

中等专业学校教材

电机及电器

西安电力学校 韩杰义 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书讲述自动控制系统中常用的各种控制电机及电器的基本结构、工作原理、特性和使用方法。全书共分九章，内容包括：小型变压器、旋转变压器、小功率直流电机、小功率异步电动机、小功率同步电机、步进电动机、常用控制电器、铁磁饱和稳压器、磁放大器以及二次线基本知识。各章均附有复习思考题。

本书是中等专业学校“电厂热工测量及自动化”专业的通用教材，也可供火电厂热工自动方面的技术人员和工人参考。

中等专业学校教材

电机及电器

西安电力学校 韩杰义 主编

*

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 12.25印张 275千字

1986年10月第一版 1986年10月北京第一次印刷

印数0001—8400册 定价1.80元

书号 15143·6164

前 言

本书是根据1984年8月在庐山召开的水利电力部中专“电厂热工测量及自动化”专业“教学计划、课程大纲讨论会”通过的《电机及电器》教学大纲(草案)编写的,可作为电力类中等专业学校“热自”专业四年制或三年制的教材。

随着火电厂的机组向大容量、高参数方向发展,电厂的自动化水平愈来愈高,从而对控制电机和低压电器设备的要求也日益提高。为了适应电力工业发展的需要,从事“热自”专业的技术人员有必要学习控制电机及电器的基础知识。《电机及电器》是《电工基础》的后续课程,本教材从各类控制电机、低压电器的基本电磁关系出发,阐明其物理概念,讲述基本结构,分析其工作原理和运行性能。考虑到从事自动控制方面的科技人员主要是合理地选择和正确使用各种控制电机及电器,所以在工作原理和电磁关系方面的叙述力求通俗易懂,讲清物理概念,而把重点放在特性和使用方面。本书初稿曾在几所兄弟学校的教学中试用。

本书共分九章,由西安电力学校韩杰义同志主编,邱运根同志参加编写,其中第一、二、三、九章为邱运根同志编写,其余各章由韩杰义同志编写。全书由沈阳电力学校蔡元宇同志主审。

本书编写过程中,曾得到西安交通大学、浙江大学、南京工学院、陕西机械学院、西安微电机研究所等单位有关老师,特别是陕西电力研究所牟善培同志的指导和帮助。在此,表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,编写时间紧迫,书中缺点和错误在所难免,诚恳地希望使用本教材的师生及读者批评指正。

编 者

1984年11月

目 录

前 言

绪 论	1
第一章 小型变压器	3
§ 1-1 变压器的基本知识	3
§ 1-2 变压器的运行分析	7
§ 1-3 变压器的折算法及等值电路	17
§ 1-4 三相变压器简介	20
§ 1-5 小型电源变压器	22
§ 1-6 输入变压器	29
§ 1-7 脉冲变压器	31
第二章 旋转变压器	38
§ 2-1 概述	38
§ 2-2 正余弦旋转变压器	39
§ 2-3 有补偿的正余弦旋转变压器	45
§ 2-4 线性旋转变压器	47
§ 2-5 旋转变压器的应用	49
第三章 铁磁饱和稳压器及磁放大器	53
§ 3-1 铁磁饱和稳压器	53
§ 3-2 磁放大器	58
第四章 小功率直流电机	66
§ 4-1 概述	66
§ 4-2 直流电机	66
§ 4-3 直流测速发电机	70
§ 4-4 直流电动机	79
§ 4-5 直流伺服电动机	86
§ 4-6 直流力矩电动机	91
第五章 小功率交流异步电动机	96
§ 5-1 概述	96
§ 5-2 异步电动机的基本结构及原理	96
§ 5-3 三相异步电动机的工作原理	98
§ 5-4 电动机的转差率、转子电流及功率因数	102
§ 5-5 三相异步电动机的转矩及机械特性	103
§ 5-6 三相异步电动机的使用	104
§ 5-7 单相异步电动机	107

§ 5-8 交流伺服电动机	110
第六章 小功率同步电机	126
§ 6-1 概述	126
§ 6-2 同步电机的结构	126
§ 6-3 同步发电机的工作原理	127
§ 6-4 同步电动机的工作原理	130
§ 6-5 小功率同步电动机	131
§ 6-6 永磁式电动机	133
§ 6-7 反应式同步电动机	136
§ 6-8 磁滞式同步电动机	138
第七章 步进电动机	143
§ 7-1 概述	143
§ 7-2 步进电动机的结构和分类	143
§ 7-3 步进电动机的工作原理	145
§ 7-4 步进电动机的性能指标	147
§ 7-5 步进电动机的应用	151
第八章 常用控制电器	155
§ 8-1 概述	155
§ 8-2 电弧的基本知识和低压开关的熄弧方法	155
§ 8-3 刀开关和熔断器	157
§ 8-4 组合开关、控制开关、按钮	159
§ 8-5 继电器	163
§ 8-6 接触器、磁力起动器	171
§ 8-7 三相异步电动机正反转的控制线路	172
§ 8-8 自动开关	173
第九章 二次线基本知识	176
§ 9-1 概述	176
§ 9-2 原理接线图	176
§ 9-3 展开接线图	177
§ 9-4 安装接线图	181
附录 互感器	188

