

内容提要

本书以就业为导向,以培养实用型人才为目标,介绍了电机与电气控制技术的相关知识和基本技能。全书共七章,包括变压器的应用、交流电动机的应用、直流电动机的应用、常用低压电器的认识、三相异步电动机的基本控制电路、典型设备的电气控制电路、技能实训。本书可作为机电、自动化等相关专业的教学用书,也可作为相关技术人员培训或工作的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术 / 王琴, 肖武清, 王佩蓓主编

. 一—上海: 上海交通大学出版社, 2022.8

ISBN 978-7-313-25957-8

I. ①电… II. ①王… ②肖… ③王… III. ①电机学
②电气控制 IV. ① TM3 ② TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 004899 号

电机与电气控制技术

DIANJI YU DIANQI KONGZHI JISHU

主 编: 王 琴 肖武清 王佩蓓

地 址: 上海市番禺路 951 号

出版发行: 上海交通大学出版社

电 话: 6407 1208

邮政编码: 200030

印 制: 北京荣玉印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张: 14

字 数: 266 千字

版 次: 2022 年 8 月第 1 版

印 次: 2022 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-313-25957-8

定 价: 49.80 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 010-6020 6144

目 录

CONTENTS

第一章 变压器的应用	1	数据	30
第一节 认识单相变压器	2	四、三相异步电动机的运行 分析	33
一、单相变压器的结构	2	第二节 电力拖动的基本知识	39
二、变压器的工作原理及作用	4	一、电力拖动系统的运动 方程式	40
三、变压器的应用与分类	5	二、电力拖动系统的负载与负载 转矩特性	41
四、变压器的运行特性及性能 指标	6	第三节 三相异步电动机的控制 技术	43
第二节 三相变压器的应用	9	一、三相异步电动机的启动 控制	43
一、三相电力变压器的结构 组成	9	二、三相异步电动机的调速 控制	47
二、三相电力变压器的联结 组别	11	三、三相异步电动机的反转 控制	52
三、三相电力变压器并联运行	14	四、三相异步电动机的制动 控制	52
四、三相电力变压器的主要 部件	15	五、三相异步电动机的选择	56
五、三相电力变压器台数的选择、 容量的确定及过负荷能力	17	第四节 单相异步电动机的应用	57
第三节 其他用途的变压器	18	一、单相异步电动机的启动问题 及其分类	57
一、自耦变压器	18	二、单相异步电动机的调速与 反转	59
二、仪用互感器	20		
三、弧焊变压器	21		
第二章 交流电动机的应用	23		
第一节 认识三相异步电动机	24	第三章 直流电动机的应用	63
一、三相异步电动机的结构	24	第一节 认识直流电动机	64
二、三相异步电动机的工作 原理	26	一、直流电动机的结构	64
三、三相异步电动机的铭牌		二、直流电动机的工作原理	68

三、直流电机的铭牌数据和主要系列	70	第四节 继电器	115
四、直流电机的励磁方式	71	一、电流继电器	116
五、直流电动机的特性分析	72	二、电压继电器	117
第二节 直流电动机的控制技术	74	三、中间继电器	117
一、直流电动机的启动控制	74	四、热继电器	118
二、直流电动机的反转控制	75	五、时间继电器	121
三、直流电动机的调速控制	75	六、速度继电器	125
四、直流电动机的制动控制	78	第五节 熔断器	127
第三节 直流电动机的使用与维护 ..	84	一、熔断器的结构及工作原理	128
一、直流电动机使用前的检查 ..	84	二、熔断器的特点及用途	128
二、直流电动机的使用	85	三、熔断器的型号及含义	128
三、直流电动机的维护	85	四、常用熔断器	129
四、换向器的维护和保养	85	五、熔断器的选择	131
五、电刷的使用	86	六、熔断器常见故障及其处理方法	131
六、换向与绕组故障	86	第六节 主令电器	131
第四章 常用低压电器的认识	89	一、按钮	132
第一节 低压电器基本知识	90	二、位置开关	133
一、低压电器的分类	90	三、接近开关	135
二、低压电器的型号含义	91	四、万能转换开关	136
三、低压电器的主要技术参数 ..	94	第五章 三相异步电动机的基本控制电路	139
四、选择低压电器的注意事项 ..	95	第一节 电气控制图的基本知识	140
第二节 开关电器	95	一、电气原理图	140
一、刀开关	95	二、电器元件布置图	142
二、低压断路器	99	三、安装接线图	143
三、漏电保护开关	103	第二节 三相异步电动机的单向起停控制电路	145
第三节 接触器	106	一、点动控制电路	145
一、交流接触器	106	二、连续运转控制电路	146
二、直流接触器	111	三、点动与连续混合控制	
三、接触器的主要技术参数	112		
四、接触器的选择	114		
五、接触器常见故障及其处理方法	114		

电路	147	第六章 典型设备的电气控制	
第三节 三相异步电动机的正反转		电路	171
启动控制电路	148		
一、转换开关控制电动机正反转		第一节 典型设备电气控制电路的	
电路	148	基础	172
二、按钮、接触器控制的正反转		一、认识机床电气原理图	172
控制电路	149	二、机床电气原理图检查和分析	
第四节 电动机的顺序、多地和自动		方法	172
往返控制电路	151	第二节 普通车床电气控制电路	174
一、顺序控制	151	一、CA6140 车床结构形式与电气	
二、多地控制	153	控制要求	174
三、自动往返循环控制	153	二、CA6140 车床电气控制电路	
第五节 三相异步电动机的 Y- Δ 降压		工作原理分析	175
启动控制电路	155	三、CA6140 车床电气线路故障	
一、定子电路串电阻启动	156	分析	177
二、星形—三角形降压启动		第三节 摇臂钻床电气控制电路	179
控制	157	一、Z3040 型摇臂钻床的主要结构和	
三、自耦变压器降压启动		运动形式	179
控制	159	二、Z3040 型摇臂钻床的电力拖动	
四、延边三角形降压启动	160	特点与控制要求	180
第六节 三相异步电动机的多速控制		三、Z3040 型摇臂钻床液压系统	
电路	161	简介	180
一、变极调速原理	161	四、Z3040 型摇臂钻床电气控制	
二、双速异步电动机控制线路	162	系统分析	181
第七节 三相异步电动机的制动控制		第四节 平面磨床电气控制电路	186
电路	165	一、M7120 型平面磨床的主要结构	
一、电动机单向反接制动		及运动形式	187
控制	165	二、M7120 型平面磨床电力拖动	
二、电动机可逆运行反接制动		特点及控制要求	188
控制	167	三、M7120 型平面磨床电气控制	
三、电动机单向运行能耗制动		电路分析	188
控制	168	四、M7120 平面磨床电气控制电路	
四、电动机可逆运行能耗制动		常见故障分析	192
控制	169		
五、机械制动控制电路	169		

第七章 技能实训	193	实训六 三相异步电动机 Y- Δ 降压启动 控制电路的接线安装	205
实训一 三相异步电动机的拆装 ...	194	实训七 三相异步电动机双速控制电路 的接线安装	208
实训二 低压电器的检测	196	实训八 三相异步电动机能耗制动控制 电路的接线安装	210
实训三 三相异步电动机点动控制电路 的接线安装	199	附录 常见元件图形符号、文字符号 一览表	212
实训四 三相异步电动机点动与长动 控制电路的接线安装	201	参考文献	216
实训五 三相异步电动机正反转控制 电路的接线安装	203		

第一章

变压器的应用

知识目标 >

- (1) 掌握变压器的结构、工作原理及作用；
- (2) 了解变压器的应用与分类；
- (3) 熟悉变压器的铭牌数据含义；
- (4) 了解三相变压器的联结组别和并联运行条件。

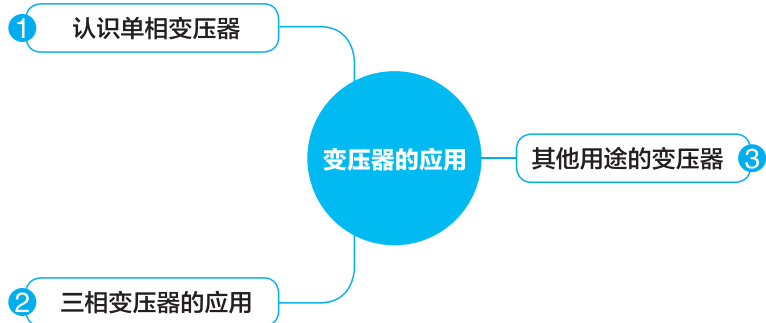
能力目标 >

- (1) 能进行变压器的拆装；
- (2) 能进行变压器台数的选择、容量的确定及过负荷能力的判断。

素质目标 >

- (1) 培养学生相互协作的团队意识；
- (2) 树立认真负责、严谨务实的工作态度。

知识结构导图 >



第一节 认识单相变压器

变压器是一种静止的电气设备，它根据电磁感应的原理，将某一等级的交流电压和电流转换成同频率的另一等级的电压和电流。变压器具有变换电压、变换电流和变换阻抗的作用。因此，变压器在电力系统、电气控制系统、自动控制、电子技术领域、测试技术领域、焊接技术领域等都具有广泛的应用。

