

第2章

变 压 器

变压器是将某一种电压、电流、相数的交流电能转变成另一种电压、电流、相数的交流电能的电器。本章介绍一些中、小型变压器的技术资料及其计算方法,供修理或制造时参考。

2-1 变压器的基本知识

一、变压器的基本原理与额定数据

图2-1为双圈式单相变压器的原理图。在闭合的铁芯上绕有两组绕组,其中接受电能的一侧叫做一次侧绕组,输出电能的一侧叫做二次侧绕组。变压器的基本工作原理是电磁感应原理。

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

式中: E_1 ——一次侧绕组感应电动势;
 E_2 ——二次侧绕组感应电动势;
 W_1 ——一次侧绕组的匝数;
 W_2 ——二次侧绕组的匝数。

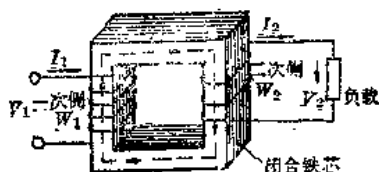


图2-1 单相变压器的原理图

如果忽略绕组本身压降,则可认为 $V_1 \approx E_1$, $V_2 \approx E_2$, 于是

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

这个关系说明了一、二次侧电压之比近似等于一、二次侧绕组匝数之比。这个比值称为变压器的变压比。

变压器通过电磁耦合关系将一次侧的电能输送到二次侧,假如两侧绕组没有漏磁,功率输送过程中又没有任何损失(无损耗)的话,那末,由能量守恒原理可知输出的功率应该等于输入功率,即

* 漏磁是没有经过铁芯而闭合的那部分磁通。

$$V_2 I_2 = V_1 I_1$$

或

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} \approx \frac{W_2}{W_1}$$

即变压器的一、二次侧电流之比等于一、二次侧绕组匝数的反比。

以上是变压器计算的基本关系式。

总之，一台变压器如果工作电压设计得越高，绕组匝数就要绕得越多，通过绕组内的电流却越小，导线截面可选用得越细。反之，工作电压设计得越低，绕组匝数就越少，通过绕组的电流则越大，导线截面就要选得越粗。

变压器外壳上附有铭牌数据，它表示其额定工作状态下的性能。一般常用的额定数据如下：

额定容量：表示在额定使用条件下变压器的输出能力，以视在功率千瓦表示。对三相变压器而言，额定容量是三相容量之和。

额定电压：表示变压器各绕组在空载时额定电压值，以伏或千伏表示。在三相变压器中，如没有特殊说明，额定电压都是指线电压。

额定电流：变压器各绕组在额定负载情况下的电流值，以安表示。在三相变压器中，如没有特殊说明，都是指线电流。

连接组标号：代表变压器各个相绕组的连接法和相角关系的符号。如 Y/Y₀-12、Y/Δ-11 标号中 Y 表示星形连接，Δ 表示三角形连接，Y₀ 表示有中线引线的星形连接。各符号中由左至右代表一、二次侧绕组连接方式，数字代表二次侧与一次侧电压的相角位移。

阻抗电压降比：表示变压器通入额定电流时的阻抗电压降对额定电压之比。

温升：变压器指定部位的温度和变压器周围空气温度之差。

对变压器油面温升的限值，仅系为保证油的长期使用而不迅速老化变质所规定的数值，不可直接作为运行中变压器负载能力的依据。

电力变压器的标准容量等级及高低压的电压等级：

(1) 变压器的容量等级：5、10、20、30、50、75、100、125、180、240、320、420、560、750、1000、…(千瓦)。

10、20、30、40、50、63、80、100、125、160、200、250、315、400、500、630、800、1000、1250、1600、…(千瓦)。

(2) 变压器的高低电压等级：低压侧的电压一般采用 400/230 伏，即线电压为 400 伏、相电压为 230 伏；高压侧的电压有 3000、3150、3300、6000、6300、6600、10000、13200、35000、60000、110000、220000…(伏)。

表 2-1 变压器的型号及意义

电力变压器		调压变压器		自耦变压器	
D	单相	T	调压器	O	自耦
J	油浸	O	自耦	注: O 在前为降压 O 在后为升压	
G	干式	Y	移圈	S、D、J、	同电力
S	三相	A	感应	F、FP、Z	
F	风冷	C	接触	干式变压器	
S	三绕组	P	湿油循环	G	干式
FP	强迫风冷	X	线	Q	加强的
Z	有载	Z	中点	H	防火
SP	强油水冷	C	串级	D、S	同电力
T	成套	P、J、Z	同电力	低电压变压器	
D	移动式	矿用变压器		D	低电压
L	铝线	K	矿用变压器	S	水冷
整流变压器		D、G、S	同电力	D、J	同电力
Z	整流变压器	船用变压器		串联变压器	
K	电抗器	S	防水	C	串联
J	电力机车用	D、G	同电力	S、D、J、	同电力
S、D、J、	同电力	电阻炉用变压器		SP	
F、FP		ZU	电阻炉用	消弧线圈	
起动变压器		S、D、J、	D、J	消弧	
Q		起动	SP	同电力	同电力
S、J	同电力	电炉用变压器		X ₁	消弧
试验变压器		H	电炉	D、J	同电力
Y	试验	K	附电抗器	L	滤波
D、J、G、S	同电力	S、J、FP、	同电力	F	放大器
中频淬火用变压器		SP	同电力	C	磁放大器
B	中频	封闭电弧炉用变压器		T	调幅
G	同电力	BH	封闭电弧炉	TN	电压调整器
		S、J	同电力	TX	移相器