绪 论

一、电机在自动控制系统中的作用

随着自动控制系统和计算装置的不断发展,在一般旋转电机的基础上产生了多种具有特殊性能的小功率电机。这些小功率电机在自动控制系统和计算装置中分别作为执行元件、检测元件和解算元件,并统称为控制电机。从基本的电磁感应原理来说,控制电机和普通旋转电机虽然没有本质上的差别,但一般旋转电机是着重考虑起动和运行状态时的力能指标;控制电机则着重考虑特性的高精度和快速响应。

控制电机已是现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装置中必不可少的重要元件。例如,没有一整套的自动控制系统,现代化热力发电厂的锅炉、汽轮机和发电机就无法正常运转;洲际导弹从发射、飞行到击中目标,必须有自动控制系统予以保证。自动控制系统中一个很重要的分支是伺服系统,藉以按预定的要求控制物位。任何复杂的自动控制系统,一般都离不开伺服系统,诸如自动记录仪表、电梯的自动升降、火炮和雷达的定位系统……等等。利用电能的伺服系统的主要部件即为控制电机。在自动控制系统中,各式各样的小巧灵敏的控制电机广泛地被用作检测、放大、执行和解算元件。

二、本课程的主要内容及特点

(一) 课程的主要内容

《电机及电器》课程是电厂热工测量及自动化专业后续《电工基础》课程而设置的一门专业基础课。根据本专业的要求,本课程的内容主要是在已学习一般电机的基础上,进一步分析各种常用控制电机的结构、原理和使用,以及部分常用控制电器。

控制电机的种类很多,主要包括直流伺服电动机、交流伺服电动机、旋转变压器、步进电机和测速发电机等。根据它们在自动控制系统中的作用,可作如下分类。

1. 执行元件

执行元件主要包括直流伺服电动机、交流伺服电动机和步进电机。这些电机的任务是将电信号转换成轴上角位移或角速度的变化,并带动控制对象转动。

2. 测量元件

测量元件包括交、直流测速发电机、旋转变压器等。它们用来测量机械转速、转角和转角差,在自动控制系统中一般作为敏感元件和校正元件。

上面所列举的是几种主要的控制电机,除此之外,还有许多特殊用途的控制电机。

(二) 控制电机的特点

日常生活和生产中常用的电机,如抽水机上的电动机、发电厂的发电机、车床上带动机器转动的电动机……等等和本书所要讲述的电机是有区别的。

从上举例可以看出,日常生活和生产中遇到的电机,一般均作为动力使用,它们的主要任务是进行能量转换。发电机把机械能转换成电能,电动机把电能转换成机械能,因此,

研究一般电机的主要任务是如何提高能量转换的效率。控制电机在整个控制系统中仅为一个元件，要完成控制信号的传递和转换，能量转换则属于次要的。所以研究控制电机的主要任务是如何使动作可靠、迅速、准确。一个自动控制系统由成百上千个各种各样元件组成，每个元件都必须按照系统对它的特定要求工作，因此，每个元件工作的好坏，都将直接影响整个系统的工作。

控制电机工作的范围极其广泛，工作环境也极为复杂，如高温、潮湿、冲击、振动、低温等，这就要求控制电机能在各种环境下可靠、准确地工作。

三、如何学习《电机及电器》课程

教材中所讲授的电机种类很多，同时还讨论了一些常用的控制电器。从内容上看，控制电机和一般电机的基本原理都是电磁感应，而通电流的导体在磁场中都要受到力的作用，因此这二者是学习本课程的理论基础，教材中特别强调了这一点。有关章的内容均从一般电机入手，运用上述两个基本理论进行分析。每一种电机牵涉的问题很多、很广，学习时要集中精力掌握基本规律和基本理论这个重点。

为了便于理解，教材未按电机的性质分类叙述，而是将电磁关系比较接近的集中一起，由浅入深，按循序渐进的原则安排章节的内容。

对热工测量及自动化专业的学生来说，为了学习后续的专业课以及今后的工作都需要学习好本门课程，不仅要掌握各种控制电机、电器的有关原理及其特性，而且要学会使用。所以教学过程中，要重视各种实践环节，使学生有较多的接触实物和动手练习的机会，把本门课程学好。

第一章 小型变压器

§ 1-1 变压器的基本知识

一、变压器的用途和分类

变压器是一种静止电器，应用电磁感应原理，在交流系统中把某一等级的电压或电流转变成所需要的另一等级的电压或电流。

变压器十分广泛地应用于国民经济各个领域。各种电器设备往往需要不同的电源电压，例如人们日常生活的照明用电为220V或110V；各种机床、生产机械的电动机用电常为380V；安全照明用电为36V。在自动控制技术中，各式各样小巧灵敏的控制电机、自动化仪表通常也要求不同等级的电源电压。变压器是电力系统中主要的电气设备，升压变压器把电站发出的电能输送到远距离的用电区；降压变压器把输电电压降到用户所需的电压等级，以供使用。

