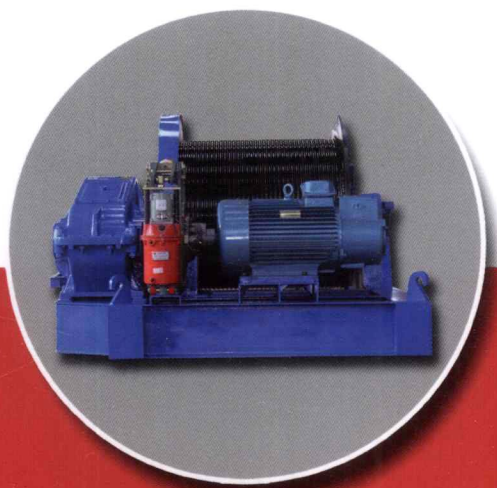


安徽省高等学校“十一五”规划教材

# 电机拖动 与PLC技术

DIANJI TUODONG YU PLC JISHU

袁清萍◎主编



合肥工业大学出版社

安徽省高等学校“十一五”规划教材

# 电机拖动与 PLC 技术

袁清萍 主编

合肥工业大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

电机拖动与 PLC 技术/袁清萍主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-5650-0068-3

I. 电… II. 袁… III. ①电机—电力传动②电机—可编程序控制器 IV. TM30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 179676 号

## 电机拖动与 PLC 技术

主编 袁清萍

责任编辑 权 怡 马成勋

责任编辑 方 丹

---

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2009 年 10 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2009 年 10 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
电 话	总编室:0551-2903038	印 张	23
	发行部:0551-2903198	字 数	550 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	安徽江淮印务有限责任公司
E-mail	press@hfutpress.com.cn	发 行	全国新华书店

---

ISBN 978-7-5650-0068-3

定价:38.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

# 前 言

本书是安徽省高等学校“十一五”规划教材(高职高专电气工程类系列)。该书集编者多年电气类专业教学、技能培训和工厂工作实践经验编写而成。在编写过程中,本书依据高等职业教育“淡化理论,够用为度,培养技能,重在应用”的原则,按照教学改革方案的要求,将“电机拖动基础”、“工厂电气控制技术”与“PLC应用技术”等三门课进行有机整合,使其融为一体、前后呼应。为使教材通俗易懂,便于自学,本书在内容上做了较大的改动,删除了陈旧过时、偏多、偏深的内容,增加了新技术、新元件、新材料等知识及应用。在理论阐述方面则力求做到叙事简明、概念清晰、突出重点,侧重于基本原则和基本概念的阐述,并强调基本理论的实际应用。全书以培养高级应用型人才为目标,以技能和工程应用能力的培养为出发点,突出实际应用。

全书共分十章。内容包括:变压器、异步电动机、直流电动机、特殊电动机、低压电器、电动机的基本控制线路、常用机床的电气控制、可编程序控制器及其工作原理、S7-200系列可编程序控制器、可编程序控制器的程序设计等。本书的教学内容具有针对性和可选择性,便于不同专业选修。

参加本书编写的有铜陵职业技术学院袁清萍,安徽水利职业技术学院何强,安徽职业技术学院马卫民。袁清萍编写了第1章、第4章、第5章、第6章、第7章,何强编写了第8章、第9章、第10章,马卫民编写了第2章、第3章。全书由袁清萍统稿并任主编。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中的缺点和错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009年9月

# 目 录

<b>第 1 章 变压器</b> .....	(1)
1.1 变压器的工作原理、用途及分类.....	(2)
1.2 三相变压器的基本结构 .....	(3)
1.3 单相变压器的运行原理 .....	(8)
1.4 变压器的空载试验和短路试验.....	(15)
1.5 变压器的运行特性.....	(17)
1.6 变压器的极性及三相变压器的联结组.....	(20)
1.7 三相变压器的并联运行.....	(24)
1.8 其他用途变压器.....	(26)
思考题与习题 .....	(32)
<b>第 2 章 异步电动机</b> .....	(34)
2.1 三相异步电动机的结构和工作原理.....	(35)
2.2 三相异步电动机定子绕组.....	(40)
2.3 三相异步电动机的运行原理与工作特性.....	(45)
2.4 三相异步电动机的机械特性.....	(54)
2.5 三相异步电动机的起动.....	(58)
2.6 三相异步电动机的调速.....	(64)
2.7 三相异步电动机的反转与制动.....	(68)
2.8 单相异步电动机.....	(71)
思考题与习题 .....	(76)
<b>第 3 章 直流电动机</b> .....	(77)
3.1 直流电动机的结构和基本原理.....	(78)
3.2 直流电动机的电枢绕组.....	(83)

