为低压绕组。高、低压绕组之间的相对位置有同心式和交迭式两种不同的排列方式。同心式绕组的低压绕组靠近铁心柱，高压绕组套在低压绕组的外边。交迭式绕组的高、低压绕组沿铁心轴线高度方向交替地排列，如图 1-5 所示。在实际变压器中多数为同心式绕组。

根据变压器容量大小和电压等级的不同，同心式绕组可分为圆筒式、连续式、纠结式和螺旋式几种类型。

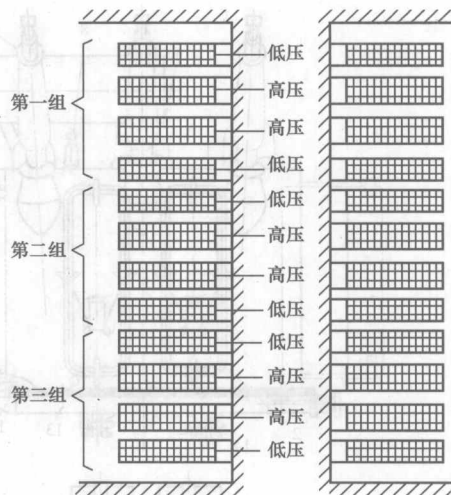


图 1-5 交迭饼式线圈

三、油箱

1. 变压器油

变压器油的第一个作用是散热。通过油的对流，将绕组和铁心由于损耗而产生的热量传送到油箱壁，再由油箱表面散逸到空气中。因此，对于一定容量的变压器，必须保证其油箱有足够大的散热表面积。

变压器油的第二个作用是加强绝缘。由于变压器油具有较大的介电强度，当器身全浸在变压器油中时，高、低压绕组之间以及它们与铁心之间的绝缘都将得到加强。变压器油的绝缘性能与它的纯净度关系极大，因此，在使用中必须尽量防止水分和杂质进入变压器的油箱。

2. 油箱的类型

(1) 平滑油箱。它仅靠油箱本身的表面积散热，用于 $50\text{kV} \cdot \text{A}$ 以下的小型变压器。

(2) 管式油箱。为了增大散热面积，在油箱周围焊装成排的油管。管式油箱及油箱盖上的各种辅助部件如图 1-6 所示。

(3) 散热器式油箱。当变压器容量大于 $3000\text{kV} \cdot \text{A}$ 时，在油箱四周已安排不下散热所需的油管。这时先用一定数量的油管组合成一个整体的散热器，然后再将数个这样的散热器安装在油箱的四周。对于容量在 $10000\text{kV} \cdot \text{A}$ 以上的变压器，还要在散热器上安装强力通风装置（电风扇）以提高散热能力。

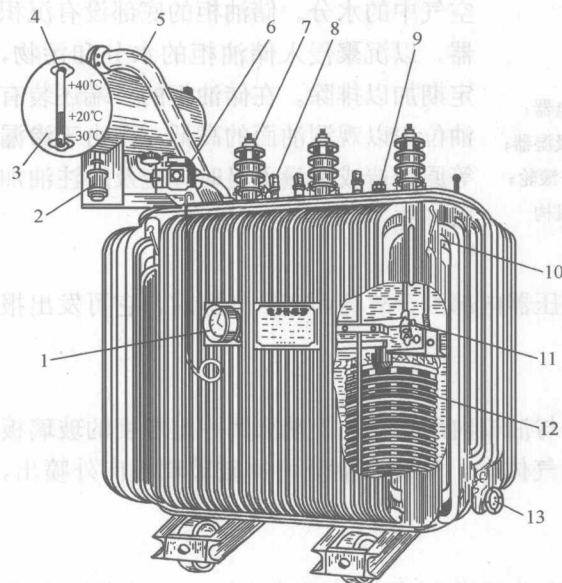


图 1-6 管式油箱及油箱盖上的各种辅助部件

- 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—线圈及绝缘；13—放油阀门