

高职高专教育“十二五”规划教材

DIANJI YU DIANQI KONGZHI
XIANGMUHUA JIAOCHENG



电机与电气控制

项目化

教程

主 编 陈秀娟 叶德云

中国建材工业出版社

高职高专教育“十二五”规划教材

电机与电气控制 项目化教程

主 审	姜新桥	
主 编	陈秀娟	叶德云
副主编	马松杰	刘桂丽

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与电气控制项目化教程 / 陈秀娟, 叶德云主编
—北京: 中国建材工业出版社, 2012. 9
ISBN 978-7-5160-0267-4

I. ①电… II. ①陈…②叶… III. ①电机学-高等学校-教材②电气控制-高等学校-教材 IV. ①
TM3②TM921. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 204004 号

内容简介

本书内容包括: 变压器的使用、交流电动机的拆装与维护、直流电动机的拆装与维护、常用特种电动机、交流电动机控制线路的安装与调试、常用生产机械电气控制线路检测与维修等。其中以三相交流电动机为重点, 以电气控制基本环节为主线, 各部分内容均从应用角度进行阐述, 注重理论联系实际, 通过典型应用实例进行电路原理分析, 强化对学生职业技能的培养与训练, 以期培养学生分析、解决生产实际问题的能力和构建简单的电气控制系统的能力。既融会贯通, 又单独成体。

本书可作为高等职业院校、高等专科院校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院的相关专业的教学用书, 并可作为相关社会从业人员的业务参考书及培训用书。

电机与电气控制项目化教程

主 编: 陈秀娟 叶德云	开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16
封面设计: 华盛英才	印 张: 16
出版发行: 中国建材工业出版社	字 数: 371 千字
地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号	版 次: 2013 年 1 月第 1 版
邮 编: 100044	印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷
经 销: 全国各地新华书店	书 号: ISBN 978-7-5160-0267-4
印 刷: 北京天宇万达印刷有限公司	定 价: 35.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

我国的高等职业教育的根本任务是培养适合我国现代化建设和经济发展的高等技术应用型人才,所以,高等职业教育在对工业电气化技术、工业企业电气化、工业电气自动化、工业仪表自动化、生产过程自动化、应用电子技术、机电一体化等高等技术应用型相关专业人才的培养过程中,应使学生掌握电机与电气控制技术的基本知识和基本技能,为在今后的生产实践中灵活地应用电机与电气控制解决实际问题打下良好的理论和实践基础,《电机与电气控制技术案例教程》就成为教学中的必修课之一。

本书内容包括:变压器的使用、交流电动机的拆装与维护、直流电动机的拆装与维护、常用特种电动机、交流电动机控制线路的安装与调试、常用生产机械电气控制线路检测与维修等。其中以三相交流电动机与拖动控制为重点,以电气控制基本环节为主线,各部分内容均从应用角度进行阐述,注重理论联系实际,通过典型应用实例进行电路原理分析,强化对学生职业技能的培养与训练,以期培养学生分析、解决生产实际问题的能力和构建简单的电气控制系统的能力。既融会贯通,又单独成体。

本书力求体现以下特色。

①集理论、实训、技能训练与应用能力培养为一体,体系新颖。

②保证基础,加强应用,突出能力,突出实际、实用、实践的原则,贯彻重概念、重结论的指导思想,注重内容的典型性、针对性,加强理论联系实际。

③在教材内容的编排上,先从典型的案例出发,引出教学内容;在讲述教学内容时,先介绍控制电路的实现形式,再展开介绍和分析相关的知识点;强调实际技能的训练和培养,增设了问题探讨部分,便于教学和学生讨论。

④讲述深入浅出,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。

本书按80~120课时编写,有条件的学校可另安排两周的课程技能训练,各学校根据不同的教学课时可以选择重点的章节进行讲解。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院的相关专业的教学用书,并可作为相关社会从业人员的业务参考书及培训用书。