3.3	直流电动机的磁场	(89)
3.4	电枢绕组的感应电动势与电磁转矩	(91)
3.5	直流电动机中的换向	(93)
3.6	直流电动机的分类	(95)
3.7	他励直流电动机的基本方程式、机械特性及负载的机械特性	(96)
3.8	他励电动机的起动和反转	(102)
3.9	他励直流电动机的制动	(106)
3.10	他励直流电动机的调速	(109)
	思考题与习题	(112)
<b>第4章</b>	<b>特殊电动机</b>	<b>(114)</b>
4.1	伺服电动机	(115)
4.2	步进电动机	(122)
4.3	测速发电机	(128)
4.4	自整角机	(133)
4.5	微型同步电动机	(138)
	思考题与习题	(143)
<b>第5章</b>	<b>低压电器</b>	<b>(144)</b>
5.1	低压电器概述	(145)
5.2	刀开关与自动开关	(146)
5.3	主令电器	(152)
5.4	保护电器	(156)
5.5	交流接触器	(161)
5.6	继电器	(164)
	思考题与习题	(173)
<b>第6章</b>	<b>电动机的基本控制线路</b>	<b>(174)</b>
6.1	三相异步电动机的正转控制线路	(175)
6.2	三相异步电动机的正反转控制线路	(180)
6.3	位置控制与自动往返控制线路	(184)

---

---

6.4	顺序控制与多地控制线路 .....	(187)
6.5	三相异步电动机降压起动控制线路 .....	(192)
6.6	三相异步电动机的制动控制线路 .....	(206)
6.7	多速异步电动机的控制线路 .....	(218)
	思考题与习题 .....	(224)
<b>第7章</b>	<b>常用机床的电气控制 .....</b>	<b>(227)</b>
7.1	C650-2 卧式车床电气控制电路 .....	(228)
7.2	M7130 型平面磨床电气控制电路 .....	(232)
7.3	Z3050 摇臂钻床电气控制电路 .....	(237)
7.4	X62W 型万能铣床电气控制电路 .....	(241)
7.5	T68 型卧式镗床电气控制电路 .....	(248)
7.6	桥式起重机控制线路 .....	(255)
	思考题与习题 .....	(267)
<b>第8章</b>	<b>可编程序控制器及其工作原理 .....</b>	<b>(269)</b>
8.1	可编程序控制器概述 .....	(270)
8.2	可编程序控制器的组成 .....	(274)
8.3	可编程序控制器工作原理及主要性能指标 .....	(279)
8.4	STEP7-Micro/WIN 编程软件的使用 .....	(282)
	思考题与习题 .....	(288)
<b>第9章</b>	<b>S7-200 系列可编程序控制器 .....</b>	<b>(289)</b>
9.1	S7-200 系列 PLC 系统构成 .....	(290)
9.2	S7-200 系列 PLC 内部元件及寻址方式 .....	(293)
9.3	S7-200 系列 PLC 基本指令 .....	(299)
9.4	S7-200 系列 PLC 功能指令 .....	(305)
	思考题与习题 .....	(320)
<b>第10章</b>	<b>可编程序控制器的程序设计 .....</b>	<b>(322)</b>
10.1	PLC 应用系统设计的内容和步骤 .....	(323)

10.2 PLC 应用中的若干问题 .....	(325)
10.3 PLC 在逻辑控制系统中的应用实例 .....	(331)
10.4 可编程序控制器网络及通信 .....	(341)
思考题与习题 .....	(347)
<b>附录 1 电气常用图形符号和文字符号新旧标准对照表 .....</b>	<b>(349)</b>
<b>附录 2 S7 - 200 可编程序控制器寻址范围及特殊标志存储器 .....</b>	<b>(353)</b>
<b>附录 3 S7 - 200 系列 PLC 有效编程范围 .....</b>	<b>(355)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(357)</b>



# 第 1 章

## 变 压 器

### 内容提要与学习要求：

本章通过对单相变压器空载及负载运行性能的分析,阐明了变压器的工作原理、基本结构和运行情况,并对其他用途的变压器作简单介绍。通过学习本章节内容,掌握变压器的变电压、变电流和变换阻抗原理,掌握三相变压器并联运行条件;了解变压器绕组极性的判断方法。

