

# 项目

# 1

# 变 压 器

## 任务 1 变压器的结构与工作原理

**任务描述：**熟悉变压器的基本结构；

了解变压器的铭牌数据；

掌握变压器的工作原理；

了解变压器的基本特性；

了解变压器的分类。

**任务分析：**变压器是电磁转换的基本元器件之一，被称为“静止的电机”，在日常生活、生产中应用极其广泛。本任务主要对变压器的基本知识进行简单的介绍，对变压器工作原理进行重点讲述。

### 活动 1 变压器的基本结构

变压器是一种常用的静止电气设备，它利用电磁感应原理，将某一电压等级的交流电变换为同频率的另一电压等级的交流电。

变压器的类型很多，有不同的分类方法。如按照用途分类有电力变压器、仪用互感器等；按照变换电能的相数分类有单相变压器、三相变压器和多相变压器。尽管变压器类型很多，但是它们的结构是基本相同的。本活动通过单相小型变压器介绍变压器的基本结构。

单相变压器是指接在单相交流电源上，用来改变单相交流电压的变压器，通常容量都很小，主要用于局部照明和控制。一般电工测量和电子线路中使用的也多为单相变压器。

变压器主要由铁芯和绕在铁芯上的线圈两部分组成，如图 1-1 所示。

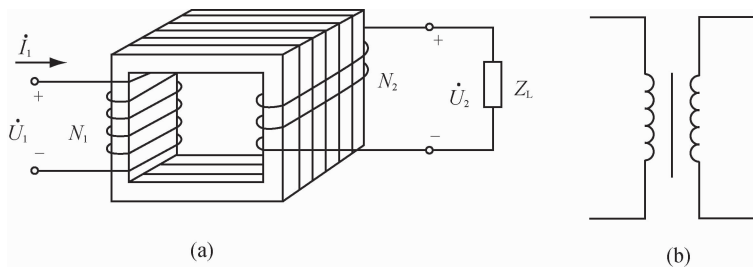


图 1-1 变压器

(a)结构示意图;(b)符号

### 1. 铁芯

常用的变压器铁芯一般都是用硅钢片制成的。硅钢是一种含硅的钢,其含硅量在 $0.8\% \sim 4.8\%$ 。由硅钢做变压器的铁芯,是因为硅钢本身是一种导磁能力很强的磁性物质,在通电线圈中,它可以产生较大的磁感应强度,从而可以使变压器的体积减小。铁芯组成变压器的磁路部分。

实际的变压器总是在交流状态下工作,功率损耗不仅发生在线圈的电阻上,也发生在交变电流磁化下的铁芯中。通常把铁芯中的功率损耗称为“铁损”,铁损由两个原因造成,一个是“磁滞损耗”,一个是“涡流损耗”。磁滞损耗是指铁芯在磁化过程中,由于存在磁滞现象而产生的铁损,这种损耗的大小与材料的磁滞回线所包围的面积大小成正比。硅钢的磁滞回线狭小,用它做变压器的铁芯磁滞损耗较小,可使其发热程度大大减小。用做变压器的铁芯,一般选用 $0.35\text{mm}$ 厚的冷轧硅钢片,硅钢片的表面都涂有绝缘漆,形成绝缘层。

按所需铁芯的尺寸,将硅钢片裁成长形片,然后交叠成“日”字形或“口”字形,如图 1-2 所示。从理论上讲,为减小涡流,硅钢片厚度越薄,拼接的片条越狭窄,效果越好。这不但减小了涡流损耗,降低了温升,还能节省硅钢片的用料。但实际上制作硅钢片铁芯时,并不单从上述的一方面有利因素出发,因为那样制作铁芯,要大大增加工时,还减小了铁芯的有效截面。所以,用硅钢片做变压器铁芯时,要从具体情况出发,权衡利弊,选择最佳尺寸。

