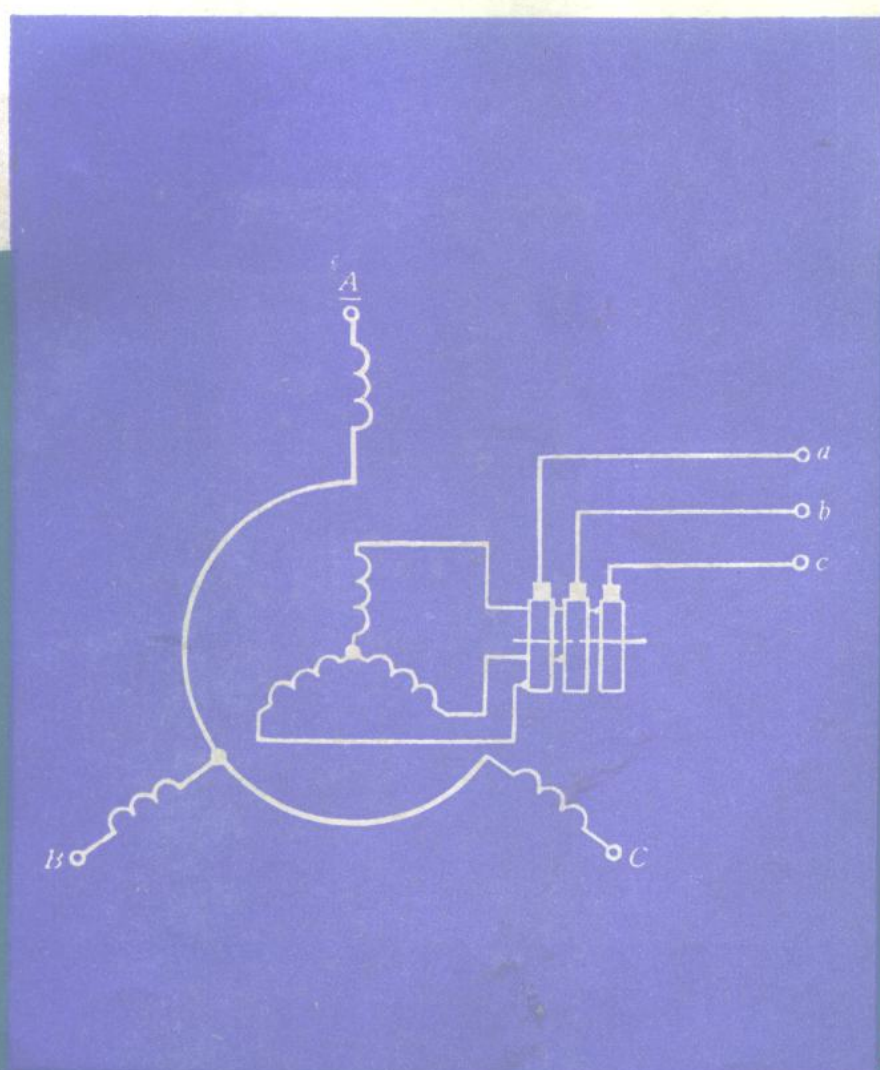


电机学

郑朝科 唐顺华 编著



同济大学出版社

高等学校试用教材

电机学

郑朝科 唐顺华 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书是按高等工业学校《电机学》教学大纲编写的。主要内容包括：变压器，交流电机的绕组、电势和磁势，异步电动机，同步电动机，直流电机和控制电机。内容由浅入深，重点突出，概念清晰，并附有大量习题。本书可作为普通高等院校和成人高校电气自动化专业的教材，兼作高等教学自学用书，也可供有关师生、工程技术人员参考。

责任编辑 褚志浩
封面设计 陈益平

电 机 学

郑朝科 唐顺华 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

常熟市印刷二厂印刷



开本 787×1092 1/16 印张 16.25 字数 416 千字

1990 年 6 月第 1 版

1990 年 6 月第 1 次印刷

印数：1—3500

定价：3.30 元

ISBN 7-5608-0585-X/TH·12

前 言

本教材是根据高等工业学校《电机学》教学大纲编写的。

本书的主要内容包括：变压器，交流电机的绕组、电势和磁势，异步电动机，同步电机，直流电机和控制电机。本书可作为普通高等工业院校和成人高等工业院校（函授、夜大、职工大学）工业电气自动化专业的教材，也可供有关专业师生、工程技术人员参考。

编者根据工业电气自动化专业的性质和多年教学实践的体会，从掌握基本理论、弄清物理概念、有利改革教学方法等要求出发，编写时力求做到重点突出、概念清楚、由浅入深、通俗易懂。每章正文之前有学习指导，每节后有小结，正文中有较多例题，这些都有利于自学，在教学中可适当减少课堂讲授时数。

本书第二、三、五、六章由郑朝科同志编写，第一、四章由唐顺华同志编写，全书由郑朝科同志主编。在编写过程中，教研室其他同志给予了极大支持与帮助。

东北工学院刘宗富教授、同济大学熊同舟教授对全书进行了认真细致的审阅，对原稿提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

在编写中主要参考了宋银宾主编的《电机及拖动基础》、陈伯时等编的《电机与拖动》和顾绳谷主编的《电机及拖动基础》等教材，以及其他兄弟院校的教材和有关资料，在此致以衷心的感谢。