本书编写过程中参考了大量文献资料,编者谨向这些文献资料的编著者和支持本书编写工作的单位和个人表示衷心的感谢。

限于编者的学术水平和实践经验,书中的疏漏及不足之处,恳切希望有关专家和广大读者批评指正,以便在今后的重印或再版中改进和完善。

编 者

目 录

项目一 变压器的使用	1
任务一 单相变压器	1
任务二 小型单相变压器	15
任务三 三相变压器	19
项目二 交流电动机的拆装与维护	33
任务一 三相异步电动机的认识与拆装	33
任务二 三相异步电动机运行特性	46
任务三 三相异步电动机的启动与反转	58
任务四 三相异步电动机的制动	65
任务五 三相异步电动机的调速	67
任务六 单相异步电动机	70
任务七 交流电动机的维护与检修	78
项目三 直流电动机的拆装与维护	90
任务一 了解直流电动机	90
任务二 直流电动机的运行特性	101
任务三 直流电动机的启动、反转、调速与制动	112
任务四 直流电动机的维护与检修	128
项目四 常用特种电动机	135
任务一 伺服电动机	135
任务二 测速发电机	143
任务三 步进电动机	147
任务四 直线电动机	154
任务五 微型同步电动机	158
项目五 交流电动机控制线路的安装与调试	164
任务一 识读电气控制线路图、接线图和布置图	164
任务二 正、反转控制线路	166
任务三 自动往返控制线路	179
任务四 顺序控制线路	182
任务五 降压启动控制线路	185
任务六 制动控制线路	195
任务七 多速异步电动机控制线路	204
任务八 绕线转子异步电动机控制线路	209

项目六 常用生产机械电气控制线路检测与维修.....	219
任务一 C650—2 型普通车床	219
任务二 Z3040B 型摇臂钻床	225
任务三 M7130 型平面磨床	231
任务四 X62W 型万能铣床	236
参考文献.....	250

项目一

变压器的使用



学习目标

- 掌握变压器的作用、基本结构;理解变压器的电压、电流和阻抗变换原理。
- 掌握自耦变压器、多绕组变压器、电焊变压器、仪用互感器等特殊变压器的结构特点;理解其工作原理;了解其应用范围。
- 掌握三相变压器的结构;理解其工作原理。
- 会进行小型变压器的测试、维护与故障检修。

任务一 单相变压器

变压器和电动机是以电磁感应原理为工作基础的。变压器在电力线路中用于电能的传输,在电子电路中用于信号的变换,是电工、电子电路中的重要设备和器件。本任务学习磁路的基本知识;变压器的用途、结构、工作原理分析;其他用途的变压器的作用、结构、工作原理分析。

一、变压器的结构与分类

1. 变压器的应用

变压器是根据电磁感应原理制成的一种静止的电气设备,用它可把某一电压下的交流电能变换为同频率的另一电压下的交流电能。变压器的基本作用是在交流电路中变电压、变电流、变阻抗及用做电气隔离。

发电厂欲将 $P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi$ 的电功率输送到用电的区域,在 P 、 $\cos\varphi$ 为一定值时,若采用的电压愈高,则输电线路中的电流愈小,因而可以减少输电线路上的损耗,节约导电材料。所以远距离输电采用高电压是最为经济的。

目前,我国交流输电的电压最高已达 500kV,这样高的电压,无论从发电机的安全运行方面或是从制造成本方面考虑,都不允许由发电机直接生产。

发电机的输出电压一般有 3.15kV、6.3kV、10.5kV、15.75kV 等几种,因此必须用升压变压器将电压升高才能远距离输送。电能输送到用电区域后,为了适应用电设备的电压要求,还需通过各级变电所(站)利用变压器将电压降低为各类电器所需要的电压值。

在用电方面,多数用电器所需的电压是 380V、220V 或 36V,少数电机也采用 3kV、6kV 等。

升压、降压都需要用变压器。变压器最主要的用途是在输配电系统。除了电力系统的变压器外,电气技术人员做实验时,要用调压变压器;电镀电解行业需要变压器来产生低压大电流;焊接金属器件常用交流电焊机;在广播扩音电路中,为了使音箱扬声器得到最大功率,可用变压器实现阻抗匹配;为了测量高电压和大电流要用到电压互感器和电流互感器;有的电器为了使用安全要用变压器进行电气隔离;人们平时常用的稳压电源盒充电器中也包含着变压器。

2. 变压器的基本结构

变压器的基本结构主要由铁芯和绕组两部分组成。为改善散热条件,大、中型电力变压器的铁芯和绕组浸入在盛满变压器油的封闭油箱中,各绕组的端线由绝缘套管引出。

(1)铁芯。铁芯是变压器的磁路,它又是绕组的支撑骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分构成,铁芯柱上装有绕组,铁轭连接铁芯柱构成闭合的磁路。为了提高铁芯的导磁性,减小磁滞损耗和涡流损耗,采用厚度为 0.35~0.5mm,材料表面涂有绝缘漆的热轧(或冷轧)硅钢片,冲压成型并叠合组装成一个整体的铁芯。

铁芯的基本结构形式有心式和壳式两种,如图 1-1 所示。心式结构的特点是绕组包围铁芯,结构比较简单,绕组的装配及绕组的绝缘也比较容易,如图 1-1(a)所示,它适用于容量大、电压高的变压器,如电力变压器均采用心式结构。壳式结构的特点是铁芯包围绕组,机械强度较好,铁芯容易散热,但外层绕组的铜线用量较多,制造工艺又复杂,铁芯材料消耗多,如图 1-1(b)所示,它一般多用于小型干式变压器,如电炉变压器、收音机、电视机中用的小型特种变压器。