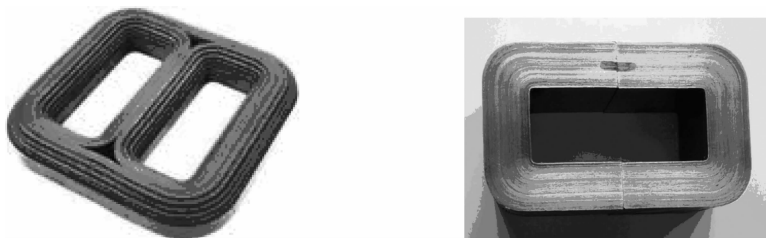


图 1-2 “日”字形铁芯和“口”字形铁芯



#### 思考与分析

既然硅钢有上述优点,为什么不用整块的硅钢做铁芯,而要把它加工成片状呢?

这是因为片状铁芯可以减小另外一种铁损——“涡流损耗”。变压器工作时,线圈中有交变电流,它产生的磁通当然是交变的。这个变化的磁通在铁芯中产生感应电流。铁芯中产生的感应电流,在垂直于磁通方向的平面内环流,所以称为涡流。涡流损耗同样使铁芯发热。为了减小涡流损耗,变压器的铁芯用彼此绝缘的硅钢片叠成,使涡流在狭长形的回路中,通过较小的截面,以增大涡流通路上的电阻;同时,硅钢中的硅使材料的电阻率增大,也起到减小涡流的作用。

## 2. 线圈

线圈是指有两个或两个以上的绕组,其中与电源连接的绕组称为原绕组,又称为初级绕组或一次绕组。凡表示原绕组各有关电量的字母均采用下标“1”来表示,如原绕组电压  $U_1$ 、原绕组匝数  $N_1$  等。与负载连接的绕组称为副绕组,又称为次级绕组或二次绕组。凡表示副绕组各有关电量的字母均采用下标“2”来表示,如副绕组电压  $U_2$ 、副绕组匝数  $N_2$  等。线圈组成变压器的电路部分。

变压器按铁芯和绕组的组合方式,可分为壳式和心式两种,分别如图 1-3、图 1-4 所示。壳式变压器的绕组被铁芯所包围,而心式变压器的绕组则包围铁芯。壳式变压器用铁量比较多,不需要专门的变压器外壳,常用于小容量的变压器,如各种电子设备和仪器中的变压器多采用壳式结构;心式变压器用铁量比较少,多用于大容量的变压器,如电力变压器多采用心式结构。

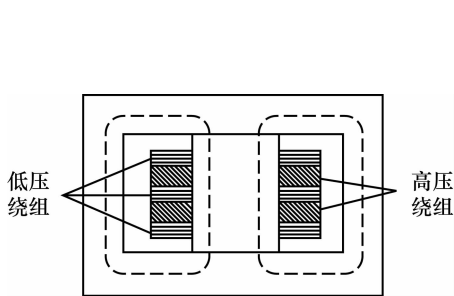


图 1-3 壳式变压器

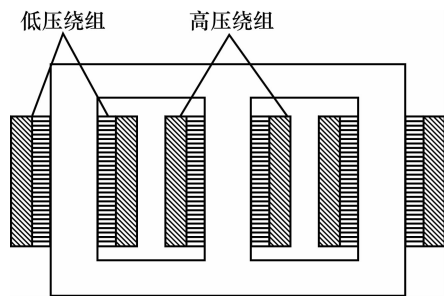


图 1-4 心式变压器

## 3. 辅助器件

铁芯和线圈是变压器必不可少的组成部分。对于不同的变压器,其他辅助元件也不尽相同,如小型变压器的线架、电气胶带、绝缘纸和套管等。这里主要讨论为改善变压器的散热性能而采用的辅助器件。

变压器在工作时,因有损耗而发热,使绕组及铁芯温度升高,这种损耗称为“铜损”。为减少铜损,大中型变压器制成油浸式,铁芯和绕组都浸在变压器油中,依靠油的对流,将热量传到油箱壁及油管上,散到空气中去,如图 1-5 所示。大容量变压器外面装有风扇,进行强