生活中有很多电器从单相电源取电，如计算机、收音机、充电器等。计算机工作时，内部需要的电源有的很低，如 DC5V、DC12V 等，其内部的单相变压器就是将 220V 交流电压变为较低等级电压的一种设备，然后经整流设备将交流整流为直流供给各部件（如 CPU、CPU 风扇等）使用。

一、单相变压器的结构

图 1-1 所示为简单双绕组单相变压器的结构原理。

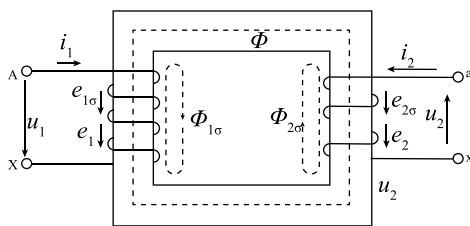


图 1-1 单相变压器的结构原理

单相变压器的容量一般都比较小，主要由铁芯和绕组（又称线圈）两部分组成。变压器的绕组与绕组之间、绕组与铁芯之间均相互绝缘。

（一）变压器铁芯

铁芯是变压器的磁路部分，其作用是利用磁耦合关系实现能量的传递，并作为变压器的机械骨架。变压器的铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成，铁芯柱上套装变压器绕组，铁轭起连接铁芯柱使磁路闭合的作用。为提高铁芯的导磁性能，减小磁滞损耗和涡流损耗，铁芯大多数采用厚度为 0.35 ~ 0.5mm、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠压制作而成。

根据变压器的铁芯结构形式可分为芯式变压器和壳式变压器两大类。芯式变压器是在两侧的铁芯柱上放置绕组，形成绕组包围铁芯的形状，如图 1-2（a）所示。壳式变压器则是在中间的铁芯上放置绕组，形成铁芯包围绕组的形状，如图 1-2（b）所示。

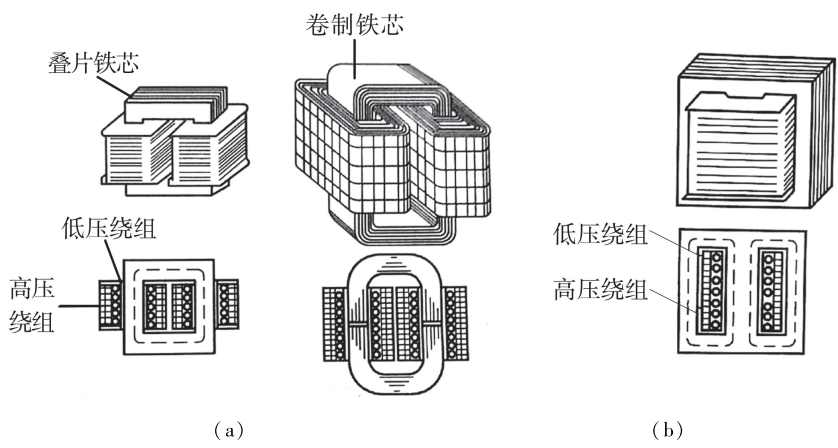


图 1-2 单相变压器的结构形式

(a) 芯式变压器结构；(b) 壳式变压器结构

根据变压器铁芯的制作工艺可分为叠片式铁芯和卷制式铁芯两种。叠片式铁芯的芯式及壳式变压器的制作顺序是，将硅钢片冲剪成如图 1-3 所示的形状，再将一片片硅钢钢按其接口交错地插入事先绕好并经过绝缘处理的线圈中，最后用夹件将铁芯夹紧。为了减小铁芯磁路的磁阻以减小铁芯损耗，要求铁芯装配时，接缝处的空气隙应越小越好。

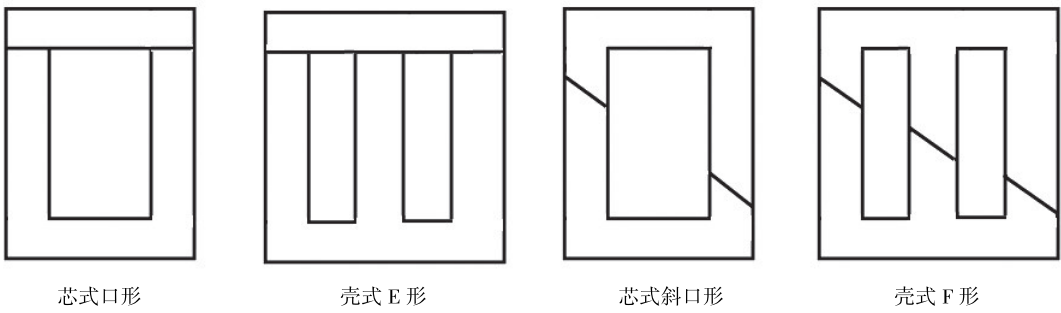
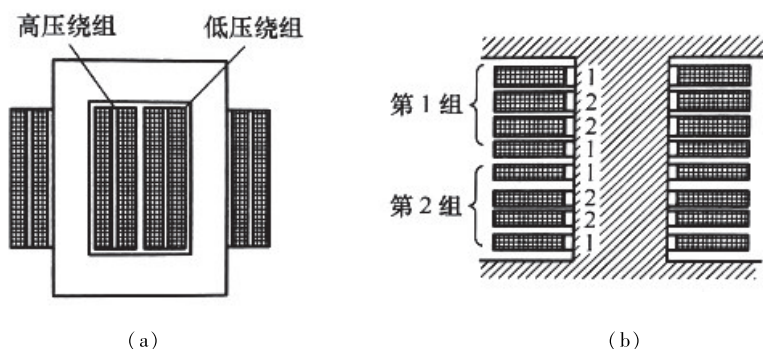


图 1-3 单相变压器铁芯形式

(二) 变压器绕组

变压器的绕组是电路部分。电力变压器的绕组通常用绝缘的扁铜线或扁铝线绕制而成，小型变压器的绕组一般用漆包线绕制而成。按高压绕组和低压绕组的相互位置和形状不同，绕组可分为同心式和交叠式两种，如图 1-4 所示。

变压器电路部分的作用是接收和输出电能，通过电磁感应实现电量的变换。与电源相接的绕组称为原边（或原绕组，一次绕组），单相变压器的原边首、尾端通常用 A、X 表示；与负载相接的绕组称为副边（或副绕组，二次绕组），其首、尾端一般常用 a、x 表示。



1—低压绕组；2—高压绕组。

图 1-4 单相变压器绕组形式

(a) 同心式绕组；(b) 交叠式绕组

二、变压器的工作原理及作用

下面讨论变压器改变电压和电流的原理。

(一) 变压器的空载运行与变换电压

变压器原边绕组接交流电源，副边绕组开路的运行状态称为空载。当变压器原边所接电源电压和频率不变时，根据主磁通原理可知，变压器铁芯中通过的工作主磁通 Φ 应基本保持为一个常量。

由变压器铁芯的高导磁性可知，产生工作主磁通 Φ 仅需很小的激励电流 “ I_{10} ”。变压器原边绕组空载运行时的激励电流值通常仅为变压器额定电流的 3%~8%。

变压器铁芯中交变的工作主磁通 Φ ，穿过其原边时产生自感电压 U_{L1} ，其有效值为

$$U_{L1} \approx 4.44fN_1\Phi_m$$

式中， f 为交流电源频率； N_1 为一次绕组匝数。

由于变压器的损耗很小，通常认为电源电压 $U_1 \approx U_{L1}$ 。铁芯中的主磁通 Φ 穿过副边时将在副边产生互感电压 U_{M2} ，互感电压的有效值为

$$U_{M2} = 4.44fN_2\Phi_m$$

式中， N_2 为二次绕组匝数。

副边由于开路而电流等于零，因此空载时副边不存在损耗， $U_{20} = U_{M2}$ 。

这样，我们就可得到变压器空载情况下原边、副边电压的比值为

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{U_{L1}}{U_{M2}} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-1)$$