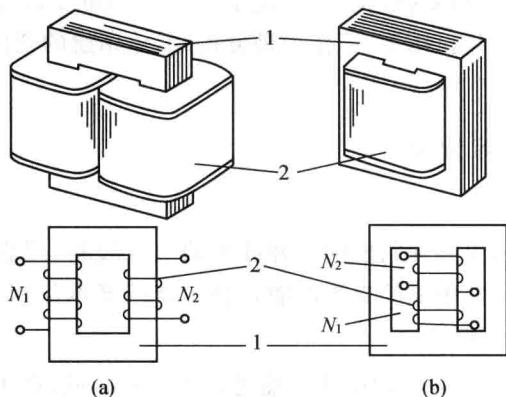


图 1-1 铁芯的基本结构形式

(a) 心式; (b) 壳式

1—铁芯; 2—绕组

各种变压器的铁芯,先将硅钢片冲压成条形,然后将条形硅钢片交错地叠合组装成“口”字形或“日”字形,如图 1-2 所示。交错叠片的目的是使各层接缝互相错开,以免接缝处的间隙集中,从而减小磁路的磁阻和励磁电流。

铁轭的截面有矩形、外 T 形、内 T 形和多级阶梯形,如图 1-3 所示。

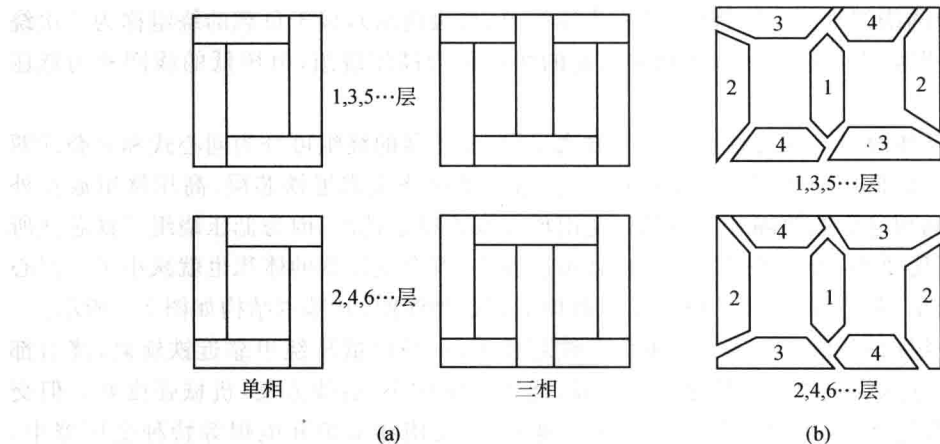


图 1-2 叠片式铁芯交错叠装的方法

(a)热轧硅钢片叠法;(b)冷轧硅钢片叠法

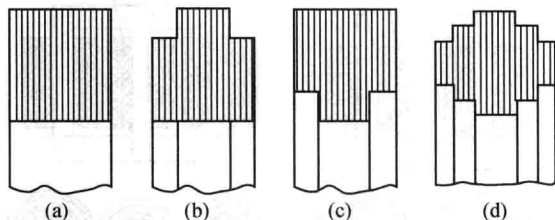


图 1-3 铁轭的截面

(a)矩形;(b)外 T 形;(c)内 T 形;(d)多级阶梯形

1—铁轭;2—铁芯柱

铁芯柱的截面在小型变压器中常为方形或矩形,但大型变压器为了充分利用线内圆空间而常用阶梯截面,有的还设有冷却油道。近年来,出现了渐开线形铁芯的变压器,它的铁轭由同一宽度的硅钢带卷成型,铁芯柱用硅钢片在专用成型机上轧制,按三角形方式布置使磁路完全对称。该变压器的主要优点在于节省硅钢片、绕组耗铜材少、便于机械化生产和减少装配工时,其铁芯柱的截面如图 1-4 所示。

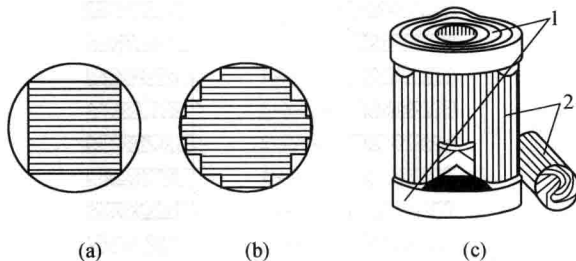


图 1-4 铁芯柱的截面

(a)矩形;(b)多级阶梯形;(c)三相渐开线形铁芯

1—铁轭;2—铁芯柱

(2)绕组。变压器绕组的作用是构成电路,它一般用绝缘漆包铜线或铝线绕制而成。通

常把接于电源的绕组称为一次绕组(或称为原绕组、初级绕组),接于负载的绕组称为二次绕组(或称为副绕组、次级绕组);或者把电压高的线圈称为高压绕组,电压低的线圈称为低压绕组。