现代化的工业企业广泛地以电能作为动力，因此，变压器的应用不仅数量多，而且要求性能好、运行安全可靠，因此，对制造和使用部门也都提出了更高的要求。

变压器的种类很多，一般分为电力变压器和特种变压器两大类。也可按其用途、绕组数、相数、冷却方式等进行分类。

1. 按用途分类

1) 电力变压器 主要用于输配电系统，又分为升压变压器、降压变压器和配电变压器等。电力变压器容量从几十kVA到几十万kVA，电压等级从几百V到几百kV。

2) 调压变压器 用来调节电网中的电压，实验室多使用小容量的调压变压器。

3) 控制变压器 容量较小，用于自动控制系统，如电源变压器、输入变压器、输出变压器和脉冲变压器等。

4) 仪用变压器 一般指电流互感器和电压互感器。因为线路中的大电流、高电压不能直接测量，需要通过互感器连接测量仪表进行测量。

5) 试验高压变压器 可产生高达750kV的电压，用于高压试验。

6) 特殊用途变压器 有电炉变压器、整流变压器和电焊变压器等。

2. 按绕组数目分类

1) 双绕组变压器 每相有高、低压两个绕组。

2) 自耦变压器 高低压共用一个绕组，高压、低压绕组之间既有磁的耦合，又有电的联系。

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。

3. 按相数分类

1) 单相变压器。

2) 三相变压器。

3) 多相变压器(例如整流用六相变压器)。

二、变压器的基本结构和工作原理

(一) 变压器的基本结构

变压器的构造因使用场合和性能要求的不同,有着较大的差异,但各种变压器的基本结构则是相同的。因为所有变压器最基本的工作情况,是由一共同的磁路把两个或两个以上的连接在不同电路上的线圈链在一起,通过电磁感应,在不同电路之间实现能量的传递。

共同的磁路部分称为铁心,被链的线圈称为绕组,如图1-1所示。通常,与交流电源相连接从电源吸收能量的绕组称原绕组,与负载相连接的绕组称副绕组。原绕组也叫做原边绕组或初级绕组,副绕组也叫做副边绕组或次级绕组。

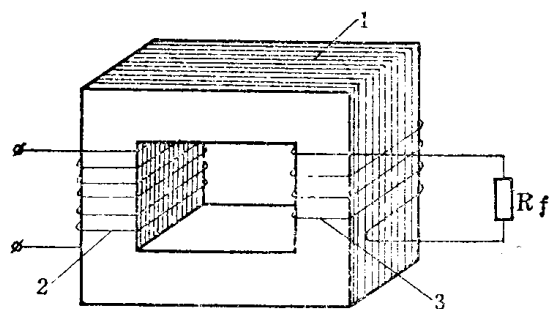


图 1-1 变压器结构示意图

1—铁心; 2—原绕组; 3—副绕组

变压器副绕组的电压一般不等于原绕组的电压,如果原绕组的电压高(高压绕组),而副绕组的电压低(低压绕组),这种变压器叫做降压变压器;反之,叫做升压变压器。

变压器的结构除铁心和绕组外,还有引线装置和冷却装置,电力变压器的铁心和绕组均置于油箱中。下面先介绍变压器的铁心和绕组的结构。

1. 铁心

铁心既是变压器的磁路,又是机械骨架。铁心由铁柱和铁轭两部分组成,铁柱上套装绕组,铁轭构成闭合磁路。铁心的型式分为内铁式(又称心式)如图1-2所示;外铁式

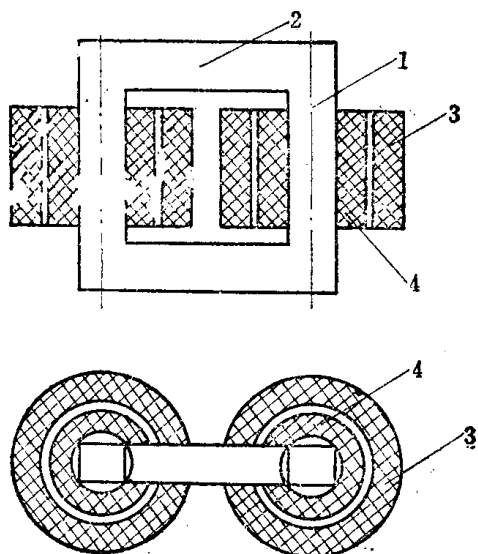


图 1-2 单相心式变压器

1—铁柱; 2—铁轭; 3—高压绕组; 4—低压绕组

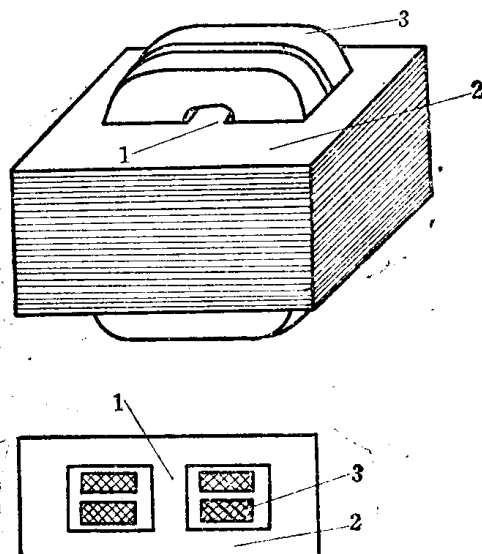


图 1-3 单相壳式变压器

1—铁柱; 2—铁轭; 3—绕组

(又称壳式)如图 1-3 所示。心式变压器是绕组包围着铁心,壳式变压器则是铁心包围着绕组。心式铁心结构比较简单,绕组的套装较为方便绝缘也较容易处理,因此国产电力变压器均采用心式结构。壳式结构的机械强度较好,但铁心用的材料较多,制造也较复杂,小容量的单相变压器一般采用壳式结构,如自动控制设备、无线电用变压器。

