

## 第3章 变压器

变压器是一种静止的电气设备,通过电磁耦合作用把电能或信号从一个电路传递到另一个电路。在电力系统中,将一种电压的交流电变成同频率的另一种电压交流电;在电信及通讯系统中,除了用作电源变压器外,还可用于传递信息及阻抗变换等;自耦变压器用于调压,互感器用于将高电压或大电流变换成便于测量和控制的低电压或小电流;还有其他各种特殊用途的变压器。

### § 3-1 变压器的结构和基本工作原理

#### 一、变压器的主要结构部件

变压器按用途可分为:电力变压器,包括升压变压器、降压变压器、联络变压器、配电变压器和厂用变压器等;特种变压器,包括整流变压器、电炉变压器、矿用变压器、电焊变压器、中频变压器等;仪用试验用变压器包括电子线路中使用的电源、隔离和脉冲变压器,阻抗变换器,互感器,自耦变压器,高压试验变压器等。本章研究一般用途电力变压器,并以其中的配电变压器作为对象,对其他用途变压器只作简单介绍。图 3-1 是一台油浸式电力变压器外形图。

除自耦变压器外,一般变压器的主体部分由一个铁芯和高、低压两套绕组组成。

#### 1. 铁芯

铁芯是变压器主磁通经过的磁路部分。为提高磁路的导磁性能和减少涡流损耗,铁芯用含硅量较高、厚度为 0.35mm 的硅钢片涂绝缘漆后叠压或卷压而成。分叠片式和渐开线式两种。叠片式又分芯式和壳式。图 3-2 为装有线圈的三相芯式变压器,其特点是线圈包围铁芯,具有用铁量较少,结构简单,散热条件好,线圈的装配和绝缘比较容易等优点,电力变压器多采用此结构;图 3-3 是一台壳式变压器,其特点是铁芯包围线圈,用铜量较少,多用于小容量变压器。

#### 2. 绕组(线圈)

线圈是变压器的电路部分,用绝缘的铜线或铝线制成,并用绝缘材料构成线圈的主绝缘和纵绝缘,使线圈固定在一定位置,形成纵、横向油道,便于变压器油流动,加强散热和冷却效果。根据高、低压线圈之间的相对位置排列不同,分为同心式和交叠式两大类,如图 3-4 所示。

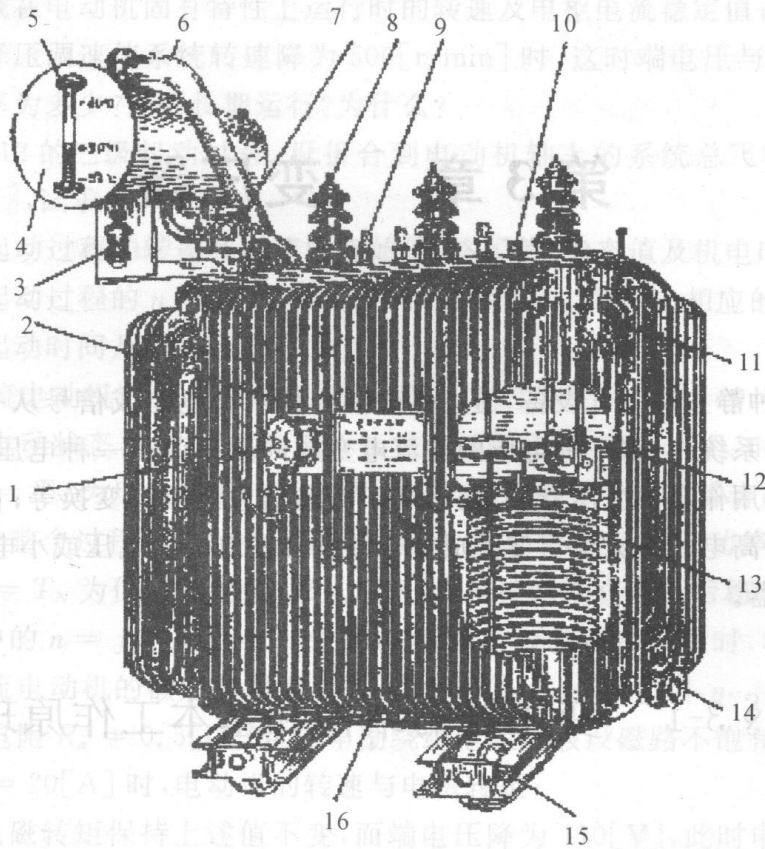


图 3-1 油浸式电力变压器

- 1- 讯号温度计 2- 铭牌 3- 吸湿器 4- 储油柜 5- 油表 6- 安全气道  
 7- 气体继电器 8- 高压套管 9- 低压套管 10- 分接开关 11- 油箱

- 12- 铁芯 13- 线圈及绝缘 14- 放油阀 15- 小车 16- 接地螺栓

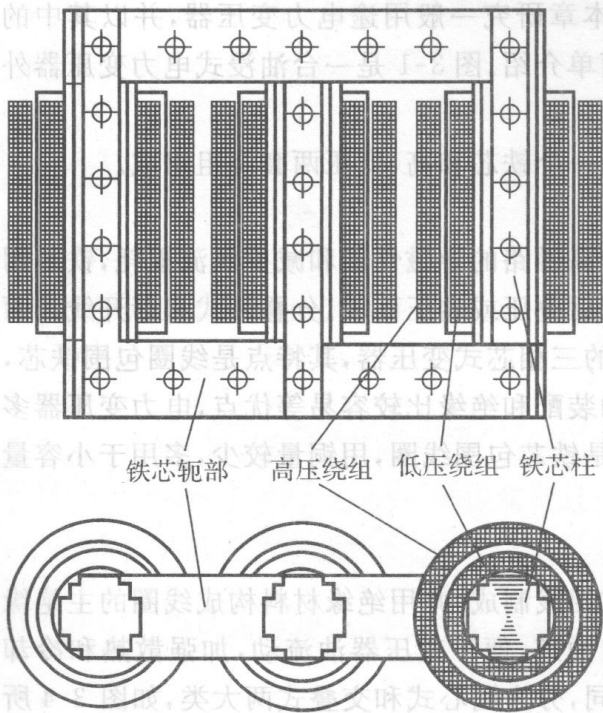


图 3-2 三相芯式变压器铁芯和绕组装配

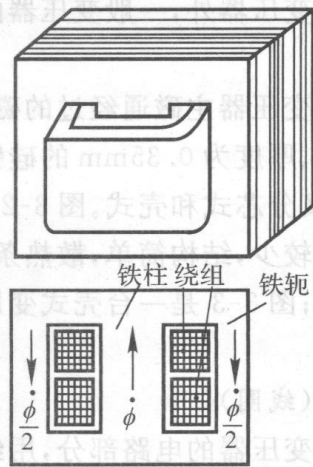
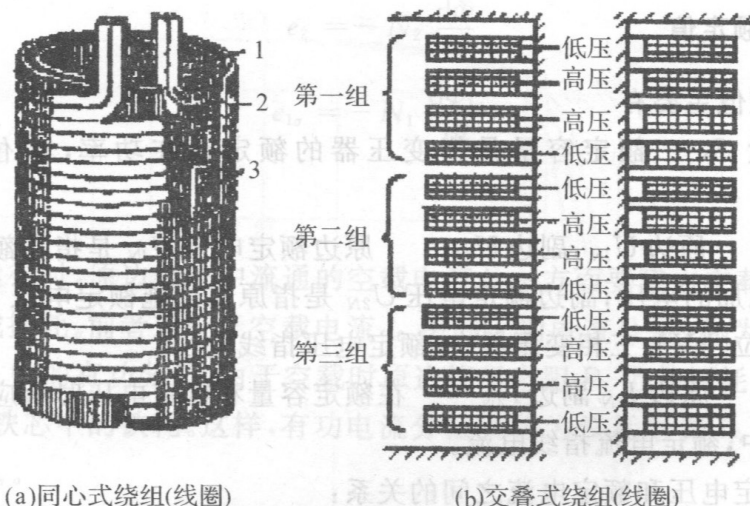