## 1.1 变压器的工作原理、用途及分类

变压器是一种常见的静止电气设备,它利用电磁感应原理,将某一数值的交变电压变换为同频率的另一数值的交变电压。变压器对电力系统中电能的传输、分配和安全使用有重要意义,被广泛应用于电气控制领域、电子技术领域、测试技术领域以及焊接技术领域等等。

### 1.1.1 变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应原理工作的,图 1-1 为其工作原理示意图。变压器的主要部件是铁心和绕组。两个互相绝缘且匝数不同的绕组分别套装在铁心上,两绕组间只有磁的耦合而没有电的联系。其中,接电源  $u_1$  的绕组称为一次绕组(又称为原绕组、初级绕组),用于接负载  $u_2$  的绕组称为二次绕组(又称为副绕组、次级绕组)。

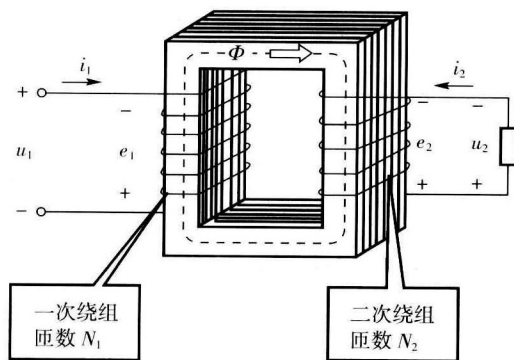


图 1-1 单相变压器原理图

一次绕组加上交流电压  $u_1$  后,绕组中便有电流  $i_1$  通过,在铁心中产生与  $u_1$  同频率的交变磁通  $\Phi$ ,根据电磁感应原理,在两个绕组中将分别产生感应电动势  $e_1$  和  $e_2$ 。

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

式中,“—”号表示感应电动势总是阻碍磁通的变化。若把负载接在二次绕组上,则在电动势  $e_2$  的作用下,有电流  $i_2$  流过负载,实现了电能的传递。由式(1-1)、式(1-2)可知,一、二次绕组感应电动势的大小(近似于各自的电压  $u_1$  及  $u_2$ )与绕组匝数成正比,故只要改变一、二次绕组的匝数,就可达到改变电压的目的,这就是变压器的基本工作原理。

### 1.1.2 变压器的用途

变压器最主要用在输、配电技术领域。根据  $P = \sqrt{3}UI \cos \Phi$ ,当输送功率  $P$  和负载的功率因数  $\cos \Phi$  一定时,输电线路上的电压  $U$  越高,则流过输电线路中的电流  $I$  就越小。这不仅可以减小输电线的截面积,节约导体材料,同时还可减小输电线路的功率损耗。因此目前

世界各国在电能的输送与分配方面都朝建立高电压、大功率的电力网系统方向发展,以便集中输送、统一调度与分配电能。这就促使输电线路的电压由高压(110~220kV)向超高压(330~750kV)和特高压(750kV以上)不断升级。目前我国高压输电的电压等级有110kV、220kV、330kV和500kV等多种。

变压器除用于改变电压外,还可以用来改变电流、变换阻抗以及产生脉冲等。

### 1.1.3 变压器的分类

变压器种类很多,通常可按其用途、绕组结构、铁心结构、相数、冷却方式等进行分类。

#### 1. 按用途分类

(1)电力变压器。用作电能的输送与分配。按其功能不同又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器等。电力变压器的容量从几十千伏安到几十万千伏安,电压等级从几百伏到几百千伏。