变压器铁心内的磁通是交变的,因而产生一定的磁滞和涡流损耗。为了减小铁心中的磁滞和涡流损耗,铁心一般使用含硅 5 % 左右、厚度为 0.35mm 的硅钢片叠成,硅钢片的两面涂绝缘硅钢漆,并经过烘干。

硅钢片有热轧和冷轧两种。冷轧硅钢片具有方向性,即顺着辗压方向的单位铁损耗低于热轧硅钢片的单位铁损耗,在相同的磁场强度下,冷轧硅钢片的磁通密度可高于热轧硅钢片 20%。在垂直辗压方向,其单位铁损耗约增高 3 ~ 4 倍。冷轧硅钢片的导磁性能较高,工作磁密可达 1.8T。热轧硅钢片没有明显的方向性,导磁性能较低,工作磁密最高只能达 1.2T,一般使用 0.9~1.2T。因此冷轧硅钢片的铁心截面可以减小,从而减小变压器的体积和重量。冷轧硅钢片在变压器中已得到日益广泛的应用。

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分,用纸包的绝缘扁线或圆线绕制。小型变压器通常用具有良好绝缘的漆包铜线绕制。

根据高压绕组和低压绕组的相对位置,绕组可分为同心式和交叠式两类。

同心式绕组指高、低压绕组同心地套装在铁柱上。为了便于绝缘,减小绕组尺寸,低压绕组一般套装在里层,靠近铁柱,高压绕组套装在外层,远离铁柱。交叠式绕组通常作成饼式,高、低压绕组交叠放置,如图 1-4 所示。为了便于绝缘,铁柱最上端和最下端的

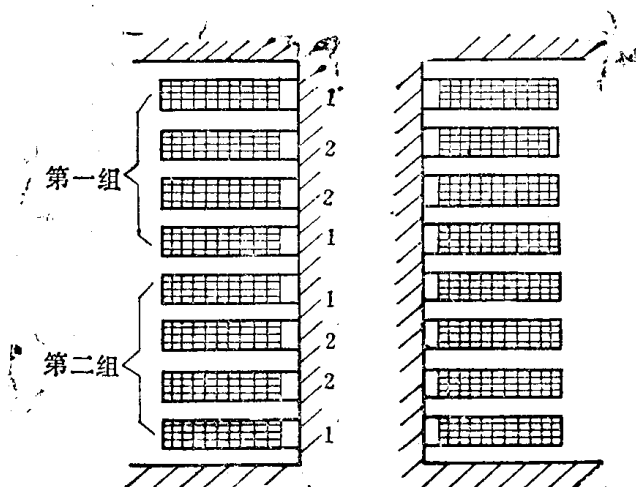


图 1-4 交叠式绕组
1—低压绕组, 2—高压绕组

两饼都应放置低压绕组。同心式绕组结构简单,制造方便,因此应用广泛,交叠式绕组机械强度好,但绝缘比较复杂,常用于容量较大的电力变压器和电炉变压器。

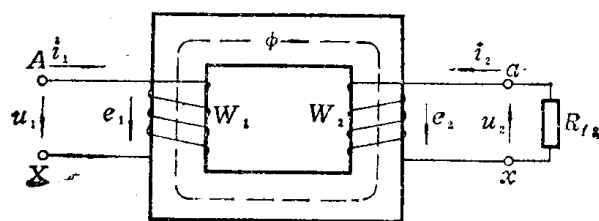


图 1-5 变压器工作原理图

(二) 变压器的工作原理

如图 1-5 所示,当变压器的原绕组两端接上交流电压 u_1 时,则有交流电流 i_1 通过原绕组,铁心中将建立交变磁通 ϕ 沿铁心而闭合。若两绕组电磁耦合甚为紧密(无漏磁通),耦合系数 $K = 1$,这种变压器是理想变压器。根据电磁感应定律可写出电势的瞬时方程式为

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1-1)$$

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

式中 W_1 、 W_2 ——原、副绕组的匝数。

若外加电压 u_1 按正弦规律变化，则磁通 ϕ 也将按正弦规律变化，即

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad (1-3)$$

式中 ϕ_m ——主磁通最大值；

ω ——电源电压的角频率， $\omega = 2\pi f$ 。

将式1-3代入式1-1和式1-2得

$$\begin{aligned} e_1 &= -W_1 \omega \phi_m \cos \omega t \\ &= W_1 \omega \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} e_2 &= -W_2 \omega \phi_m \cos \omega t \\ &= W_2 \omega \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-5)$$

从式(1-4)和式(1-5)可知，主磁通按正弦规律变化时，所产生的感应电势亦按正弦规律变化。根据图中规定的正方向， e_1 和 e_2 同相，它们在相位上都滞后于主磁通 ϕ 90°。电势 e_1 与 e_2 的有效值分别为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} W_1 \phi_m = 4.44f W_1 \phi_m \quad (1-6)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} W_2 \phi_m = 4.44f W_2 \phi_m \quad (1-7)$$

由于它们按正弦规律变化，故可用复数表示，即

$$\dot{E}_1 = -j4.44f W_1 \phi_m \quad (1-8)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44f W_2 \phi_m \quad (1-9)$$

由式(1-6)和式(1-7)可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K \quad (1-10)$$