限于编者水平和时间仓促，收集资料不够充分，书中一定会有不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者 1988年10月

绪 论

一、课程的性质、任务和主要内容

“电机学”是工业电气自动化专业的重要专业基础课之一。它在整个专业教学计划中具有承上启下的作用，它是“物理学”“电工原理”等基础课的后续课程。

本课程的任务是使学生掌握常用交、直流电机、控制电机及变压器的基本结构、工作原理、运行性能和实验方法，为后续专业基础课和专业课的学习准备必要的基础知识。同时，也为从事工业电气自动化工程技术工作和科学研究奠定初步基础。

本课程的内容包括变压器，交流电机的绕组、电势和磁势，异步电动机，同步电动机，直流电机和控制电机。重点讨论电磁规律方面的问题。

二、课程的特点

“电机学”是一门既带专业性又带基础性的课程，因而与“电工原理”等课程性质有所不同。在“电工原理”中所要解决的问题往往是被理想化了的，所以能用较严密的数学模型予以描述和分析。在“电机学”中不仅要求掌握基本理论，而且要求运用理论来解决实际问题，而在实际问题中，客观情况通常是比较复杂的，带综合性的。因此，在分析问题时，有必要运用工程观点和工程方法，先将问题简化，找出主要矛盾，然后运用理论加以解决，这样得到的结果，虽然能够正确地反映客观规律，但是还有一定程度的近似性，需要时，可以再深入分析较次要的矛盾，得到更正确的解答。学习这门课程时要注意从实际出发，不要仅仅满足于公式中的数学关系，必须通过公式的符号看到它们所代表的物理量之间的关系，同时要注重数学计算。

学习这门课程，既要注意它的实用性也要注意它的基础性。它是一门讲授基础理论的课程，因为电机的类型很多，既要介绍变压器和交流电机，还要介绍直流电机、控制电机等。各种电机都有各自的个性与特点，都是必须掌握的，这就要求在掌握个性的基础上，掌握其共性，从而找出规律性的东西，使我们的认识深化一步，掌握分析问题的方法。

三、主要教学环节与学习方法

本教材考虑到便于自学，叙述比较详尽，每章前有自学指导，每章后面有复习思考题、习题及测验作业，每节后面有练习思考题和内容小结，因此学习本课程可以自学为主，辅以适当的面授，面授只讲解课程的重点和难点。现将主要教学环节与学习方法说明如下：

1. 阅读教材

教材是学生学习的依据，必须认真、仔细地反复阅读，分析和研究教材中的具体内容和主要问题。阅读本教材应以“节”为单位，建议先将必读的内容通读一遍，然后再精读，通读时应侧重于对每节内容的轮廓性了解，例如针对所讨论问题如何提出，引入了什么物理概念，解决问题时采用什么方法，问题解决后得到什么结论等。通读中碰到困难之处可先打个记号，留待精读时去逐步解决。在通读时不必急于去解答每节后面的练习与思考题。通读一遍后，应根据每章前面的学习指导中所提出的学习要求、重点和难点内容进行精读，对重点内容一定要学深学透，做到概念清楚，对难点但不是重点的部分则不要花费过多的时间和

精力, 以免影响其他内容的学习。对一般内容要能运用基本理论进行分析, 但不要求涉及过深过多。在阅读每节内容之后, 读者对练习与思考题可自行选做, 以巩固对教材内容的理解, 并做每章后面的有关习题, 参考每节后面的小结, 自己进行总结, 以便更系统地掌握所学内容。

2. 复习思考题

在每章后面的复习思考题, 包含了复习本章内容的自我检查性题目及深化内容的问题。通过复习思考题的解答, 可以衡量读者对本章内容的掌握程度。复习思考题相当于一个复习提纲, 按照复习思考题进行总结易于抓住重点。

3. 习题

为了巩固所学知识, 加深对教材内容的理解, 培养读者分析问题的能力, 训练必要的计算技能并做到理论联系实际, 做习题是很重要的。每节后面的练习与思考题, 比较简单, 读者在每学完一个具体内容后可随时选做。每章后的习题, 带有综合性, 要求读者进行解答, 并按规定交老师批改。

4. 测验作业

在完成了一阶段(一般是1~2章)的学习任务后, 教材中安排了测验作业题, 这是教师检查学生在一个阶段中是否完成学习任务的主要依据。测验作业应该独立完成。

5. 实验

“电机学”是一门实践性较强的专业基础课, 所以实验是必不可少的重要教学环节。通过实验可对变压器和各类电机的工作特性、基本原理和理论计算加以验证; 并进行独立的实验操作, 学会测定各种电机(包括变压器)的工作特性及主要参数的方法, 提高实验技能和熟练程度。

四、学习本课程所需的基本电磁规律

“电机学”所涉及的基本理论, 除数学外, 主要是电学、磁学和动力学原理。无论是电动机还是变压器, 其工作原理都是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律、电磁力定律等基础之上的, 在学习本课程时要应用这些基本定律。为了便于读者复习, 下面简要地介绍上述定律的内容。