图 3-3 单相壳式变压器



(a)同心式绕组(线圈)

(b)交叠式绕组(线圈)

图 3-4 变压器绕组(线圈)

根据绕组绕制特点分为圆筒式、饼式、连续式、纠结式、螺旋式和铝箔筒式等几种主要型式,以适应不同容量、不同电压变压器的选用。

### 3. 油箱和变压器油

变压器油箱由钢板焊接而成。油箱内除放置变压器器身(带绕组的变压器铁芯组件)外,其余空间充满变压器油。变压器油是石油中提炼出来的特种油,具有优良的绝缘性能,并作为散热媒介。为扩大散热面,油箱侧面装置散热管或冷却器。

## 二、基本工作原理

图 3-5 表示单相变压器的工作示意图。铁芯上绕有匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$  的两个高、低压线圈,与电源相连、输入电能的线圈称为原边(又称为一次绕组、初级绕组或原绕组),与负载相连、输出电能的线圈称为副边(又称为二次绕组、次级绕组或副绕组)。当原边与电源接通时,在外施电压  $u_1$  作用下,原边就有交流电流流通,并在铁芯中产生交变磁通  $\Phi$ ,磁通的交变频率和外施电压  $u_1$  的频率相同。磁通  $\Phi$  同时与原、副边线圈相交链,根据电磁感应原理,原、副边线圈中就会感应电动势  $e_1$  和  $e_2$ 。若副边绕组与负载  $Z_L$  接通,则在  $e_2$  的作用下,副边就有电流流通,向负载输出电功率。

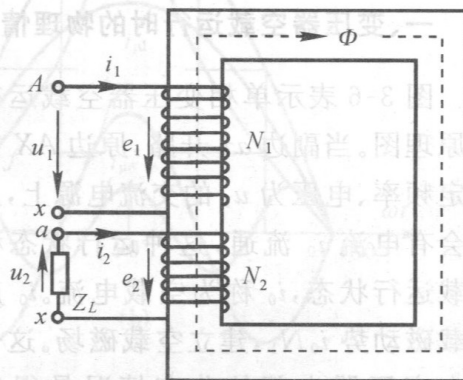


图 3-5 单相变压器工作示意图

所以,变压器的工作原理就是:原边绕组从电源吸取电功率,借助磁场为媒介,根据电感原理,传递到副边绕组,然后再将电功率传送到负载。

原、副边绕组感应电动势之比等于原、副边绕组的匝数之比,而原、副边电压与原、副边电动势的大小相接近。所以,只要改变原、副边绕组的匝数之比,便可以达到变换电压的目的。

### 三、变压器的额定值

变压器的额定值主要有

(1) 额定容量  $S_N$  额定容量是指变压器的额定视在功率, 单位 [VA] 或 [kVA] 或 [MVA]。

(2) 额定电压 原边  $U_{1N}$ , 副边  $U_{2N}$  原边额定电压  $U_{1N}$  是指在额定运行情况下, 原边接线端点间应施加的电压; 副边额定电压  $U_{2N}$  是指原边外施额定电压  $U_{1N}$  时副边出线端间的空载电压, 单位 [kV]。三相变压器中, 额定电压指线电压。

(3) 额定电流 原边  $I_{1N}$  副边  $I_{2N}$  在额定容量和额定电压时所应提供的电流, 单位 [A]。三相变压器中, 额定电流指线电流。

额定容量、额定电压和额定电流之间的关系:

单相变压器  $S_N = U_{1N}I_{1N} = U_{2N}I_{2N}$

三相变压器  $S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$

(4) 额定频率  $f_N$  我国规定标准工业频率为 50 [Hz]。

此外, 在变压器铭牌上还标有: 额定效率  $\eta_N$ 、温升  $\theta_N$ 、阻抗电压  $u_k$ 、联接组号和接线图等。

## § 3-2 单相变压器的空载运行

### 一、变压器空载运行时的物理情况

图 3-6 表示单相变压器空载运行时的原理图。当副边  $ax$  开路, 原边  $AX$  接到额定频率、电压为  $u_1$  的交流电源上, 原边就会有电流  $i_0$  流通, 这种运行状态称为空载运行状态,  $i_0$  称为空载电流。 $i_0$  产生空载磁动势  $i_0 N_1$ , 建立空载磁场。这个磁场在变压器内部的分布情况是很复杂的, 为便于分析计算, 将它们分成两部分等效磁通, 主要部分(约为总磁通量的 99% 以上) 在铁芯中闭合流通, 与原、副边绕组相交链, 是变压器实现能量转换和传递的主要因素, 称为主磁通, 用  $\Phi$  表示; 另一小部分主要通过非磁性介质(空气或变压器油), 仅与原边绕组相交链, 称为漏磁通, 用  $\Phi_{1\sigma}$  表示。图中已将只与部分原边绕组相交链的漏磁通等效成与所有原边绕组相交链的漏磁通。

因电压  $u_1$ 、电流是随时间交变的, 故主磁通  $\Phi$  也必定是交变的, 根据电磁感应定律, 原、副边绕组中就会感应电动势  $e_1$  和  $e_2$ , 漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$  同样是交变的, 原边绕组中就会感应电动势  $e_{1\sigma}$ , 按图所示正方向, 则有

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

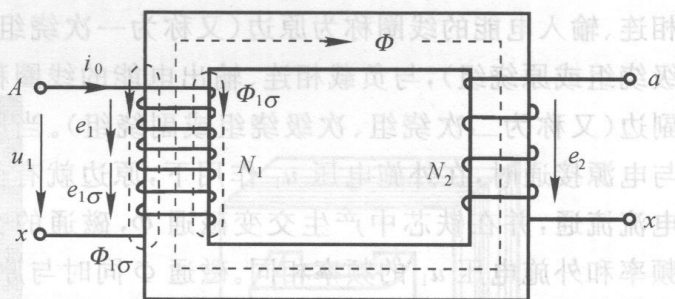


图 3-6 单相变压器空载运行原理图

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt}$$

## 二、空载电流

变压器空载运行时,原边绕组中流通的空载电流  $i_0$  一方面要建立空载运行时的磁场,另一方面要引起空载损耗。前者对应于空载电流  $i_0$  中的无功电流分量,称为磁化电流  $i_\mu$ ;后者对应于空载电流  $i_0$  中的有功分量。由于空载时原边绕组电阻  $R_1$  上的铜耗远小于铁芯中的铁耗,故一般只考虑铁芯中的铁耗。这样,有功电流分量就称为铁耗电流  $i_{Fe}$ ,空载电流  $i_0$  也就认为是励磁电流  $i_m$ 。