根据高、低压绕组在铁芯柱上排列的方式不同,变压器的绕组可分为同心式和交叠式两种。同心式的高、低压绕组同心套在铁芯柱上,通常低压绕组靠近铁芯层,高压绕组放在外面层,二者之间用绝缘纸筒隔开。当低压绕组放在靠近铁芯柱时,因为低压绕组与铁芯柱所需的绝缘距离比较小,所以线圈的尺寸也就可以缩小,整个变压器的体积也就减小了。同心式绕组结构简单、制造方便,国产电力变压器均采用这种线圈,其基本结构如图 1-5 所示。

交叠式绕组的高、低压绕组交替地套在铁芯柱上,一般以低压绕组靠近铁轭侧,绕组都做成饼式,高、低压绕组之间用绝缘材料隔开,绕组漏电抗小,引线方便,机械强度好。但交叠式高、低压绕组之间的间隙较多,绝缘比较复杂,主要用在电炉和电焊等特种变压器中。三相交叠式绕组如图 1-6 所示。

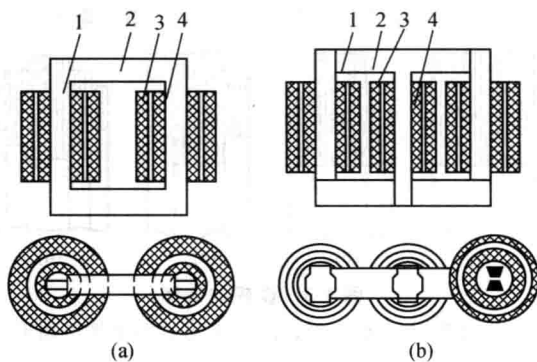


图 1-5 同心式绕组

(a)单相;(b)三相

1—铁芯柱;2—铁轭;3—高压绕组;4—低压绕组

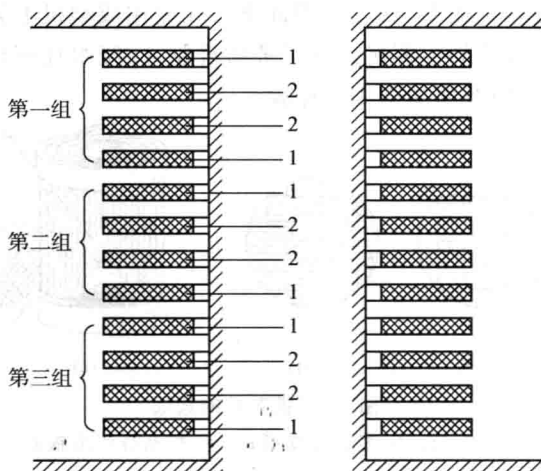


图 1-6 三相交叠式绕组

1—低压绕组;2—高压绕组

3. 变压器的分类

变压器的种类很多,可以按用途、结构、相数、冷却方式等来进行分类。

按用途分为电力变压器(主要用在输、配电系统中,又分为升压变压器、降压变压器和配电变压器)和特殊变压器(如试验用变压器、仪用变压器、电炉变压器、电焊变压器和整流变压器等)。

按绕组数目分为单绕组(自耦)变压器、双绕组变压器、三绕组变压器和多绕组变压器等。

按相数分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

按铁芯结构分为心式变压器和壳式变压器。

按调压方式分为无励磁调压变压器和有载调压变压器。

按冷却介质和冷却方式分为空气自冷式(或称为干式)变压器、油浸式变压器(包括油浸自冷式、油浸风冷式、强迫油循环水冷冷却式和强迫油循环风冷却式)和充气式冷却变压器。

电力变压器按容量大小通常分为小型变压器(容量为 $10 \sim 630 \text{ kV} \cdot \text{A}$)、中型变压器(容量为 $800 \sim 6300 \text{ kV} \cdot \text{A}$)、大型变压器(容量为 $8000 \sim 63000 \text{ kV} \cdot \text{A}$)和特大型变压器(容量在 $90000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 及以上)。

电路图中表示单相变压器的符号如图 1-7 所示。

二、变压器的运行

1. 单相变压器的工作原理

变压器是利用电磁感应原理进行工作的,变压器有两个绕组,接在额定电压的交流电源上的绕组称为原绕组(或称为一次绕组),其匝数为 N_1 ;接于负载的绕组称为副绕组(或称为二次绕组),其匝数为 N_2 。当原绕组外加电压为 u_1 交流电源时,原绕组中流过交流电流,产生交变磁通势,使铁芯中产生交变磁通 ϕ ,并交链于原、副绕组,使原、副绕组中产生交流电动势 e_1 和 e_2 。单相变压器的工作原理如图 1-8 所示。

