



全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

GONGCHANG DIANQI KONGZHI SHEBEI

工厂电气控制设备

杨一平 主编

李鸿征 主审

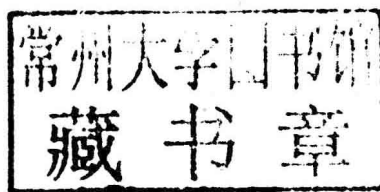


黄河水利出版社

全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

工厂电气控制设备

主 编 杨一平
副主编 程改青 卢青波
王俊豪 毕新熙
主 审 李鸿征



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本教材是全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材,是编者依据多年企业工作经验和教学实践以及高职高专教学改革,将电机学、电力拖动技术和工厂电气控制三门课程有机地结合编写而成的。全书共分8章,主要内容有变压器、三相异步电动机、直流电动机、其他电机、常用低压电器、继电器控制电路的基本环节、典型机床的电气控制及其故障诊断、电气控制系统设计等,且每章精选了习题作为本章知识内容的深化。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校以及技师学院的电气工程及电气自动化技术、供用电技术、机电一体化等专业及相关专业的教学用书,也可供从事相关专业的工程技术人员参考及培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

工厂电气控制设备/杨一平主编. —郑州:黄河水利出版社,
2011.8

全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5509-0031-8

I. ①工… II. ①杨… III. ①工厂-电气控制装置-
高等教育-教材 IV. ①TM571.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 156136 号

策划编辑:王文科 电话:0371-66028027 E-mail: wwk5257@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsclbs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:787 mm×1092 mm 1/16

印张:18

字数:438千字

印数:1—4 000

版次:2011年8月第1版

印次:2011年8月第1次印刷

定价:36.00元

前 言

本教材立足高等职业教育人才培养目标,遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和针对性、加强实践能力培养的原则,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的应用能力和解决现场实际问题的能力。

全书以电机为控制对象,以继电器-接触器等低压电器为控制、保护元件,组成生产机械的电力拖动和电气控制系统。其中以三相异步电动机拖动和控制为重点,以电气控制基本环节为主线,阐述了常用工厂电气设备的电气控制技术和电气控制系统设计等基本知识。从生产实际出发,对常用设备的常见电气故障进行了分析,以期培养学生分析、解决生产实际问题的能力和进行简单的电气控制系统设计的能力。

本教材内容简洁,选材合理,结构严谨,具有如下特点:

(1) 根据面向高职学生的思想,组织编写内容,理论知识以“必需、够用”为度,强调实际应用。

(2) 教材叙述简明扼要,深入浅出,富于启发性、实用性。

(3) 理论与实训同步、专业与实践能力等级考证同行,全力推动“双证”制度的实施。

(4) 电器元件的图形和文字符号都采用最新国家标准。

本书计划讲授 120 个学时,由于各学校培养方案的不同,以及对学生的知识和能力的要求不同,各学校可根据教学要求做相应调整,有些章节和内容可通过自学、参观、实习或课程设计完成。

本书编写人员及编写分工如下:张芝雨(许昌职业技术学院)编写第一章,卢青波(郑州职业技术学院)编写第二、四章,王双(许昌职业技术学院)编写第三章,杨一平(许昌职业技术学院)编写第五章,程改青(许昌职业技术学院)编写第六章,毕新熙(河南天冠燃料乙醇有限公司)编写第七章,王俊豪(许昌职业技术学院)编写第八章。杨一平负责全书的统稿和编写组织工作。宁玉伟、马建民、张传斌副教授对本书提出了很多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

本书由杨一平任主编,由程改青、卢青波、王俊豪、毕新熙任副主编,由李鸿征教授任主审。

由于水平有限,书中难免有错漏之处,敬请读者批评指正,不胜感谢。

编 者

2011 年 05 月

目 录

前 言

第一章 变压器	(1)
第一节 变压器概述和基本结构	(1)
第二节 单相变压器	(4)
第三节 三相变压器	(8)
第四节 其他变压器	(18)
第五节 变压器常见电气故障及分析	(22)
本章小结	(24)
习题	(24)
第二章 三相异步电动机	(26)
第一节 三相异步电动机的基本结构和工作原理	(26)
第二节 三相异步电动机的运行	(33)
第三节 三相异步电动机的特性	(35)
第四节 三相异步电动机的安装及维护	(41)
第五节 三相异步电动机的电气故障及分析	(43)
本章小结	(47)
习题	(47)
第三章 直流电动机	(48)
第一节 直流电动机的工作原理和基本结构	(48)
第二节 直流电动机的分类和铭牌值	(54)
第三节 他励直流电动机的运行	(59)
第四节 他励直流电动机的启动和反转	(61)
第五节 他励直流电动机的反转	(63)
第六节 他励直流电动机的制动	(64)
第七节 他励直流电动机的调速	(66)
第八节 直流电动机的电气故障及分析	(68)
本章小结	(70)
习题	(70)
第四章 其他电机	(72)
第一节 单相异步电动机	(72)
第二节 交流伺服电动机	(80)
第三节 步进电动机	(85)
第四节 测速电动机	(89)
第五节 旋转变压器	(92)