### 1. 忽略空载损耗时的空载电流

忽略空载损耗时的,空载电流  $i_0$  纯粹为建立空载磁场的磁化电流  $i_\mu$ 。由于磁性材料磁化曲线的非线性,所以磁化电流的大小和波形取决于铁芯的饱和程度,也就是取决于铁芯中磁通密度  $B_m$  的大小。一般,变压器铁芯工作在具有一定饱和程度的状态下,所以当外施电压为正弦波,感应电动势为正弦波,主磁通  $\Phi$  为正弦波时,磁化电流  $i_\mu$  的波形畸变成尖顶波,如图 3-7 所示。

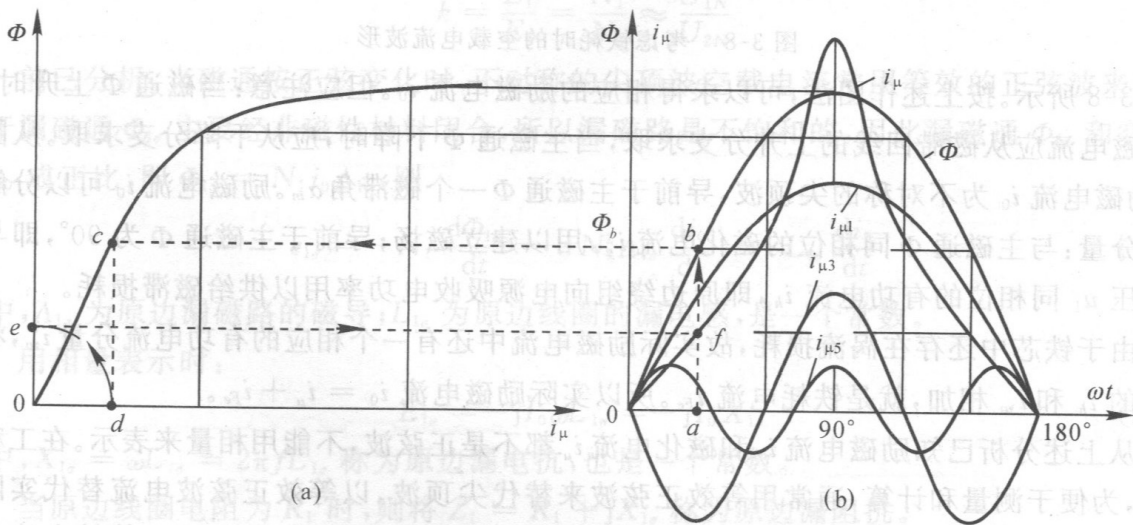


图 3-7 不计铁耗,磁通为正弦波时的励磁电流波形

在已知不考虑铁芯损耗时的平均磁化曲线  $\Phi = f(i_\mu)$  和主磁通  $\Phi = f(\omega t)$  的曲线后,用作图法求取磁化电流  $i_\mu = f(\omega t)$  就相当方便。如  $\omega t = a$  瞬时,求取正弦变化的主磁通  $\Phi$  的值为  $\Phi_b$ ,而产生所需的磁化电流按图中箭头所指方向,即  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$  方向求得  $Od = af$ 。对于其他瞬时所需的磁化电流,可按同样方法一一求得,从而获得  $i_\mu = f(\omega t)$ 。

从图中显见,当主磁通  $\Phi$  为正弦波时,磁化电流  $i_\mu$  为对称的尖顶波。磁路愈饱和,磁化电流的波形畸变愈严重。利用富氏级数展开法,可以将尖顶波的磁化电流  $i_\mu$  分解为基波及 3、5、7……次谐波,如图 3-7 所示。基波  $i_{\mu 1}$  与磁通  $\Phi$  同相位,导前于感应电动势  $e_1$  为  $90^\circ$ ,即滞后于外施电压  $u_1$  为  $90^\circ$ ,所以为无功电流。谐波的幅值随着次数的增大而减小。

### 2. 考虑空载损耗时的空载电流

实际上变压器在空载运行时,磁通是交变的,对应的  $\Phi = f(i_\mu)$  应该是一条磁滞回线,

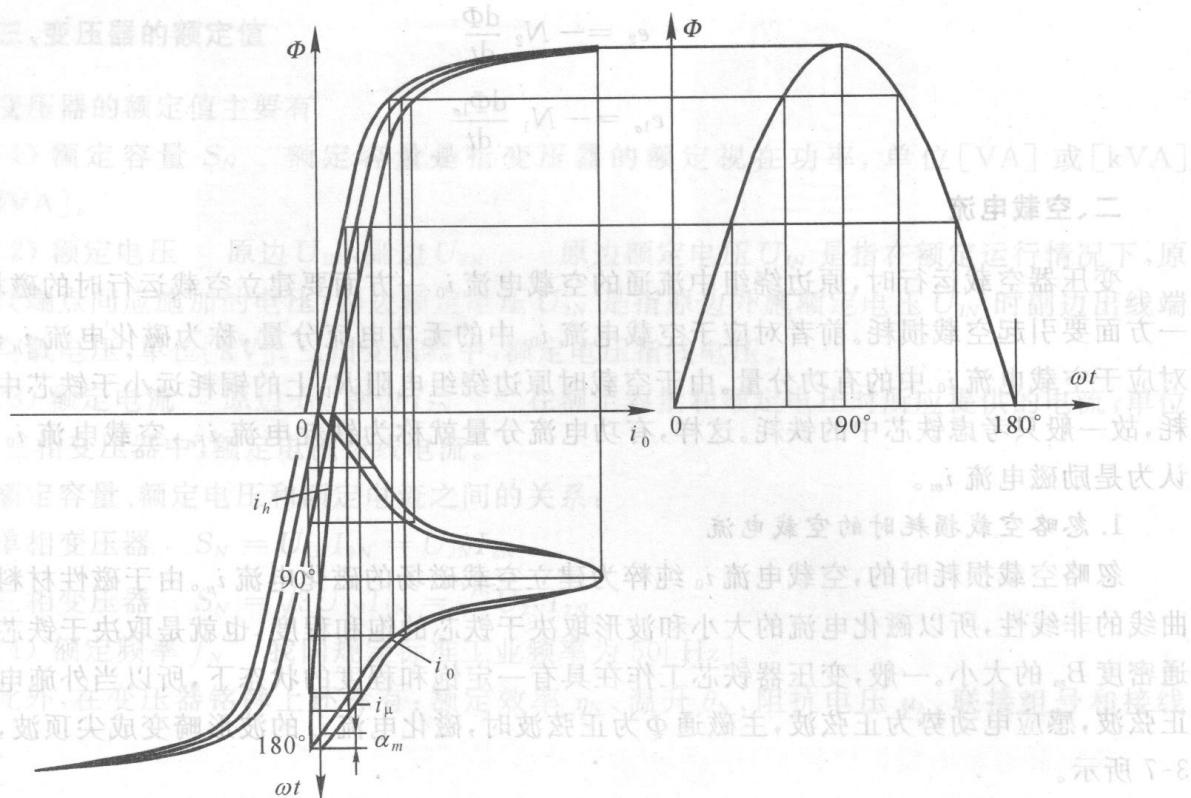


图 3-8 考虑铁耗时的空载电流波形

如图 3-8 所示。按上述作图法，可以求得相应的励磁电流  $i_0$ 。但应注意：当磁通  $\Phi$  上升时，所需励磁电流应从磁滞回线的上升分支求取，当主磁通  $\Phi$  下降时，应从下降分支求取。从图看见，励磁电流  $i_0$  为不对称的尖顶波，导前于主磁通  $\Phi$  一个磁滞角  $\alpha_m$ 。励磁电流  $i_0$  可以分解为两个分量：与主磁通  $\Phi$  同相位的磁化电流  $i_\mu$ ，用以建立磁场；导前于主磁通  $\Phi$  为  $90^\circ$ ，即与外施电压  $u_1$  同相位的有功电流  $i_h$ ，即原边绕组向电源吸收电功率用以供给磁滞损耗。