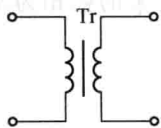


图 1-7 单相变压器的表示符号

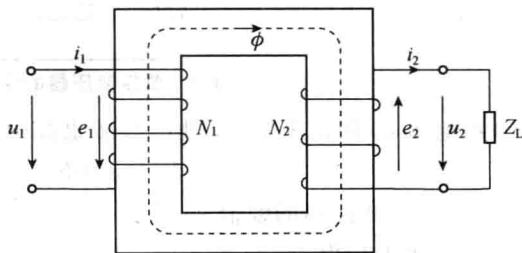


图 1-8 单相变压器的工作原理图

根据电磁感应定律,交变的主磁通 ϕ 在原、副绕组中分别感应出电动势 e_1 与 e_2 ,有

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

忽略绕组中的漏电抗压降,不考虑绕组中的电阻压降,原、副绕组的端电压可表示为:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &\approx e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ u_2 &\approx e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

若二次绕组开路(不接负载),这种运行方式称为变压器的空载运行。若二次绕组接负载,这种运行方式称为变压器的负载运行。其中 N_1 和 N_2 分别为一次、二次绕组的匝数。

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-3)$$

从式 1-3 中可知,变压器的一次、二次绕组感应电动势之比与电压之比都等于一次与二次绕组的匝数之比。在磁通势一定的条件之下,只需改变一次、二次绕组的匝数之比,就可实现改变二次绕组输出电压大小的目的。

2. 变压器的空载运行

变压器空载运行是指变压器的一次绕组接在额定频率、额定电压的交流电源上,而二次绕组开路时的运行状态,如图 1-9 所示。图中,原绕组两端加上交流电压 u_1 时,便有交变电流 i_0 通过原绕组, i_0 称为空载电流。大、中型变压器的空载电流约为原边额定电流的 3%~8%。变压器空载时原绕组近似为纯电感电路,故 i_0 较 u_1 滞后 90° ,此时原绕组的交变磁动势为 $i_0 N_1$,它产生交变磁通,因为铁芯的磁导率比空气(或油)的大得多,绝大部分磁通通过铁芯磁路交链着原、副绕组,称为主磁通或工作磁通,记为 ϕ ;还有少量磁通穿出铁芯沿着原绕组外侧通过空气或油而闭合,这些磁通只与原绕组交链,称为漏磁通,记为 $\phi_{1\sigma}$,漏磁通一般都很小,为了使问题简化,可以略去不计。

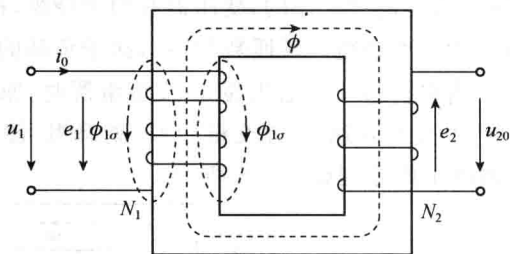


图 1-9 单相变压器的空载运行原理图

若外加电压 u_1 按正弦变化,则 i_0 与 ϕ 也都按正弦变化。设 ϕ 的初相为零,即

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

式中: Φ_m ——主磁通的幅值。

将 ϕ 代入式 1-1,得

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -N_1 \Phi_m \omega \cos \omega t = E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -N_2 \Phi_m \omega \cos \omega t = E_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

可见 e_1 与 e_2 的相位都比 ϕ 滞后 $\frac{\pi}{2}$;因为 i_0 与产生的磁通 ϕ 是同相的,而 i_0 滞后外加电压 u_1 $\frac{\pi}{2}$,所以 e_1 与 e_2 都与外加电压 u_1 反相。

由式 1-4 求得 e_1 与 e_2 的有效值分别为:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_{1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m \omega = 4.44 f N_1 \Phi_m \\ E_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_{2m} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_2 \Phi_m \omega = 4.44 f N_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中: $N_1 \Phi_m \omega = 2\pi f N_1 \Phi_m = E_{1m}$;

$N_2 \Phi_m \omega = 2\pi f N_2 \Phi_m = E_{2m}$ 。

由此可得:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_m}{4.44 f N_2 \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-6)$$

即原、副绕组中的感应电动势之比等于原、副绕组匝数之比。

由于变压器的空载电流 I_0 很小,原绕组中的电压降可略去不计,故原绕组的感应电动势 E_1 近似地与外加电压 U_1 相平衡,即 $U_1 \approx E_1$ 。而副绕组是开路的,其端电压 U_{20} 就等于感应电动势 E_2 ,即 $U_{20} = E_2$ 。