(2)特种变压器。在特殊场合使用的变压器,如作为焊接电源的电焊变压器;专供大功率电炉使用的电炉变压器;将交流电整流成直流电时使用的整流变压器等。

(3)仪用互感器。用于电工测量,如电流互感器、电压互感器等。

(4)控制变压器。容量一般比较小,用于小功率电源系统和自动控制系统。如电源变压器、输入变压器、输出变压器、脉冲变压器等。

(5)其他变压器。如试验用的高压变压器;输出电压可调的调压变压器;产生脉冲信号的脉冲变压器等。

#### 2. 按绕组构成分类

有双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器等。

#### 3. 按铁心结构分类

有叠片式铁心结构变压器、卷制式铁心结构变压器、非晶合金铁心结构变压器。

#### 4. 按相数分类

有单相变压器、三相变压器、多相变压器。

#### 5. 按冷却方式分类

有干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器、充气式变压器等。

## 1.2 三相变压器的基本结构

三相变压器可以由三台同容量的单相变压器组成,按需要将一次绕组及二次绕组分别接成星形或三角形联结。图1-2所示为一、二次绕组均为星形联结的三相变压器组。三相变压器的另一种结构类型是把三个单相变压器合成一个三铁心柱的结构型式,称为三相心式变压器,如图1-3所示。由于三相绕组接至对称的三相交流电源时,三相绕组中产生的主磁通也是对称的,故有 $\dot{\phi}_U + \dot{\phi}_V + \dot{\phi}_W = 0$ ,即中间铁心柱的磁通为零,因此中间铁心柱可以省略,成为图1-3(b)形式。实际上为了简化变压器铁心的剪裁及叠装工艺,均采用将U、V、W三个铁心柱置于同一个平面上的结构型式,如图1-3(c)所示。