由于铁芯中还存在涡流损耗，故实际励磁电流中还有一个相应的有功电流分量  $i_w$ ，将同相位的  $i_h$  和  $i_w$  相加，就是铁耗电流  $i_{Fe}$ 。所以实际励磁电流  $i_0 = i_\mu + i_{Fe}$ 。

从上述分析已知励磁电流  $i_0$  和磁化电流  $i_\mu$  都不是正弦波，不能用相量来表示。在工程计算上，为便于测量和计算，通常用等效正弦波来替代尖顶波。以等效正弦波电流替代实际空载电流时，其等效条件为：(1) 两者的频率相等；(2) 两者的有效值相等；(3) 等效电流的相位，应保证向电源吸取的有功功率等于铁耗。使用等效正弦波后，励磁电流、磁化电流和铁耗电流就可以用相量形式来表示，三者之间具有下列关系

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_0 &= \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} \\ I_0 &= \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

### 三、感应电动势和变压器变比

当主磁通按正弦规律变化，即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (3-2)$$

式中， $\Phi_m$  为主磁通的幅值，单位用 [Wb]。

则原边绕组中的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (3-3)$$

式中,  $E_{1m} = \omega N_1 \Phi_m = 2\pi f N_1 \Phi_m$  为  $e_1$  的幅值;  $E_1$  为  $e_1$  的有效值, 单位用[V]。

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (3-4)$$

式中,  $f$  为电源电压的频率, 单位用[Hz]。

副边绕组中的感应电动势为

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (3-5)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (3-6)$$

式中,  $E_{2m} = \omega N_2 \Phi_m = 2\pi f N_2 \Phi_m$  为  $e_2$  的幅值;  $E_2$  为  $e_2$  的有效值, 单位用[V]。

将式(3-3)和式(3-5)与式(3-2)进行比较, 可见, 原、副边的感应电动势  $e_1$ 、 $e_2$  滞后于主磁通  $\Phi$  为  $90^\circ$ 。所以当原、副边感应电动势用相量表示时, 有

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (3-7)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (3-8)$$

原、副边感应电动势之比称为变压器的变比  $k$ , 即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \quad (3-9)$$

前已分析, 当磁通按正弦变化时, 不对称的尖顶波空载电流常用等效的正弦波来替代。由于漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$  主要经非磁性材料闭合, 所以漏磁路是不饱和的, 因此漏磁通  $\Phi_{1\sigma}$  和空载电流  $i_0$  成正比, 即  $\Phi_{1\sigma} = N_1 i_0 \Lambda_{1\sigma}$ , 则

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} = -N_1^2 \Lambda_{1\sigma} \frac{di_0}{dt} = -L_{1\sigma} \frac{di_0}{dt} \quad (3-10)$$

式中,  $\Lambda_{1\sigma}$  为原边漏磁路的磁导;  $L_{1\sigma}$  为原边线圈的漏电感, 是一个常数。

用相量表示时:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 \omega L_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 X_{1\sigma} \quad (3-11)$$

式中,  $X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma} = 2\pi f L_{1\sigma}$  称为原边漏电抗, 也是一个常数。

当原边线圈电阻为  $R_1$  时, 则将  $Z_1 = R_1 + jX_{1\sigma}$  称为原边漏阻抗。

#### 四、空载运行时的电动势平衡方程式

根据电路定律, 按图 3-6 所规定的正方向, 变压器空载运行时原边的电动势平衡方程式为

$$u_1 = -e_1 - e_{1\sigma} + i_0 R_1 \quad (3-12)$$

用相量表示时:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (3-13)$$

说明原边绕组中的电动势和漏阻抗限制了空载电流的大小, 额定电压时所需空载电流约为  $(2 \sim 8)\% I_N$ 。所以空载电流所引起的漏阻抗压降很小, 故在分析变压器空载运行时的物理情况时, 一般将漏阻抗压降忽略, 则

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (3-14)$$

上式表明,变压器铁芯中的主磁通大小主要取决于电源电压  $u_1$  和频率  $f$ ,而与变压器铁芯所用材料和尺寸无关。铁芯所用材料和尺寸只影响励磁电流大小和铁耗。

变压器空载时,副边绕组中没有电流流通,所以电压与电动势平相等,即

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 \quad (3-15)$$

### 五、空载运行时的等效电路

变压器的工作原理是建立在电磁感应定律的基础上,而变压器运行时,既有电路问题又有电和磁的耦合问题,尤其当磁路存在饱和现象时,将给分析和计算变压器的性能带来不便和困难。若将变压器运行中的电和磁之间的相互耦合关系用一个模拟电路的形式来等效,将使分析和计算大为简化,所谓等效电路就是基于这一概念而建立起来的。

前已分析,漏磁感应的电动势  $\dot{E}_{1\sigma}$  可用空载电流  $\dot{I}_0$  流过漏抗  $X_{1\sigma}$  所引起的压降来表示。同样,主磁通所感应的电动势  $\dot{E}$  也可以用类似的方法来解决。因为励磁电流  $\dot{I}_0$  (即  $\dot{I}_m$ ) 包含有功分量  $\dot{I}_{Fe}$ , 与  $(-\dot{E}_1)$  同相位,和无功分量  $\dot{I}_\mu$ , 滞后于  $(-\dot{E}_1)$  为  $90^\circ$ 。因此,  $(-\dot{E}_1)$  可以用  $\dot{I}_{Fe}$  流过一个电阻元件上的电压降,或用  $\dot{I}_\mu$  流过一个电感元件上的电压降来表示,即

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_{Fe} R$$

或

$$\dot{I}_{Fe} = \frac{-\dot{E}_1}{R}$$

$$-\dot{E}_1 = j\dot{I}_\mu X$$

或

$$\dot{I}_\mu = \frac{-\dot{E}_1}{jX}$$

由于  $\dot{I}_0 = \dot{I}_{Fe} + \dot{I}_\mu$ , 所以

$$\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{R} + \frac{-\dot{E}_1}{jX} = (-\dot{E}_1) \left( \frac{1}{R} - j\frac{1}{X} \right) = (-\dot{E}_1)(G - jB) = (-\dot{E}_1)Y \quad (3-16)$$

