

第1章

变压器

变压器是利用电磁感应原理来改变电压的一种静止的电能量转换装置,广泛应用于国民经济的各个领域。本章以普通双绕组电力变压器为主要研究对象,首先介绍变压器的用途、分类、基本结构和额定数据;之后重点研究单相变压器在稳态和对称运行条件下的基本原理及运行特性,对于三相变压器仅就其特点加以论述;最后,简单地介绍两种特种变压器的结构特点及其工作原理。

1.1 概述

1.1.1 变压器的用途

变压器是一种静止的电气设备,它运用电磁感应原理,将一种交流电能转换成频率相同的另一种交流电能。

在电力系统中,为了将发电站的大功率电能输送到远距离的用户区,采用高压输电才是经济合理的。因为当输送的功率一定时,电压越高,线路中的电流就越小,则输电线路的功率损耗和电压降也越小。因此需要采用升压变压器,将发电机发出的电压(通常只有 $10.5\text{ kV}\sim 20\text{ kV}$)逐级升高到 $220\text{ kV}\sim 500\text{ kV}$;当电能输送到用户区后,又需要采用降压变压器,将其逐级降到各种配电电压,供动力设备和照明设备使用。由此可见,变压器在电力系统中具有重要的作用。

此外,变压器在其他部门中也被广泛应用,如测量交流电能的仪用互感器,用于整流、高压实验、矿井等特殊场合的专用变压器,用于自动控制系统中的小功率变压器等。

1.1.2 变压器的分类

变压器有多种分类方法。下面将按变压器的用途、绕组数目、相数、冷却方式和冷却介质分别进行分类。

- (1) 按用途分: 有电力变压器和特种变压器;
- (2) 按绕组数目分: 有双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器;
- (3) 按相数分: 有单相变压器和三相变压器;
- (4) 按铁芯结构分: 有芯式变压器和壳式变压器;

(5) 按冷却方式和冷却介质分: 有用油冷却的油浸式变压器和空气冷却的干式变压器。

1.1.3 变压器的基本工作原理

变压器的基本工作原理基于电磁感应定律。下面以一台单相双绕组变压器(如图 1-1 所示)为例来说明其工作原理。将与交流电源相连的绕组,称为原绕组或一次绕组,与原绕组或一次绕组有关的各物理量均标以下标“1”,如一次侧电压、电流、电阻分别表示为 u_1 、 i_1 、 R_1 ;将与负载相连的绕组,称为副绕组或二次绕组,与副绕组或二次绕组有关的各物理量均标以下标“2”,如二次侧电压、电流、电阻分别表示为 u_2 、 i_2 、 R_2 。

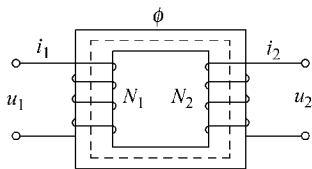


图 1-1 变压器的工作原理

当一次绕组外加交流电压 u_1 ,在一次绕组中便有交流电流 i_1 流过。因而在铁芯中产生一个与外施电压同频率的交变磁通 ϕ ,该交变磁通 ϕ 同时与一、二次绕组相交链,根据电磁感应定律,便在一、二次绕组中产生与匝数成正比的感应电动势 e_1 和 e_2 ,即

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

若不考虑变压器线圈的电阻和漏磁通,有

$$u_1 = -e_1 \propto N_1$$

$$u_2 = e_2 \propto N_2$$

用有效值表示为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

式中, N_1 为一次绕组匝数; N_2 为二次绕组匝数。

故只要改变一、二次绕组的匝数比,便可达到改变电压的目的。当二次绕组接上用电设备,副绕组即有电能输出,从而实现能量的传递,这就是变压器的基本工作原理。

1.1.4 变压器的基本结构

铁芯和绕组是变压器中最主要的部件,其构成变压器的主体,称为器身。

1. 变压器的铁芯

铁芯既是变压器的磁路部分,又是套装绕组的骨架。为了减少铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗铁耗,变压器铁芯通常用表面涂以绝缘漆、厚为 0.3 mm 或 0.35 mm 的冷轧硅钢片叠装而成。

铁芯分为铁芯柱和铁轭两部分。铁芯柱上套绕组,铁轭则将铁芯柱连接起来构成闭合磁路。根据铁芯的结构,变压器可分为芯式和壳式两种。芯式结构的特点是:铁轭靠着绕组的顶面和底面,而不包围绕组的侧面,这种变压器的结构简单,绕组和绝缘装配比较容易,因此电力变压器均采用芯式结构,如图 1-2 所示。壳式结构的特点是:铁轭包围绕组的顶面、底面和侧面,这种变压器的机械强度好,但制造复杂,仅在一些特种变压器或小容量变压器中采用这种结构,如图 1-3 所示。