1. 直流和交流电路分析原理

欧姆定律; 基尔霍夫第一定律(在电路的联接点上, 电流的代数和等于零); 基尔霍夫第二定律(在闭合的回路中所有的电势之和等于所有压降之和)。

2. 磁路定律

(1) 磁路欧姆定律: 由于磁与电有相似的规律, 电路欧姆定律同样可以应用到磁路上, 设 Φ 为磁路中的磁通, Λ 为磁路的磁导, R_m 为磁路的磁阻, F_0 为磁势, 应用欧姆定律则有:

$$\Phi = F_0 \Lambda_m = \frac{F_0}{R_m}.$$

(2) 安培环路定律: 在闭合的磁路中, 磁场强度的线积分等于作用在该回路上的总的磁势(安或安匝), 即

$$\oint H \cdot dl = IW,$$

这是空间的积分, 与时间无关, 如果电源 I 为直流, 则 H 亦为恒值; 如 I 为交流的瞬时

值, H 亦为瞬时值. 这是电生磁的规律

3. 电磁关系

(1) 法拉第电磁感应定律: 即磁生电的规律, 在旋转电机中, 当磁通与线圈有相对运动时产生的切割电势为

$$e = Blv$$

其方向按右手定则定。

在变压器里当磁通在线圈中交变时, 其感应电势为:

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

(2) 毕沃-萨乏电磁力定律: 带电导体在磁场中所受的力为

$$f = Bli$$

其方向按左手定测定. 主要应用于电动机和发电机, 求它的机械力矩, 它和电磁感应定律结合起来, 形成电功率和机械功率转化的基础.

4. 能量转换和守恒定律

在同一旋转电机中不论是发电机状态或是电动机状态, 都存在有由切割电势所形成的电功率和电磁力所产生的机械功率, 考虑到在旋转电机上任何一根导线, 它的电势是 $e = Blv$, 则

$$\text{电功率} = ei = Blvi \text{ (瞬时值)}$$

$$\text{机械功率} = fv = Blvi \text{ (瞬时值)}$$

可见它们的数值是相等的, 它们的区别在于方向. 在发电机中 e 和 i 同方向, f 和 v 反方向. 在电动机中 e 和 i 反方向, f 和 v 同方向. 这就是电机中的能量转换规律.

电机是机电能量转换元件, 它在转换能量的过程中必须遵循能量守恒定律, 即输入的能量与输出及损耗的能量必须相平衡.

目 录

绪 论

第一章 变压器..... (1)

学习指导..... (1)

第一节 变压器的工作原理和结构..... (3)

第二节 单相变压器的空载运行..... (7)

第三节 单相变压器的负载运行..... (12)

第四节 变压器的参数测定..... (22)

第五节 变压器的运行特性..... (25)

第六节 三相变压器..... (29)

第七节 其他变压器..... (39)

复习思考题..... (44)

习题..... (45)

测验作业..... (49)

第二章 交流电机的绕组、电势和磁势..... (52)

学习指导..... (52)

第一节 交流电机的基本工作原理..... (53)

第二节 交流电机的绕组..... (59)

第三节 交流绕组的感应电势..... (66)

第四节 交流绕组的磁势..... (76)

复习思考题..... (94)

习题..... (95)

测验作业..... (96)

第三章 异步电动机..... (98)

学习指导..... (98)

第一节 异步电动机的基本结构、额定值和主要系列..... (99)

第二节 异步电机的磁路、主磁通和漏磁通..... (104)

第三节 转子静止时的异步电动机的电磁关系..... (105)

第四节 转子旋转时异步电动机的电磁关系..... (111)

第五节 异步电动机的功率和转矩..... (119)

第六节 鼠笼转子参数的计算..... (124)

第七节 三相异步电动机的工作特性和参数测定..... (127)

第八节 单相异步电动机..... (133)

第九节 交流换向器电动机..... (138)

复习思考题..... (141)

习题	(142)
测验作业	(143)
第四章 同步电动机	(145)
学习指导	(145)
第一节 同步电机的构造与型式	(146)
第二节 同步电动机的电压方程式和相量图	(148)
第三节 同步电动机的运行特性	(152)
第四节 同步电动机的起动	(160)
第五节 无换向器电动机	(162)
复习思考题	(166)
习题	(167)
测验作业	(168)
第五章 直流电机	(169)
学习指导	(169)
第一节 直流电机的工作原理	(170)
第二节 直流电机的结构	(174)
第三节 直流电机的铭牌数据与主要系列	(176)
第四节 直流电机的电枢绕组	(178)
第五节 直流电机的磁场和电枢反应	(186)
第六节 直流电机的感应电势和电磁转矩	(194)
第七节 直流发电机	(198)
第八节 直流电动机	(205)
第九节 直流电机的换向	(213)
复习思考题	(218)
习题	(220)
测验作业	(222)
第六章 控制电机	(225)
学习指导	(225)
第一节 伺服电动机	(226)
第二节 测速发电机	(230)
第三节 自整角机	(233)
第四节 旋转变压器	(239)
第五节 步进电动机	(241)
思考题与习题	(246)
测验作业	(246)
附录	(248)
一、主要符号表	(248)
二、力学、电学和磁学单位符号	(250)