式中， k 是变压器的变压比，简称变比。当 $k > 1$ 时为降压变压器，当 $k < 1$ 时为升压变压器。

(二) 变压器的负载运行与变换电流

图 1-5 所示为变压器的负载运行原理图。变压器在负载运行状态下，副边感应电压

U_2 将在负载回路中激发电流 I_2 。 I_2 的大小和相位主要取决于负载的大小和性质，因此常把 I_2 称为负载电流。

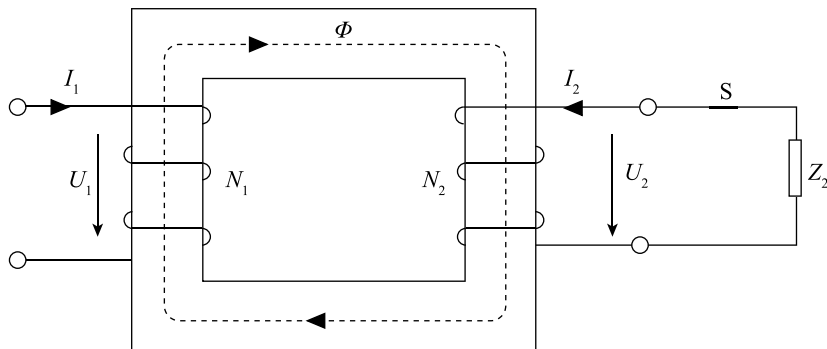


图 1-5 变压器的负载运行

在变压器负载运行时的磁通势平衡方程式 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_{10} N_1$ 中，由于激励电流 $\dot{I}_{10}$ 很小，往往可忽略不计，因此 $\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2$ ，一、二次绕组电流有效值关系为

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-2)$$

所以，当变压器额定运行时，一、二次绕组电流之比，近似等于其匝数比的倒数。改变一、二次绕组的匝数，可以改变一、二次绕组电流的比值，起到电流变换的作用。

(三) 变压器的变换阻抗作用

在图 1-5 中， $|Z_2| = \frac{U_2}{I_2}$ ，原边输入等效阻抗 $|Z_1| = \frac{U_1}{I_1}$ 。把前面的变压器电压、电流变换关系式代入到原边输入等效阻抗公式中可得：

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1} = k^2 \frac{U_2}{I_2} = k^2 |Z_2| \quad (1-3)$$

式中的 Z_2 称为变压器副边阻抗，显然，通过改变变压器的变比，可以达到阻抗变换的目的。

三、变压器的应用与分类

在电力系统中，变压器是输配电能的主要电气设备。三相变压器的输出容量 $S_N = \sqrt{3} U_{1N} \times I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} \times I_{2N}$ (三相)，可见在同等容量的情况下电压 U 越高，线路电流 I 越小，则输电线路上的压降和功率损耗也就越小，同时还可以减小输电线的截面积，节省材料，达到减小投资和降低运行费用的目的。我国规定高压输电线路电压为 110kV、200kV、330kV 与 500kV 等几种，但发电厂的交流发电机受绝缘和制造技术上的限制，难以达到这么高的电压，因此发电机发出的电压需经变压器升高后再输送。从用电方面考虑，大都采用低压用电，一方面是为了用电安全，另一方面是为了使用电设备的

绝缘等级降低,以降低制造成本,因此又必须经降压变压器降压,且往往经几次降压后才可供用户使用。在电力系统中变压器对电能的经济输送、灵活分配和安全使用具有重要意义,所以获得广泛应用。

另外,在测量系统中使用的仪用互感器,可将高电压变换成低电压,或将大电流变换成小电流,以隔离高压和便于测量;在实验室中使用的自耦变压器,可调节输出电压的大小,以满足负载对电压的不同要求;在电子线路中,有电源变压器,可用变压器来耦合电路、传递信号、实现阻抗匹配等。

变压器的种类很多,按用途不同主要分为以下几种。

- (1) 电力变压器:供输电系统中升压或降压用。
- (2) 特殊变压器:如电炉变压器、电焊变压器和整流变压器等。
- (3) 仪用互感器:如电压互感器与电流互感器。
- (4) 试验变压器:用于高压试验。
- (5) 控制用变压器:在控制线路中使用。
- (6) 调压器:用来调节电压。

四、变压器的运行特性及性能指标

要正确、合理地使用变压器,就必须了解变压器在运行时的主要特性及性能指标。

(一) 变压器的外特性

变压器接入负载后,一方面,随着负载电流 i_2 的增加,副绕组的阻抗压降也增加,使副边输出电压 u_2 随着负载电流的变化而变化。另一方面,当原边电流 i_1 随 i_2 的增加而增加时,原绕组的阻抗压降也增加。由于电源电压 u_1 不变,则原、副边感应电压 u_1 和 u_{20} 都将有所下降,当然也会影响副边的输出电压 u_2 下降。变压器的外特性就是描述输出电压 u_2 随负载电流 i_2 变化的关系,即 $u_2 = f(i_2)$ 。若把两者之间的对应关系用曲线表示出来,就可以得到如图 1-6 所示的变压器外特性。

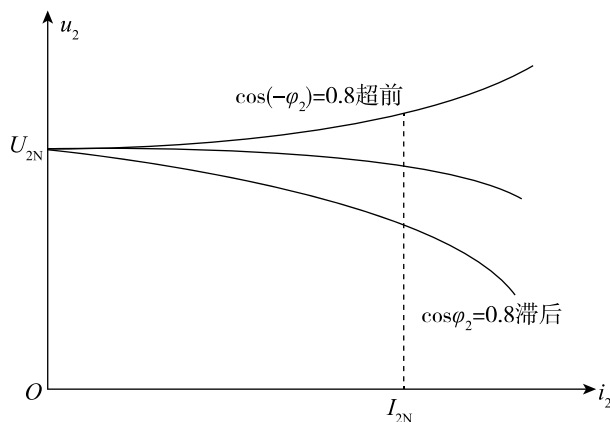


图 1-6 变压器的外特性

当负载性质为纯电阻时, 功率因数 $\cos\varphi_2 = 1$, u_2 随 i_2 的增加略有下降; 若功率因数 $\cos\varphi_2 = 0.8$ 为感性负载时, 随 i_2 的增加, u_2 下降的程度加大; 当 $\cos(-\varphi_2) = 0.8$ 为容性负载时, u_2 随 i_2 的增加而增加。由此可见, 负载的功率因数对变压器外特性的影响很大。

(二) 电压变化率

变压器外特性变化的程度, 可以用电压变化率 $\Delta U\%$ 表示。电压变化率是变压器一次绕组上加额定电压、负载功率因数一定时, 二次绕组端电压 U_2 与额定电压 U_{2N} 之差对额定电压 U_{2N} 的百分比, 即

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \quad (1-4)$$

电压变化率反映了供电电压的稳定性, 是变压器的一个重要性能指标。 $\Delta U\%$ 越小, 说明变压器二次绕组输出的电压越稳定, 因此要求变压器的 $\Delta U\%$ 越小越好。常用的电力变压器从空载到满载, 电压变化率为 $3\% \sim 5\%$ 。

(三) 变压器的损耗及效率

变压器外从电源输入的有功功率 P_1 和负载输出的有功功率 P_2 可分别计算如下:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi$$

两者之差为变压器的损耗 ΔP , 它包括铜损耗 P_{Cu} 和铁损耗 P_{Fe} 两部分, 即

$$\Delta P = P_{Cu} + P_{Fe}$$

1. 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。基本铁损耗包括铁芯中磁滞损耗和涡流损耗, 它决定于铁芯中的磁通密度的大小、磁通交变的频率、硅钢片的质量等。附加损耗则包括铁芯叠片间绝缘损伤而产生的局部涡流损耗、主磁通在变压器铁芯以外的结构部件中引起的涡流损耗等, 附加损耗为基本损耗的 $15\% \sim 20\%$ 。

变压器的铁损耗与一次绕组上所加的电源电压大小有关, 而与负载电流的大小无关。当电压一定时, 铁芯中的磁通量基本不变, 故铁损耗也就基本不变, 因此铁损耗又称为“不变损耗”。

2. 铜损耗 P_{Cu}

变压器的铜损耗也分为基本铜损耗和附加铜损耗两部分。基本铜损耗是由电流在一、二次绕组电阻上产生的损耗, 而附加铜损耗是指由漏磁通产生的集肤效应使电流在导体内分布不均匀而产生的额外损耗。附加铜损耗约占基本铜损耗的 $3\% \sim 20\%$ 。在变压器中铜损耗与负载电流的平方成正比, 所以铜损耗又称为“可变损耗”。

3. 效率

变压器的输出功率 P_2 与输入功率 P_1 之比称为变压器的效率 η , 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \% = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \times 100 \% = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \times 100 \% \quad (1-5)$$

变压器没有旋转部件，不像电机那样有机械损耗存在，因此变压器的效率一般都比较高，中小型电力变压器的效率在 80 % 以上，大型电力变压器的效率可达 95 % 以上。