式(1-10)说明变压器原、副绕组中感应电势之比等于它们的匝数之比，比值 K 称变压器的变比，是变压器的一个重要参数。

对理想变压器而言， $U_1 = E_1$ 、 $U_2 = E_2$ ，所以

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K \quad (1-11)$$

从式(1-11)可以看出，正由于原、副绕组的匝数不同，变压器起了变电压作用。这就是说，设计变压器可以选择适当的原、副绕组的匝数比，便能把原绕组的电压变为所需要的副绕组电压。习惯上变比 K 为高压绕组的匝数对低压绕组的匝数之比，即 $K > 1$ 。

三、变压器的额定值

变压器的额定值是指变压器制造厂按设计规定变压器的正常运行参数数据。额定值通常标注在变压器的铭牌上，故亦称铭牌值。变压器一般有如下的额定值。

1. 额定容量 S_e

在额定状态下，变压器输出能力的保证值，以副绕组的额定电压和额定电流的乘积表示，单位为VA或kVA。

2. 额定电压 U_e

变压器空载并于额定分接头下，各绕组端电压的保证值，单位为V或kV。三相变压器的额定电压均指线电压。

3. 额定电流 I_e

根据额定容量和额定电压所计算出的绕组电流值即为额定电流，单位为A或kA。

单相变压器原、副绕组的额定电流为

$$I_{1e} = \frac{S_e}{U_{1e}}, \quad I_{2e} = \frac{S_e}{U_{2e}} \quad (1-12)$$

三相变压器原、副绕组的额定电流为

$$I_{1e} = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_{1e}}, \quad I_{2e} = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_{2e}} \quad (1-13)$$

4. 额定频率 f_e

我国规定交流电的频率为50Hz。

此外，在额定运行情况下，变压器的效率，温升等数据亦属于变压器的额定值。

例 1-1 一台三相油浸自冷式铝线变压器， $S_e = 180\text{kVA}$ ， Y/Y_{0-12} 联结， $U_{1e}/U_{2e} = 10\text{kV}/0.4\text{kV}$ ，试求原、副绕组的额定电流。

解： $I_{1e} = S_e / \sqrt{3} U_{1e} = \frac{180 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 10.4\text{A}$

$$I_{2e} = S_e / \sqrt{3} U_{2e} = \frac{180 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0.4 \times 10^3} = 259.8\text{A}$$

§ 1-2 变压器的运行分析

一、变压器各物理量正方向的选定

变压器运行情况的分析，必然涉及到原绕组端电压 $\dot{U}_1$ 、原绕组电流 $\dot{I}_1$ ，主磁通 ϕ ，副绕组电流 $\dot{I}_2$ 和副绕组端电压 $\dot{U}_2$ 以及原、副绕组感应电势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 等物理量，这些物理量都是随时间变化的正弦量。为了正确表达这些物理量间的相互关系，如不规定一个参考正方向，则讨论它们的正负就没有标准。参考正方向是人为给定的。例如，图1-5所示， ϕ 在某一瞬时的方向若和 ϕ 所标的箭头方向一致，则此瞬时磁通 ϕ 为正；相反，另一瞬时磁通 ϕ 的方向和 ϕ 所标的箭头方向相反，则此瞬时磁通 ϕ 为负。

交变物理量的参考正方向，从原理上讲可以任意选定。由于变压器是按照电磁规律工作的，因此，选定参考正方向必须与表征变压器的电磁规律方程式配合，否则就不能正确

地反映变压器的真实状态。例如，图 1-5 中穿过原绕组的磁通 ϕ 和感应电势 $\dot{E}_1$ 的正方向要符合“右螺旋”关系，即感应电势的瞬时值应为

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt}$$

上式说明，当 ϕ 按规定的正方向增加，即 $\frac{d\phi}{dt}$ 为正值时，原绕组中感应电势的大小为 $W_1 \frac{d\phi}{dt}$ ，而 e_1 的实际方向是由 X 指向 A，这和电压选定的正方向（由 A 指向 X）相反，即 e_1 应为负；反之，当 ϕ 按规定的正方向减小，即 $W_1 \frac{d\phi}{dt}$ 为负值时，原绕组中感应电势的方向与选定的正方向相同，即 e_1 应为正值。这也就是 $W_1 \frac{d\phi}{dt}$ 前负号的意义。

1. 原绕组各物理量正方向的选定

变压器原绕组吸收功率，是电源的一个负载，所以原绕组各物理量正方向的选定原则应符合“电动机”惯例。

(1) 电压 u_1 的正方向 选定为由 A 指向 X，即表示当 A 点电位高于 X 点时 u_1 为正值。

(2) 电流 i_1 的正方向 选定和 u_1 的正方向一致，这表明变压器原绕组始终吸收电源的功率。

(3) 主磁通 ϕ 的正方向 根据 i_1 的正方向和“右螺旋”定则，当电流从 A 点流入时，原绕组所产生磁通的方向（如图中虚线所示）为 ϕ 的正方向。

(4) 感应电势 e_1 的正方向 习惯上取 e_1 的正方向与 ϕ 的正方向符合“右螺旋”关系。此时， $e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt}$ 。

2. 副绕组各物理量正方向的选定

变压器的副绕组输出功率，其各物理量正方向的选定原则应符合“发电机”惯例。

(1) 感应电势 e_2 的正方向 e_2 的正方向与 ϕ 的正方向符合“右螺旋”定则。 $e_2 = -W_2 \frac{d\phi}{dt}$ 。

(2) 电流 i_2 的正方向 i_2 是在 e_2 的作用下产生的，选取 i_2 的正方向与 e_2 一致。

(3) 电压 u_2 的正方向 从变压器负载看， u_2 和 i_2 的正方向应当一致。

二、变压器的空载运行

变压器的原绕组接交流电源，副绕组开路时叫空载运行，或称无载运行。空载运行是变压器最简单的运行状态，因为此时副绕组中没有电流流过，所以分析变压器运行，往往先从空载运行开始。