式中,电导  $G = 1/R$ , 电纳  $B = 1/X$ , 导纳  $Y = G - jB$ 。

与式(3-16)相对应的等效电路如图 3-9(a) 所示。

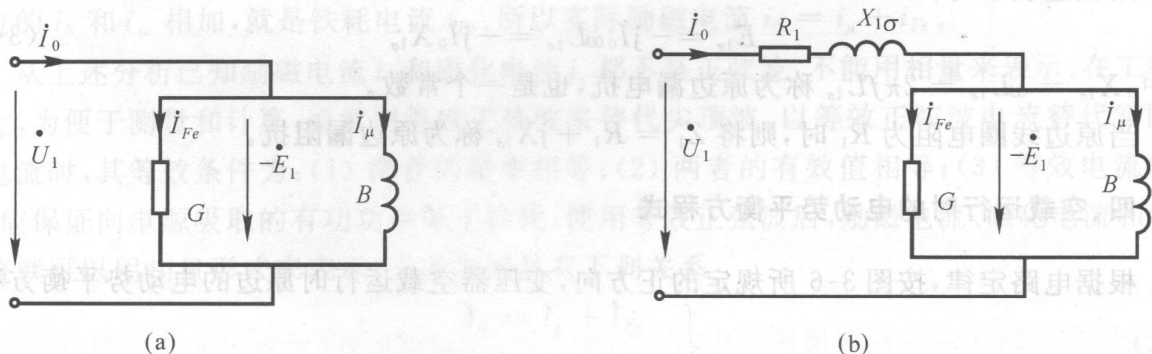


图 3-9 变压器空载运行时的并联等效电路

把式(3-16)代入式(3-13)得

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_1 + \frac{\dot{I}_0}{Y} = \dot{I}_0 (R_1 + jX_{1\sigma}) + \frac{\dot{I}_0}{G - jB} \quad (3-17)$$

与式(3-17)相对应的等效电路如图 3-9(b) 所示。

图 3-9 是并联形式的等效电路,计算时仍感不便,常用一个电阻和一个电抗相串联的等效电路,而端电压  $(-\dot{E})$  和励磁电流  $\dot{I}_0$  仍保持不变。



设转换后的串联等效阻抗为  $Z_m = R_m + jX_m$ , 则

$$Z_m = R_m + jX_m = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G - jB} = \frac{G}{G^2 + B^2} + j \frac{B}{G^2 + B^2}$$

其中,  $R_m = \frac{G}{G^2 + B^2}$  称为铁耗电阻(或激磁电阻), 是主磁通在铁芯中产生的铁耗所对应的

等效电阻, 使  $I_0^2 R_m$  等于主磁通产生的铁芯损耗;  $X_m = \frac{B}{G^2 + B^2}$  称为激磁电抗, 它的数值等

于单位励磁电流产生的主磁通在励磁线圈中所感应的电动势的大小。由于主磁通在铁芯中流通时, 受铁芯磁路饱和的影响, 所以  $X_m$  与  $X_{1\sigma}$  不同, 它不是一个常数, 而是随铁芯饱和程度增加而减少。这样, 在考虑了铁芯损耗以后,  $\dot{E}_1$  与  $\dot{I}_0$  的关系变为:

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (R_m + jX_m) \quad (3-18)$$

将式(3-18)代入式(3-13), 得到

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (R_1 + j\dot{I}_0 X_{1\sigma}) + \dot{I}_0 (R_m + jX_m) \quad (3-19)$$

式(3-18)和式(3-19)相对应的等效电路如图3-10(a)和图3-10(b)所示。

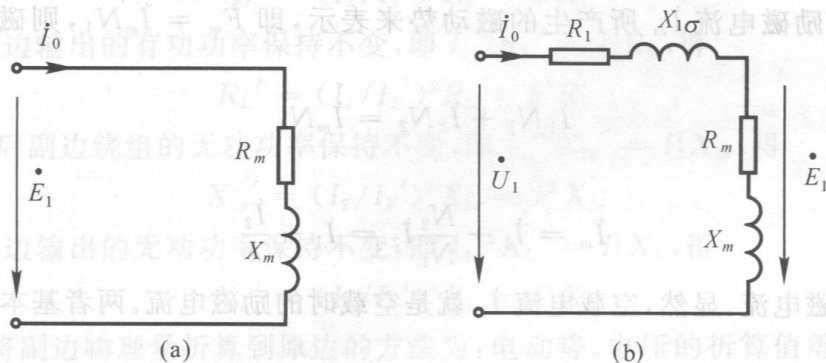


图3-10 变压器空载运行时的串联等效电路

### § 3-3 单相变压器的负载运行

#### 一、变压器负载运行时的物理情况

当变压器副边  $ax$  端接通负载阻抗时的工作状态称为负载运行, 如图3-11所示。在  $\dot{E}_2$  的作用下, 副边绕组就有电流  $\dot{I}_2$  流通, 负载阻抗  $Z_L$  的大小决定了副边电流  $\dot{I}_2$ 。根据全电流定律, 这时铁芯中的主磁通  $\Phi$  由原边磁动势和副边磁动势共同产生, 与空载相比有所变化, 从而改变了原、副边的感应电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$ , 在电压  $\dot{U}_1$  和原边漏阻抗  $Z_1$  一定的情况下,  $\dot{E}_1$  的改变必然引起原边电流从空载时的  $\dot{I}_0$  变为负载时的  $\dot{I}_1$ 。但应注意: 由于原边漏阻抗很小, 因此主磁通  $\Phi$  和感应电动势  $\dot{E}_1$  的变化也是很小的。当然, 副边磁动势除了参与产生主磁通外, 同样会产生只与副边线圈相交链的漏磁通  $\Phi_{2\sigma}$ , 会在副边线圈中感应电动势  $e_{2\sigma}$ 。用相量表示时

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 \omega L_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 X_{2\sigma} \quad (3-20)$$

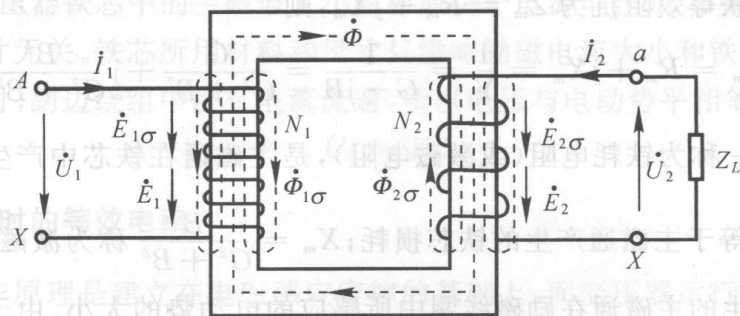


图 3-11 单相变压器负载运行原理图

## 二、负载运行时的基本方程式

### 1. 磁动势平衡方程式

变压器负载运行时,原边绕组产生磁动势  $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$ ,副边绕组产生磁动势  $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ,两者合成的磁动势,  $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m$  就是产生负载运行时的主磁通  $\Phi$  的励磁磁动势。 $\dot{F}_m$  一般用原边绕组通入励磁电流  $\dot{I}_m$  所产生的磁动势来表示,即  $\dot{F}_m = \dot{I}_m N_1$ ,则磁动势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1 \quad (3-21)$$

或

$$\dot{I}_m = \dot{I}_1 + \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k} \quad (3-22)$$

式中,  $\dot{I}_m$  称为励磁电流。显然,空载电流  $\dot{I}_0$  就是空载时的励磁电流。两者基本接近。

或

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L} \quad (3-23)$$

式中,  $\dot{I}_{1L} = -\frac{\dot{I}_2}{k}$  称为原边电流的负载分量。

上式表明,负载时,原边电流可以认为由两个分量组成:一个是励磁电流  $\dot{I}_m$ ;另一个是负载分量  $\dot{I}_{1L}$ ,而负载分量产生的磁动势  $\dot{I}_{1L} N_1$  用以抵消副边绕组产生的磁动势  $\dot{I}_2 N_2$ ,即

$$\dot{I}_{1L} N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0 \quad (3-24)$$

### 2. 电动势平衡方程式

按图 3-11 所表示的各物理量正方向,根据电路定律,可得负载运行时,原、副边电动势平衡方程式如下

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j_1 \dot{I}_1 X_{1\sigma} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (3-25)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2\sigma} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{2\sigma} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (3-26)$$