在三相电力变压器中,目前使用最广的是油浸式电力变压器,其外形如图1-4所示。它主要由铁心、绕组、油箱和冷却装置、保护装置等部件组成。

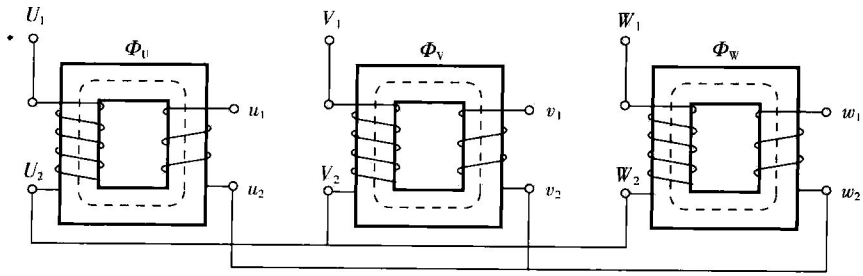


图 1-2 三相变压器组

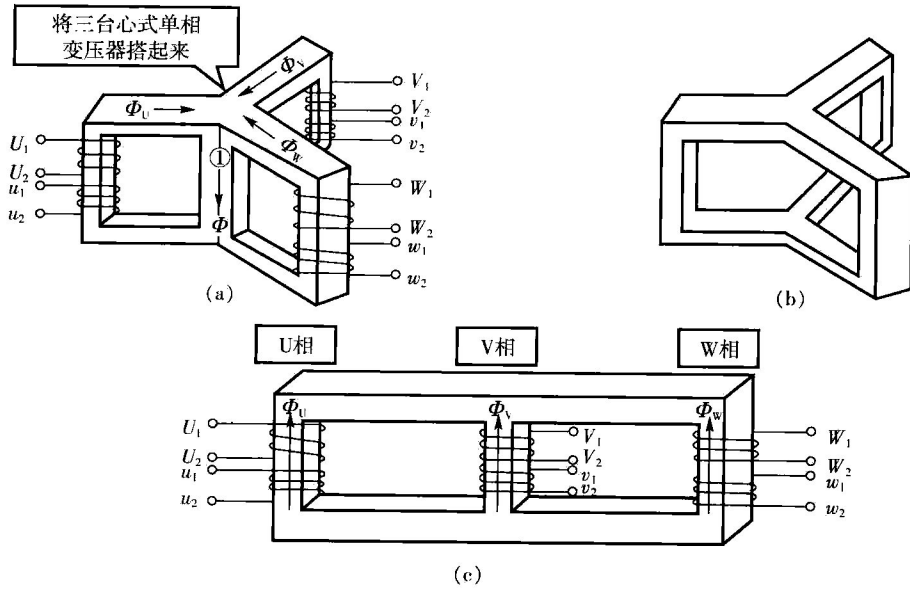


图 1-3 三相心式变压器

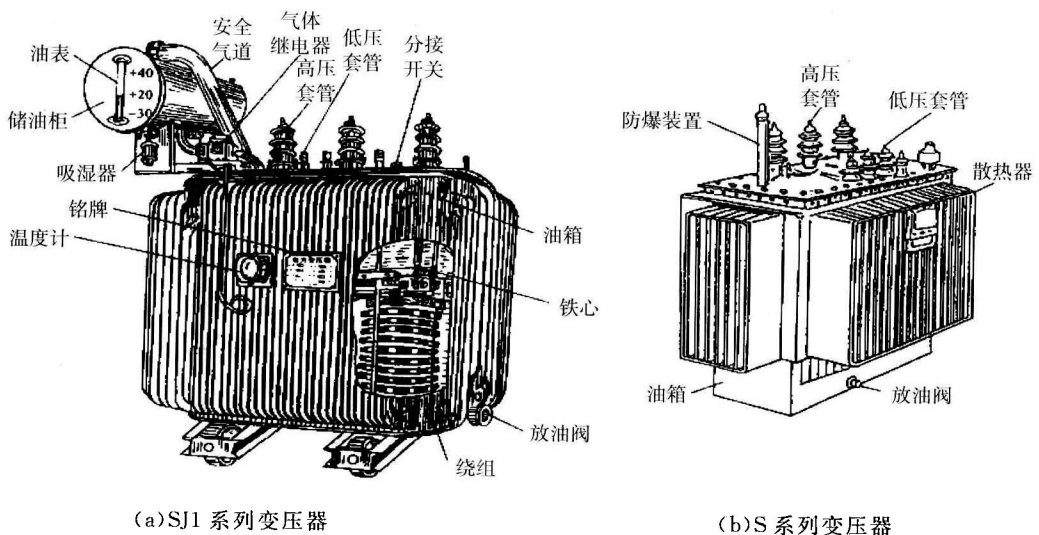


图 1-4 油浸式电力变压器

## 1. 铁心

铁心是三相变压器的磁路部分,与单相变压器一样,它也是由 0.35mm 厚的硅钢片叠压(或卷制)而成。20 世纪 70 年代以前生产的电力变压器铁心采用热轧硅钢片,其主要缺点是变压器体积大,损耗大,效率低。20 世纪 80 年代以后生产的新型电力变压器铁心均用高磁导率、低损耗的冷轧晶粒取向硅钢片制作,以降低其损耗,提高变压器的效率,这类变压器称为低损耗变压器,以 S7(SL7)及 S9 为代表产品。电力部规定从 1985 年起,新生产及新上网的必须是低损耗电力变压器。三相电力变压器铁心均采用心式结构,如图 1-5 所示。通常心式结构的铁心采用交叠式的叠装工艺,即把剪成条状的硅钢片用两种不同的排列法交错叠放,每层将接缝错开叠装,如图 1-6 所示。交叠式铁心的优点是:各层磁路的接缝相互错开,气隙小,故空载电流较小。另外,由于交叠式铁心的夹紧装置简单经济,且可靠性高,因而在国产电力变压器中得到广泛采用。主要不足之处是铁心及绕组的装配工艺较复杂。

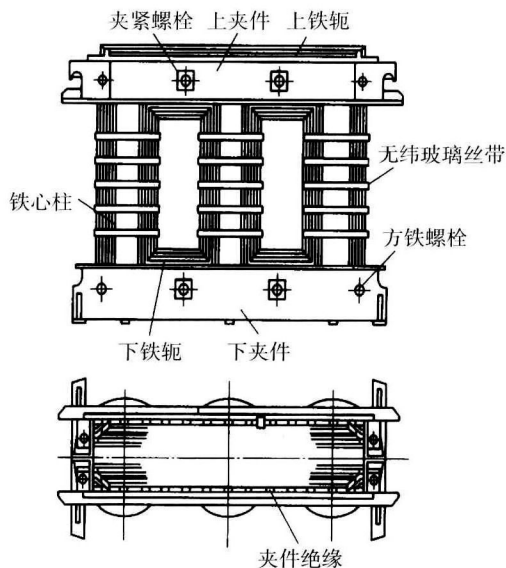


图 1-5 三相三铁心柱铁心外形图

随着高磁导率、低损耗的冷轧晶粒取向硅钢片在电力变压器中被广泛采用,由于该类硅钢片在顺轧制方向有较小的损耗和较高的磁导率,如仍采用图 1-6 所示的叠装方式,当磁通从垂直轧制的方向通过时,则在转角处会引起附加损耗。因此,广泛采用图 1-7 所示的  $45^\circ$  的斜切硅钢片进行叠装。