于是有

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-7)$$

式 1-7 说明,变压器空载时,原、副绕组端电压之比近似等于电动势之比(即匝数之比),这个比值 k 称为变压比,简称变比。

式 1-7 可写成 $U_1 \approx k U_{20}$ 。当 $k > 1$,则 $U_{20} < U_1$,是降压变压器;若 $k < 1$,则 $U_{20} > U_1$,是升压变压器。

一般地,变压器的高压绕组总有几个抽头,以便在运行中随着负载的变动或外加电压 U_1 稍有变动时,用来改变高压绕组匝数,从而调整低压绕组的输出电压。通常调整范围为额定电压的 $\pm 5\%$ 。

例 1.1 有一台单相降压变压器,原绕组接到 6600V 的交流电源上,副绕组电压为 220V,试求其变比。若原绕组匝数 $N_1 = 3300$ 匝,试求副绕匝数 N_2 。若电源电压减小到 6000V,为使副绕组电压保持不变,试问原绕组匝数应调整到多少?

解 变比为: $k = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{6600}{220} = 30$

副绕组匝数为: $N_2 = \frac{N_1}{k} = \frac{3300}{30} = 110$ (匝)

若 $U'_1 = 6000\text{V}$, U_{20} 不变,则原绕组匝数应调整为: $N'_1 = N_2 \frac{U'_1}{U_{20}} = 110 \times \frac{6000}{220} = 3000$ (匝)

3. 变压器负载运行

变压器的负载运行是指原绕组加额定电压,副绕组与负载相接通时的运行状态,如图 1-10 所示。这时副边电路中有了电流 i_2 ,它的大小由副绕组电动势 E_2 和副边电路的总的等效阻抗来决定。

因为变压器原绕组的电阻很小,它的电阻电压降可忽略不计,实际上,即使变压器满载,原绕组的电压降也只有额定电压 U_{1N} 的 2% 左右,所以变压器负载时仍可近似地认为 U_1 等

于 E_1 。由式 1-5 可得:

$$U_1 \approx 4.44fN_1\Phi_m$$

上式是反映变压器基本原理的重要公式。它说明,不论是空载还是负载运行,只要加在变压器原绕组的电压 U_1 及其频率 f 都保持一定,铁芯中工作磁通的幅值 Φ_m 就基本上保持不变,那么,根据磁路欧姆定律,铁芯磁路中的磁动势也应基本不变。

空载时,铁芯磁路中的磁通是由原边磁动势 $I_0 N_1$ 产生和决定的。设负载时原、副边电流分别为 i_1 与 i_2 ,则此时铁芯中的磁通是由原、副边的磁动势共同产生和决定的,它们都是正弦量,可用相量表示。前面说过,铁芯磁路中的磁动势基本不变,所以负载时的合成磁动势应近似等于空载时的磁动势,即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-8)$$

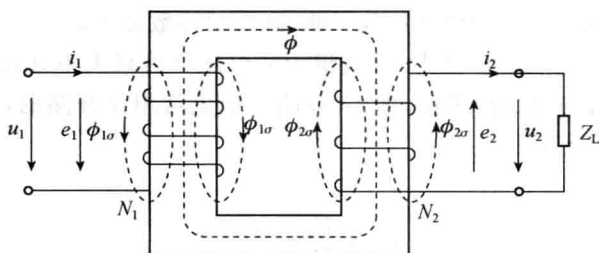


图 1-10 单相变压器的负载运行原理图

式(1-8)称为变压器负载运行时的磁动势平衡方程,此式也可写成:

$$\dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_0 N_1 + (-\dot{I}_2 N_2)$$

上式表明,负载时原绕组的电流建立的磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 可分为两部分:其一是 $\dot{I}_0 N_1$,用来产生主磁通 Φ_m ;其二是一 $\dot{I}_2 N_2$,用来抵偿副绕组电流所建立的磁动势 $\dot{I}_2 N_2$,从而保持 Φ_m 基本不变。

当变压器接近满载时, $\dot{I}_0 N_1$ 远小于 $\dot{I}_1 N_1$,即可认为 $\dot{I}_0 N_1 \approx 0$,于是有

$$\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2$$

说明 $\dot{I}_1 N_1$ 与 $\dot{I}_2 N_2$ 近似相等而且反相。若只考虑量值关系,则

$$I_1 N_1 \approx I_2 N_2$$

或

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-9)$$

就是说,变压器接近满载时,原、副绕组的电流近似地与绕组匝数成反比,这表明变压器有变流作用。应当指出,式(1-9)只适用于满载或重载的运行状态,而不适用于轻载的运行状态。

由以上分析可知,变压器负载加大(即 I_2 增加)时,原边电流 I_1 必然相应增加,电流能量经过铁芯中磁通的媒介作用,从原边电路传递到副边电路。

变压器除有变压作用和变流作用之外,还可用来实现阻抗的变换。设在变压器的副边接入阻抗为 Z_L ,那么在原边看,这个阻抗值相当于多少呢?由图 1-11 可知,从原绕组输入端看进去的输入阻抗值 $|Z'_L|$ 为:

$$|Z'_L| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{kU_2}{k^{-1}I_2} = k^2 |Z_L| \quad (1-10)$$