式中,  $Z_2 = R_2 + jX_{2\sigma}$  称为副边的漏阻抗。

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L \quad (3-27)$$

## 三、变压器的折算法

利用式(3-25)、式(3-26)、式(3-27)和式(3-22)等对变压器已能进行定量计算。但因变压器原、副边线圈的匝数相差较大,原、副边的参数和电压、电流的数值相差较大,计算时不

方便,画相量图就更困难。所以一般均采用折算法。即用一个匝数和原边线圈相等的新的副边线圈来替代实际的副边线圈。这个新的副边线圈的各种物理量就称为副边的折算值。应当注意:折算仅仅是一种数学方法,所以在副边线圈折算前后,保持变压器原来的电磁关系、磁场分布情况和能量关系不变。折算值用原来物理量的右上角加“'”来表示。各物理量的折算值方法如下:

(1) 折算前后副边产生的磁动势保持不变,即  $I_2' N_1 = I_2 N_2$ , 得

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{k} \quad (3-28)$$

(2) 折算前后副边的视在功率保持不变,即  $E_2' I_2' = E_2 I_2$ , 得

$$E_2' = (I_2 / I_2') E_2 = k E_2 \quad (3-29)$$

折算前后副边输出的视在功率保持不变,即  $U_2' I_2' = U_2 I_2$ , 得

$$U_2' = (I_2 / I_2') U_2 = k U_2 \quad (3-30)$$

(3) 折算前后副边绕组的损耗保持不变,即  $I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2$ , 得

$$R_2' = (I_2 / I_2')^2 R_2 = k^2 R_2 \quad (3-31)$$

折算前后副边输出的有功功率保持不变,即  $I_2'^2 R_L' = I_2^2 R_L$ , 得

$$R_L' = (I_2 / I_2')^2 R_L = k^2 R_L \quad (3-32)$$

(4) 折算前后副边绕组的无功功率保持不变,即  $I_2'^2 X_{2\sigma}' = I_2^2 X_{2\sigma}$ , 得

$$X_{2\sigma}' = (I_2 / I_2')^2 X_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma} \quad (3-33)$$

折算前后副边输出的无功功率保持不变,即  $I_2'^2 X_L' = I_2^2 X_L$ , 得

$$X_L' = (I_2 / I_2')^2 X_L = k^2 X_L \quad (3-34)$$

综上所述,将副边物理量折算到原边的方法为:电动势、电压的折算值等于原值乘以变比  $k$ ; 电流的折算值等于原值除以  $k$ ; 阻抗的折算值等于原值乘以  $k^2$ 。

折算后变压器的基本方程组为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I} R_1 + j \dot{I}_1 X_{1\sigma} \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' R_2' - j \dot{I}_2' X_{2\sigma}' \\ \dot{U}_2' &= \dot{I}_2' Z_L' = \dot{I}_2' (R_L' + j X_L') \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_m \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_2' = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \\ -\dot{E}_1 &= \dot{I}_m Z_m = \dot{I}_m (R_m + j X_m) \end{aligned} \right\} \quad (3-35)$$

#### 四、等效电路

##### 1. T形等效电路图

根据上述方程式组可以画出等效电路图如图 3-12(a) 所示。图中  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2'$  的箭头表示电动势的正方向。

因  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ , 所以可以将两条电动势相等的电路合并成一条支路, 而流过这条支路的电流为  $\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m$ 。等效电路变成如图 3-12(b) 所示。

根据  $-\dot{E}_1 = \dot{I}_m (R_m + j X_m)$ , 可以得到用纯阻抗表示的等效电路如图 3-12(c) 所示。由于电路中的阻抗(不包括负载阻抗)分布呈“T”形, 所以称为 T 形等效电路图。

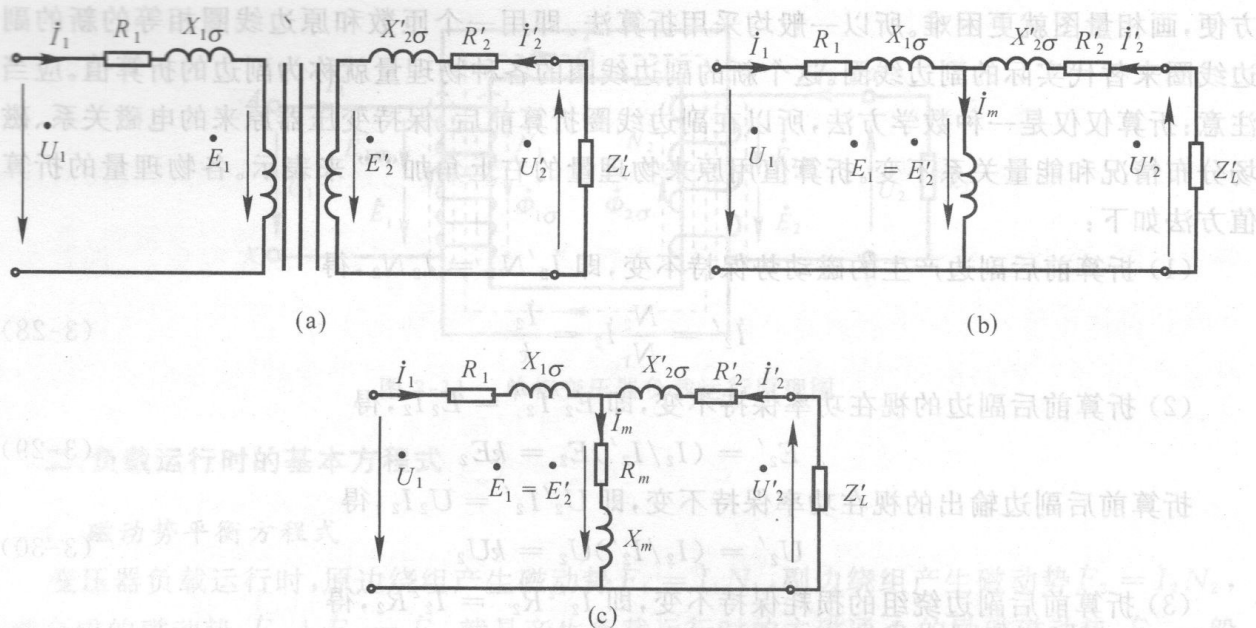


图 3-12 变压器 T 形等效电路的形成

2. 近似  $\Gamma$  形等效电路图

T 形等效电路能准确地反映变压器内在的电磁关系,但它包含有串联和并联电路,进行相量运算比较复杂。为简化计算,考虑到  $Z_1 \ll Z_m$ ,可以将形等效电路中的激磁支路  $R_m$  和  $X_m$  直接移到电源端,成为如图 3-13 所示的近似  $\Gamma$  形等效电路图。使计算大为简化,而误差不大。