本章小结	(94)
习题	(94)
第五章 常用低压电器	(96)
第一节 低压电器的分类	(96)
第二节 配电电器	(96)
第三节 控制电器	(108)
第四节 常用低压电器故障及分析	(138)
本章小结	(144)
习题	(145)
第六章 继电器控制电路的基本环节	(146)
第一节 电气控制系统图	(146)
第二节 三相异步电动机的全压启动控制	(148)
第三节 三相异步电动机的降压启动控制	(154)
第四节 三相异步电动机的正反转控制	(166)
第五节 三相异步电动机的制动控制	(172)
第六节 三相异步电动机的调速控制	(180)
第七节 电气控制系统的保护环节	(186)
第八节 电气控制系统常见故障及检修方法	(188)
本章小结	(196)
习题	(197)
第七章 典型机床的电气控制及其故障诊断	(198)
第一节 C650 卧式车床的电气控制	(198)
第二节 Z3040 型摇臂钻床的电气控制	(204)
第三节 T68 型卧式镗床电气控制电路分析	(210)
第四节 X62W 型万能铣床电气控制电路	(218)
第五节 M7130 型平面磨床电气控制电路	(225)
第六节 机床电气故障检查分析和排除	(230)
本章小结	(234)
习题	(234)
第八章 电气控制系统设计	(236)
第一节 电气控制系统设计的原则和内容	(236)
第二节 电气控制系统设计的方法与步骤	(246)
第三节 电力拖动方案的确定和电动机的选择	(252)
第四节 常用控制电器的选择	(257)
第五节 电气控制装置的设计	(265)
第六节 继电接触式控制系统设计示例	(274)
本章小结	(279)
习题	(280)
参考文献	(281)

第一章 变压器

在国民经济的各个领域,变压器已被广泛应用,从电力的生产、输送到分配至各用电部门,都离不开变压器。就电力系统来说,电力变压器就是一个主要电器。电炉设备、整流设备、电焊设备、矿山设备、船舶设备等,都采用专用变压器。此外,实验设备、测量设备、控制设备等,也采用各式各样的变压器。

第一节 变压器概述和基本结构

一、变压器概述

变压器是将一种等级的交流电压变换成频率相同的另一种等级交流电压的静止电气设备。它是根据电磁感应原理制成的一种电气设备,具有变换电压、电流和阻抗的功能。

变压器是电力系统中不可缺少的重要设备,在电力系统中它用来改变交流电压的大小,以满足不同电压等级的负荷的需要。因此,变压器在电力系统和供电系统中占有很重要的地位。

在机床线路中,控制电路一般是经变压器降压得到的中低电压电路,有的变压器(如隔离变压器)还起到隔离噪声等干扰信号的作用。

二、变压器的基本结构

虽然变压器种类繁多、形状各异,但其基本结构是相同的。变压器的主要组成部分是铁芯和绕组。

(一) 铁芯

铁芯是变压器中主要的磁路部分,通常由含硅量较高,厚度为 0.35 mm 或 0.5 mm,表面涂有绝缘漆的热轧或冷轧硅钢片叠装而成。铁芯分为铁芯柱和铁轭两部分,铁芯柱套有绕组,铁轭作闭合磁路之用,铁芯构成变压器的磁路。按照铁芯的形状不同,变压器可分为口型、EI 型、F 型、C 型等,如图 1-1 所示,为常见的变压器铁芯的形状。

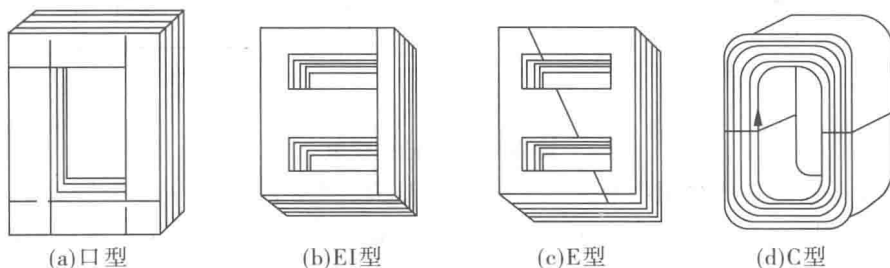


图 1-1 常见的变压器铁芯的形状

按铁芯和绕组的组合结构,通常又把变压器分为芯式和壳式两种,如图 1-2(a)所示为芯式铁芯的变压器,其绕组套在铁芯柱上,结构较简单,绕组的装配和绝缘都比较方便,且用铁量少,因此多用于容量较大的变压器,如电力变压器。如图 1-2(b)所示为壳式铁芯的变压器,铁芯把绕组包围在中间。由于壳式变压器的铁芯把绕组包围在中间,故不需要专门的变压器外壳,但它的制造工艺复杂,用铁量较多,常用于小容量的变压器中,如电子线路中的变压器多采用壳式结构。