式(1-10)说明,变压器副边的负载阻抗 $|Z_L|$ 反映到原边的阻抗值 $|Z'_L|$ 近似为 $|Z_L|$ 的 k^2 倍,起到了阻抗变换作用。图 1-11 是表示这种变换作用的等效电路图。

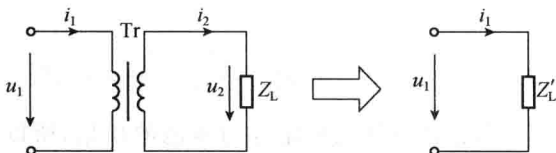


图 1-11 变压器阻抗变换等效电路

例如,把一个 8Ω 的负载电阻接到 $k=3$ 的变压器副边,折算到原边就是 $R' \approx 3^2 \times 8 = 72\Omega$ 。可见,选用不同的变比,就可把负载阻抗变换成为等效二端网络所需要的阻抗值,使负载获得最大功率,这种做法称为阻抗匹配,在广播设备中常用到,该变压器称为输出变压器。

例 1.2 有一台降压变压器,原绕组电压为 220V ,副绕组电压为 110V ,原绕组为 2200 匝,若副绕组接入阻抗为 10Ω 的阻抗,问变压器的变比;副绕组匝数;原、副绕组中电流各为多少?

解 变压器变比为: $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{110} = 2$

副绕组匝数为: $N_2 = \frac{N_1 U_2}{U_1} = \frac{2200 \times 110}{220} = 1100(\text{匝})$

副绕组电流为: $I_2 = \frac{U_2}{|Z_L|} = \frac{110}{10} = 11(\text{A})$

原绕组电流为: $I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1100}{2200} \times 11 = 5.5(\text{A})$

4. 变压器的工作特性

变压器的工作特性是指外特性和效率特性,表征变压器性能的主要指标有电压变化率和效率。

(1) 变压器的外特性。变压器的外特性是指电源电压和负载的功率因数为常数时,二次侧电压随负载电流变化的规律,即 $U_2 = f(I_2)$ 。在负载运行时,由于变压器内部存在电阻和漏抗,故当负载电流流过时,变压器内部将产生阻抗压降,使二次侧端电压随负载电流的变化而变化。不同负载性质时,变压器的外特性曲线如图 1-12 所示。在电阻性负载 $\cos\varphi_2 = 1$ 和电感性负载 $\cos\varphi_2 = 0.8$ 时,外特性曲线是下降的;而电容性负载 $\cos(-\varphi_2) = 0.8$ 时,外特性曲线是上翘的。

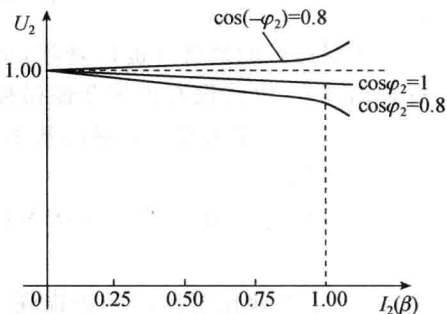


图 1-12 变压器的外特性曲线

(2)电压变化率。电压变化率是指变压器一次绕组加上交流 50Hz 的额定电压,二次绕组空载电压 U_{20} 和带负载后在某一功率因数下二次绕组电压 U_2 之差与二次绕组额定电压 U_{2N} 的比值,用 $\Delta U\%$ 表示,即

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \quad (1-11)$$

电压变化率反映了变压器供电电压的稳定性与电能的质量,所以它是表征变压器运行性能的重要数据之一。

(3)变压器的损耗。变压器实际输出的有功功率 P_2 不仅决定于副边的实际电压 U_2 与实际电流 I_2 ,而且还与负载的功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关,即

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2 \quad (1-12)$$

式中: φ_2 —— u_2 与 i_2 的相位差。

变压器输入功率决定于它的输出功率。输入的有功功率为:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1-13)$$

式中: φ_1 —— u_1 与 i_1 的相位差。

变压器输入功率与输出功率之差($P_1 - P_2$)是变压器本身消耗的功率,称为变压器的功率损耗,简称损耗,它包括以下两部分。

①铜损耗 P_{Cu} 。变压器的铜损耗分为基本铜损耗和附加铜损耗两部分。基本铜损耗是电流在一、二次绕组电阻上的损耗,而附加铜损耗包括由集肤效应引起导线等效截面积变小而增加的损耗以及漏磁场在结构部件中引起的涡流损耗等。附加铜损耗大约为基本铜损耗的 0.5%~20%。变压器铜损耗的大小与负载电流的平方成正比,所以把铜损耗称为可变损耗。