第一章 变 压 器

变压器是一种静止的电器，利用电磁感应定律可将某一电压等级的交流电能，变换为同频率的另一种电压等级的交流电能。它主要的用途是变换电压，故称为变压器。

从发电厂发出来的交流电，经过电力系统输送和分配到用户，图 1-1 所示为一个简单的电力系统示意图。在大功率电能的输送过程中，为了减少输电线路上的损耗，必须采用升压变压器进行高压输电，当电能送到受电区时，还需要用降压变压器把高电压降低后供给各种

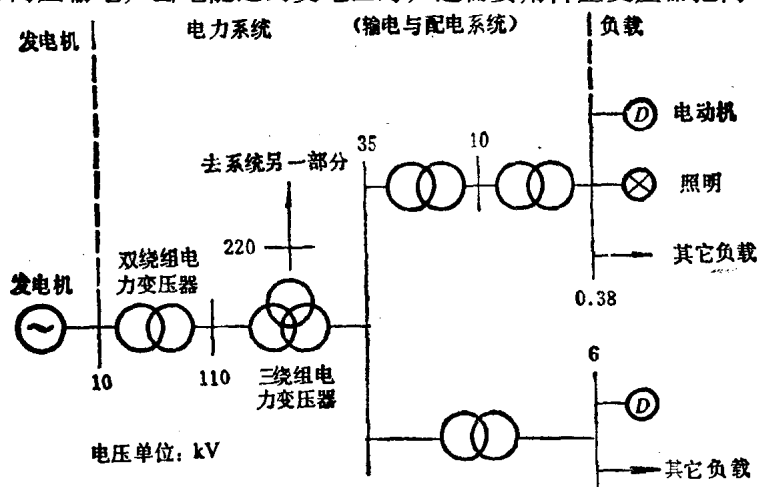


图1-1 简单的电力系统示意图

电气装置即负载使用。故从发电、输电及配电到用户，通常需要经过数次变换电压等级，以此来提高输配电的效率。通常，变压器的安装容量是发电机容量的(5~8)倍。因此，变压器对电力系统的经济和安全运行，有着十分重要的意义。

用于电力系统升压或降压的变压器称为电力变压器，工频为 50Hz，目前我国生产的变压器最大容量为360MVA，最高电压为 500kV。

变压器不仅能满足用户对不同电压等级的要求，而且在电力拖动系统和自动控制系统中，还可作为能量传递或讯号传递的元件，应用十分广泛。

本章主要研究一般用途的电力变压器，对其他特殊变压器只作简要介绍。

学 习 指 导

本章以普通双绕组电力变压器为主要研究对象，分析介绍变压器的工作原理、分类及其结构，并着重叙述单相变压器的运行性能、等值电路、相量图和参数计算。此外对三相变压器的磁路系统、联接组别以及并联运行等若干特殊问题也作专门研究。最后概略地介绍自耦变压器、仪用互感器和三绕组变压器的工作原理及其结构特点。

一、本章基本要求

1. 了解变压器的主要结构、基本工作原理及主要额定值的意义。

2. 通过单相变压器空载运行分析, 初步掌握变压器内部的电磁物理过程和空载时的基本方程式。

3. 通过变压器负载运行分析, 深入理解负载运行时变压器各物理量之间的关系, 绕组折算的物理意义及其计算方法, 掌握负载运行时的等值电路、相量图及参数测定, 求解电压变化率和效率, 分析变压器的运行性能。

4. 根据变压器不同铁心结构, 分析三相变压器绕组联接法和磁路系统对电势波形的影响。

5. 熟悉变压器的联接组别, 并能根据绕组接线图判别其联接组别, 或按照给出的联接组别画出绕组接线图。

6. 了解三相变压器并联运行的条件, 掌握变压器并联运行的参数计算。

二、本章重点和难点

本章重点内容

1. 变压器空载运行和负载运行的主要区别在于原绕组电流大小的变化。空载时原绕组电流为 I_0 , 负载时原绕组中的电流变为 I_1 , 电流变化的目的是为了维持铁心中的主磁通 Φ 保持不变, 使变压器原、副绕组在负载时的电磁平衡达到一种新的状态, 因此要分析并理解在不同运行状态下, I_0 、 I_1 和 I_2 等参数的物理意义。

2. 基本方程式、等值电路、相量图是分析变压器内部电磁关系的有效工具, 可借助于它们来分析变压器各种运行状态。

3. 三相变压器联接组别的确定是分析变压器相位的关键, 三相磁路系统的不同结构对电势波形有较大的影响, 变压器并联运行是日常使用中常见的问题, 它们必须满足三个条件方可进行并联运行。

本章的难点

1. 变压器内部磁势平衡的概念与实质;

2. 三相变压器联接组别的确定;

3. 三相变压器绕组联接法以及不同磁路系统对电势波形的影响。

三、说明

1. 变压器是一种电磁耦合元件, 通过磁路的耦合作用把交流电能从原边传递到副边, 利用绕制在同一铁心上的原绕组和副绕组之间的匝数不等, 把电压从原绕组的某一数量等级改变为副绕组的另一数量等级。

2. 变压器主要由铁心和绕组组成, 绕组可分为原绕组和副绕组, 铁心磁路同时穿过原、副绕组形成闭合回路, 两绕组分别与电源或负载形成独立电路。

3. 在研究变压器的运行情况时, 先分析空载运行, 然后再分析负载运行。因为空载运行时副绕组开路且电流为零, 此时变压器运行情况比较简单, 易于理解。而负载运行时副边有电流, 运行情况较为复杂, 按照这样的顺序来分析, 可以由简到繁, 由特殊到一般地认识整个变压器的内部电磁关系。