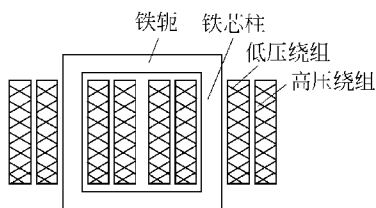


图 1-2 单相芯式变压器

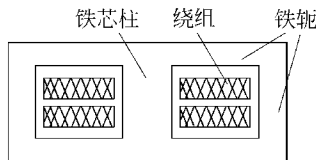


图 1-3 单相壳式变压器

2. 变压器的绕组

绕组是变压器的电路部分，由包有绝缘材料的铜（或铝）导线绕制而成。在变压器中，电压较高的绕组称为高压绕组，电压较低的绕组称为低压绕组。装配时低压绕组靠近铁芯，高压绕组套在低压绕组外面，高、低压绕组间设置有油道（或气道），以加强绝缘和散热。高、低压绕组两端到铁轭之间都要衬垫端部绝缘板。根据高、低压绕组之间的相对位置，变压器的绕组可分成同心式和交叠式两类。

同心式绕组的高、低压绕组同心地套装在芯柱上，如图 1-2 所示。同心式绕组结构简单、制造方便，国产电力变压器均采用这种结构。同心式绕组按绕制的方法不同，又分为圆筒式、螺旋式和连续式几种形式。交叠式绕组的高、低压绕组沿芯柱高度方向互相交叠放置，如图 1-4 所示。交叠式绕组机械强度较好、漏抗小、引线方便，多用于壳式变压器中。

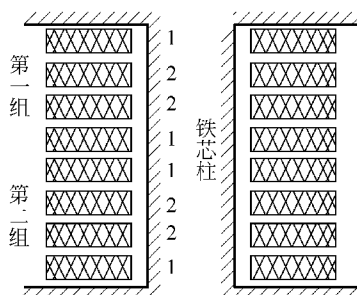


图 1-4 交叠式绕组

1—低压绕组；2—高压绕组

3. 变压器的其他部件

除器身外，典型的油浸式电力变压器还有油箱、散热器、绝缘套管、分接开关及继电保护装置等部件。图 1-5 是一台三相油浸式电力变压器的示意图。

1.1.5 变压器的额定值

额定值是变压器制造厂对变压器在指定工作条件下运行时所规定的一些量值。当变压器在额定状态下工作时，可以保证变压器长期可靠地运行。额定值是选用变压器的依据。额定值标注在变压器的铭牌上。变压器的主要额定值如下。

(1) 额定容量 S_N

在铭牌规定的额定状态下，变压器所输出的视在功率的保证值，称为变压器的额定容量，单位为 $V \cdot A$ 或 $kV \cdot A$ 。由于变压器的效率较高，通常将变压器一次绕组、二次绕组的额定容量设计成相等。对于三相变压器，额定容量是指三相容量之和。

(2) 一、二次侧的额定电压 U_{1N} 、 U_{2N}

一次侧的额定电压 U_{1N} ，是指变压器在正常运行时一次绕组线路端子间外施电压的有效值。二次侧额定电压 U_{2N} ，是指当变压器一次侧外加额定电压 U_{1N} 时二次侧的空载电压。对于三相变压器，一、二次侧额定电压均指线电压。它们的单位均为 V 或 kV 。

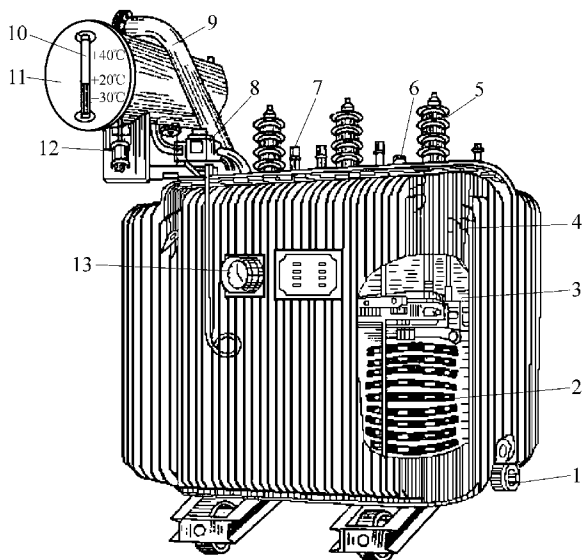


图 1-5 三相油浸式电力变压器

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

(3) 一、二次侧的额定电流 I_{1N} 、 I_{2N}

额定电流是指根据额定容量和额定电压计算出来的电流有效值，单位为 A。对三相变压器，额定电流系指线电流。

对单相变压器，一、二次侧额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

对三相变压器，一、二次侧额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

(4) 额定频率 f_N

额定频率的单位为 Hz，我国规定的标准工频为 50 Hz，故电力变压器的额定频率是 50 Hz。

此外，在变压器的铭牌上还标注有相数、接线图、额定运行效率、阻抗压降和温升。对于特大型变压器还标注有变压器的总质量、铁芯和绕组的质量以及储油量，供安装和检修时参考。

例 1-1 有一台三相变压器，额定容量 $S_N = 5000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 10 \text{ kV}/6.3 \text{ kV}$ ，一、二次绕组分别采用星形和三角形接法，求该变压器一、二次侧的额定线电流和额定相电流。