(一) 变压器空载运行的物理状况

图 1-6 所示为单相变压器空载运行的原理图。当原绕组加上额定频率 f_e 的正弦电压 $\dot{U}_1$ 时，原绕组内有 $\dot{I}_0$ 流过。副绕组开路，副绕组内没有电流，处于空载运行状态， $\dot{I}_0$ 称为空载电流。

为了便于分析，图1-6中各物理量均按惯例标出了它们的正方向。在电压 $\dot{U}_1$ 的作用下，原绕组将流过空载电流 $\dot{I}_0$ ，并建立相应的空载磁势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 W_1$ ，并产生磁通 ϕ 。由于空载电流 $\dot{I}_0$ 主要产生空载磁势，故又称激磁电流，空载磁势 $\dot{F}_0$ 也称激磁磁势。

变压器铁心是用高导磁材料硅钢片叠成的，其导磁系数比空气（或油）的导磁系数大得多，因此，绝大部分的磁通以闭合的铁心为路径，并和原绕组、副绕组相交链，称为主磁通 ϕ ，这是变压器传递能量的形式。但是有少量磁通通过油或空气闭合，仅交链着原绕组，称为原绕组的漏磁通 ϕ_{L1} 。

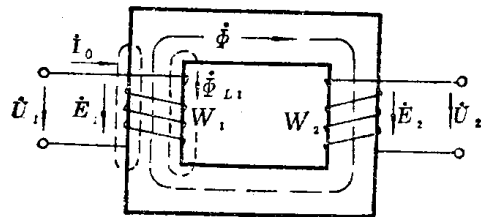


图 1-6 单相变压器空载运行

根据电磁感应定律，主磁通 ϕ 将分别在原、副绕组中感应出电势 e_1 和 e_2 ，而漏磁通 ϕ_{L1} 仅在原绕组中感应出漏磁电势 e_{L1} 。原、副绕组的感应电势可用下列方程表示。

$$\begin{aligned} e_1 &= -W_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 &= -W_2 \frac{d\phi}{dt} \\ e_{L1} &= -W_1 \frac{d\phi_{L1}}{dt} \end{aligned} \quad (1-14)$$

(二) 磁通和感应电势、电压的关系

磁通和由它产生的感应电势之间的关系是由电磁感应定律所规定的。如前所述，可以导出主磁通 ϕ 在原、副绕组中感应电势分别为

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j4.44fW_1\phi_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44fW_2\phi_m \end{aligned}$$

以上是变压器理论的基本关系式，它表征感应电势的大小与电源频率 f ，绕组匝数 W 及铁心中主磁通最大值 ϕ_m 成正比。由式 (1-4) 和式 (1-5) 可知，绕组中的感应电势在相位上落后于主磁通 90° ，如图1-7所示。

同理，原绕组中漏磁电势为

$$e_{L1} = -W_1 \frac{d\phi_{L1}}{dt} = \omega W_1 \phi_{L1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-15)$$

$$E_{L1} = W_1 \omega \phi_{L1m} / \sqrt{2} \quad (1-16)$$

$$\dot{E}_{L1} = -j4.44W_1 f \phi_{L1m} \quad (1-17)$$

由于漏磁通的路径为油或空气，故自感系数为一常数，即

$$L_{L1} = \frac{\psi_{L1}}{I_{0m}} = \frac{W_1 \phi_{L1m}}{I_{0m}} = \frac{W_1 \phi_{L1m}}{\sqrt{2} I_0} \quad (1-18)$$

将式 (1-18) 代入式 (1-16) 及式 (1-17) 得

$$\begin{aligned} E_{L1} &= I_0 \omega L_{L1} = I_0 x_{L1} \\ \dot{E}_{L1} &= -j\dot{I}_0 \omega L_{L1} = -j\dot{I}_0 x_{L1} \end{aligned} \quad (1-19)$$

式中 x_{L1} ——原绕组的漏电抗, $x_{L1} = \omega L_{L1}$ 。

原绕组的漏电抗 x_{L1} 是原绕组的一个参数。利用这一参数可以电抗压降的形式表示漏磁电势, 并使 $\dot{E}_{L1}$ 与 $\dot{I}_0$ 直接联系起来。漏电抗 x_{L1} 从物理意义上表征了漏磁通对电路产生的电磁效应。

此外, 原绕组中还存在电阻 r_1 , 当空载电流流过原绕组时, 将产生电阻压降 $\dot{I}_0 r_1$ 。

根据基尔霍夫第二定律, 原边绕组的电路可列出电势平衡方程式, 即

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{L1} + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 x_{L1} + \dot{I}_0 r_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1\end{aligned}\quad (1-20)$$

式中 Z_1 ——空载时原绕组的漏阻抗, $z_1 = r_1 + jx_{L1}$ 。

空载电流的数值很小, 仅为额定电流的 2%~10%, 电阻压降及漏磁电势的数值与 $\dot{E}_1$ 相比又小得很多, 均可忽略不计, 故得

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44fW_1\phi_m \quad (1-21)$$

空载时 $I_2 = 0$, 故副边绕组的端电压 $\dot{U}_2$ 等于它的磁感应电势 $\dot{E}_2$, 即

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 = -j4.44fW_2\phi_m \quad (1-22)$$