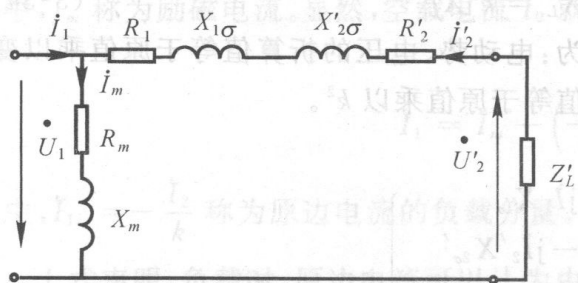
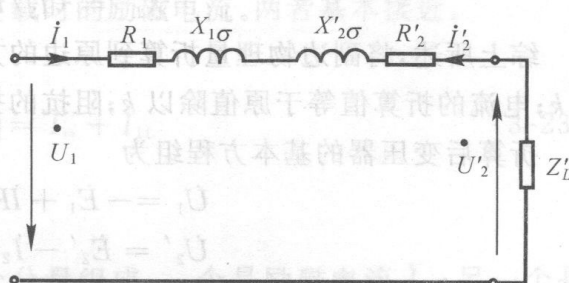
图 3-13 变压器的近似形  $\Gamma$  等效电路图

图 3-14 变压器的简化等效电路图

## 3. 简化等效电路

在电力变压器中励磁电流  $I_m \ll$  额定电流  $I_{1N}$ ,则可忽略  $I_m$ ,即将近似  $\Gamma$  形等效电路图中的励磁支路去掉,就得到如图 3-14 所示的简化等效电路图。

在近似  $\Gamma$  形等效电路和简化等效电路图中,常将原、副边的漏阻抗合并起来,即

$$\left. \begin{aligned} R_k &= R_1 + R_2' \\ X_k &= X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \\ Z_k &= R_k + jX_k = Z_1 + Z_2' \end{aligned} \right\} \quad (3-36)$$

式中,  $Z_k$  称为短路阻抗;  $R_k$  称为短路电阻;  $X_k$  称为短路电抗。

对应简化等效电路的电压平衡方程式为

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(R_k + jX_k) - \dot{U}_2' = \dot{I}_1 Z_k - \dot{U}_2' \quad (3-37)$$

从简化等效电路可见,短路阻抗  $Z_k$  决定变压器稳态短路电流  $I_k = U_1/Z_k$  的大小,  $Z_k$  还表征了变压器在额定负载时电压降落的大小,它是变压器的一个重要参数。

### 五、相量图

根据变压器基本方程式组(3-35)不仅可以画出T形等效电路,同时可以画出相量图,如图3-15所示。相量图能清楚地表明各物理量之间的相位关系,是分析交流电路的一种重要手段。

变压器的负载通常为感性负载,在已知 $U_2$ 、 $I_2$ 和 $\cos\varphi_2$ ,以及变压器参数 $k$ 、 $R_1$ 、 $X_{1\sigma}$ 、 $R_2$ 、 $X_{2\sigma}$ 、 $R_m$ 和 $X_m$ 等时,绘制相量图的步骤如下:

(1) 根据变比计算出副边参数和变量的折算值 $U_2'$ 、 $I_2'$ 、 $R_2'$ 、 $X_{2\sigma}'$ ;

(2) 按比例尺绘出 $\dot{U}_2'$ 和 $\dot{I}_2'$ 相量,其中 $\dot{I}_2'$ 滞后于 $\dot{U}_2'$ 为 $\varphi_2$ 角;在 $\dot{U}_2'$ 上依次加上副边绕组的漏阻抗压降 $\dot{I}_2'R_2'$ 和 $j\dot{I}_2'X_{2\sigma}'$ ,便得到相量 $\dot{E}_2'$ 。由于 $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ ,所以 $\dot{E}_1$ 相量也就已同时绘出;

(3) 导前于 $\dot{E}_1$ 90°作主磁通 $\dot{\Phi}_m$ ;导前于 $\dot{\Phi}_m$  $\alpha_{Fe}$ 角作励磁电流 $\dot{I}_m$ ,其中 $\alpha_{Fe} = \arctan(R_m/X_m)$ , $I_m = E_1/Z_m$ ;

(4) 根据 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2')$ 作出 $\dot{I}_1$ 相量;

(5) 作相量 $-\dot{E}_1$ ;在 $-\dot{E}_1$ 上依次加上原边绕组的漏阻抗压降 $\dot{I}_1R_1$ 和 $j\dot{I}_1X_{1\sigma}$ ,便得到电源电压 $\dot{U}_1$ 的相量。 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_1$ 之间的相位差角 $\varphi_1$ 就是变压器原边的功率因数角, $\cos\varphi_1$ 就是原边的功率因数。

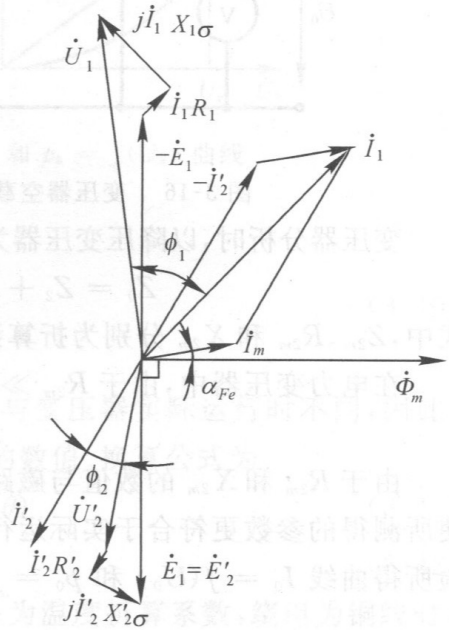


图3-15 感性负载时的变压器相量图

值得注意的是:① 由于变压器原、副边漏阻抗压降值远远小于感应电动势和原、副边电压,励磁电流也远远小于原、副边电流,所以不可能严格按实际值的比例去画相量图;② 对应于不同的等效电路,有不同的相量图。

总之,基本方程组、等效电路和相量图是分析变压器运行状况的三种方法,三者之间是相互关联和统一的,只是基本方程组概括了变压器中的电磁关系,定量计算时一般利用基本方程组和等效电路图;讨论各物理量之间的相位关系时,利用相量图就显得特别方便和明了。

## § 3-4 变压器的参数测定

在求解变压器基本方程组、画等效电路图和相量图时,均需要知道变压器的参数,即原、副边绕组的电阻、漏抗和激磁阻抗。这些参数,对新设计的变压器可以通过计算获得,对已有的变压器可以通过空载和短路试验测定。

### 一、变压器的空载试验

为便于测量和安全起见,通常将正弦波电源电压加在低压绕组上。试验接线图如图3-16所示。考虑到空载试验时电压需超过额定值,而电流很小,为减少测量仪表所需电流引起的误差,一般将电流表和功率表的电流线圈接在靠变压器绕组侧。为了获得空载时各物理量随电压变化的曲线,外施电压应能在一定范围内变化。一般,先将电源电压升高到 $1.2U_N$ ,然后再逐渐

单调下降,依次分别测出空载电流  $I_0$  和空载损耗  $p_0$ ,即可作出曲线  $I_0 = f(U_0)$  和  $p_0 = f(U_0)$ 。