(四) 变压器的铭牌及额定值

1. 变压器铭牌

为了使变压器安全、经济、合理地运行，同时让用户对变压器的性能有所了解，制造厂家对每一台变压器都安装了一块铭牌，上面标明了变压器型号及各种额定数据，只有理解铭牌上各种数据的含义，才能正确地使用变压器。图 1-7 所示为某三相电力变压器的铭牌。

三相电力变压器					
型 号	S9-500/10			电压 (V)	
产品代号	IFATO、710、022			高压	低压
标准代号	GB 1094.1—1996	I	+5%	10 500	400
额定容量	500kV·A	II	额定	10 000	
	3相50Hz	III	-5%	9 500	
额定效率	98.6%	连接组别 Yyn0		短路电压	4.4%
使用条件	户外式	额定温升 80℃		器 身 重	115kg
冷却方式	ONAN	总 重 量 1 779kg		出厂序号	200201061
油 重	311kg	× × 变压器厂		2002年1月	

图 1-7 某三相电力变压器的铭牌

2. 变压器的额定值

图 1-7 是一个配电站用的降压变压器，其铭牌数据中显示将 10kV 的高压降为 400V 的低压，供三相负载使用。下面具体解释一下铭牌数据中的主要参数。

(1) 型号。产品中的 S 表示三相变压器，9 为设计序号，500 表示变压器的额定容量为 500kV·A，斜杠后的 10 表示高压侧电压是 10kV。

(2) 额定电压。铭牌数据中的高压是高压侧额定电压 U_{1N} ，指加在一次绕组上的正常工作电压值。 U_{1N} 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 3 个电压值，可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 10 500V，偏低时则调至 9 500V，以保证低压侧的额定电压为 400V 左右。

铭牌数据中的低压是低压侧额定电压 U_{2N} ，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，为保证额定负载时输出 380V 的电压，考虑到电压调整率为 $\pm 5\%$ ，该变压器空载时二次绕组的额定电压 U_{2N} 定为 400V。在三相变压器中，额定电压均指线电压。

(3) 额定电流。额定电流是指根据变压器允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。额定容量是在额定工作状态下输出功率的保证值，指变压器的视在功率，其单位为 $\text{kV}\cdot\text{A}$ 。

单相变压器的额定容量为

$$S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N} \quad (1-6)$$

三相变压器的额定容量为

$$S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N} \quad (1-7)$$

(5) 联结组别标号。指三相变压器一、二次绕组的联结方式。其中 Y 指变压器的高压侧绕组作星形联结 (D 表示高压侧绕组作三角形联结)，y 表示低压侧绕组作星形联结 (d 表示低压侧绕组作三角形联结)，N 表示高压侧绕组作星形联结时带有中线 (n 表示低压侧绕组作星形联结时带有中线)。

(6) 阻抗电压。阻抗电压又称短路电压，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。

第二节 三相变压器的应用

在实际电力系统中，普遍采用三相制供电，故三相变压器得到广泛使用。三相变压器可以由 3 台相同的单相变压器组成，称为三相变压器组；也可以将 3 个铁芯柱用铁轭连在一起来构成 1 台三相变压器，称为三相芯式变压器。

三相变压器一次绕组上三相对称电压，在其二次绕组侧感应出三相对称电动势。当在二次绕组接上对称负载时，在二次绕组中流过三相对称电流，其大小相等，相位互差 120° 。因此，三相变压器运行时，可取其中一相来分析，也就是说，单相变压器的分析方法完全适用于三相变压器在对称负载下运行时的分析。但三相变压器有与单相变压器不同的磁路系统和电路系统。

一、三相电力变压器的结构组成

(一) 三相电力变压器的磁路系统

三相变压器可以由 3 台同容量的单相变压器组成，再按需要将一次绕组及二次绕组分别接成星形或三角形。图 1-8 所示为一、二次绕组均用星形联结的三相变压器组。三相变压器的另一种结构形式是把 3 个单相变压器合成 1 个三铁芯柱的结构形式，称

为三相芯式变压器，如图 1-9 (a) 所示。由于三相绕组接入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，故三相磁通之和等于零，即中间铁芯柱的磁通为零，因此中间铁芯柱可以省略，如图 1-9 (b) 所示，实践中为了简化变压器铁芯的剪裁及叠装工艺，均采用将 U、V、W 三个铁芯柱置于同一个平面上的结构形式，如图 1-9 (c) 所示。

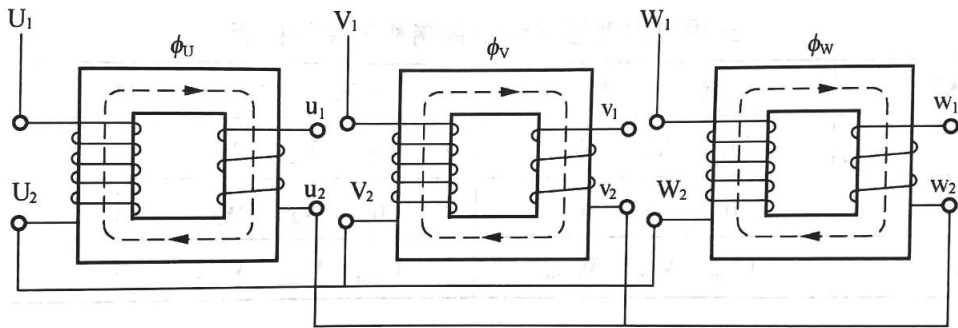


图 1-8 三相变压器组

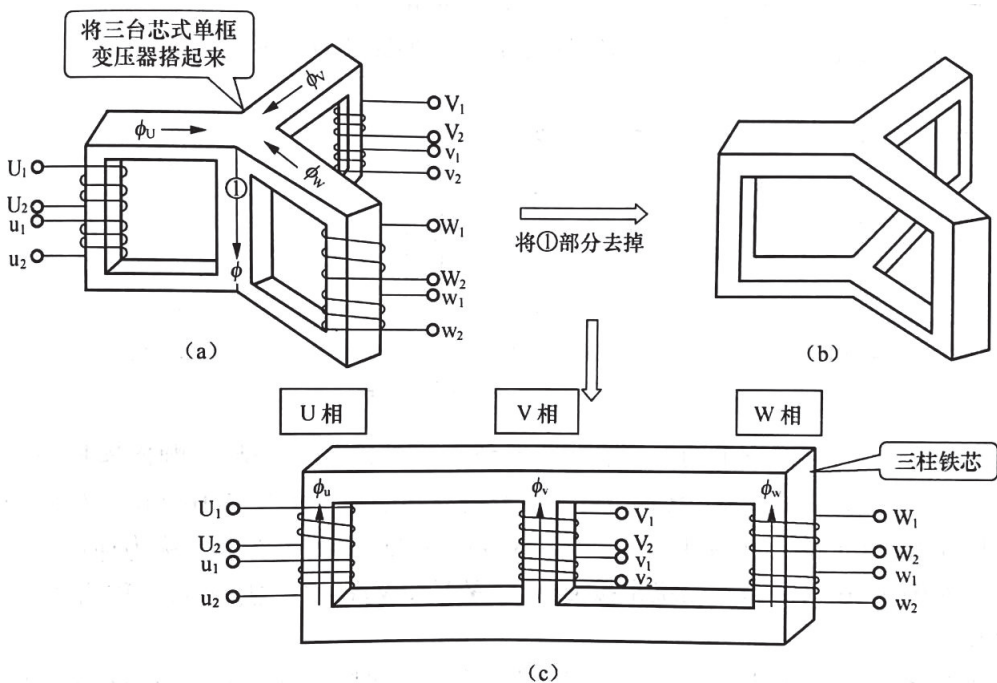


图 1-9 三相芯式变压器

(a) 三相芯式变压器；(b) 无铁芯柱三相芯式变压器；(c) 平面布置的实际芯式变压器

(二) 三相电力变压器的电路系统

三相电力变压器的电路系统是指三相变压器各相的一次绕组、二次绕组的联结情

况。为表明联结形式，对绕组的首端和末端的标志做出规定，如表 1-1 所示。

表 1-1 三相电力变压器绕组首端和末端的标志

绕组名称	首端	末端	中点
高压绕组	$U_1 \quad V_1 \quad W_1$	$U_2 \quad V_2 \quad W_2$	N
低压绕组	$u_1 \quad v_1 \quad w_1$	$u_2 \quad v_2 \quad w_2$	n
中压绕组	$U_{1m} \quad V_{1m} \quad W_{1m}$	$U_{2m} \quad V_{2m} \quad W_{2m}$	Nm