②铁损耗 P_{Fe} 。变压器的铁损耗包括基本铁损耗和附加铁损耗两部分。基本铁损耗为铁芯中涡流和磁滞损耗,它取决于铁芯中磁通密度大小、磁通交变的频率和硅钢片的质量。铁损耗中的附加铁损耗,包括由铁芯叠片间绝缘损伤引起的局部涡流损耗、主磁通在结构部件中引起的涡流损耗等,一般为基本铁损耗的 15%~20%。

变压器的铁损耗还与一次侧外加电源电压的大小有关,而与负载大小无关。当电源电压一定时,其铁损耗就基本不变,铁损耗又称之为不变损耗。

(4)变压器的效率和效率特性。变压器的效率是指变压器的输出功率与输入功率之比,用百分数表示,即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{Fe} + P_{Cu}}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}\right) \times 100\% \quad (1-14)$$

变压器效率的大小反映了变压器运行的经济性能的好坏,是表征变压器运行性能的重要指标之一。由于变压器没有转动部分,也就没有机械摩擦损耗,因此它的效率很高,一般中、小电力变压器效率在 95% 以上,大容量电力变压器最高效率可达 98%~99% 以上。

在计算效率时,可采用下列几个假定:

①以额定电压下的空载损耗 P_0 作为铁损耗 P_{Fe} ,并认为铁损耗不随负载而变化,即 $P_0 = P_{Fe} = \text{常数}$ 。

②以额定电流时的短路损耗 P_k 作为额定电流时的铜损耗 P_{CuN} ,且认为铜损耗与负载电流的平方成正比,即

$$P_{\text{Cu}} = \left(\frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2 P_k = \beta^2 P_{\text{CuN}}$$

③由于变压器的电压变化率很小,负载时 U_2 的变化可不予考虑,即认为 $U_2 = U_{2N}$ 。故输出功率为:

$$P_2 = U_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = U_{2N} \beta I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2 \quad (1-15)$$

式中: β ——负载系数, $\beta = I_2 / I_{2N}$ 。

由此可得:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k} \right) \times 100\% \quad (1-16)$$

对于已制成的变压器, P_0 和 P_k 是一定的,所以效率与负载大小及功率因数有关。在功率因数一定时,变压器效率与负载系数之间的关系 $\eta = f(\beta)$ 称为变压器的效率特性曲线,如图 1-13 所示。从图中可以看出,空载时, $\beta = 0$, $P_2 = 0$, $\eta = 0$;当负载增大时,效率增加很快;当负载达到某一数值时,效率最大,然后又开始降低。这是因为随负载功率 P_2 的增大,铜损耗 P_{Cu} 按 β 的平方成正比增大,超过某一负载之后,效率随 β 的增大反而变小了,其间出了一个最高效率 η_{max} 。通过数学分析,可求出最高效率的条件是:铜损耗 P_{Cu} 等于铁损耗 P_{Fe} (即可变损耗等于不变损耗)。即,

$$P_{\text{Cu}} = \beta_m^2 P_k = P_0$$

或

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \quad (1-17)$$

式中: β_m ——最大效率时的负载系数。

将式(1-17)代入式(1-16)中,可得出最高效率为:

$$\eta_{\text{max}} = \left(1 - \frac{2P_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2P_0} \right) \times 100\% \quad (1-18)$$

由于电力变压器长期接在电网上运行,总有铁损耗,而铜损耗却随负载而变化,一般变压器不可能总在额定负载下运行。因此为提高变压器的运行效率,设计时使铁损耗相对比较小一些,一般取 $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ 。

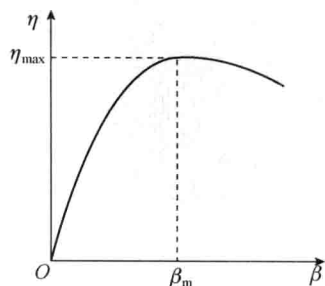


图 1-13 变压器的效率特性曲线

三、其他用途的变压器

1. 自耦变压器

普通双绕组变压器原、副绕组之间仅有磁的耦合,并无电的直接联系。自耦变压器只有一个绕组,如图 1-14 所示,即原、副绕组公用一部分绕组,所以自耦变压器原、副绕组之间除有磁的耦合外,又有电的直接联系。实质上自耦变压器就是利用一个绕组抽头的方法来实现改变电压的一种变压器。

以图 1-14 所示的自耦变压器为例,将匝数为 N_1 的原绕组与电源相接,其电压为 u_1 ;匝数为 N_2 副绕组(原绕组的一部分)接通负载,其电压为 u_2 。自耦变压器的绕组也是套在闭