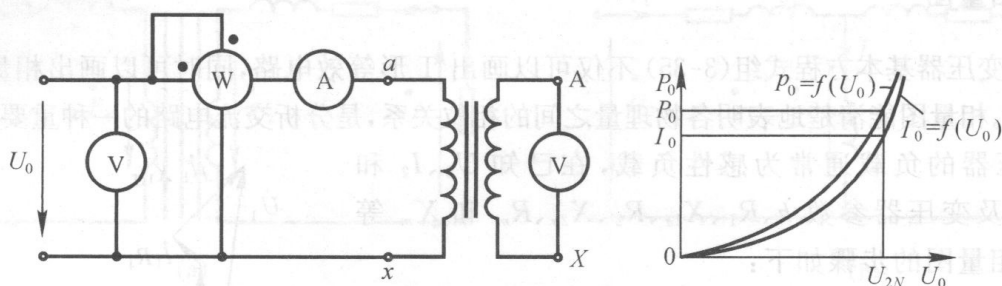


图 3-16 变压器空载试验接线图与  $I_0 = f(U_0)$  和  $p_0 = f(U_0)$  曲线

变压器分析时,以降压变压器为例的。从 T 形等效电路可知,空载试验时测得的总阻抗为

$$Z_0 = Z_2 + Z_{2m} = (R_2 + jX_{2\sigma}) + (R_{2m} + jX_{2m})$$

式中,  $Z_{2m}$ 、 $R_{2m}$  和  $X_{2m}$  分别为折算到低压边的激磁阻抗、铁耗电阻和激磁电抗。

在电力变压器中,由于  $R_{2m} \gg R_2$ ,  $X_{2m} \gg X_{2\sigma}$ ,所以近似地认为

$$Z_0 \approx Z_{2m} = R_{2m} + jX_{2m}$$

由于  $R_{2m}$  和  $X_{2m}$  的数值与磁路的饱和程度有关,即在不同电压下所测得的数值不同,为使所测得的参数更符合于实际运行的情况,应取额定电压点的数据来计算激磁阻抗。即从试验所得曲线  $I_0 = f(U_0)$  和  $p_0 = f(U_0)$  上查出  $U_0 = U_{2N}$  所对应的  $I_0$  和  $p_0$ ,再进行计算:

$$\left. \begin{aligned} Z_{2m} &= U_0 / I_0 \\ R_{2m} &= p_0 / I_0^2 \\ X_{2m} &= \sqrt{Z_{2m}^2 - R_{2m}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

根据空载试验低压边加额定电压时所测得的高压边电压值,可以计算出变压器的变比  $k$ ,然后将上述计算所得的激磁阻抗值乘以  $k^2$ ,就得到折算到高压边的激磁阻抗值,即

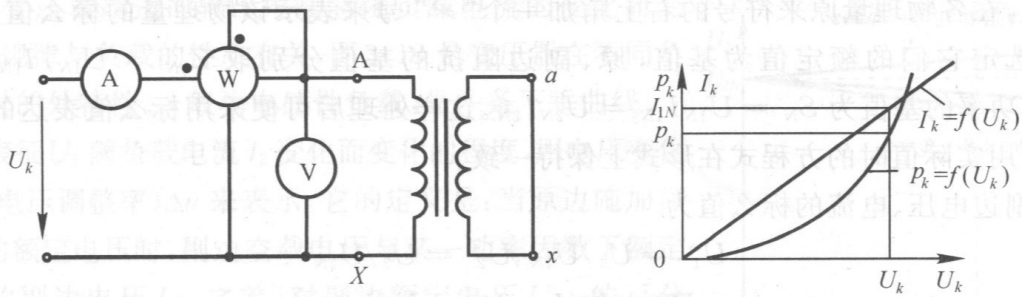
$$\left. \begin{aligned} Z_m &= k^2 Z_{2m} \\ R_m &= k^2 R_{2m} \\ X_m &= k^2 X_{2m} \end{aligned} \right\} \quad (3-39)$$

一般变压器在额定电压时,空载电流  $I_0 \approx (2 \sim 10)\% I_N$  空载损耗  $p_0 \approx (0.2 \sim 1.0)\% S_N$ ;随着变压器容量的增大, $I_0$  和  $p_0$  的百分值逐渐减小。

## 二、变压器的短路试验

为便于测量,短路通常将电源施加在高压边,而副边直接短路。试验接线图如图 3-17 所示。考虑到短路试验时电流需超过额定值,而电压很低,为减少测量仪表上的电压降引起的误差,一般将电压表和功率表的电压线圈接在靠变压器绕组侧。变压器短路时,外施电压仅用于克服变压器中的等效漏阻抗压降;由于一般电力变压器的短路阻抗  $Z_k$  很小,为了避免产生过大的短路电流而使绕组烧毁,短路试验应当在低电压下进行。调节外施电压,使短路电流  $I_k$  从 0 逐渐增加到  $1.2 \sim 1.3 I_N$ ,测出短路电流  $I_k$  和短路损耗  $p_k$  随外施电压  $U_k$  变化的曲线  $I_k = f(U_k)$  及  $p_k = f(U_k)$ 。由于漏磁路不饱和,短路阻抗(即漏阻抗)  $Z_k$  可视为常值,故短路电流曲线为一直线;而短路损耗的曲线近似为指数曲线。

由于短路试验时外施电压很低,铁芯中磁通密度很低,铁耗和励磁电流均可忽略,所以在短路情况下可采用变压器的简化等效电路。在  $I_k = f(U_k)$  和  $p_k = f(U_k)$  曲线上,取  $I_k =$

图 3-17 变压器短路试验接线图与  $I_k = f(U_k)$  和  $p_k = f(U_k)$  曲线

$I_{1N}$  查出对应的  $U_k$  和  $p_k$ , 计算变压器的短路参数

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= U_k / I_k \\ R_k &= p_k / I_k^2 \\ X_k &= \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-40)$$

由于导体的电阻值和温度有关, 而短路试验时的温度与变压器实际运行时不同, 因此, 由短路试验所得的参数应换算到基准工作温度 ( $75^\circ\text{C}$ ) 时的数值。换算公式为

$$R_{k75^\circ\text{C}} = R_{k\theta} (\alpha + 75) / (\alpha + \theta) \quad (3-41)$$

$$Z_{k75^\circ\text{C}} = \sqrt{R_{k75^\circ\text{C}}^2 + X_k^2} \quad (3-42)$$

式中,  $\theta$  为试验时的室温;  $R_{k\theta}$  为  $\theta$  环境温度下的短路电阻;  $\alpha$  为温度折算系数, 绕组为铜线时  $\alpha = 234.5$ , 绕组为铝线时  $\alpha = 228$ 。

一般电力变压器当短路电流值达到额定电流值时, 短路损耗约为  $(0.4\% \sim 4\%) S_N$ , 数值随着变压器容量的增大而减小。

当短路电流达到额定值时, 外施电压  $U_k = I_{1N} Z_{k75^\circ\text{C}}$  称为短路电压 (或称为阻抗电压), 为便于使用, 短路电压通常用额定电压的百分值表示, 即

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} Z_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% \quad (3-43)$$

它的有功分量 (或称电阻分量)  $u_{kR}$  和无功分量 (或称电抗分量)  $u_{kX}$  分别为

$$\left. \begin{aligned} u_{kR} &= \frac{I_{1N} R_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% \\ u_{kX} &= \frac{I_{1N} X_k}{U_{1N}} \times 100\% \\ u_k &= \sqrt{u_{kR}^2 + u_{kX}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-44)$$

短路电压  $u_k$  是变压器的一个重要参数, 它的大小反映了在额定负载时, 变压器漏阻抗压降的大小。  $u_k$  较小, 则变压器负载变化时, 输出电压的波动较小, 但当变压器短路时, 短路电流就较大。一般电力变压器的  $u_k$  约为  $4\% \sim 10\%$ , 其数值随着变压器容量的增大而增大。

### § 3-5 标么值

在工程 and 科技计算中, 各物理量, 如电压、电流、阻抗和功率等往往不用它们的实际值来表示, 而是表示成这些物理量与选定的同单位的基值之比的形式, 称为标么值。为区分实际值