三相电力变压器无论一次侧还是二次侧绕组，均有星形和三角形两种联结方式。

星形联结是把三相绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 （或 u_2 、 v_2 、 w_2 ）联结在一起，而把它们的首端 U_1 、 V_1 、 W_1 （或 u_1 、 v_1 、 w_1 ）分别用导线引出，如图 1-10（a）所示。

三角形联结是把一相绕组的末端和另一相绕组的首端连在一起，顺次联结成一个闭合回路，然后从首端 U_1 、 V_1 、 W_1 （或 u_1 、 v_1 、 w_1 ）用导线引出，如图 1-10（b）、图 1-10（c）所示。其中，图 1-10（b）的三相绕组按 U_2W_1 、 W_2V_1 、 V_2U_1 的次序联结，称为逆序三角形联结。而 1-10（c）的三相绕组按 U_2V_1 、 W_2U_1 、 V_2W_1 的次序联结，称为顺序三角形联结。

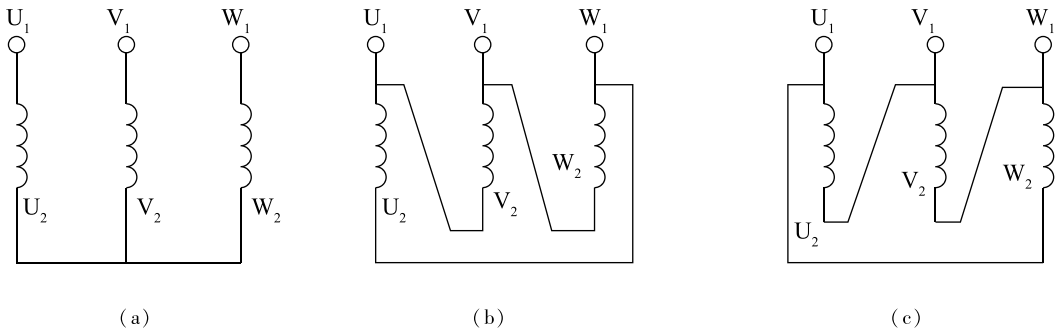


图 1-10 三相变压器三相绕组联结方法

（a）星形联结；（b）三角形联结（逆序联结）；（c）三角形联结（顺序联结）

三相变压器一、二次绕组用星形联结和三角形联结时，统一按国家标准规定：高压绕组星形联结用“Y”表示，三角形联结用“D”表示，中性线用“N”表示。低压绕组星形联结用“y”表示，三角形联结用“d”表示，中性线用“n”表示。

二、三相电力变压器的联结组别

为了制造和使用上的方便，国家规定三相双绕组电力变压器的标准联结组为 Yyn0、Yd11、YNd11、YNy0、Yy0 共五种，其中前三种最常用。各种联结组有不同的适用范围，如 Yyn0 多用于容量不超过 1 800kV·A、低压电压为 230V/400V 的配电变压器，供动力与照明负载。Yd11 用于高压侧电压 35kV 及以下、低压侧电压高于 400V 的配电变压器。YNd11 用于高压侧电压 110kV 及以上且中性点接地的大型、巨型变压器中。Yy0

用于只供给负载、容量不太大的变压器。下面以 $Yy0$ 、 $Yd11$ 为例分析其联结组向量关系。其余常用联结组如表 1-2 所示。

表 1-2 三相变压器常用联结组

三相绕组接线图				
联结组简明表示				
联结组	$Yy0$	$Yy6$	$Yd1$	$Yd5$

1. $Yy0$ 联结组

图 1-11 (a)、图 1-11 (b)、图 1-11 (c) 为三相变压器 $Yy0$ 联结组的接线图、向

量图及简明表示。在图 1-11 (a) 的接线图中, 高压侧、低压侧绕组都按星形联结, 且同名端都在首端。按联结组标号确定方法步骤如下。

(1) 在图 1-11 (a) 中标出高、低压绕组相电动势 $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ 与 $\dot{E}_a$ 、 $\dot{E}_b$ 、 $\dot{E}_c$ 的正方向。

(2) 在图 1-11 (b) 中画出高压绕组的电动势相量图, 将相量图的 A 点放在钟面的“12”处。

(3) 根据低压绕组的 $\dot{E}_a$ 与 $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_b$ 与 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_c$ 与 $\dot{E}_C$ 同相位, 通过画平行线作出低压侧的电动势相量图。

(4) 把低压侧相量图移向高压侧相量图, 并使两者几何中心重合。

(5) 自几何中心向 a 点引一连线并延伸, 使其所指钟面序数为“0”(即“12”), 确定该联结组标号为“0”, 即为 Yy0 联结组。

图 1-11 (c) 为 Yy0 联结组的简明表示。Yy0 联结组表明线电动势 $\dot{E}_{ab}$ 与 $\dot{E}_{AB}$ 同相位。

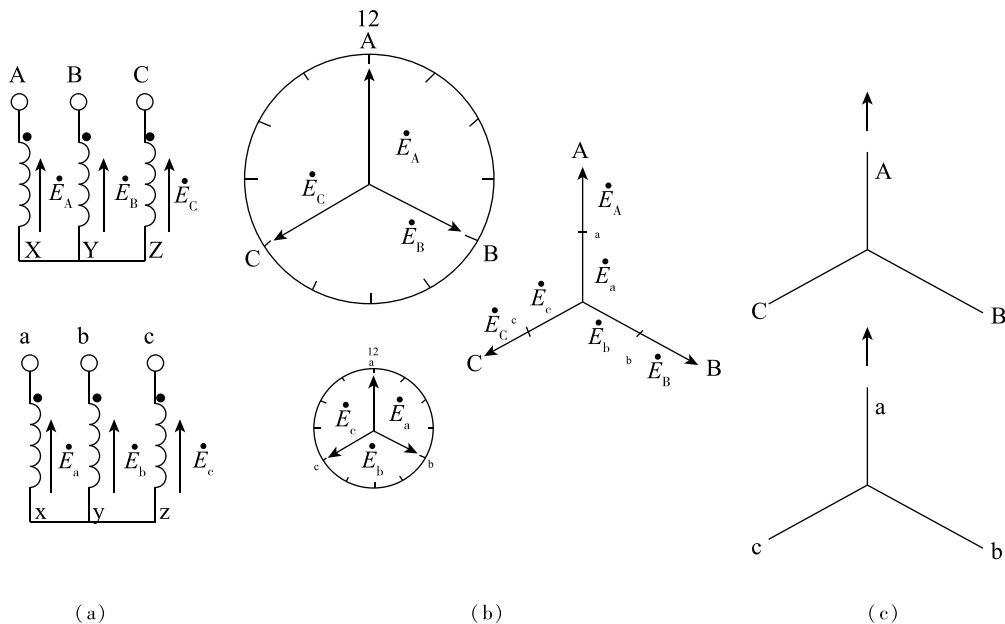


图 1-11 Yy0 联结图

(a) 接线图; (b) 向量图; (c) 简明表示

2. Yd11 联结组

图 1-12 (a)、图 1-12 (b)、图 1-12 (c) 为 Yd11 联结组的接线图、向量图及简明表示。在图 1-12 (a) 中, 高压绕组为星形联结, 低压绕组为三角形逆序联结, 且同名端同时作为首端。

图 1-12 (b) 中的高压侧相量图与图 1-11 (b) 中的高压侧相量图一样。低压绕组的 $\dot{E}_a$ 与 $\dot{E}_A$ 同相位, 所以在低压侧的相量图中 $\dot{E}_a$ 与 $\dot{E}_A$ 平行且方向一致, 同时又因是三角形逆序联结, 所以 $\dot{E}_a = \dot{E}_{xa} = \dot{E}_{ca}$, $\dot{E}_b = \dot{E}_{yb} = \dot{E}_{ab}$, $\dot{E}_c = \dot{E}_{zc} = \dot{E}_{bc}$ 。低压侧相量图如图 1-

12 (b) 所示, 把低压侧相量图移向高压侧相量图, 并使两者几何中心重合, 自几何中心向 a 点引一连线并延伸, 使其所指钟面序数为 “11”, 确定该联结组标号为 “11”, 即为 Yd11 联结组。图 1-12 (c) 所示为 Yd11 联结组的简明表示。