4. 本章对变压器的运行分析都是针对单相变压器进行的, 但在三相对称负载下, 对单相变压器分析的结论完全适用于三相变压器。此外, 在稳态时求得变压器等值电路中的各参数均应为相参数, 所以在作三相变压器参数计算时, 也必须换成每相数值。

5. 三相变压器绕组的不同联接组别和不同磁路系统对变压器电势波形的影响, 以及变

压器并联运行等是研究三相变压器区别于单相变压器的特殊问题。

第一节 变压器的工作原理和结构

一、变压器的简单工作原理

在一个闭合的铁心上绕制两个或两个以上匝数不同的线圈就构成了一台最简单的变压器，如图1-2所示。

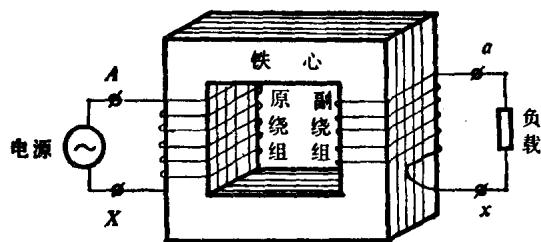


图1-2 单相双绕组变压器

由图可见，一个共同的磁路把两个联接到不同电路上的线圈交链在一起，通过电磁感应来实现两个电路之间的能量传递。共同的磁路部分常用硅钢片叠成，称为铁心。接到电源的线圈叫做原绕组、原边或高压侧，接到负载的线圈叫作副绕组、副边或低压侧。

当原绕组外加交流电源时，原绕组中便有交流电流流通，且建立磁势，从而在铁心中产生交变的磁通，其频率与电源电压的频率相同。铁心中的磁通同时交链原、副绕组，并在原、副绕组内感应电势。若忽略绕组的漏抗压降，变压器的原、副边电压可以近似表示为

$$u_1 \approx -e_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

$$u_2 \approx e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

则

$$\frac{u_1}{u_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (1-3)$$

由此可见，变压器原、副绕组电势之比以及电压之比都等于原、副绕组的匝数之比。只要改变原、副绕组的匝数，便可改变副绕组输出电压的大小，以满足各种不同用电者的要求，这就是变压器的简单工作原理。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，而且各种类型的变压器在结构上和性能上的差异较大。一般可按用途对变压器进行分类，也可按铁心结构，相数多少和冷却方式等进行分类。

根据变压器的用途通常可分为电力变压器(如升压变压器、降压变压器，配电变压器等)，特种变压器(如电炉变压器、整流变压器等)，仪用互感器(电压互感器和电流互感器等)以及试验用的高压变压器和调压器等。

根据线圈数目的多少，变压器可分为两线圈、三线圈、多线圈变压器，以及自耦变压器等。

根据变压器的铁心结构，可分为心式变压器和壳式变压器。

根据变压器的相数多少，可分为单相变压器和三相变压器。

根据变压器的冷却方式和冷却介质不同可分为用空气冷却的干式变压器和用油冷却的油浸式变压器等。

三、变压器的结构

变压器主要由铁心、线圈、油箱和绝缘套管等部件组成。图1-3为油浸式电力变压器的外形

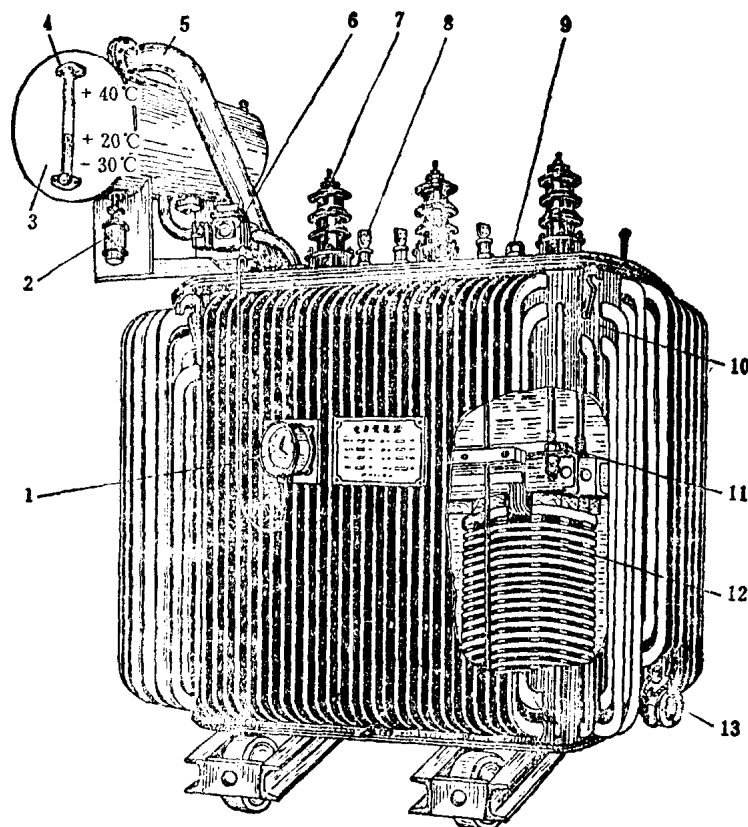


图1-3 油浸式电力变压器

- 1—讯号式温度计；2—吸湿器；3—储油柜；4—油表；5—安全气道
6—气保继电器；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