注: 在变压器型号后面的数字部分: 斜线的左面表示额定容量(千瓦); 斜线的右面表示一次侧的额定电压(千伏)。例如有台电力变压器 SJL-560/10, 由电力变压器项中查得为三相油浸自冷式铝线 560 千瓦、高压侧电压 10 千伏。

变压器的型号及其含义如表 2-1 所示。

二、变压器的分类和结构

1. 变压器的分类 变压器分类的方法很多,按相数可分为单相和三相两种;前者多为小容量的变压器,后者大多是较大容量的以及电力变压器等。按绕组数目分为单圈式(自耦变压器)、双圈式(一般中小型电力变压器)以及多圈式(电源变压器)。按耦合的介质可分为空芯变压器与铁芯变压器两种,目前大多为铁芯变压器。按铁芯结构分成芯式与壳式(如图 2-2)。壳式变压器的铁轭包在绕组外面,导热性能较好,但制造工艺复杂,除了很小的电源变压器外,目前已很少使用。芯式变压器绕组包在铁芯外面,制造工艺也较简单。按冷却介质不同又分为油浸变压器、干式变压器(空气冷却式)以及水冷变压器。干式变压器多用在低电压、小容量、或用在防火防爆的场合,电压较高、容量较大的变压器多用油浸式或水冷式。电力变压器大多采用油浸式(见第 10 章)。

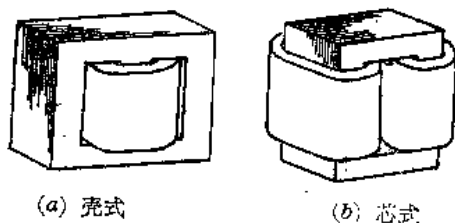
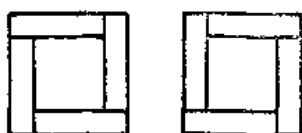


图 2-2 单相变压器铁芯结构图

2. 铁芯结构 铁芯由铁柱和铁轭两部分组成。绕组套装在铁柱上,而铁轭则用来使整个磁路闭合。为了减少铁芯磁滞及涡流损耗起见,一般都采用 D41、D42、D43-0.35~0.5 热轧硅钢片及 D310、D320、D330 等冷轧硅钢片叠成,冷轧硅钢片在导磁性能与减少损耗方面都比热轧硅钢片好得多。

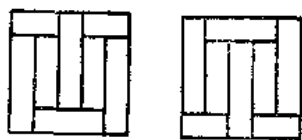
变压器铁芯一般采用交叠方式进行叠装,应使上层和下层叠片的接缝互相错开(如图 2-3、2-4)。

在微型变压器中,为了简化工艺,常采用如图 2-5 所示的叠片形状。互感器和单相小变压器(<500 瓦)还有采用长条冷轧硅钢片卷成的卷片式铁芯,如图 2-6。渐开线铁芯结构(图 2-7)是由三个铁柱和二铁轭对接装成,制造和检修较方便,材料节省,体积也将大大缩小。



(a) 第一层 (b) 第二层

图 2-3 单相变压器铁芯叠装图



(a) 第一层 (b) 第二层

图 2-4 三相变压器铁芯叠装图



(a) 山字形(或称B字形) (b) 日字形 (c) F字形

图 2-5 微型变压器的叠片

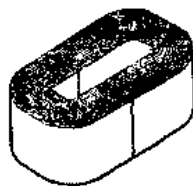


图 2-6 叠片式铁芯

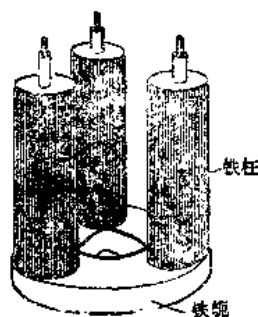
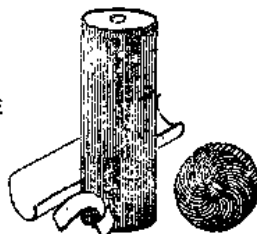