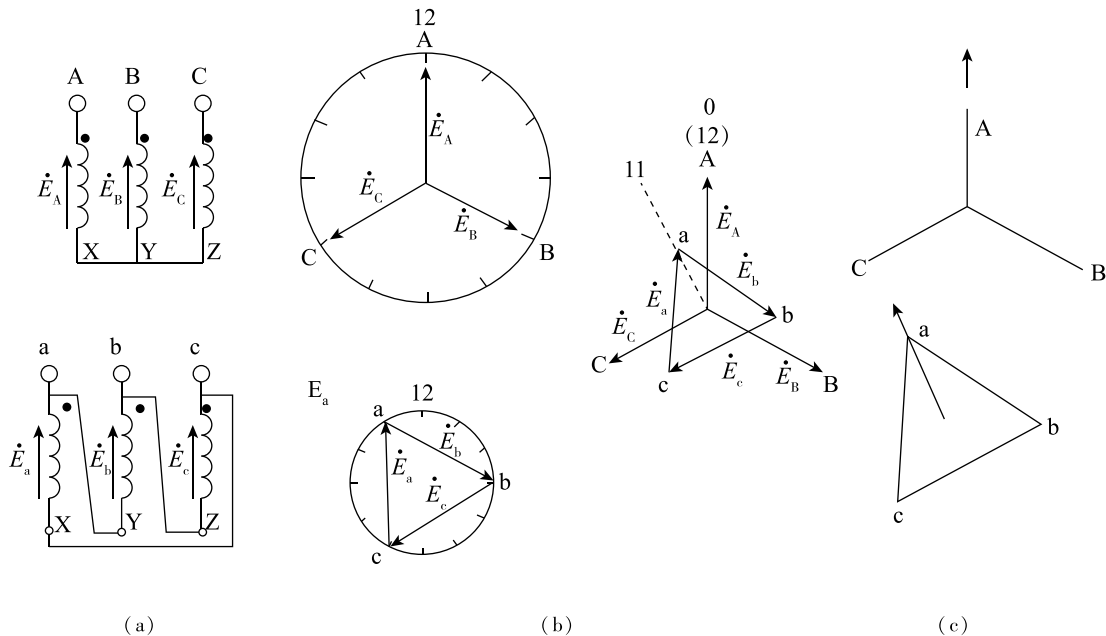


图 1-12 Yd11 联结图

(a) 接线图; (b) 向量图; (c) 简明表示

三、三相电力变压器并联运行

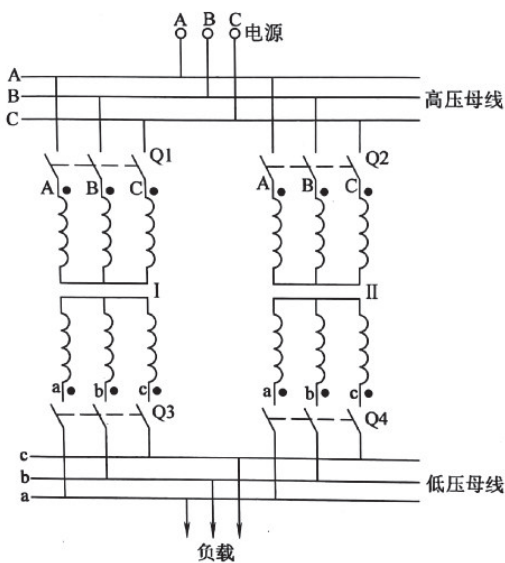


图 1-13 三相 Yy0 联结组变压器的并联运行

(一) 三相电力变压器的并联运行的目的

变压器的并联运行是指多台变压器的一、二次绕组分别并联到一、二次公共母线上, 同时对负载供电的运行方式, 如图 1-13 所示。供配电技术中常常采用变压器的并联运行方式, 目的是提高供电的可靠性和变压器运行的经济性。

例如, 某工厂变电所采用两台变压器并联运行时, 如果其中一台变压器发生故障需要检修, 此时只要将其从电网中切除, 另一台变压器仍能正常供电, 从而提高了供电的可靠性。

(二) 三相电力变压器并联运行的条件

为了保证并联运行的变压器在空载时并联回路没有环流，负载运行时各变压器的负荷分配与容量成正比，并联运行的变压器必须满足以下条件。

- (1) 并联运行的各台变压器额定电压应相等，即各台变压器的电压比应相等。
- (2) 并联运行的各台变压器联结组必须相同。
- (3) 并联运行的各台变压器短路阻抗应相等。

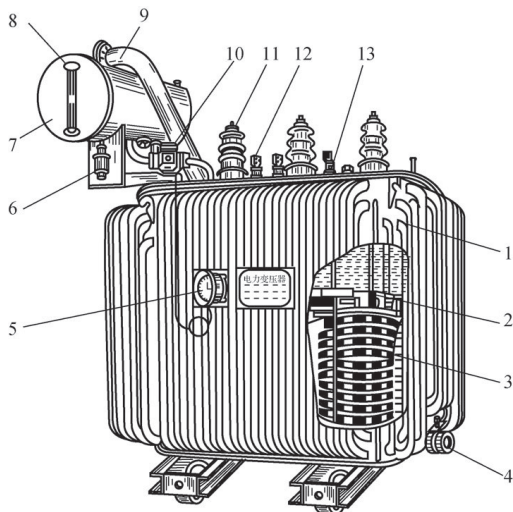
若将变比不同的变压器并联运行，二次侧电压将造成不平衡，空载时就会因电压差而出现环流，变比相差越大，环流也越大，从而影响到变压器容量的合理分配，因此并联运行的变压器，其变比不允许超过 $\pm 5\%$ 。

如果并联变压器的联结组别标号不同，就会在并联运行的回路中产生环流，而且此环流通常是额定电流的几倍，这么大的电流将使变压器很快烧坏。因此，联结组别标号不同的变压器绝不能并联运行。

如果并联运行的变压器短路电压不同，由于负载电流与短路电压成反比，易造成负载分配不合理。因此，短路电流差值不允许超过 $\pm 10\%$ 。

四、三相电力变压器的主要部件

三相电力变压器主要部分是铁芯和绕组，除此之外，三相变压器还有其他配件，如油箱、储油柜以及绝缘套管、分接开关和气体继电器等部件组成。在电力系统中应用最广泛的是油浸式电力变压器，如图 1-14 所示。



1—油箱；2—铁芯；3—线圈；4—放油阀门；5—信号式温度计；6—吸湿器；7—储油柜；
8—油表；9—安全气道；10—气体继电器；11—高压套管；12—低压套管；13—分接开关。

图 1-14 油浸式电力变压器

1. 油箱

油箱是变压器的外壳，油箱内充满了绝缘性能良好的变压器油，铁芯和绕组安装浸放在油箱内，靠纯净的变压器油对铁芯和绕组起绝缘和散热作用。

2. 储油柜

当变压器的体积随着油温膨胀或缩小时，储油柜起着储油及补油的作用，以保证油箱内充满变压器油。储油柜侧面装有一个油位计，从油位计中可以监视油位的变化。

3. 吸湿器

吸湿器由一根铁管和玻璃容器组成，内装硅胶等干燥剂。当储油柜内的空气随变压器油的体积膨胀或缩小时，排除或吸入的空气都经过吸湿器，吸湿器内的干燥剂吸收空气中的水分，对空气起到过滤作用，从而保持变压器油的清洁。

4. 防爆管

防爆管又称喷油管，装于变压器顶盖上，喇叭形的管子与储油柜或大气连通，管口由薄膜封住。当变压器内部有故障时，油温升高，油分解产生大量气体，使油箱内压力剧增。这时防爆管薄膜破碎，油及气体由管口喷出，防止变压器的油箱爆炸或变形。

5. 绝缘套管

变压器的各侧绕组引出线必须采用绝缘套管，以便联结各侧引线。套管有纯陶瓷、充油和电容等不同形式。

6. 散热器

散热器又称冷却器，其形式有扇形、圆形和排管等。当变压器上层油温与下层油温产生温差时，通过散热器形成油的对流，经散热器冷却后流回油箱，起到降低油温的作用。为了提高变压器油的冷却效果，常采用风冷、强油风冷和强油水冷等措施。散热器的散热面积越大，散热效果越好。

7. 分接开关

分接开关是调整电压比的装置。双绕组变压器的一次绕组及三绕组变压器的一、二次绕组一般有3~5个分接头位置，操作部分装于变压器顶部，经传动杆伸入变压器的油箱。3个分接头的中间分接头2为额定电压的位置，相邻分接头电压相差 $\pm 5\%$ ；多分接头的变压器相邻分接头电压相差 $\pm 25\%$ ，根据系统运行的需要，按照指示的标记，来选择分接头的位置。

8. 气体继电器

气体继电器是变压器的主要保护装置，装在变压器的油箱和储油柜的联结管上。当变压器的内部出现故障时，气体继电器上接信号回路，下接分接开关的跳闸回路。

除上述部分外，变压器还有温度计、吊装环、入孔支架等附件。

五、三相电力变压器台数的选择、容量的确定及过负荷能力

(一) 电力变压器台数的选择

在选择电力变压器时，应选用低损耗节能型变压器，如 S9 系列或 S10 系列。对于安装在室内的电力变压器，通常选择干式变压器；如果变压器安装在多尘或有腐蚀性气体严重影响的场所，一般需选择密闭型变压器或防腐型变压器。台数的选择原则如下。