迫风冷。变压器油箱是封闭的,防止水分和湿气浸入。由于变压器油的热胀冷缩,还需配有储油枕,用油管与油箱连通,油枕内的空气与外面空气之间要经氯化钙装置吸潮。

小容量变压器主要靠周围空气散热,一般做成干式或空气自冷式变压器。

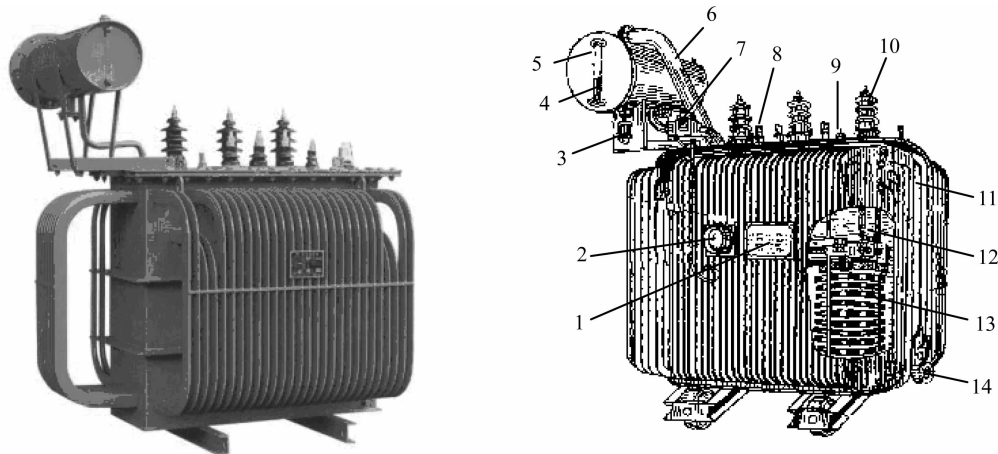


图 1-5 油浸式变压器的外形图及内部结构图

- 1—铭牌;2—讯号式温度计;3—吸湿器;4—油表;5—储油枕;6—安全气道;  
7—气体继电器;8—低压套管;9—分接开关;10—高压套管;  
11—油箱;12—铁芯;13—线圈;14—放油阀

## 活动 2 变压器的工作原理

### 1. 变压器的工作原理

变压器是利用电磁感应原理传输电能或电信号的器件,它具有变压、变流和变阻抗的作用。变压器的种类很多,应用十分广泛。例如,在电力系统中用电力变压器把发电机发出的电压升高后进行远距离输电,到达目的地后再用变压器把电压降低以便用户使用,以此减少传输过程中电能的损耗;在电子设备和仪器中常用小功率电源变压器改变市电电压,再通过整流和滤波,得到电路所需要的直流电压;在放大电路中用耦合变压器传递信号或进行阻抗的匹配等。变压器虽然大小悬殊,用途各异,但其工作原理却是相同的。

### 2. 变压器的铭牌数据

每台变压器都有一铭牌,上面标注着型号、额定值及其他数据,便于用户了解变压器的运行性能。图 1-6 为某电力变压器的铭牌。

(1)额定容量  $S_N$  指变压器额定工作条件下输出能力的保证值,是额定视在功率,单位为伏安( $V \cdot A$ )、千伏安( $kV \cdot A$ )或兆伏安( $MV \cdot A$ )。

电力变压器			
产品型号	SL7—315/10	产品编号	
额定容量	315kV·A	使用条件	户外式
额定电压	10 000/400V	冷却条件	ONAN
额定电流	18.2/454.7A	短路电压	4%
额定频率	50 Hz	器身吊重	765kg
相 数	三相	油 重	380kg
连接组别	Yyno	总 重	1 525kg
制造厂		生产日期	