图. 现将其主要结构部件简单介绍如下:

1. 铁心

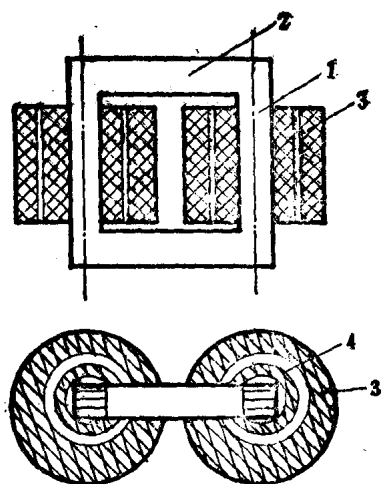
铁心是变压器的磁路，又是它的机械骨架。铁心由铁柱和铁轭两部分组成，在心柱上套装绕组，铁轭使整个磁路成为闭合磁路。为了具有较高的导磁系数，减少磁滞和涡流损耗，铁心都采用厚度为 0.35 或 0.5mm、表面涂有绝缘漆的热轧或冷轧硅钢片叠装而成。

按线圈和铁心配置的方式不同，变压器铁心结构的基本型式有心式、壳式和渐开线式。图 1-4a 和 b 分别为单相心式 and 三相心式变压器的铁心及线圈。这种心式结构的特点是铁轭靠着线圈的顶面和底面，而不包围线圈的侧面，散热条件较好，结构较为简单，线圈的装配及绝缘也较容易，国产变压器绝大部分采用心式结构。

图 1-5 为单相壳式变压器的铁心及线圈。这种铁心结构散热条件差，制造工艺比较复杂，使用材料多，只适用于一些特殊变压器，如电炉变压器，小容量电源变压器等。

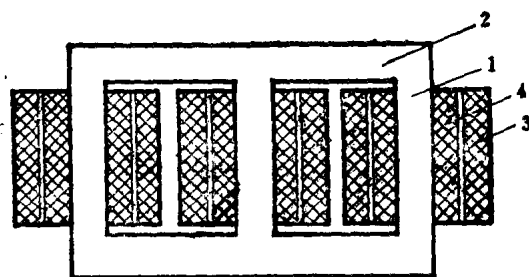
图 1-6 是三相渐开线式变压器的铁心，它是由尺寸相同的硅钢片在成形机上滚压成渐开线型。与心式变压器相比其优点在于三相磁路完全对称。因此当外加三相对称电压时，三个铁心中的磁通是对称的，三段铁轭中的磁通也是对称的。

2. 绕组



(a) 单相心式变压器

1—铁心柱；2—铁轭；3—高压绕组；4—低压绕组



(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

图1-4 心式变压器

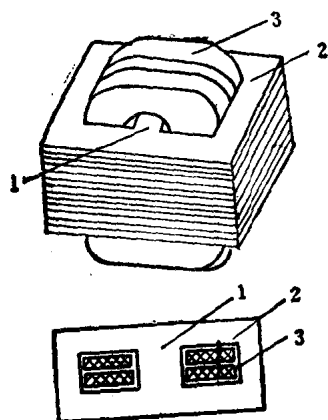


图1-5 单相壳式变压器

1—铁心柱；2—铁轭；3—绕组

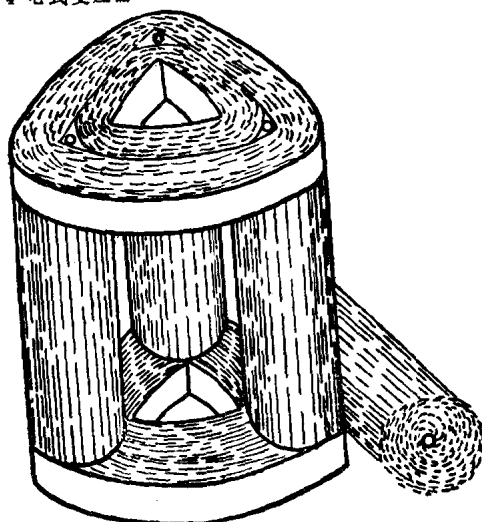


图1-6 三相 staggered 型铁心

绕组是变压器的电路部分，用铜或铝绝缘导线绕成。绕组在铁心上的布置有同心式和交叠式两种，同心式绕组的排列如图1-4所示。为了便于绕组和铁心绝缘，通常将电压低的绕组靠近铁心放置。图1-7所示为交叠式线圈的排列，高、低压绕组沿铁心柱高度方向交叠排列。为了减小绝缘层的厚度，通常是低压绕组靠近铁轭，这种结构主要用于壳式变压器。

3. 油箱和变压器油

变压器油箱是用钢板焊接而成的，一般都做成椭圆形。它的内部除放置变压器器身(带绕组变压器铁心)外，其余空间全部由变压器油充满。变压器油是一种从石油中提炼出来的矿物油，它在变压器中一方面作为绝缘介质，另一方面作为散热媒介，即通过油的对流把绕组及铁心所产生的热量传给油箱壁或散热器，以冷却变压器器