(1) 满足用电负荷对可靠性的要求。在有一、二级负荷的变电所中，宜选择两台主变压器，当在技术经济上比较合理时，主变压器也可选择多于两台。三级负荷一般选择一台主变压器，如果负荷较大时，也可选择两台主变压器。

(2) 负荷变化较大时，宜采用经济运行方式的变电所，可考虑采用两台主变压器。

(3) 降压变电所与系统相连的主变压器选择一般不超过两台。

(4) 在选择变电所主变压器台数时，还应适当考虑负荷的发展，留有扩建增容的余地。

(二) 变压器容量的确定

1. 单台变压器容量的确定

单台变压器的额定容量 S_N 应能满足全部用电设备的计算负荷 S_e ，留有余量，并考虑变压器的经济运行，即

$$1.15S_e \leq S_N \leq 1.4S_e \quad (1-8)$$

2. 两台主变压器容量的确定

装有两台主变压器时，每台主变压器的额定容量 S_N 应同时满足以下两个条件。

(1) 当任意一台变压器单独运行时，应满足总计算负荷的 60%~70% 的要求，即

$$60\% S_e \leq S_N \leq 70\% S_e \quad (1-9)$$

(2) 当任意一台变压器单独运行时，应能满足全部一、二级负荷总容量的需求，即

$$S_N \geq S_{Ie} + S_{IIe} \quad (1-10)$$

3. 考虑负荷发展留有一定的容量

通常变压器容量和台数的确定与工厂主接线方案相对应，因此在设计主接线方案时，还要考虑到用电单位对变压器台数和容量的要求。

(三) 电力变压器的过负荷能力

变压器为满足某种运行需要而在某些时间内允许超过其额定容量运行的能力称为过负荷能力，变压器的过负荷通常可分为正常过负荷和事故过负荷两种。

1. 变压器的正常过负荷能力

电力变压器运行时的负荷是经常变化的，日常负荷曲线的峰谷差可能很大。根据等值老化原则，电力变压器可以在一小段时间内允许超过额定负荷运行。

变压器的正常过负荷能力，是以不牺牲变压器正常寿命为原则来制定的，同时还规定过负荷期间负荷和各部分温度不得超过规定的最高限值。我国的限值：绕组最热点温度不得超过 140°C ，自然油循环变压器负荷不得超过额定负荷的 1.3 倍，强迫油循环变压器负荷不得超过额定负荷的 1.2 倍。

2. 变压器的事事故过负荷

事故过负荷又称为短时急救过负荷。当电力系统发生事故时，保证不间断供电是首要任务，加速变压器绝缘老化是次要的。所以，事故过负荷和正常过负荷不同，它是以牺牲变压器寿命为代价的。事故过负荷时，绝缘老化率允许比正常过负荷时高得多，即允许较大的过负荷，但我国规定绕组最热点的温度仍不得超过 140°C 。

考虑到夏季变压器的典型负荷曲线，其最高负荷低于变压器的额定容量时，每低 1°C 可允许过负荷 1%，但以过负荷 15% 为限，正常过负荷允许最高不得超过额定容量的 20%。

第三节 其他用途的变压器

在实际工业生产中，除了前面介绍的单相变压器和三相电力变压器外，还有各种用途的特殊变压器，本节仅介绍常用的自耦变压器、仪用互感器和弧焊变压器的工作原理及特点。

一、自耦变压器

（一）自耦变压器工作原理

普通双绕组变压器，其一、二次绕组是两个独立的绕组，它们之间只有磁的耦合，而没有电的直接联系。自耦变压器的结构特点是一、二次绕组共用一个绕组，如图 1-15 所示。对于降压自耦变压器，一次绕组的一部分充当二次绕组；对于升压自耦变压器，二次绕组的一部分充当一次绕组。因此自耦变压器一、二次绕组之间既有磁的联系，又有电的直接联系。将一、二次绕组共用部分的绕组称为公共绕组。下面以降压自耦变压器为例分析其工作原理。图 1-15 中， N_1 为自耦变压器一次绕组匝数， N_2 为二次绕组匝数。

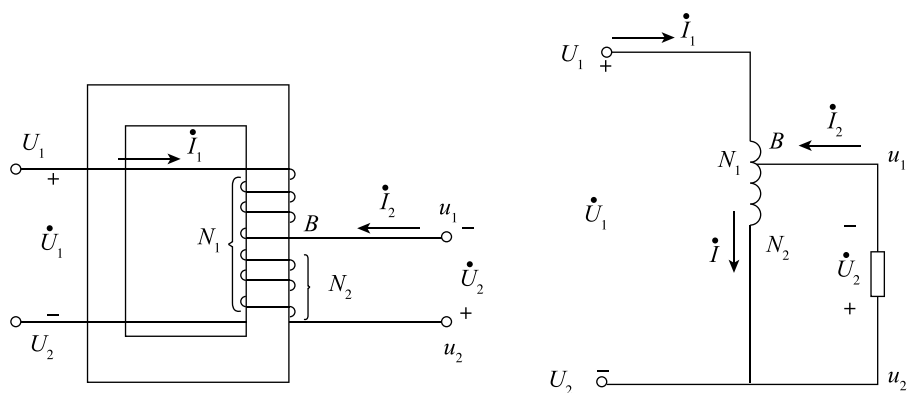


图 1-15 自耦变压器工作原理

对于普通双绕组变压器，通过电磁感应，将电能从一次侧传递到二次侧，而对于自耦变压器，除通过电磁感应传递能量外，还由于一次侧和二次侧之间电路相通，也会直接传递一部分能量。当在一次绕组上加电源电压 U_1 时，由于主磁通 Φ_m 的作用，在一、二次绕组中产生感应电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ ，其有效值为

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$$

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$$

如不计绕组的漏阻抗，则自耦变压器的电压比 k 为

$$k = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

由上式可知，改变自耦变压器二次绕组的匝数 N_2 ，便可调节其输出电压的大小。

(二) 自耦变压器的特点

自耦变压器具有结构尺寸小、材料省、成本低、损耗小、效率高等优点，而且自耦变压器的电压比 k 越接近 1，其优越性越显著，所以自耦变压器一般用于电压比 $k < 2$ 的场合。

由于自耦变压器一次侧和二次侧之间有电的直接联系，一次侧的电气故障会波及二次侧，也可能发生把高电压引入低压绕组的危险事故，因此要求自耦变压器在使用时必须正确接线，外壳必须接地，且在低压侧使用的电气设备应有高压保护设备，以防过电压，此外还应有短路保护措施。

自耦变压器有单相的也有三相的，一般三相自耦变压器采用星形接法，较大容量的三相异步电动机减压启动时，可用三相自耦变压器来实现减压启动，以减小启动电流。图 1-16 所示为三相自耦变压器原理。将自耦变压器的抽头做成滑动触头，用以平滑地调节自耦变压器二次绕组电压，这种自耦变压器称为自耦调压器。图 1-17 所示为常用的环形铁芯单相自耦调压器原理。自耦调压器常用来调节试验电压的大小。