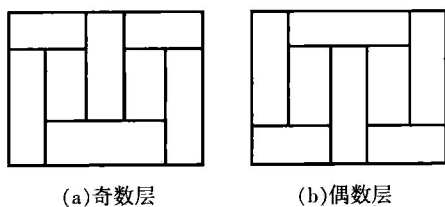


图 1-6 三相交叠式铁心叠片方式

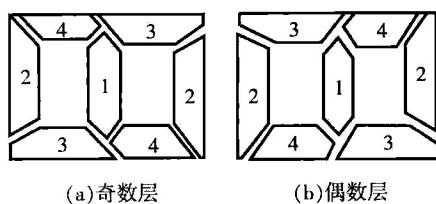


图 1-7 斜切冷轧硅钢片的叠装方式

铁心叠装好以后,必须将铁心柱及铁轭部分固紧成为一个整体,老的产品均在硅钢片中间冲孔,再用夹紧螺栓穿过圆孔固紧。夹紧螺栓与硅钢片之间必须有可靠的绝缘体,否则,硅钢片会被夹紧螺栓短路,使涡流增加而引起过热,造成硅钢片及绕组烧坏。目前生产的变压器,铁心柱部分已改用环氧无纬玻璃丝带绑扎,如图 1-5 所示。而铁轭部分仍用夹紧螺栓及上、下夹件夹紧,使整台变压器铁心成为一个坚实的整体。

铁心柱的截面形状与变压器的容量有关,单相变压器及小型三相电力变压器采用正方形或长方形截面,如图 1-8(a)所示;在大、中型三相电力变压器中,为了充分利用绕组内圆的空间,通常采用阶梯形截面,如图 1-8(b)、(c)所示。阶梯形的级数越多,则变压器结构

越紧凑,但叠装工艺越复杂。

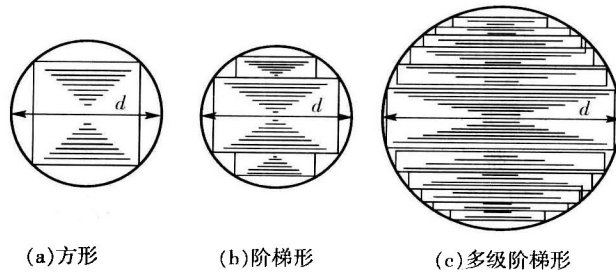


图 1-8 铁心柱截面形状

叠片式铁心的主要缺点是:铁心的剪冲及叠装工艺比较复杂,给制造和修理带来许多麻烦,同时,由于接缝的存在也增加了变压器的空载损耗。随着制造技术的不断成熟,像单相变压器一样,采用卷制式铁心结构的三相电力变压器已在  $500\text{kV}\cdot\text{A}$  以下容量中被采用,其优点是体积小,损耗低,噪声小,价格低,极有推广前景。

变压器铁心的最新发展趋势是采用铁基、铁镍基、钴基等非晶带材料代替硅钢。我国已生产 SH11 系列非晶合金电力变压器,它具有体积小、效益高、节能等优点,极有发展前景。

### 2. 绕组

绕组是三相电力变压器的电路部分。一般用绝缘纸包的扁铜线或扁铝线绕成,绕组的结构型式与单相变压器一样,有同心式绕组和交叠式绕组。当前新型的绕组结构为箔式绕组电力变压器,绕组用铝箔或铜箔氧化技术和特殊工艺绕制,使变压器整体性能得到较大的提高,我国已开始批量生产。

绕组制作完成后,将图 1-5 变压器铁心的上夹件拆开,并将上部的铁轭硅钢片拆去,后将三相高、低压绕组套在三个铁心柱上,再重新装好上部铁轭和上夹件,成为如图 1-9 所示的电力变压器器身。

### 3. 油箱和冷却装置

由于三相变压器主要用于电力系统进行电能的传输,因此其容量都比较大,电压也比较高,目前国产的高电压、大容量三相电力变压器 OSFPSZ - 360000/500 已批量生产(容量为 36 万  $\text{kV}\cdot\text{A}$ ,电压为  $500\text{kV}$ ,每台变压器重量达到  $250\text{t}$ )。为了铁心和绕组能更好地散热和绝缘,均将其置于绝缘的变压器油内,而油则盛放在油箱内,如图 1-4 所示。为了增加散热面积,一般在油箱四周加装散热装置,老型号电力变压器采用在油箱四周加焊扁形散热油管,如图 1-4(a)所示;新型电力变压器多采用片式散热器散热,如图 1-4(b)所示。容量大于  $10000\text{kV}\cdot\text{A}$  的电力变压器,则采用风吹冷却或强迫油循环冷却装置。