式 (1-21) 说明, 当外加电压不变时, E_1 几乎不变, 主磁通 ϕ_m 的大小也不变, 即主磁通的大小决定于外加电压。电势与主磁通波形及相量图如图 1-7 所示。

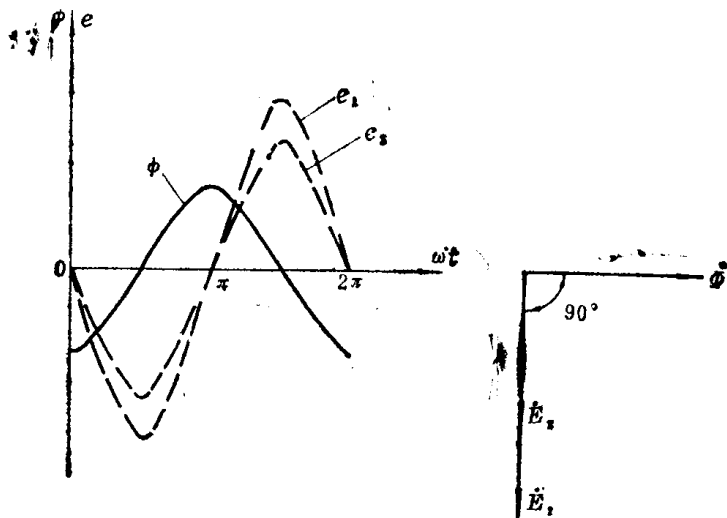


图 1-7 电势与主磁通波形及相量图

(三) 变压器的变比

从 § 1-1 节已知, 变压器原绕组感应电势 E_1 与副绕组感应电势 E_2 之比称为变压器的变比, 并用符号 K 表示, 即

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fW_1\phi_m}{4.44fW_2\phi_m} = \frac{W_1}{W_2} \quad (1-23)$$

式 (1-23) 说明变压器的变比等于原、副绕组的匝数比。单相变压器空载运行时, 由于 $U_1 = E_1$, $U_2 = E_2$, 因此变比 K 可以近似地认为等于空载时的电压比, 即

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K \quad (1-24)$$

由式 (1-24) 可知, 若 $W_2 > W_1$, 则 $U_2 > U_1$ 即为升压变压器; 反之若 $W_2 < W_1$, 则

$U_2 < U_1$ 即为降压变压器。可见, 变压器能改变电压就是因为原、副绕组的匝数不同。因此设计制造变压器时, 若适当选择原、副绕组的匝数比, 即可实现所要求的电压变换。但是, 应当指出, 原绕组的匝数并非任意选定, 而要符合下列关系, 即

$$U_1 \approx 4.44fW_1\phi_m = 4.44fW_1B_mS$$

$$W_1 \approx \frac{U_1}{4.44fB_mS} \quad (1-25)$$

式中 B_m ——磁通密度的最大值 (T);

S ——铁心的有效截面积 (m^2)。

(四) 变压器空载伏安特性

变压器空载伏安特性是指变压器空载时, 原绕组电压和电流之间的关系, 其实验线路由被试变压器、电压表、电流表和一台用来调整原边电压的调压器组成, 如图1-8所示。被试变压器的副绕组开路 (即空载状态)。当原绕组加不同电压 U_1 时, 则测得不同空载电流 I_{10} 。根据所测数据可作出图1-9所示的空载伏安特性曲线。

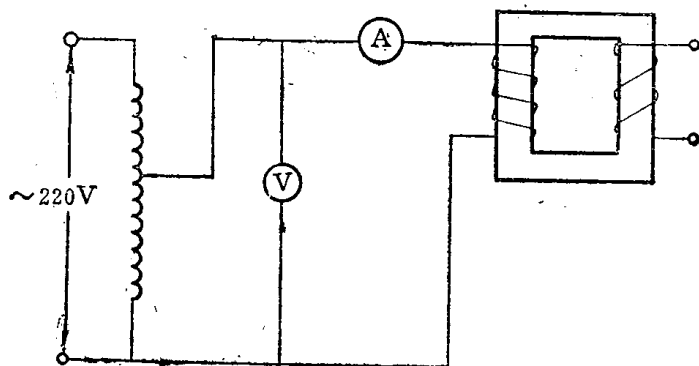


图 1-8 变压器的空载实验线路

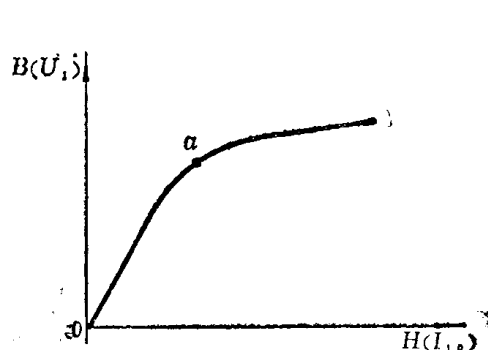


图 1-9 变压器的空载伏安特性

变压器空载伏安特性即其铁心材料的磁化曲线。为了说明这一点, 可将电压 U_1 和空载电流 I_{10} 作如下变换。

根据式 (1-6) 和 $U_1 \approx E_1$ 得

$$\phi_m = \frac{U_1}{4.44fW_1} \quad (\text{Wb})$$

$$B_m = \frac{\phi_m}{S} = \frac{U_1}{4.44fW_1S} \quad (\text{T})$$

上式将伏安特性中的电压 U_1 变换成与磁密 B_m 关系式。

由电工原理又可将空载电流 I_{10} 变换成与磁场强度 H 的关系式, 即

$$H = \frac{I_{10}W_1}{l}$$

式中 H ——铁心中的磁场强度;