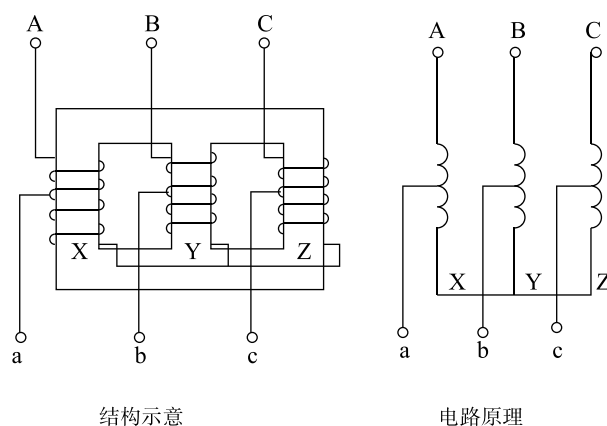


图 1-16 三相自耦变压器原理

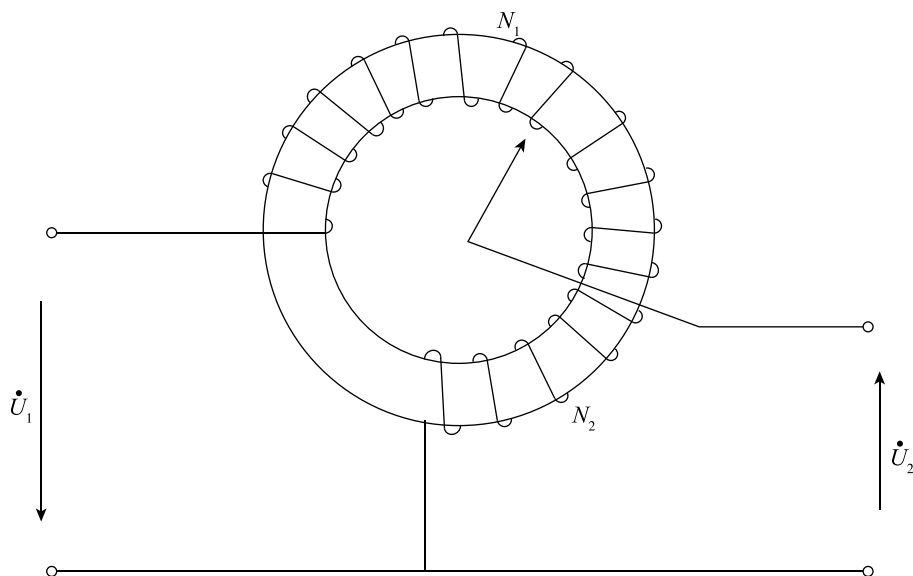


图 1-17 常用的环形铁芯单相自耦调压器原理

二、仪用互感器

在电力系统中，电压可高达几百兆伏，电流可大到几万安培，如此大的电量要直接用于检测或取作继电保护装置用电是不可能的。此时，可用特种变压器将一次侧的高电压或大电流按比例缩小为二次侧的低电压或小电流，以供测量或继电保护装置使用。这种专门用来传递电压或电流信息，以供测量或继电保护装置使用的特种变压器，称为仪用变压器，又称为仪用互感器。

仪用互感器按其用途不同，可分为电压互感器和电流互感器两种，其中用于测量高电压的互感器称为电压互感器，用于测量大电流的互感器称为电流互感器。

(一) 电压互感器

电压互感器实质上是一种变压比较大的降压变压器，其原理如图 1-18 所示。

电压互感器的一次绕组并联于被测电路中，二次绕组接电压表或其他仪表，如功率表的电压线圈。使用电压互感器时应注意以下几点。

(1) 二次侧不允许短路，否则短路电流很大，会将烧坏互感器。

(2) 互感器的铁芯和二次绕组的一端必须可靠接地，以防一次高压绕组绝缘损坏时，铁芯和二次绕组带上高压而引起触电。

(3) 电压互感器有一定的额定容量，使用时不宜接过多的仪表，否则将影响互感器的测量精度。

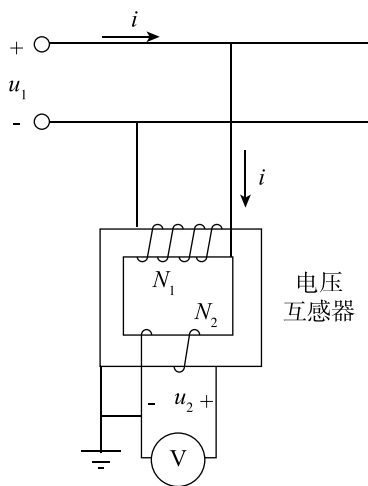


图 1-18 电压互感器的原理

(二) 电流互感器

电流互感器的原理如图 1-19 所示。电流互感器的一次绕组是由一匝或几匝截面积较大的导线构成的，直接串联在被测电路中，流过的是被测电流。电流互感器的二次绕组的匝数较多，且与电流表或功率表的电流线圈构成闭合回路。电流表和其他仪表的电流线圈阻抗很小，因此电流互感器运行时，接近于变压器短路运行。

使用电流互感器时，应注意以下几点。

(1) 电流互感器运行时二次绕组绝不允许开路。若二次绕组开路，则电流互感器成为空载运行状态，此时一次绕组中流过的大电流全部成为励磁电流，铁芯中的磁通密度猛增，磁路产生严重饱和，一方面铁芯过热而烧坏绕组绝缘，另一方面二次绕组中因匝数很多，将产生很高的感应电压，可能将绝缘击穿，危及二次绕组中的仪表及操作人员的安全。为此，电流互感器的二次绕组电路中绝不允许装熔断器。在电流互感器运行时，若要拆下电流表，应先将二次绕组短路。

(2) 电流互感器的铁芯和二次绕组的一端必须可靠接地，以免绝缘损坏时，高压侧电压传到低压侧，危及仪表及人身安全。

(3) 电流表内阻抗应很小，否则将影响测量精度。

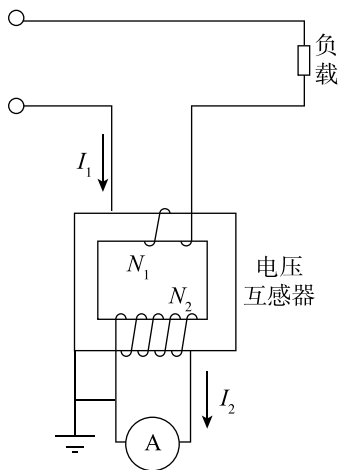


图 1-19 电流互感器的原理

三、弧焊变压器

交流弧焊机（见图 1-20）在生产实际中应用很广泛，它实质上是一种特殊的降压变

压器,也称为电焊变压器或弧焊变压器。电弧焊是靠电弧放电的热量来熔化焊条和金属以达到焊接金属的目的。为保证焊接质量和电弧燃烧的稳定性,对弧焊变压器要求如下。

(1) 具有较高的起弧电压。起弧电压应达到 $60\sim 80\text{V}$, 达到额定负载时约为 30V 。

(2) 起弧以后,要求电压能够迅速下降,同时在短路时(如焊条碰到工件上,副边输出电压为零)次级电流也不要过大,一般不超过额定值的两倍。也就是说,弧焊变压器要具有陡降的外特性,如图 1-21 所示。

(3) 为了适应不同的焊接要求,要求弧焊变压器的焊接电流能够在较大的范围内进行调节,而且工作电流要比较稳定。

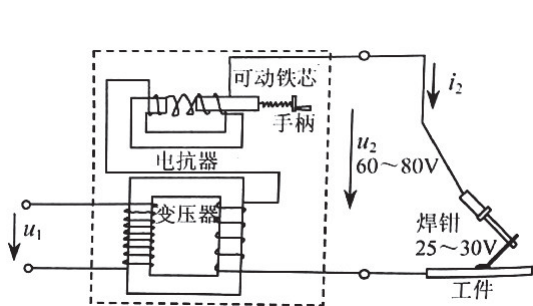


图 1-20 交流电焊机示意图

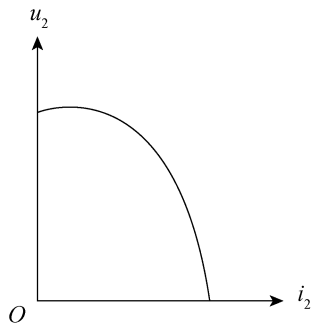


图 1-21 弧焊变压器的外特性

为满足上述要求,交流电焊机的电源由一个能提供大电流的变压器和一个可调电抗器组成。当工作时,焊件内有电流通过,形成电弧。电抗器起限流作用,并产生电压降,使焊枪与焊件间的电压降低,形成陡降的外特性。为了维持电弧,工作电压通常为 $25\sim 30\text{V}$ 。当电弧长度变化时,电流变化比较小,可保证焊接质量和电弧的稳定。为了满足大小不同、厚度不同的焊件对焊接电流的要求,可调节电抗器活动铁芯的位置,即改变电抗器磁路中的空气隙,使电抗随之改变,以调节焊接电流。电抗器的铁芯有一定的空气隙,通过转动螺杆可以改变空气隙的长短。当空气隙加长后,磁阻增大,由磁路欧姆定律可知,此时的电流增大;当空气隙减小时,工作电流随之减小。由此可见,要获得不同大小的焊接电流,通过改变空气隙的长短即可实现。通常手工电弧焊使用的电流范围是 $50\sim 500\text{A}$ 。

问题与思考

1. 电力变压器主要由哪些部分组成? 变压器在供配电技术中起什么作用?
2. 什么叫变压器, 变压器的基本工作原理是什么?
3. 变压器并联运行的条件有哪些?
4. 单台变压器容量确定的主要依据是什么? 两台变压器的容量应如何确定?
5. 电压互感器和电流互感器在使用时应注意什么?
6. 有一台三相变压器, $S_N = 3\,000\text{kV}\cdot\text{A}$, $U_1 = 10\text{kV}$, $U_2 = 0.4\text{kV}$, Y、y 联结, 求 I_1 及 I_2 。