图 1-6 某电力变压器的铭牌

(2) 额定电压  $U_N$  指变压器长时间运行所能承受的工作电压,以 V 或 kV 表示。

(3) 额定电流  $I_N$  指变压器在额定容量下,允许长期通过的电流,以 A 表示。

(4) 额定频率  $f_N$  指工业用电频率,我国规定为 50Hz。

(5) 温升指变压器绕组或上层油面的温度与变压器周围环境的温度之差。在每一台变压器的铭牌上都标有温升的限值。国家标准规定,当变压器安装地点的海拔不超过 1 000m 时,绕组温升的限值为  $65^{\circ}\text{C}$ ,上层油面温升的限值为  $55^{\circ}\text{C}$ 。

(6) 额定工作状态指变压器在额定电压、额定频率、额定负载及规定使用条件下的工作状态,在铭牌上都有标示。变压器在额定工作状态下运行,经济效果好、寿命长;反之,经济效果差、寿命短,甚至会出事故。

小型电源及控制变压器一般只标出输入电压、输出电压和频率等参数。

## 提醒

变压器的额定容量、额定电压、额定电流之间的关系如下:

单相变压器为

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

三相变压器为

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

## 实践活动

在日常接触到的电气设备中,都有哪些用到了变压器,简单说明一下它的作用,记录它的铭牌参数并解释其含义。

## 活动 3 变压器的基本特性

### 1. 电压变换

当原绕组外加电压  $\dot{U}_1$  时,原边就有电流  $\dot{I}_1$  流过,并在铁芯中产生与  $\dot{U}_1$  同频率的交变主磁通  $\dot{\Phi}_m$ ,主磁通  $\dot{\Phi}_m$  既穿过原绕组,也穿过副绕组,于是在原、副绕组中分别感应出电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$ ,向负载输出电能。且感应电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$  与  $\dot{\Phi}_m$  的参考方向之间符合右手螺旋定则,由法拉第电磁感应定律可得感应电动势的瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1-3)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1-4)$$

感应电动势的有效值为

$$E_1 \approx 4.44fN_1\Phi_m \quad (1-5)$$

$$E_2 \approx 4.44fN_2\Phi_m$$

所以

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \text{ (式中 } K \text{ 为变比)} \quad (1-6)$$

若忽略绕组内阻和漏磁通,原、副绕组端电压大小近似为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &\approx E_1 \\ U_2 &\approx E_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-8)$$

可见,变压器原、副绕组上电压的比值近似等于两者的匝数之比, $K$ 称为变压器的变比。改变变压器原、副绕组的匝数,就能够把某一数值的交流电压变为同频率的另一数值的交流电压,即

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1}U_1 = \frac{1}{K}U_1 \quad (1-9)$$

当原绕组的匝数  $N_1$  比副绕组的匝数  $N_2$  多时, $K > 1$ ,这种变压器称为降压变压器;反之,当  $N_1 < N_2$  时, $K < 1$ ,这种变压器称为升压变压器; $K = 1$  时为隔离变压器。

**【例 1-1】** 已知某变压器铁芯的截面积为  $20\text{cm}^2$ ,铁芯中磁感应强度的最大值不能超过  $0.2\text{T}$ ,若要用它把  $220\text{V}$  工频交流电变换成为  $20\text{V}$  的同频率交流电,原、副绕组的匝数应为多少?

**解** 铁芯中磁通的最大值

$$\Phi_m = B_m S = 0.2 \times 20 \times 10^{-4} = 0.0004 \text{ (Wb)}$$

原绕组的匝数应为

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44f\Phi_m} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 0.0004} \approx 2477$$

副绕组的匝数应为

$$N_2 = \frac{U_2}{4.44f\Phi_m} = \frac{20}{4.44 \times 50 \times 0.0004} \approx 225$$

## 2. 电流变换

如图 1-7 所示,变压器的原绕组接交流电压  $\dot{U}_1$ ,副绕组接上负载  $Z_L$ ,这种运行状态称为负载运行。这时副边的电流为  $I_2$ ,原边电流由  $I_{10}$  增大为  $I_1$ ,且  $U_2$  略有下降,这是因为有了负载后, $I_1$ 、 $I_2$  会增大,原、副绕组本身的内部压降也会比空载时增大,使副绕组电压  $U_2$  比  $E_2$  低一些。因为变压器内部压降一般小于额定电压的  $10\%$ ,所以变压器有无负载对电压比的影响不大,可以认为负载运行时变压器原、副绕组的电压比仍然基本上等于原、副绕组匝数之比。