l ——铁心磁路的长度。

这样, 变压器的伏安特性就转换成铁心材料的磁化曲线, 如图1-9所示。

为了既能充分利用铁心材料, 又能减小激磁电流, 变压器的 B_m 常选在曲线的点 a 处。

已经设计或制造成的变压器, 其原绕组额定电压是确定的。如电源电压 U_1 增加并超

过额定值时，则激磁电流 I_1 将因磁饱和现象而急剧增加，从而导致变压器的烧毁。

(五) 空载电流

变压器空载运行时有空载损失，由于空载损失较小，往往可以忽略不计。忽略空载损失后，空载电流便为纯粹建立磁场的无功电流 i_{0q} ，或叫磁化电流。当铁心中磁通密度较低，铁心未饱和时磁化曲线近似直线，激磁电流便和磁通成正比。假设此时的磁通是正弦波，则磁化电流 i_{0q} 也是正弦波，如图1-10所示。但是，为了充分利用材料，变压器铁心的磁路总是按接近饱和设计的，即磁通选在磁化曲线进入饱和的区段。此时，激磁电流便不再与磁通成线性关系。下面将进一步分析磁通为正弦波时，磁化电流 i_{0q} 的波形。

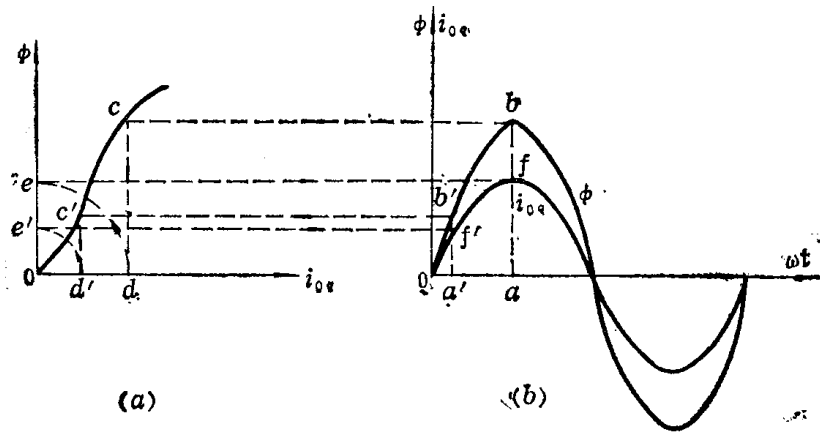


图 1-10 磁路未饱和时 ϕ 和 i_{0q} 的波形
(a)磁化曲线；(b) ϕ 和 i_{0q} 的波形

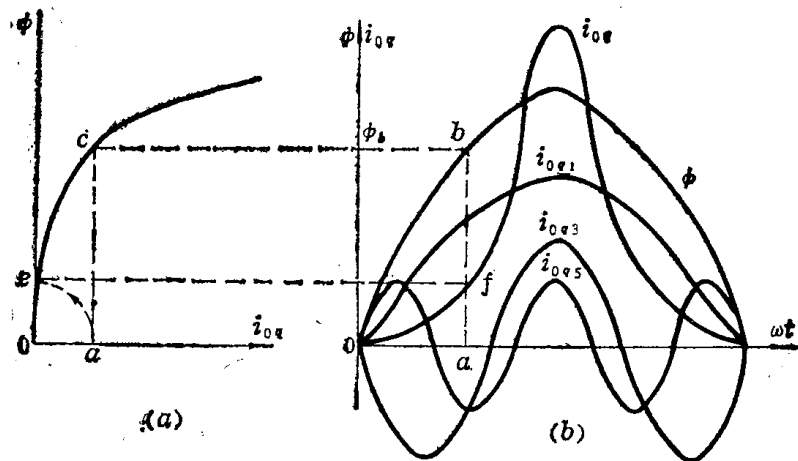


图 1-11 磁化曲线波形及其谐波
(a)磁化曲线；(b) i_{0q} 波形及其谐波

图1-11 (a) 所示为一热轧硅钢片的磁化曲线 $\phi=f(i_{0q})$ 。图1-11 (b) 所示为 $\phi=f(\omega t)$ 曲线。通过这两个曲线可以求出磁化电流曲线 $i_{0q}=f(\omega t)$ 。当 $\omega t=0$ 时， $\phi=0$ ， $i_{0q}=0$ ，即图1-11 (b) 中0点；当 $\omega t=a$ 时，磁通为b点之值 ϕ_b ，产生 ϕ_b 的 i_{0q} 之值可按图1-11中箭头的方向，即 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ ，求出为af。用同样的方法，可以求出产生相应磁通的 i_{0q} 之值，从而可得 $i_{0q}=f(\omega t)$ 曲线。由图1-11 (b) 所示可见，当主磁通按正弦变化时，磁化电流将不按正弦变化，而出现一个尖顶波，而且磁路愈饱和，尖顶波的