图 2-7 渐升线铁芯



铁柱的断面形状必须从简化工艺和提高利用率两方面考虑。小型变压器可以采用正方形的或长方形的铁柱的断面。较大容量的变压器,为了充分利用绕组内圆的空间,铁柱断面常采用多级阶梯形,如图 2-8 所示。当铁柱直径大于 350 毫米时,为了改善铁芯冷却,铁柱中放置油道。

铁轭的断面一般约比铁柱大 5%~10% 左右,以便减少励磁安匝和铁损。断面形状有正方形、十字形、T 字形和倒 T 字形、多级阶梯形和同级阶梯形等,如图 2-9 所示。

3. 绕组结构 有同芯式和交叠式两种,如图 2-10 所示。

多数电力变压器(1800 千瓦以下)都采用同芯式绕组,即一次侧与二次

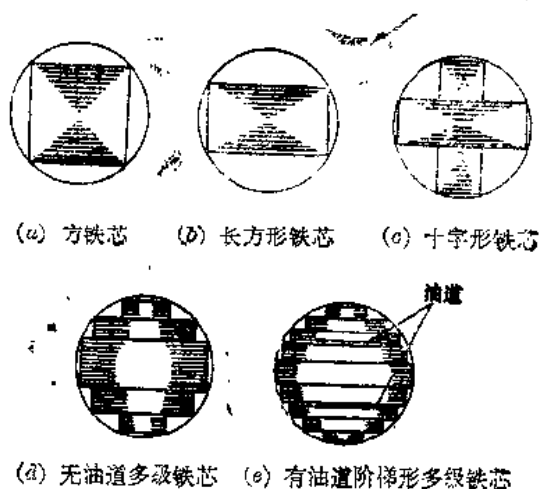


图 2-8 各种形状的铁柱断面



图 2-9 各种形状的铁轭断面

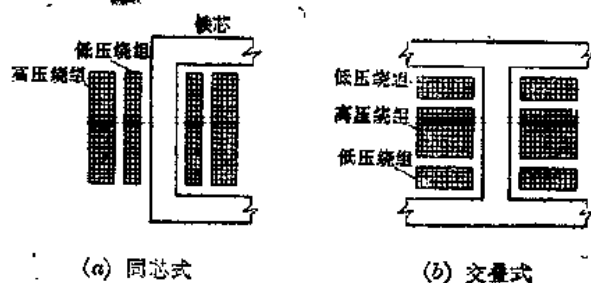


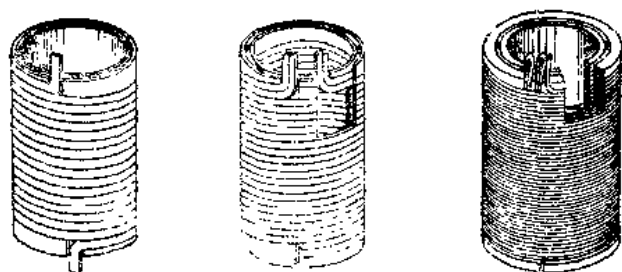
图 2-10 变压器绕组的结构

侧绕组套装在同一个铁柱上。为便于绝缘起见,一般低压侧的绕组放在里面,高压侧的绕组套在外面。但容量较大而电流也很大的变压器,由于低压绕组引出线的工艺困难,亦往往把低压侧放在高压侧的外面。交叠式绕组的高、低压绕组是互相交叠放置的,为便于绝缘,一般最上和最下的二组绕组都是低压

绕组。交叠式的主要优点是漏抗小,机械强度好,引线方便。大于400千瓦的电炉变压器绕组就是采用这样的布置。

同芯式绕组的结构简单,制造方便。按其绕组的绕制方式不同,同芯式绕组又分成圆筒式、螺旋式、分段式和连续式四种。不同的结构具有不同的电气、机械及热的特性。

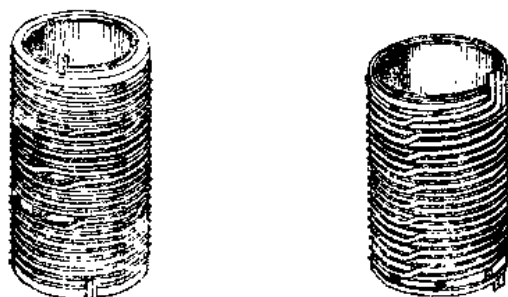
图2-11(a)、(b)都是圆筒式绕组,线匝沿高度(轴向)绕制,如螺旋形状。它制造工艺简单,但机械强度、轴向承受短路能力都较差,所以大多用在电压低于500伏、容量为10~750千瓦的变压器中。图2-11(c)为多层圆筒式绕组,用在容量为10~560千瓦,电压为10千伏及以下的变压器中。