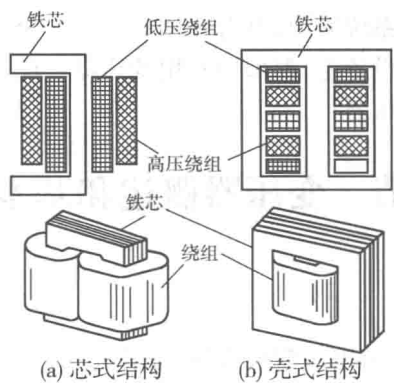


图 1-2 变压器的铁芯结构

(二) 绕组

绕组是变压器电路的主体部分,我们把变压器与电源相接的一侧称为“原边”,相应的绕组称为原绕组(或一次绕组、初级),其电磁量用下标数字“1”表示;而与负载相接的一侧称为“副边”,相应的绕组称为副绕组(或二次绕组、次级),其电磁量用下标数字“2”表示。

绕组通常用绝缘的铜线或铝线绕制,一般小容量变压器的绕组用高强度漆包线绕制而成,大容量变压器可用绝缘扁铜线或铝线绕制。绕组的形状有筒型和盘型两种,如图 1-3 所示。

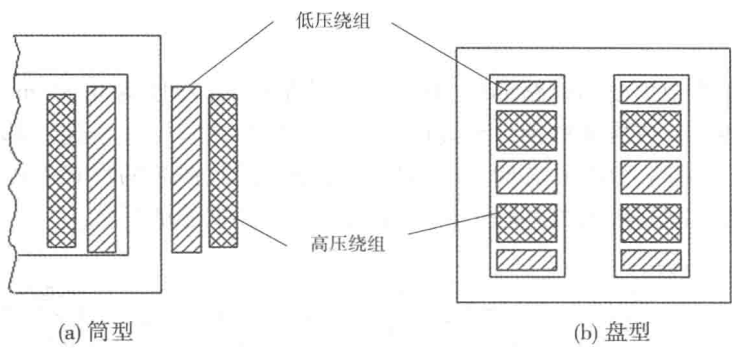


图 1-3 变压器的绕组

根据变压器的高压绕组与低压绕组的相对位置,绕组又可分为同芯式与交叠式两种。同芯式绕组适用于芯式变压器。同芯式绕组根据制造方法的不同,又可分为圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等,如图 1-4 所示,为同芯式绕组的几种形式。

高压绕组电压高,绝缘要求高,如果高压绕组在内,离变压器铁芯近,则应加强绝缘,这

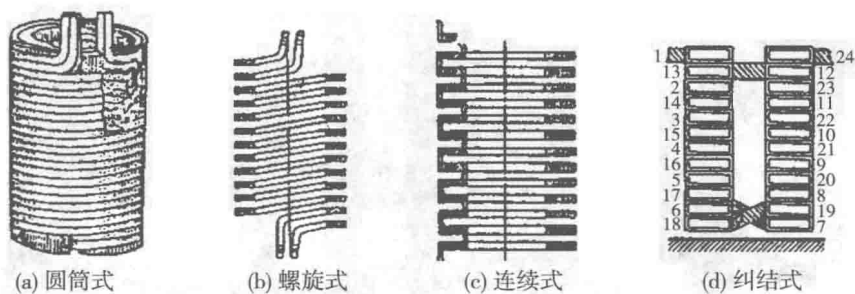


图 1-4 同芯式绕组的几种形式

就提高了变压器的成本造价。因此,为了绝缘方便,低压绕组紧靠着铁芯,高压绕组则套装在低压绕组的外面。两个绕组之间留有油道,既可以起绝缘作用,又可以使油把热量带走。在单相变压器中,高、低压绕组均分为两部分,分别缠绕在两个铁芯柱上,两部分既可以串联又可以并联。三相变压器同一相的高、低压绕组全部缠绕在同一铁芯柱上。

(三) 其他结构部件

变压器的器身放在装有变压器油的油箱内。变压器油既是一种绝缘介质,又是一种冷却介质。为使变压器油能长久地保持良好状态,在变压器油箱上面装有圆筒形的储油柜。储油柜通过连通管与油箱相通,柜内油面高度随着油箱内变压器油的热胀冷缩而变动,储油柜使油与空气的接触面积减小,从而减少油的氧化和水分的侵入。另外气体继电器和安全气道是在故障时保护变压器安全的辅助装置。

只有绕组和铁芯的变压器称为干式变压器,而大容量变压器的器身放在盛有绝缘油的油箱中的变压器称为油浸式变压器。

油浸式变压器主要附件有油枕、干燥器、防爆开关、气体继电器等,如图 1-5 所示。

三、变压器的分类

变压器按用途一般分为电力变压器和特种变压器两大类。

(一) 电力变压器

电力变压器可以按用途、相数、调压方式、绝缘介质、冷却方式、中性点绝缘水平、绕组数及其结构形式、铁芯与绕组的组合结构等的不同进行分类。

(1) 按用途不同可分为升压变压器、降压变压器、联络变压器、配电变压器以及用于直流输电的换流变压器等。

(2) 按相数不同可分为单相变压器、三相变压器和在特殊情况下使用的多相变压器。

(3) 按绕组数及其结构形式不同可分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器、自耦变压器和分裂变压器等。