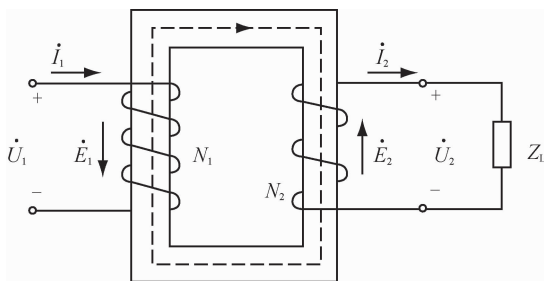


图 1-7 变压器的负载运行

变压器负载运行时,由  $\dot{I}_2$  形成的磁动势  $\dot{I}_2 N_2$  对磁路也会产生影响,即铁芯中的主磁通  $\dot{\Phi}_m$  是由  $\dot{I}_1 N_1$  和  $\dot{I}_2 N_2$  共同产生的。由式  $U \approx E \approx 4.44 f N \Phi_m$  可知,当电源电压和频率不变时,铁芯中的磁通最大值应保持基本不变,那么磁动势也应保持不变,即  $I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_{10} N_1$ 。

由于变压器空载电流很小,一般只有额定电流的百分之几,因此当变压器额定运行时,可忽略不计,则有  $I_1 N_1 \approx -I_2 N_2$ 。

可见变压器负载运行时,原、副绕组产生的磁动势方向相反,即副边电流  $\dot{I}_2$  对原边电流  $\dot{I}_1$  产生的磁通有去磁作用。因此,当负载阻抗减小,副边电流  $I_2$  增大时,铁芯中的磁通  $\Phi_m$  将减小,原边电流  $I_1$  必然增加,以保持磁通  $\Phi_m$  基本不变,所以副边电流变化时,原边电流也会相应地变化。原、副边电流有效值的关系为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (1-10)$$

可见,当变压器额定运行时,原、副边的电流之比近似等于其匝数之比的倒数。改变原、副绕组的匝数,就能够改变原、副绕组电流的比值,这就是变压器的电流变换特性。

不难看出,变压器的电压比与电流比互为倒数,因此匝数多的绕组电压高,电流小;匝数少的绕组电压低,电流大。

**【例 1-2】** 已知某一变压器  $N_1 = 1\,000$ ,  $N_2 = 100$ ,  $U_1 = 220\text{V}$ ,  $I_2 = 2\text{A}$ , 负载为纯电阻,忽略变压器的漏磁和损耗,求变压器的副边电压  $U_2$ , 原边电流  $I_1$  和输入、输出功率。

解 变压比 
$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1\,000}{100} = 10$$

副边电压 
$$U_2 = \frac{U_1}{K} = \frac{220}{10} = 22(\text{V})$$

原边电流 
$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{2}{10} = 0.2(\text{A})$$

输入功率 
$$P_1 = U_1 I_1 = 220 \times 0.2 = 44(\text{W})$$

输出功率 
$$P_2 = U_2 I_2 = 22 \times 2 = 44(\text{W})$$

可见,当变压器的功率损耗忽略不计时,它的输入功率与输出功率相等,符合能量守恒

定律。

在远距离输电线路中,线路损耗  $P_1$  与电流  $I_1$  的平方乘以线路电阻  $R_1$  的积成正比,因此在输送同样功率的情况下,所用电压越高,电流就会越小,输电线上的损耗越小。这样可以减小输电导线的截面积,从而大大降低成本。所以电厂在输送电能之前,必须先用升压变压器将电压升高,但传输到用户后,电压不能太高,通常为 380V 或 220V,因此要用降压变压器再进行降压。