(a) 单层筒式 (b) 扁线绕的双层筒式 (c) 圆线绕的多层筒式

图 2-11 圆筒式绕组

图2-12是螺旋式绕组,它由若干并联导线沿径向平绕,轴向线匝间有油道,并具有较大的支撑面和冷却面,所以可应用在较大电流(300安以上)的低压绕组中。为使并联导体电流均匀分配,在绕制过程中需进行换位。螺旋式绕



(a) 单螺旋

(b) 双螺旋

图 2-12 螺旋式绕组

组一般用在大于 1000 千瓦, 而不宜采用双层圆筒式绕组的变压器中。

图 2-13 是由若干单独线段串成的分段式绕组。每个线段与圆筒式绕组相同, 但比圆筒式机械强度好。因制造工艺复杂, 一般用在每柱容量为 350 千瓦变压器的高压绕组中。

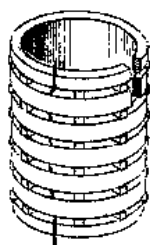


图 2-13 分段式绕组



图 2-14 连续式绕组

图 2-14 是连续式绕组。连续式绕组绕制中无焊接接头, 端部支撑面大, 冷却油道径、横通畅, 所以机械强度较好, 只是制造工艺较复杂。一般宜用在容量为 750 千瓦、电压为 6 千伏以上的大、中型变压器中。

三、变压器的连接组别

对称的三相连接, 通常有 Y 、 Δ 、 Z 三种接法, 其中常用的是现行国家标准所规定的 Y/Y_0-12 、 $Y/\Delta-11$ 、 $Y_0/\Delta-11$ 等三种。

变压器绕组连接的标记如图 2-15 所示, 其中 A 、 B 、 C 代表变压器一次侧绕组的首端, X 、 Y 、 Z 代表一次侧绕组的尾端, a 、 b 、 c 、 x 、 y 、 z 分别代表二次侧绕组的首端和尾端, $\odot$ 为同名端标记。

1. 变压器连接组的时钟表示法 各种连接组的一次侧电压与二次侧电压间的相角差, 有的为 0° , 有的为 30° 的倍数。在时钟的表面上, 每两相邻数字间有 30° 的角差, 因此采用时钟表示连接组标号较为方便。

把变压器一次侧的线电压矢量 AB 作为时钟的长针 (分针), 它固定地指向钟面数字 12 上。把二次侧相应的线电压矢量 ab 作为时钟的短针 (时针)。如果短针也指向 12, 则表示矢量 AB 与 ab 同相, 按照钟表读数为 12 点钟。这种连接方法便记为 12。例如我们经常遇到 $Y/Y-12$, 它表示一次侧绕组用星形连接, 二次侧绕组也用星形连接, 如图 2-16(a) 所示。图 (b) 为矢量图, 其一次侧线电压与相应二次侧线电压间的相角差为 0° 。

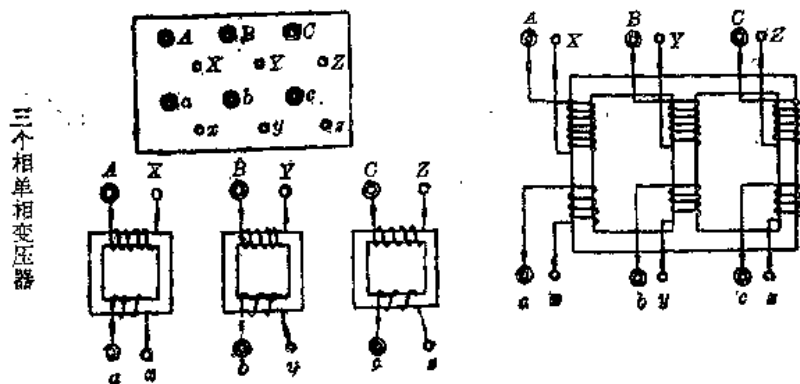


图 2-15 变压器绕组连接标记

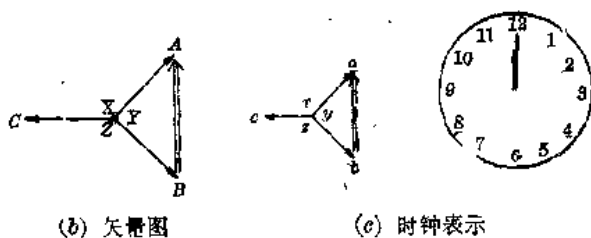
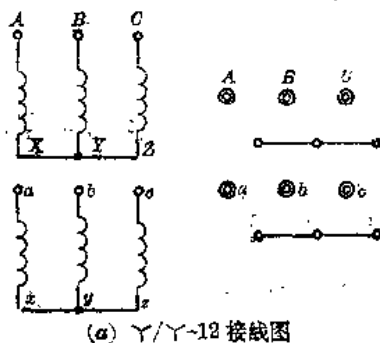