(4) 按铁芯与绕组的组合结构不同可分为芯式变压器和壳式变压器。

(5) 按调压方式不同可分为有载调压变压器和无励磁调压变压器。

(6) 按绝缘介质不同可分为油浸式变压器(内注矿物油或硅油等合成油)和干式变压器(内充六氟化硫气体或以树脂浇注和浸渍空冷等)。

(7) 按中性点绝缘水平不同可分为全绝缘变压器和半绝缘变压器(或称分级绝缘变压器)。

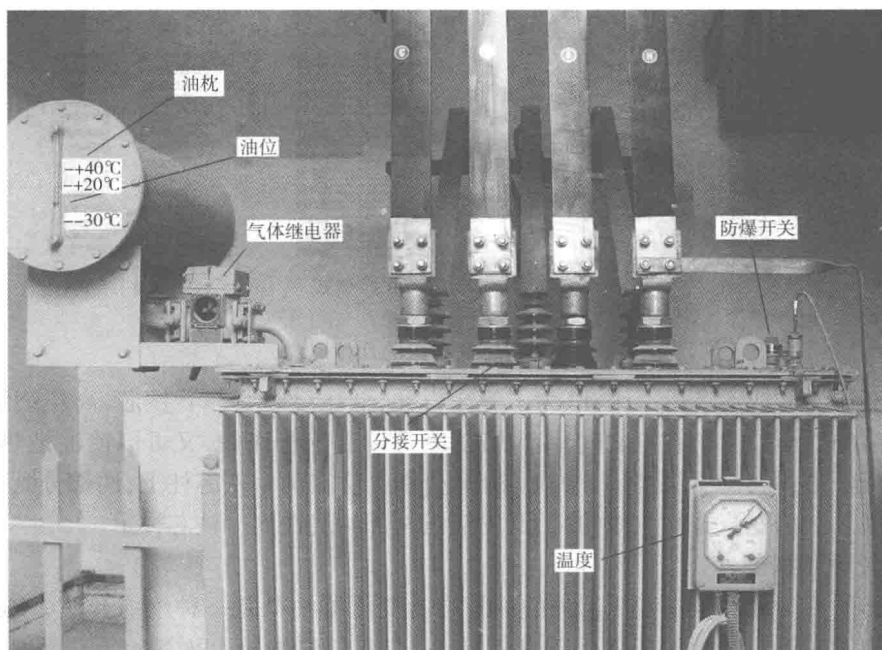


图 1-5 油浸式变压器主要附件

(8)按冷却方式不同可分为油浸自冷(ONAN)变压器、油浸风冷(ONAF)变压器、强迫油循环风冷(OFAF)变压器、强迫油循环水冷(OFWF)变压器、强迫油导向循环风冷(ODAF)变压器、强迫油导向循环水冷(ODWF)变压器、干式空气自冷(G)变压器、干式浇注绝缘(C)变压器和蒸发冷却变压器。

(二) 特种变压器

特种变压器可分为整流变压器、电炉变压器、高压试验变压器、控制变压器等。

第二节 单相变压器

一、单相变压器的基本结构和工作原理

(一) 单相变压器的基本结构

单相变压器主要由铁芯和绕组两个基本部分组成。一般小功率单相变压器多采用壳式结构,容量较大的单相变压器常采用芯式结构。

(二) 单相变压器的工作原理

变压器是一种静止的电机,它利用电磁感应原理实现电能在不同等级电压之间的能量传递。

变压器的工作原理,以最基本的单相双绕组变压器为例进行阐述。由于变压器的工作原理涉及电路、磁路以及它们的相互联系等方面的问题,比较复杂,为了便于分析,在此把它们分为变压、变流、变阻抗三种情况来讨论。

图 1-6 是单相变压器的工作原理图。该变压器有一个铁芯(提供磁通的闭合路径)和高、低压两个绕组,其中接电源的绕组为原绕组,匝数 N_1 ,电压 u_1 ,电流 i_1 ,主磁电动势 e_1 ,漏

磁电动势 $e_{1\sigma}$; 与负载相接的绕组为副绕组, 匝数 N_2 , 电压 u_2 , 电流 i_2 , 主磁电动势 e_2 , 漏磁电动势 $e_{2\sigma}$ 。图中标明的是它们的参考方向。当交流电源电压 u_1 加到原绕组后, 就有交流电流 i_1 通过该绕组, 在铁芯中产生主磁通 Φ 。这个主磁通不仅穿过原绕组, 同时也穿过副绕组, 两个绕组中分别产生感应电势 e_1 和 e_2 。这时, 如果副绕组与外电路的负载接通, 便有电流 i_2 流入负载, 即副绕组有电能输出。

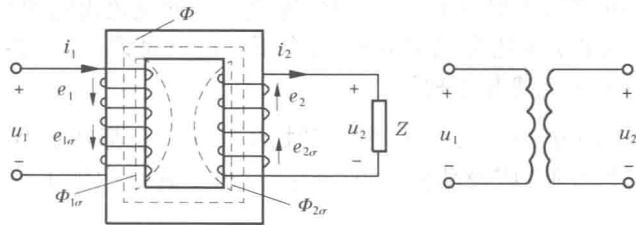


图 1-6 变压器结构示意图及变压器符号

1. 变压器的变压原理(变压器的空载运行)