### 3. 阻抗变换

变压器除了具有变压和变流的特性外,还有变换阻抗的特性。如图 1-8 所示,变压器原边接电源  $U_1$ ,副边接的阻抗值为  $|Z_L|$ ,对于电源来说,图中虚线框内的电路可用另一个阻抗  $|Z_L'|$  来等效。所谓等效,就是指它们从电源吸取的电流和功率相等。当忽略变压器的漏磁和损耗时,等效阻抗由下式求得,即

$$|Z_L'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)U_2}{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 |Z_L| = K^2 |Z_L| \quad (1-11)$$

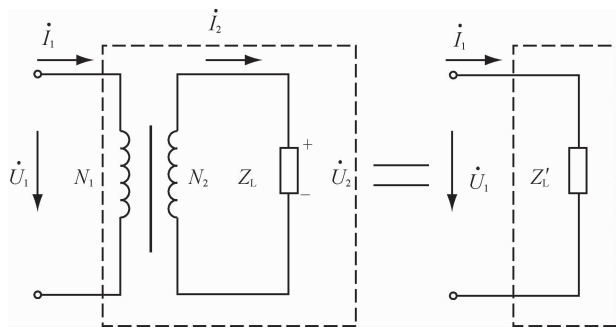


图 1-8 变压器阻抗变换的等效

$|Z_L| = \frac{U_2}{I_2}$  为变压器副边的负载阻抗。可见,对于变比为  $K$  且变压器副边阻抗为  $|Z_L|$  的负载,相当于在电源上直接一个阻抗为  $|Z_L'| = K^2 |Z_L|$  的负载,也可以说变压器把负载阻抗  $|Z_L|$  变换为  $|Z_L'|$ 。因此,通过选择合适的变比  $K$ ,可把实际负载阻抗变换为所需的数值,这就是变压器的阻抗变换特性。

在电子电路中,为了提高信号的传输功率,常用变压器将负载阻抗变换为适当的数值,使其与放大电路的输出阻抗相匹配,这种做法称为阻抗匹配。

**【例 1-3】** 某交流信号源的电动势  $E=120\text{V}$ ,内阻  $R_0=800\Omega$ ,负载电阻  $R_L=8\Omega$ 。

(1) 若将负载与信号源直接相连,如图 1-9(a)所示,信号源输出的功率有多大?

(2) 若要信号源输给负载的功率达到最大,负载电阻应等于信号源内阻。现用变压器进行阻抗变换,则变压器的匝数比应选多少? 阻抗变换后信号源的输出功率有多大?

**解** (1) 由图 1-9(a)可知,若将负载直接与信号源连接,信号源的输出功率为

$$P = I^2 R_L = \left(\frac{E}{R_0 + R_L}\right)^2 R_L = \left(\frac{120}{800 + 8}\right)^2 \times 8 = 0.176(\text{W})$$



(2) 如图 1-9(b)所示,用变压器把负载  $R_L$  变换为等效电阻,使其阻值与电源内阻相等。则变比

$$K = \sqrt{\frac{R_L'}{R_L}} = \sqrt{\frac{800}{8}} = 10$$

信号源的输出功率为

$$P_2 = I^2 R_L' = \left( \frac{E}{R_0 + R_L'} \right)^2 R_L' = \left( \frac{120}{800 + 800} \right)^2 \times 800 = 4.5(\text{W})$$

可见,阻抗匹配后输出功率为最大。

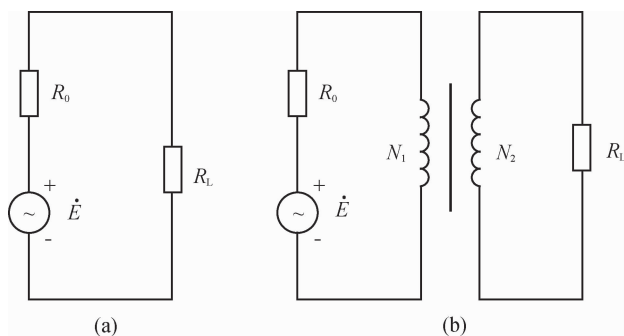


图 1-9 例 1-3 图



### 知识拓展

## 变压器的类型与自耦变压器

### 1. 变压器的分类

(1) 按冷却方式不同,变压器可分为干式(自冷)变压器、油浸(自冷)变压器和氟化物(蒸发冷却)变压器等。

(2) 按防潮方式不同,变压器可分为开放式变压器、灌封式变压器和密封式变压器等。

(3) 按铁芯或线圈结构不同,变压器可分为心式变压器(插片铁芯、C形铁芯、铁氧体铁芯)、壳式变压器(插片铁芯、C形铁芯、铁氧体铁芯)、环型变压器和金属箔变压器等。