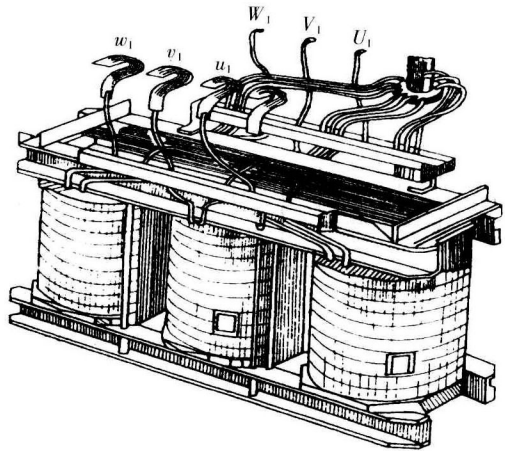


图 1-9 电力变压器器身

大多数变压器在油箱上部还安装有储油柜,它通过连接管与油箱相通。储油柜内的油

面高度随变压器油的热胀冷缩而变动。储油柜使变压器油与空气的接触面积大为减小,从而减缓了变压器油的老化速度。新型的全充油密封式电力变压器则取消了储油柜,运行时变压器油的体积变化完全由设在侧壁的膨胀式散热器(金属波纹油箱)来补偿,变压器端盖与箱体之间焊为一体,设备免维护,运行安全可靠。以S9-M系列、S10-M系列全密封波纹油箱电力变压器为代表的产品,我国现已开始批量生产。

#### 4. 保护装置

(1)气体继电器。在油箱和储油柜之间的连接管中装有气体继电器,当变压器发生故障时,内部绝缘物汽化,使气体继电器动作,发出信号或使开关跳闸。

(2)防爆管(安全气道)。装在油箱顶部,它是一个长的圆形钢筒,上端用酚醛纸板密封,下端与油箱连通。若变压器发生故障,油箱内压力骤增时,则油流可冲破酚醛纸板,不会造成变压器箱体爆裂。近年来,国产电力变压器已广泛采用压力释放阀来取代防爆管,其优点是动作精度高,延时短,能自动开启及自动关闭,克服了停电更换防爆管的缺点。

#### 5. 铭牌

在每台电力变压器的油箱上都有一块铭牌,标志其型号和主要参数,作为正确使用变压器时的依据,如图1-10所示。

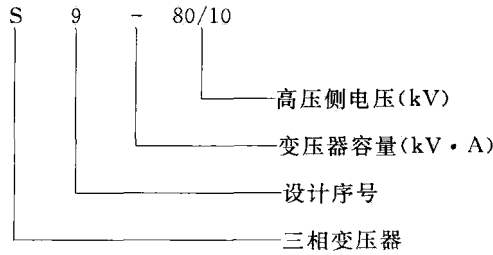
分接位置		高压		标准代号	
		电压 V	电流 A	GB 1094.1,2-1996	GB 1094.3,5-85
I	10 500			产品型号	S9-80/10
II	10 000	4.6		产品代号	1NB.710.5315.1 相数 3 相
III	9 500			额定容量	80 kV·A 额定频率 50 Hz
		低压		冷却方式	ONAN 器身质量 320 kg
		电压 V	电流 A	使用条件	户外式 油质量 100 kg
		400	115.5	连接组标号	Dyn11 总质量 500 kg
		阻抗电压 %		绝缘水平	LI 75 AC 35
				出厂序号	
				制造年月	年 月

中华人民共和国 ×× 变压器厂

图 1-10 电力变压器铭牌

图 1-10 所示的变压器是配电站用的降压变压器,将 10kV 的高压降为 400V 的低压,供三相负载使用。铭牌中的主要参数说明如下:

(1)型号。型号说明,例如:



(2) 额定电压  $U_{1N}$  和  $U_{2N}$ 。高压侧(一次绕组)额定电压  $U_{1N}$  是指加在一次绕组上的正常工作电压值。它是根据变压器的绝缘强度和允许发热等条件规定的。高压侧标出的三个电压值,可以根据高压侧供电电压的实际情况,在额定值的  $\pm 5\%$  范围内加以选择,当供电电压偏高时可调至 10500V,偏低时则调至 9500V,以保证低压侧的额定电压为 400V 左右。

低压侧(二次绕组)额定电压  $U_{2N}$  是指变压器在空载时,高压侧加上额定电压后,二次绕组两端的电压值。变压器接上负载后,二次绕组的输出电压  $U_2$  将随负载电流的增加而下降,为保证在额定负载时能输出 380V 的电压,考虑到电压调整率为 5%,故该变压器空载时二次绕组的额定电压  $U_{2N}$  为 400V。