图 2-16 Y/Y-12 连接的变压器

假如把 Y/Y-12 的二次侧头尾互换(如图 2-17(a)), 那末二次侧线电压矢量 $a'b'$ 便将与一次侧线电压 AB 矢量反相, 用时钟表示时, 短针将指向钟面数字 6, 这样的连接组便记为 Y/Y-6。

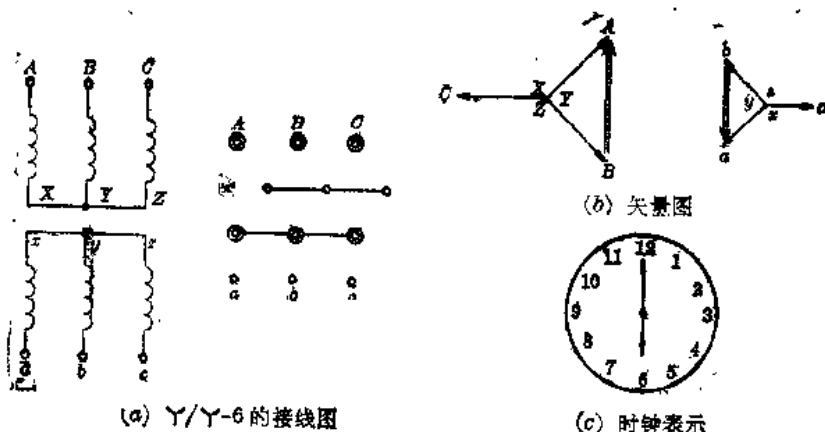


图 2-17 Y/Y-6 连接的变压器

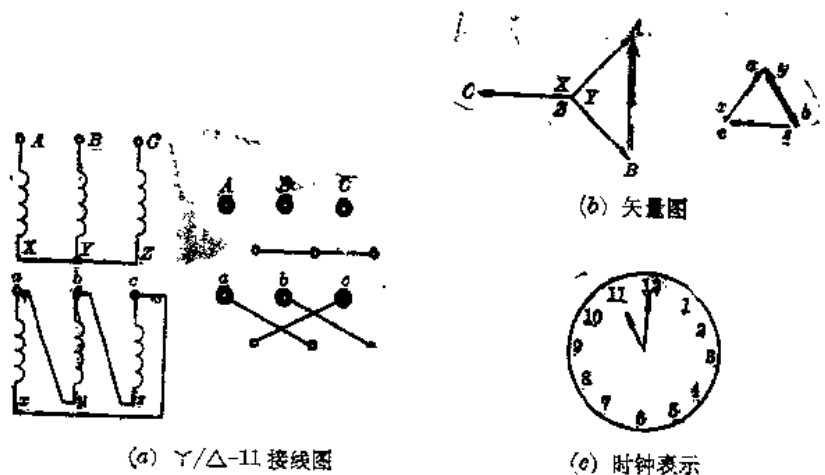


图 2-18 Y/Δ-11 连接的变压器

如果把一次侧绕组接成星形，二次侧绕组接成三角形(图 2-18(a))，那末一次侧与二次侧电压矢量 AB 与 ab 间将有 30° 的相角差。从矢量图中可以看到二次侧线电压矢量 a_1b_1 将较一次侧线电压矢量 AB 超前 30° 。用时钟表示时，短针便将指向钟面数字 11，这种连接组记为 Y/Δ-11。