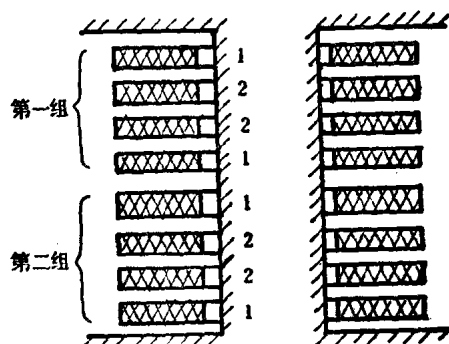


图1-7 交叠式(饼式)绕组

1—低压绕组；2—高压绕组

身。为了扩大散热面，在油箱的侧面装有1~3排扁形钢管，或者增设冷却器。

变压器还有许多其他的附件，如油枕(即贮油柜)、测温装置、气体继电器、安全气道、无载分接开关、散热器等。

四、变压器的额定值

1. 额定容量 S_N

额定工作状态下变压器的视在功率，用VA、kVA或MVA表示，对于双绕组电力变压器，原、副绕组的容量设计为相同。

2. 额定电压 U_{N1}/U_{N2}

U_{N1} 是电源加到原绕组上的额定电压， U_{N2} 是副绕组开路即空载运行时副绕组的端电压，均用V或kV表示，三相变压器的额定电压系指线电压。

3. 额定电流 I_{N1}/I_{N2}

根据变压器额定容量和额定电压计算出来的线电流即为额定电流，用A表示。

对于单相变压器，原、副绕组的额定电流为：

$$I_{N1} = \frac{S_N}{U_{N1}}, \quad I_{N2} = \frac{S_N}{U_{N2}}$$

对于三相变压器：

$$I_{N1} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{N1}}, \quad I_{N2} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{N2}}$$

4. 额定频率 f_N

我国规定标准工业用电的频率为50Hz。

此外，额定运行时变压器的效率、温升等数据均为额定值。除额定值外，铭牌上还标有变压器的相数，绕组连接方式和组别、短路电压(或阻抗电压)的相对值(或标么值)、运行方式(长期连续运行或短时运行)及冷却方式等。

例1-1 有一台三相双绕组铝线变压器，额定容量 $S_N = 100\text{kVA}$ ，Y/Y₀-12接法， $U_{N1}/U_{N2} = 6000/400\text{V}$ ，试求原副绕组的额定电流。

解：

$$I_{N1} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{N1}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 9.62 \text{ (A)}$$

$$I_{N2} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{N2}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 144.34 \text{ (A)}$$

练习与思考题

题1-1 变压器是根据什么原理进行变压的？它的主要用途有哪些？

题1-2 变压器铁心有何作用？为什么铁心要用硅钢片叠成？若用整块的铸铁做铁心行不行？

题1-3 如果将变压器误接到电压等于其额定电压值的直流电源上，会发生什么现象？

题1-4 有一台单相电力变压器，额定容量 $S_N = 180\text{kVA}$ ，额定电压 $U_{N1}/U_{N2} = 10000/380\text{V}$ ，试求原、副绕组的额定电流。

答案： $I_{N1} = 18\text{(A)}$ ， $I_{N2} = 473.7\text{(A)}$

题1-5 有一台三相电力变压器， $S_N = 560\text{kVA}$ ， $U_{N1}/U_{N2} = 6300/400\text{V}$ ，试求原、副

线组的额定电流。

答案: $I_{N1} = 51.3(\text{A})$, $I_{N2} = 808.3(\text{A})$

小 结

1. 变压器是借助于电磁感应作用, 实现能量转换的电磁元件, 它可将某一电压等级的交流电能转换成频率相同的另一电压等级的交流电能。

2. 变压器拥有一个共同的磁路以及两个独立的电路, 其主要部件有: 铁心、绕组、油箱和变压器油等。根据变压器的用途可分为电力变压器、特种变压器和仪用互感器等。

第二节 单相变压器的空载运行

变压器的原绕组接至交流电网, 副绕组开路, 这种情况即为变压器的空载运行, 空载时, 副绕组内电流为零, 对原绕组没有影响, 故分析起来较为方便。

一、空载运行时的物理情况

图1-8为单相变压器空载运行时的示意图。原绕组用 AX 表示, 匝数为 W_1 , 副绕组用 ax 表示, 匝数为 W_2 。在副绕组 ax 开路的情况下, 当原绕组 AX 接到频率为 f_1 、电压为 u_1 的交流电网上时, 原绕组中便有电流流通, 这个电流称为变压器的空载电流, 用 i_0 表示, 由它产生的磁势称为空载磁势 $i_0 W_1$, 在空载磁势 $i_0 W_1$ 的作用下, 磁路中便产生磁通, 因此空载磁势又叫作励磁磁势, 空载电流 i_0 又叫作励磁电流。由励磁磁势 $i_0 W_1$ 产生的磁通分为两部分: 一部分磁通是沿铁心闭合, 同时与原、副绕组相交链的, 称为主磁通, 用 Φ 表示; 另一部分磁通是沿非铁磁材料(变压器油或空气)闭合, 且仅与原绕组相交链, 称为漏磁通, 用 $\Phi_{\sigma 1}$ 表示。交流电网的电压 u_1 随时间以频率 f 作正弦变化, 因此励磁电流 i_0 、主磁通 Φ 及原绕组漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 也随时间交变, 频率均为 f_1 。由于变压器铁心是用高导磁材料制成的, 其导磁系数远比空气的大, 所以空载运行时, 主磁通占总磁通的绝大部分, 而漏磁通只占总磁通的 $(0.1 \sim 0.2)\%$ 左右。