在三相变压器中,额定电压均指线电压。

(3) 额定电流  $I_{1N}$  和  $I_{2N}$ 。额定电流是指根据变压器容许发热的条件而规定的满载电流值。在三相变压器中额定电流是指线电流。

(4) 额定容量  $S_N$ 。额定容量是指变压器在额定工作状态下,二次绕组的视在功率,其单位为  $kV \cdot A$ 。

单相变压器的额定容量为  $S_N = \frac{U_{2N} I_{2N}}{1000} kV \cdot A$ , 三相变压器的额定容量为  $S_N = \frac{\sqrt{3} U_{2N} I_{2N}}{1000} kV \cdot A$ 。

(5) 联结组标号。指三相变压器一、二次绕组的连接方式。Y(高压绕组作星形联结)、y(低压绕组作星形联结);D(高压绕组作三角形联结)、d(低压绕组作三角形联结);N(高压绕组作星形联结时的中性线)、n(低压绕组作星形联结时的中性线)。

(6) 阻抗电压。阻抗电压又称为短路电压。它标志在额定电流时变压器阻抗压降的大小。通常用它与额定电压  $U_{1N}$  的百分比来表示。

### 1.3 单相变压器的运行原理

#### 1.3.1 变压器的空载运行

##### 1. 原理图及正方向

变压器一次绕组接额定交流电压,而二次绕组开路,即  $I_2=0$  的工作方式称为变压器的空载运行,如图 1-11 所示。

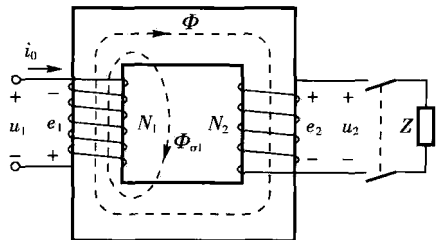


图 1-11 单相变压器空载运行



由于变压器在交流电源上工作,因此通过变压器中的电压、电流、磁通及电动势的大小及方向均随时间在不断地变化,为了正确地表示它们之间的相位关系,必须首先规定它们的参考方向,或称为正方向。

参考方向在原则上可以任意规定,但是参考方向的规定方法不同。由楞次定律可以知道,同一电磁过程所列出的方程式,其正、负号也将不同。为了统一,习惯上都按照“电工惯例”来规定参考方向:

(1)在同一支路中,电压的参考方向与电流的参考方向一致。

(2)磁通的参考方向与电流的参考方向之间符合右手螺旋定则。

(3)由交变磁通  $\Phi$  产生的感应电动势  $e$ ,其参考方向与产生该磁通的电流参考方向一致(即感应电动势  $e$  与产生它的磁通  $\Phi$  之间符合右手螺旋定则时为正方向)。图 1-1 及图 1-11 中各电压、电流、磁通、感应电动势的参考方向即按此惯例标出。

下面分析变压器空载运行时,各物理量之间的关系。

## 2. 理想变压器

空载时,在外加交流电压  $u_1$  作用下,一次绕组中通过的电流称为空载电流  $i_0$ 。在电流  $i_0$  的作用下,铁心中产生交变磁通。磁通按性质可分为两部分,一部分通过整个铁心磁路闭合,即与一次、二次绕组共同交链的磁通,称为主磁通  $\Phi$ 。它是总磁通的主要部分,是变压器一次、二次绕组进行能量传递的媒介。另一部分是只与一次绕组交链,通过空气等非磁性物质构成的一次侧漏磁通  $\Phi_{\sigma 1}$ 。由于该磁路磁阻很大,故  $\Phi_{\sigma 1}$  仅占总磁通的很小一部分。为了分析问题方便,先假定不计漏磁通  $\Phi_{\sigma 1}$ ,也不计一次绕组的电阻  $r_1$  及铁心的损耗。这种变压器称为理想变压器。当主磁通  $\Phi$  同时穿过一次及二次绕组时,分别在其中产生感应电动势  $e_1$  和  $e_2$ ,其值正比于  $\frac{d\Phi}{dt}$ 。

设  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , 则

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega N \Phi_m \cos \omega t \\ &= 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

可见在相位上,  $e$  滞后于  $\Phi 90^\circ$ , 在数值上, 其有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi N f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 N f \Phi_m$$

由此可得

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (\text{V}) \quad (1-3)$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (\text{V}) \quad (1-4)$$

式中,  $\Phi_m$  为交变磁通的最大值, Wb;  $N_1$  为一次绕组匝数;  $N_2$  为二次绕组匝数;  $f$  为交流电的频率, Hz。

由式(1-3)及式(1-4)可得