(4) 按电源相数不同,变压器可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

(5) 按用途不同,变压器可分为电源变压器、调压变压器、音频变压器、中频变压器、高频变压器和脉冲变压器。

### 2. 自耦变压器

原边与副边共用一个绕组的变压器称为自耦变压器,如图 1-10 所示。根据结构不同,可分为可调压式和固定式两种类型。自耦的“耦”是电磁耦合的意思,普通的变压器是通过原副边线圈电磁耦合来传递能量,原副边没有直接的电的联系,而自耦变压器原副边有直接

的电的联系,它的低压线圈就是高压线圈的一部分。

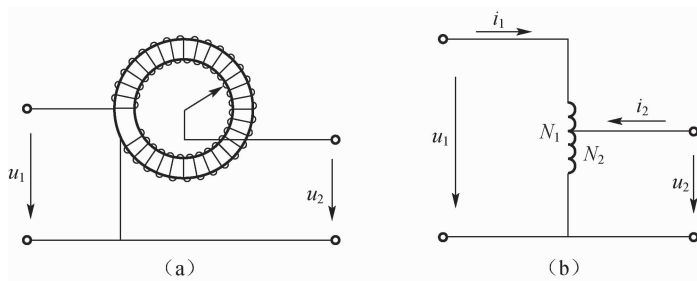


图 1-10 自耦变压器

(a)结构图;(b)符号

(1)自耦变压器有以下几方面特点。

①由于自耦变压器的计算容量小于额定容量,所以在同样的额定容量下,自耦变压器的主要尺寸较小,有效材料(硅钢片和导线)和结构材料(钢材)都相应减少,从而降低了成本。有效材料的减少使得铜损和铁损也相应减少,故自耦变压器的效率较高。同时由于主要尺寸的缩小和质量减小,可以在容许的运输条件下制造单台容量更大的变压器。但通常在自耦变压器中,只有  $K \leq 2$  时,上述优点才明显。

②由于自耦变压器的短路阻抗标么值比双绕组变压器小,故电压变化率较小,但短路电流较大。

③由于自耦变压器原副边有电的直接联系,当高压侧过电压时会引起低压侧严重过电压。为了避免这种危险,原副边都必须装设避雷器,不要认为原副边是串联的,原边已装、副边就可省略。

④在一般变压器中,有载调压装置往往连接在接地的中性点上,这样调压装置的电压等级可以比在线端调压时低。而自耦变压器中性点调压侧会带来所谓的相关调压问题。因此,要求自耦变压器有载调压时,只能采用线端调压方式。

(2)自耦变压器的应用如下。

自耦变压器在不需要原副边隔离的场合都有应用,具有体积小、耗材少、效率高的优点。常见的交流(手动旋转)调压器、家用小型交流稳压器内的变压器、三相电机自耦减压启动箱内的变压器等,都是自耦变压器的应用范例。

随着我国电气化铁路事业的高速发展,自耦变压器(AT)供电方式得到了长足的发展。由于自耦变压器供电方式非常适用于大容量负荷的供电,对通信线路的干扰又较小,因而被客运专线以及重载货运铁路广泛采用。早期我国铁路专用自耦变压器主要依靠进口,成本较高且维护不便。近年来,由中铁电气化局集团保定铁道变压器有限公司设计并生产的 OD8-M 系列铁路专用自耦变压器先后在神朔铁路、京津城际高速铁路、武广客运专线等多条重要铁路投入使用,受到相关部门的高度好评,填补了国内相关产品的空白。