变压器的空载运行是指原绕组接在正弦交流电源 u_1 上, 副绕组开路不接负载 ($i_2 = 0$)。

在电压 u_1 的作用下, 原绕组中有电流 i_1 通过, 此时, $i_1 = i_0$ 称为空载电流。它在原边建立磁动势 $i_0 N_1$, 在铁芯中产生同时交链着原、副绕组的主磁通 Φ 。主磁通 Φ 的存在是变压器运行的必要条件。

由图 1-6 可得, 原、副绕组的电压方程分别为

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + jX_{1\sigma} \dot{I}_1 - \dot{E}_1 \quad (1-1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - jX_{2\sigma} \dot{I}_2 \quad (1-2)$$

忽略原绕组的电阻 R_1 和漏抗 $X_{1\sigma}$ 的电压, 且变压器空载时, 则有

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1; \dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$$

其相应的有效值关系为

$$\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = 0.44fN_1\dot{\Phi}_m \quad (1-3)$$

$$\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2 = 0.44fN_2\dot{\Phi}_m \quad (1-4)$$

式中 f ——电源频率, Hz, 工频为 50 Hz;

N_1 ——一次侧绕组匝数, 匝;

N_2 ——二次侧绕组匝数, 匝。

由此可以得出, 原边电压 U_1 与副边电压 U_2 之间的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-5)$$

在负载状态下, 由于副绕组的电阻 R_2 和漏抗 $X_{2\sigma}$ 很小, 其上的电压远小于 e_2 , 仍有

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &\approx \dot{E}_2 \\ \frac{U_1}{U_2} &\approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \end{aligned}$$

式中, k 称为变压器的变压比(简称变比), 该式表明变压器原、副绕组的电压与原、副绕组的匝数成正比。当 $k > 1$ 时, 为降压变压器; 当 $k < 1$ 时, 为升压变压器。对于已经制成的变压器而言, k 值是一定的, 故副绕组电压随原绕组电压的变化而变化。

2. 变压器的变流原理(变压器的负载运行)

变压器的原绕组接在正弦交流电源 u_1 上,副绕组接上负载的运行情况,称为变压器的负载运行。

接上负载后,副绕组中便有电流 i_2 通过,建立副边磁动势 $i_2 N_2$,根据楞次定律, $i_2 N_2$ 将有改变铁芯中原有主磁通 Φ 的趋势。但是,在电源电压 u_1 及其频率 f 一定时,铁芯具有恒磁通特性,即主磁通 Φ 将基本保持不变。因此,原绕组中的电流由 i_0 变到 i_1 ,使原边的磁动势由 $i_0 N_1$ 变成 $i_1 N_1$,以抵消副边磁动势 $i_2 N_2$ 的作用。也就是说,变压器负载时的总磁动势应该与变压器空载时的磁动势基本相等。

由 $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = 0.44 N_1 f \Phi_m$ 可知, U_1 和 f 不变时, E_1 和 Φ_m 也都基本不变。因此,有负载时产生主磁通的原、副绕组的合成磁动势($i_1 N_1 + i_2 N_2$)和空载时产生主磁通的原绕组的磁动势 $i_0 N_1$ 基本相等,即

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$$

空载电流 i_0 很小,可忽略不计,则

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 N_1 &\approx -\dot{I}_2 N_2 \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \end{aligned} \quad (1-6)$$

式 $\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2$ 中负号说明 I_1 和 I_2 的相位相反,即 $I_2 N_2$ 对 $I_1 N_1$ 有去磁作用。式(1-6)说明变压器负载运行时,其原绕组和副绕组电流有效值之比,等于它们匝数比的倒数,即变压比 k 的倒数。这也就是变压器的电流变换原理。

3. 阻抗变换

设接在变压器副绕组的负载阻抗 Z 的模为 $|Z|$,则

$$|Z| = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \quad (1-7)$$

Z 反映到原绕组的阻抗模 $|Z'|$ 为

$$|Z'| = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{k \dot{U}_2}{\frac{\dot{I}_2}{k}} = k^2 \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = k^2 |Z| \quad (1-8)$$

式(1-8)说明以下两点:

(1)当变压器的副边接入负载阻抗 Z 时,反映(反射)到变压器原边的等效阻抗 $|Z'| = k^2 |Z|$,即增大 k^2 倍,这就是变压器的阻抗变换作用。

(2)当副边的负载阻抗 $|Z|$ 一定时,通过选取不同的匝数比的变压器,在原边可得到不同的等效阻抗 $|Z'|$ 。因此,在一些电子设备中,为了获得最大的功率输出,可以利用变压器将负载的阻抗变换到正好等于电源的内阻抗,即“阻抗匹配”。

二、单相变压器的联结组

联结组是变压器运行中的一个重要概念。通过研究单相变压器的联结组,为三相变压器的联结组的学习打好基础。

(一)单相变压器原、副绕组首末端标记及连接方法

单相变压器原绕组的首、末端被标记为 U, X ;把副绕组的首、末端标记为 u, x 。单相变

压器的原、副绕组缠绕在同一根铁芯柱上,并被同一主磁通所交链,任何时刻两个绕组的感应电动势都会在某一端呈现高电位的同时,在另外一端呈现出低电位。借用电路理论的知识,把原、副绕组中同时呈现高电位(低电位)的端点称为同名端,并在该端点旁加“·”来表示。