假如把 Y/Δ-11 连接的变压器二次侧各绕组的头尾互换(图 2-19(a))，

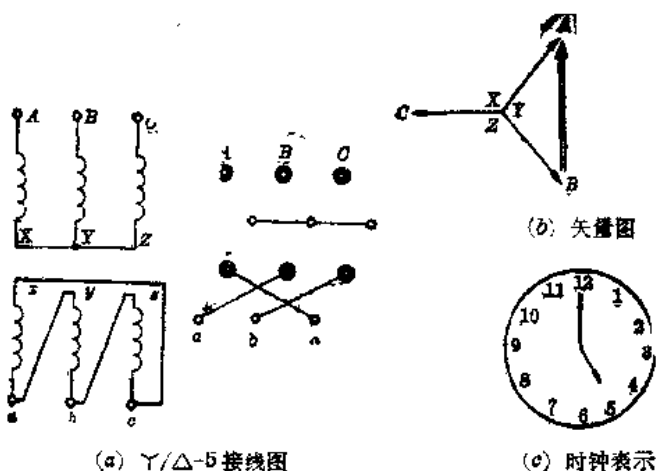


图 2-19 Y/Δ-5 连接的变压器

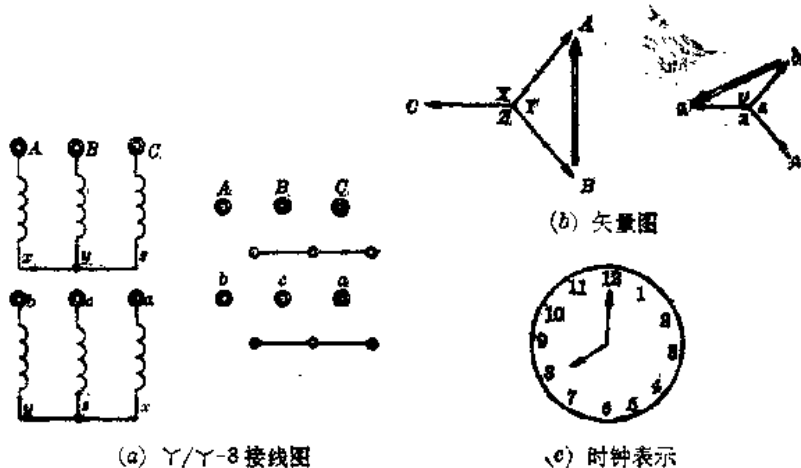


图 2-20 Y/Y-8 连接的变压器

这时二次侧线电压矢量 ab 便相应地改变了位置，短针 ab 将指向钟面数字 5，这种连接组便记为 Y/Δ-5。

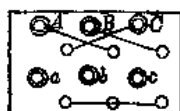
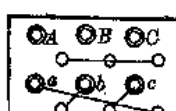
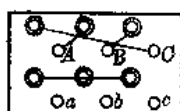
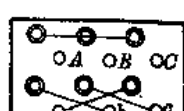
又如在 Y/Y-12 连接组中，将二次侧绕组的端点 a 改标为 b ， b 改标为 c ， c 改标为 a 使用，则可得 Y/Y-8 连接组(图 2-20)。

从以上的例子中可以看出,三相变压器由于一、二次侧绕组的端点标志互换,以及它们接成三角形或星形等连接方式不同,可得到12组48种以上的各种不同接法。

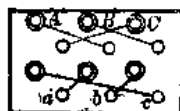
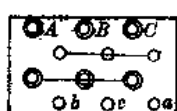
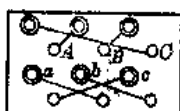
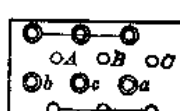
对于单相变压器,如果一次侧电压矢量 A 、 X 与二次侧电压矢量 a 、 x 为同相时,应记为 $I/I-12$,反相时,应记为 $I/I-6$ 。

2. 变压器各种组别的接线方法

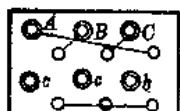
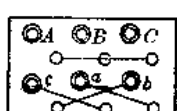
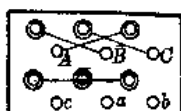
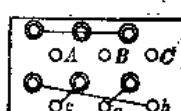
第一组

 $\Delta/Y-1(30^\circ)$  $Y/\Delta-1(30^\circ)$ 

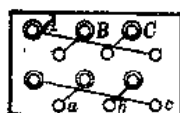
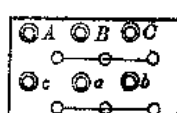
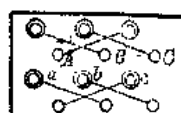
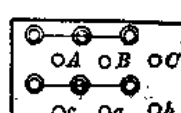
第二组

 $\Delta/\Delta-2(60^\circ)$  $Y/Y-2(60^\circ)$ 

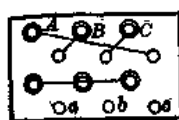
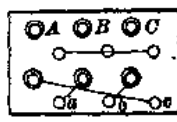
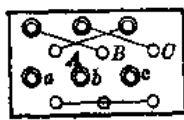
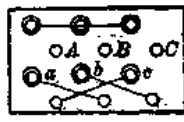
第三组

 $\Delta/Y-3(90^\circ)$  $Y/\Delta-3(90^\circ)$ 

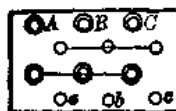
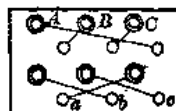
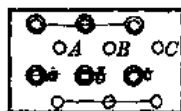
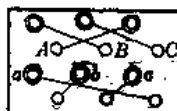
第四组

 $\Delta/\Delta-4(120^\circ)$  $Y/Y-4(120^\circ)$ 

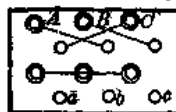
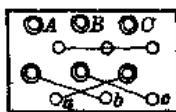
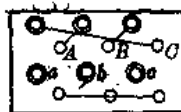
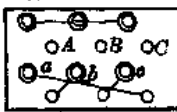
第五组

 $\Delta/Y-5(150^\circ)$  $Y/\Delta-5(150^\circ)$ 

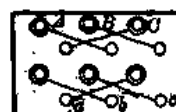
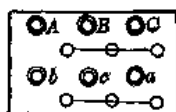
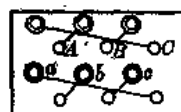
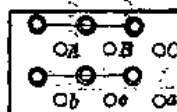
第六组