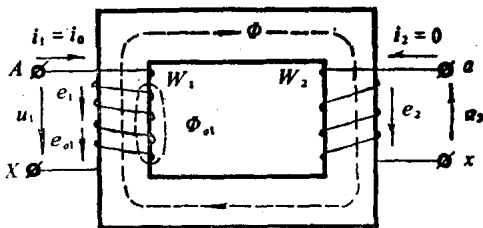


图1-8 单相变压器空载运行示意图

虽然主磁通 Φ 和漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 都是由空载电流 i_0 产生的, 但两者的性质却不同。由于铁磁材料存在饱和现象, 主磁通 Φ 与建立它的电流 i_0 之间的关系是非线性的, 漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 沿非铁磁材料构成的路径闭合, 它与电流 i_0 呈线性关系。主磁通在原、副绕组内感应电势, 当副绕组接上负载时, 在副绕组电势的作用下, 变压器向负载输出电功率。因此主磁通在变压器中起着传递能量的媒介作用, 而漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 仅在原绕组内感应漏电势, 只起压降作用, 不能传递能量。

二、变压器中各量正方向的规定

变压器中的电压、电流、磁通和感应电势的大小和方向都是随时间变化的。因此, 它们的正方向原则上是可以任意选择的, 但变压器内部电磁规律却是一定的, 表示电磁规律的方程式必须与选定的正方向相配合, 否则就不能正确地表示出其真实的规律。例如, 按图1-9a所规定的正方向, 感应电势 $-e_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt}$, 如按图1-9b所规定的正方向则应写为 $e_1 =$

$W_1 \frac{d\Phi}{dt}$ 。因此为了正确地表明变压器中各参数之间的相位关系，必须首先规定它们的正方向。

习惯上将变压器的原绕组看作负载，原绕组各参数正方向的规定应遵循电动机惯例，将变压器的副绕组看作电源，副绕组各参数正方向的规定应遵循发电机惯例。

现以图 1-8 为例，假定 u_1 的正方向是从 A 到 X，则电流的正方向亦为从 A 流向 X，即同一电路内，电压降和电流的正方向一致。磁通 (Φ 和 $\Phi_{\sigma 1}$) 的正方向与产生它们的电流 i_0 之间的关系应符合右手螺旋法则，由图中原绕组的绕向可知，磁

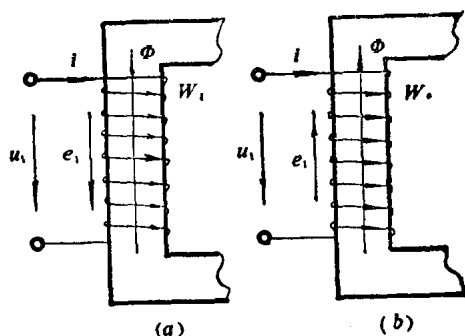


图1-9 正方向的不同规定

通的正方向由下而上。感应电势 e_1 的正方向与电流 i_0 的正方向一致。由于 e_2 和 e_1 是同一个磁通产生的，且副绕组的绕向与原绕组的绕向相同，因此 e_2 和 e_1 的正方向相同，均为由上而下。若将副绕组看作电源时，则 u_2 的正方向应由 e_2 决定，即 x 指向 a ，当副绕组接上负载后，副绕组中电流 i_2 正方向与 e_2 相同，功率自副绕组输出，这就是发电机惯例。

三、空载时的电势和电压平衡方程式

1. 感应电势与磁通之间的关系

假定主磁通是按正弦规律变化，即

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

根据电磁感应定律和图 1-8 所规定的正方向，主磁通 Φ 在原、副绕组中感应电势的表达式为：

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{m1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ e_2 &= -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{m2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 $E_{m1} = \omega W_1 \Phi_m$ ——原绕组 e_1 的最大值；

$E_{m2} = \omega W_2 \Phi_m$ ——副绕组 e_2 的最大值。

由于电势和磁通均以同样的频率按正弦规律变化，因此原、副绕组的感应电势可用相量表示如下：

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j \frac{\omega W_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j \frac{2\pi f W_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f W_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j \frac{\omega W_2}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j \frac{2\pi f W_2}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f W_2 \dot{\Phi}_m \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式 1-6 表示，绕组中感应电势的大小与绕组的匝数及主磁通的最大值成正比，其相位落后于主磁通 90° 。

在图 1 8 中，当原边电流 i_0 交变时，原绕组中的漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 也随着变化，于是在原绕组中也产生漏感电势 $e_{\sigma 1}$ ，其表达式为：

$$e_{\sigma 1} = -W_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = -\omega W_1 \Phi_{\sigma 1m} \cos \omega t = E_{\sigma 1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1-7)$$

写成相量形式：