(二) 单相变压器联结组的确定

按照惯例,统一规定原、副绕组感应电动势的方向均从首端指向末端。一旦两个绕组的首、末端定义完之后,同名端便只由绕组的绕向决定。当同名端同时为原、副绕组的首端(末端)时, E_{Ux} 和 E_{ux} 同相位,用联结组 I/I-12 表示,如图 1-7 所示;否则, E_{Ux} 和 E_{ux} 相位相差 180° ,用联结组 I/I-6 表示,如图 1-8 所示。

由此可见,单相变压器原边、副边感应电动势的方向存在两种可能:同为电动势升(降);一个为电动势升,另一个为电动势降。

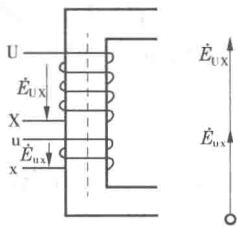


图 1-7 I/I-12 联结组

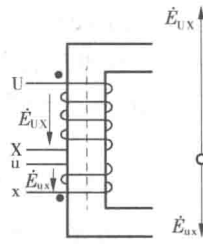


图 1-8 I/I-6 联结组

三、变压器的使用特性

(一) 外特性

外特性是指副绕组电压 U_2 与副绕组电流 I_2 的变化关系,如图 1-9 所示。电压变化率反映电压 U_2 的变化程度。通常希望 U_2 的变动越小越好,一般变压器的电压变化率约为 5%。用式(1-9)表示为

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 U_{20} ——空载时变压器副绕组电压;

U_2 ——满载时变压器副绕组电压。

(二) 损耗与效率

变压器在运行时存在两种损耗:铁损和铜损。

(1) 变压器的铁损 P_0 。

变压器一次侧加有交变电压时,铁芯中产生交变的磁通,从而在铁芯中产生磁滞与涡流损耗,总称变压器的铁损。铁损包括磁滞损耗(ΔP_0)和涡流损耗($I_0^2 R_1$)。

变压器空载运行时损耗为

$$P_0 = I_0^2 R_1 + \Delta P_0 \quad (1-10)$$

由于空载电流 I_0 和一次绕组电阻 R_1 都比较小,所以 $I_0^2 R_1$ 可以忽略不计,因此变压器的空载损耗主要是铁损。当电源电压一定时,铁损基本不变,而与负载电流的大小和性质无关。

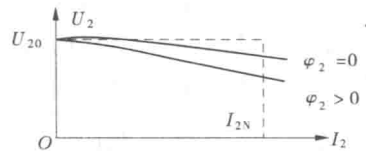


图 1-9 变压器的外特性曲线

(2) 变压器的铜损 P_K 。

由于变压器一、二次绕组都有一定的电阻 (R_1 、 R_2)，当有电流通过时，就要产生一定的功率和电能损耗，这就是铜损。

变压器的铜损为

$$P_K = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (1-11)$$

因此，变压器的铜损的大小主要取决于负载电流的大小。

(3) 变压器的效率：输出功率 P_2 与输入功率 P_1 比值的百分比，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中， $\Delta P = P_0 + P_K$ 。

当变压器输出功率为零时，效率也为零；随着输出功率的增加，效率也上升，直至最大值，然后又降低。这是因为，变压器的铁损基本上不变，而铜损则与负荷电流的平方成正比，当负荷电流大到一定程度后，铜损很快增大使得效率下降。实验证明，当变压器的铜损与铁损相等时，变压器的效率达到最大值。

(三) 额定值

(1) 额定电压 U_N ：指变压器副绕组空载时原、副绕组的电压，对于三相变压器指的是线电压。

(2) 额定电流 I_N ：指允许绕组长时间连续工作的线电流。

(3) 额定容量 S_N ：在额定工作条件下变压器的视在功率。

单相变压器

$$S_N = U_{2N} I_{2N} \approx U_{1N} I_{1N} \quad (1-13)$$

三相变压器

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \approx \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \quad (1-14)$$