 $Y/Y-6(180^\circ)$  $\Delta/\Delta-6(180^\circ)$ 

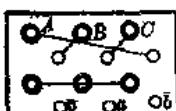
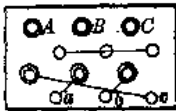
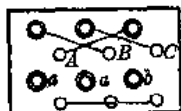
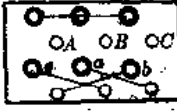
第七组

 $\Delta/Y-7(210^\circ)$  $Y/\Delta-7(210^\circ)$ 

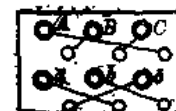
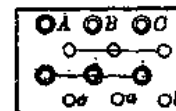
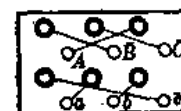
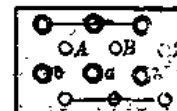
第八组

 $\Delta/\Delta-8(240^\circ)$  $Y/Y-8(240^\circ)$ 

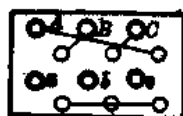
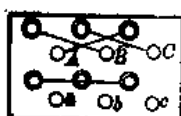
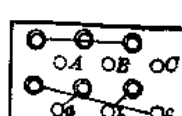
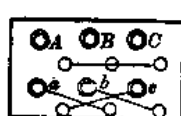
第九组

 $\Delta/Y-9(270^\circ)$  $Y/\Delta-9(270^\circ)$ 

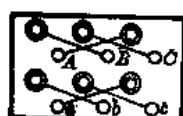
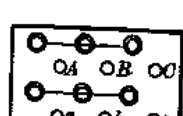
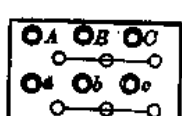
第十组

 $\Delta/\Delta-10(300^\circ)$  $Y/Y-10(300^\circ)$ 

第十一组

 $\Delta/\gamma-11(180^\circ)$  $\gamma/\Delta-11(180^\circ)$ 

第十二组

 $\Delta/\Delta-12(0^\circ)$  $\gamma/\gamma-12(0^\circ)$ 

四、三相变压器组别极性的测量

各种接法变压器的三相极性有它一定的规律，因此根据三相的极性可以判断变压器的组别。

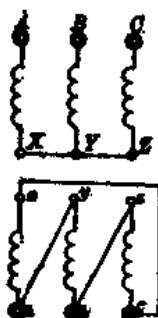


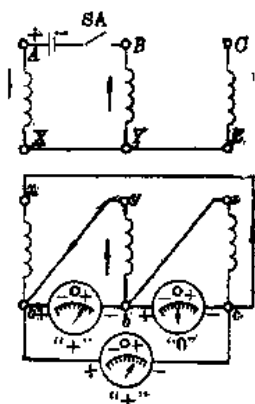
图 2-21 $\gamma/\Delta-11$
变压器的接线图

图 2-21 为一次侧接成星形，二次侧接成三角形的三相变压器，在 12 个接线头中， A, B, C 和 a, b, c 是同极性， X, Y, Z 和 x, y, z 也是同极性。如果把一次侧作为电源侧来看，那么这个变压器的接法是属于第五组的 $\gamma/\Delta-11$ 接法。下面以这种接法的变压器为例，测量其三相的极性。

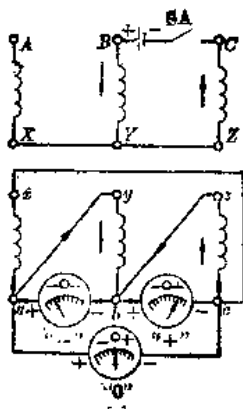
先在一次侧 A, B 间接上一直流电源(电池)和开关 SA ， A 接电池正极， B 接负极。再用一直流毫安表或直流毫伏表分别测量二次侧 a, b, c 三相的极性，也可用万用电表的直流毫安档或直流毫伏档来测量。直流电表一定要按照图 2-22(a)的正负极性进行连接，不可接错。按规定如果电流是从表“+”流进去的，电表的指示记为“+”；如果电流是从表“-”流进去的，电表的指示记为“-”。

按图 2-22(a)电路接线以后，将开关 SA 合上，于是在一次侧绕组 AX, YB 中就有电流通过。在刚合上开关的瞬间，由于一、二次侧绕组的相互感应作用，二次侧绕组 xa, by 中也将感应出电流，电流的方向和一次侧绕组相反(即

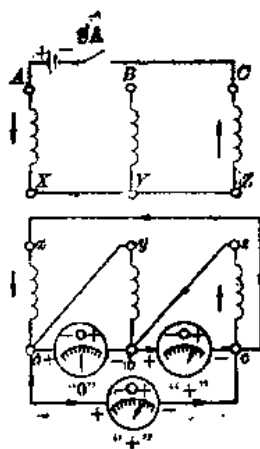
相差 180°), 如图中箭头所示。在 a, b 间的电表, 它跨接在 b 相绕组上, 电流的方向是 $b \rightarrow y \rightarrow a \rightarrow b$, 通过电表时从表“+”流进, 根据规定电表的指示应记为“+”, 即 a, b 测量的结果为“+”。



(a)



(b)



(c)

图 2-22 γ/Δ -11 变压器的极性测量接线图

表 2-2 $Y/\Delta-11$ 接法变压器极性规律

进 电		测 量 (电 表 指 示)					
+	-	$a^+ \quad b^-$		$b^+ \quad c^-$		$a^+ \quad c^-$	
A	B	+		0		+	
B	C	-		+		0	
A	C	0		+		+	

表 2 3 三相变压器组别极性的规律

组别及 接 法	进 电 (一次侧) + -	测量(二次侧)			组别及 接 法	进 电 (一次侧) + -	测量(二次侧)		
		a^+b^-	b^+c^-	a^+c^-			a^+b^-	b^+c^-	a^+c^-
第 1 组 (30°)	A B	+	-	0	第 7 组 (210°)	A B	-	+	0
	B C	0	+	+		B C	0	-	-
	A C	+	0	+		A C	-	0	-
第 2 组 (60°)	A B	+	-*	-	第 8 组 (240°)	A B	-	+	+
	B C	+	+	+		B C	-	-	-*
	A C	+	-	+		A C	-*	+	-
第 3 组 (90°)	A B	0	-	-	第 9 组 (270°)	A B	0	+	+
	B C	+	0	+		B C	-	0	-
	A C	+	-	0		A C	-	+	0
第 4 组 (120°)	A B	-	-	-*	第 10 组 (300°)	A B	+	+	+
	B C	+	-	+		B C	-*	+	-
	A C	+	-*	-		A C	-	+	+
第 5 组 (150°)	A B	-	0	-	第 11 组 (330°)	A B	+	0	+
	B C	+	-	0		B C	-	+	0
	A C	0	-	-		A C	0	+	+
第 6 组 (180°)	A B	-*	+	-	第 12 组 (360°)	A B	+	-	+
	B C	+	-*	-		B C	-	+	+
	A C	-	-	-		A C	+	+	+

注: 有 * 的表示电表的偏转角较大。

接着看接在 b 、 c 间的电表。这一电表跨接在 c 相上,由图中可以看到, c 相绕组一次侧没有电流,二次侧当然也不会有电流流过,因而电表的指针应该不动,指示为“零”,即 b 、 c 测量结果为“0”。

最后看接在 a 、 c 二点间的电表。这一电表二端跨接在 a 相绕组上,电流的方向为 $x \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow x$, 电流从表“+”流进,于是电表应指示“+”,即 a 、 c 测量结果为“+”。将上述结果列于表 2-2 中。

同样,也可按图 2-22(b)及(c)分别进行测量,并将测量结果列于表 2-3 中。

表 2-2 是 $Y/\Delta-11$ 接法变压器的极性规律。实验证明无论是 $Y/\Delta-11$ 还是 $\Delta/Y-11$, 凡是第十一组的变压器就符合表 2-2 的极性规律。如果事先不知道某一变压器的组别,而测得极性规律的结果正符合表 2-2, 那么这一变压器的连接组别一定是 $Y/\Delta-11$ 。

用同样方法,可以找出另外十一种组别的变压器极性规律,如表 2-3。

极性测量时应注意以下几点:

(1) 应在开关 $S4$ 合上的一瞬间观察电表的指向,为使测量正确,应重复几次进行观察。同时记下偏转的读数,若不是使用检流计,要得到明显的负指向,须将电表进行反接来观察。但这时电表的指示仍应记为“-”。

(2) 直流电源电压一般在 6 伏以下,不宜太高,通常采用干电池。

(3) 一般电表指针不动或微动作为“0”,另外当三个偏转读数都有时,如果其中一个偏转读数比其他二个数中的最大一个偏转读数的一半还小,那么这个偏转读数,亦应作为“0”。

2-2 电力变压器的技术数据

SJL 系列电力变压器采用铝导线绕组和 0.35 毫米 D43 热轧硅钢片,高压侧带无励磁调压开关,调压 $\pm 5\%$, 温升标准: 绕组 65°C , 油顶层 55°C 。技术数据如表 2-4。SCL 型环氧树脂浇注干式变压器是空气自冷式,绕组由铝导线和铝箔绕制后,用环氧树脂浇注或浸渍而固化密封形成一体,具有良好的电性能和机械性能承受冲击电压、局部放电和低温等试验。铁芯采用冷轧全斜接缝叠装式,能降低电耗,绕组与铁芯及压紧装置采用弹性固定装置防止共振,降低噪音。其技术数据见表 2-5。S7 型、SL7 型低损耗电力变压器的技术数据见表 2-6~表 2-8。