第三节 三相变压器

三相变压器是 3 个容量相同的单相变压器的组合，它有 3 个铁芯柱，每个铁芯柱都绕着同一相的两个线圈，一个是高压线圈，另一个是低压线圈。

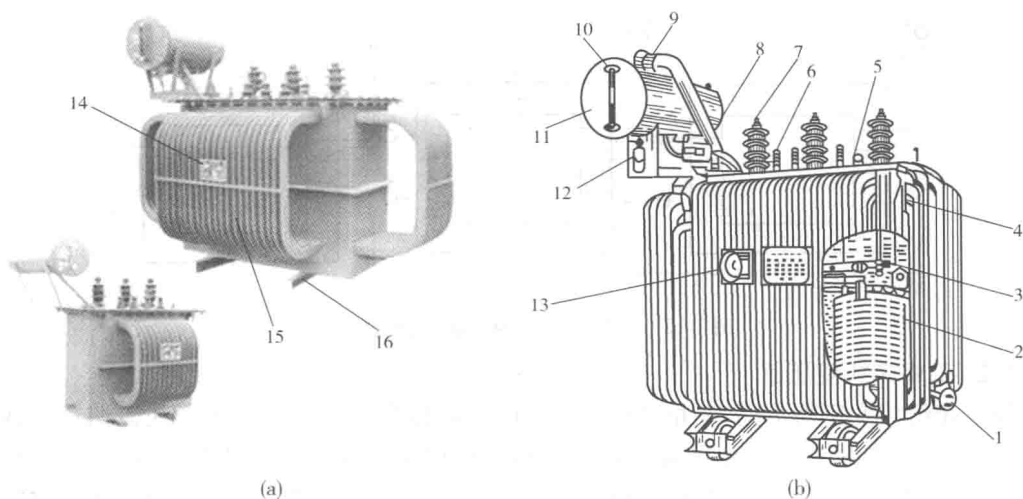
变压器的主要结构部件有：由铁芯和绕组两个基本部分组成的器身，以及放置器身且盛满变压器油的油箱。此外，还有一些为确保变压器运行安全的辅助器件。图 1-10 为一台油浸式电力变压器结构图。图 1-11 为 SFPL-120000/220 型电力变压器外形图。

一、三相变压器的磁路系统

三相变压器的磁路系统，可分为各相磁路彼此无关（三相组式）和各相磁路彼此相关（三相芯式）的两类。

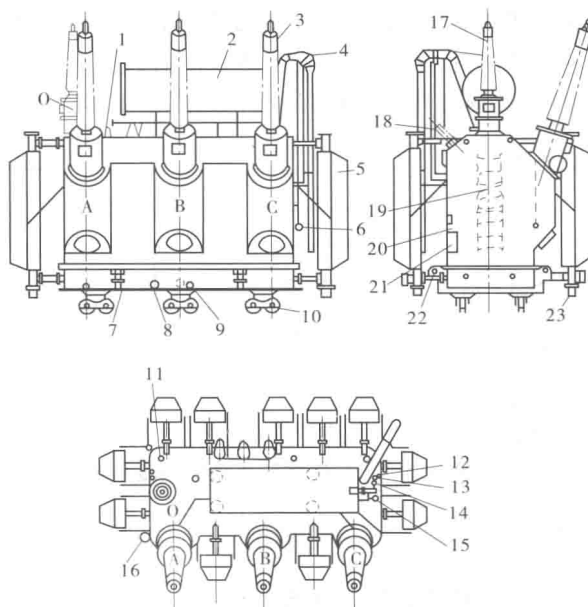
(一) 三相组式变压器

三相组式变压器是由 3 个磁路相互独立的单相变压器所组成的，三相之间只有电的联系而无磁的联系，如图 1-12 所示。虽然各磁路相互独立，原、副绕组可根据要求接成星形（Y）或三角形（ Δ ）。但当对原绕组施加对称的三相电压时， Φ_U 、 Φ_V 、 Φ_W 便会对称，空载电流也是对称的。



- 1—放油阀门;2—绕组;3—铁芯;4—油箱;5—分接开关;
6—低压套管;7—高压套管;8—气体继电器;9—安全气道;
10—油表;11—储油柜;12—吸湿器;13—湿度计;14—铭牌;15—散热油管;16—底座

图 1-10 油浸式电力变压器外形图



- 1—接地套管;2—油枕;3—高压套管;4—压力释放装置;5—散热器;6—吸湿器;7—千斤顶支架;
8—取油样阀门;9—接地螺钉;10—滚轮;11—分接开关操动机构;12—信号温度计;13—水银温度计;
14—电阻温度计;15—瓦斯继电器;16—事故放油阀门;17—中性点套管;18—低压套管;19—梯子;
20—油箱;21—接线箱;22—起吊孔;23—潜油泵

图 1-11 SFPL-120000/220 型电力变压器外形图

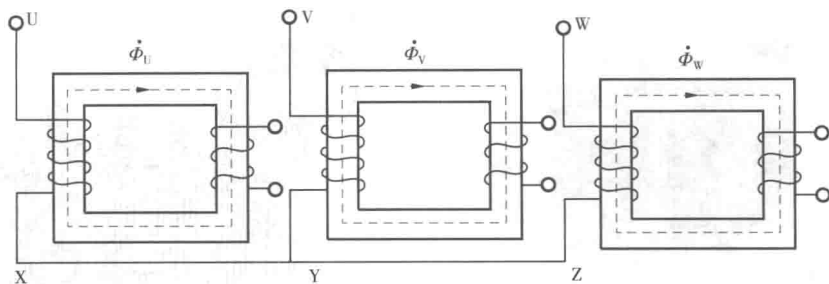


图 1-12 三相变压器组的磁路、电路系统

(二) 三相芯式变压器

与三相组式变压器不同,三相芯式变压器的磁路相互关联。它是通过铁轭把 3 个铁芯柱连在一起的,如图 1-13 所示。这种铁芯结构是从单相变压器演变过来的,把 3 个单相变压器铁芯柱的一边组合到一起,而将每相绕组缠绕在未组合的铁芯柱上。由于在对称的情况下,组合在一起的铁芯柱中不会有磁通存在,故可以省去。和同容量的三相组式变压器相比,三相芯式变压器所用的材料较少、质量轻。但它的缺点在于:

(1) 采用三相芯式变压器供电时,任何一相发生故障,整个变压器都要进行更换,如果采用三相组式变压器,只要更换出现故障的一相即可。所以,三相芯式变压器的备用容量为三相组式变压器的 3 倍。

(2) 对于大型变压器来说,如果采用芯式结构,体积较大,运输不便。

基于以上考虑,为节省材料,多数三相变压器采用芯式结构。但对于大型变压器而言,为减少备用容量以及确保运输方便,一般都是三相组式变压器。

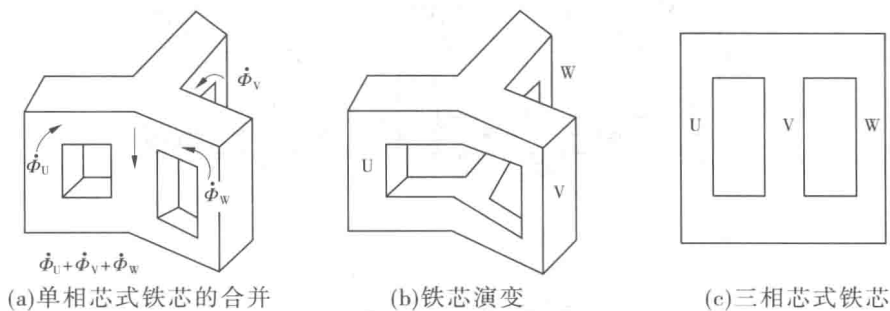


图 1-13 三相芯式变压器的磁路系统

二、三相变压器的电路系统——联结组

(一) 变压器原、副绕组首末端标记及连接方法

对三相变压器而言,为研究方便,也对其首、末端加以标记,如表 1-1 所示。

表 1-1 三相变压器首末端标记

绕组名称	首端	末端	中点
原绕组	U、V、W	X、Y、Z	0
副绕组	u、v、w	x、y、z	0

理论上来说,三相变压器的原、副绕组都可以根据需要接成星形(Y)或三角形(Δ),一旦按规定的接法连接完成,其表示方法便随之确定。为方便起见,用Y/y表示原、副边的星形接法;用D/d来表示原、副边的三角形接法。原绕组在接成星形(Y)时,如果有中线引出,则用YN表示;副绕组在接成星形(Y)时,如果有中线引出,则用yn表示。例如,YN/d表示原绕组为星形接法,并且有中线引出,副绕组为三角形接法;D/y表示原绕组为三角形接法,副绕组为星形接法,无中线引出。

(二) 三相变压器的联结组

三相变压器的联结组由两部分组成,一部分表示三相变压器的联结方法;另一部分表示联结组的标号。下面详细介绍确定联结组的方法。联结组标号是由原边、副边线电动势的相位差决定的。三相变压器的3个铁芯柱上都有分别属于原绕组和副绕组的一相,它们的相位关系与单相变压器原、副绕组感应电动势的关系完全一样。根据电路理论可知,当三相绕组按星形(Y)连接时,线电动势的大小为相电动势的 $\sqrt{3}$ 倍,相位则超前相应相电动势 30° ;当三相绕组按三角形(Δ)连接时,线电动势与相电动势相等。所以在确定原边、副边相电动势的相位关系后,线电动势的关系也随之确定,便可根据线电动势的相位关系来确定联结组标号。联结组标号有两层含义:一方面原边、副边线电动势相位差都是 30° 的倍数,该倍数即为联结组标号;另一方面代表着时钟的整点数,如果规定原边线电动势作为分针始终指向12点不动,副绕组的线电动势作为时针,按顺时针转动,指向几点,则联结组标号就是几,这就是所谓的钟表法。

1. 由三相变压器的接线图确定联结组

在已知三相变压器接线图的情况下,可以按如下步骤来确定其联结组:首先画出原绕组相电动势的相量图,并根据其连接方式求出线电动势;然后把U点当做u点,根据同名端,确定副边相电动势与原边相电动势的相位关系,画出副边相电动势的相量图,再由其连接方式求出副边的线电动势;最后根据相量图所示的原边、副边线电动势相位差,得到联结组标号。

1) 变压器绕组的连接方法

(1) 星形联结用符号“Y(或y)”表示。

三个首端U、V、W(或u、v、w)向外引出,末端X、Y、Z(或x、y、z)连接在一起成为中性点,如图1-14(a)所示。

(2) 三角形联结用符号“D(或d)”表示。

各相间联结次序为U—X—W—Z—V—Y(或u—x—w—z—v—y);从首端A、B、C(或a、b、c)向外引出,如图1-14(b)所示。

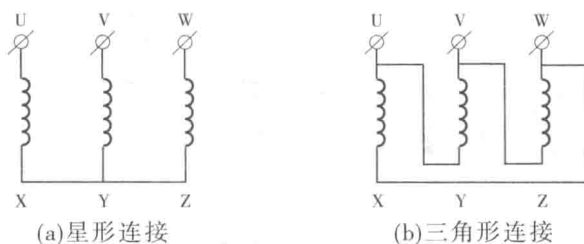


图 1-14 变压器绕组的连接方法