解 一次侧额定线电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 288.7 (\text{A})$$

一次侧额定相电流为

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 288.7(\text{A})$$

二次侧额定线电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} = 458.2(\text{A})$$

二次侧额定相电流为

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = 264.6(\text{A})$$

1.2 变压器的运行分析

本节以单相双绕组变压器为例,首先从变压器空载运行和负载运行的基本电磁关系出发,分析变压器稳态运行时的基本方程式、等效电路、相量图以及运行性能,其分析方法和结论适用于对称稳态运行的三相变压器的每一相。

1.2.1 变压器的空载运行

变压器的一次绕组接交流电源,二次绕组开路,负载电流为零时的运行,称为变压器的空载运行。

1. 空载运行时的电磁过程

图 1-6 所示为一台单相变压器空载运行的示意图,图中 N_1 和 N_2 分别表示一次和二次绕组的匝数。当二次绕组开路,一次绕组 AX 端外接一正弦交流电压 u_1 时,在一次绕组中便有交流电流 i_0 流过,该电流 i_0 称为空载电流。空载电流 i_0 产生空载磁动势 $F_0 = N_1 i_0$,在空载磁动势 F_0 的作用下,将在变压器内部产生磁通。由于该磁通的实际分布情况很复杂,为了便于分析,将该磁通分为两部分,如图 1-6 所示。其中磁通 ϕ 沿铁芯闭合,与一、二次绕组相交链,称为主磁通,主磁通将在一、二次绕组中感应出电动势,因而起着传递能量的媒介作用;磁通 $\phi_{1\sigma}$ 主要沿变压器油或者空气等非铁磁材料闭合,仅与一次绕组相交链,称为一次绕组的漏磁通,一次绕组漏磁通仅在一次绕组中感应电动势,不传递能量,只起着电压降的作用。

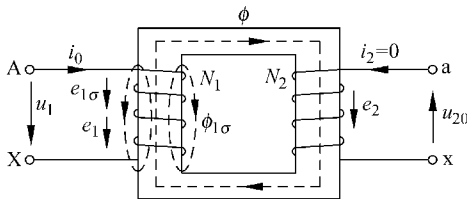


图 1-6 单相变压器空载运行

由于主磁通以变压器铁芯为闭合路径,所遇到的磁阻很小,而漏磁通通过的路径主要是变压器油和空气等非铁磁材料,所遇到的磁阻很大,因此在变压器中漏磁通远小于主磁通,约为主磁通的 $0.1\% \sim 0.2\%$ 。此外,由于变压器铁芯材料存在饱和现象,故主磁通与建立它的电流为非线性关系,而漏磁通主要沿非铁磁材料闭合,是线性磁路,故它与建立它的电流为线性关系。

2. 空载运行时的电动势平衡方程式

(1) 参考方向的假定

为了用方程式正确地表示变压器中各物理量之间的关系,必须先假定它们的参考方向。在分析变压器时,各物理量的参考方向可以任意假定,但参考方向的规定不同,对同一电路所列出的方程式也不同。变压器各物理量的参考方向通常按惯例假定如下:

① 一次绕组电流 i_1 的参考方向与外加的电源电压 u_1 的参考方向一致,即二者为关联的参考方向;

② 磁通的参考方向与产生该磁通的电流的参考方向符合右手螺旋关系,并认为相应的磁动势也为正值;

③ 感应电动势的参考方向与产生它们的磁通的参考方向符合右手螺旋关系;

④ 二次绕组电流 i_2 的参考方向与二次绕组感应电动势 e_2 的参考方向一致, u_2 的参考方向与 i_2 流入负载阻抗 Z_L 的正方向一致。

(2) 感应电动势

① 一、二次绕组的感应电动势

当外加电源电压按正弦规律变化时,主磁通 ϕ 也将按正弦规律变化,设主磁通的瞬时表达式为

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

式中, Φ_m 为主磁通的最大值; ω 为磁通变化的角频率, $\omega = 2\pi f$ 。

如前所述,主磁通 ϕ 同时与一、二次绕组交链,将在一、二次绕组中感应出电动势 e_1 、 e_2 , 则

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t \\ &= 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-1)$$

同理可得

$$\begin{aligned} e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} = \omega N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中, $E_{1m} = \omega N_1 \Phi_m = 2\pi f N_1 \Phi_m$, 为一次绕组感应电动势的最大值; $E_{2m} = \omega N_2 \Phi_m = 2\pi f N_2 \Phi_m$, 为二次绕组感应电动势的最大值。

由上面的分析可以看出,感应电动势随时间的变化落后于磁通随时间的变化 90° 。它们的有效值分别为

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

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-4)$$

由于电动势 e_1 、 e_2 均是按正弦规律变化,式(1-1)、式(1-2)可分别用相量形式表示为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-5)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-6)$$

② 一次绕组漏感电动势

由上面的分析可知,一次绕组漏磁通 $\phi_{1\sigma}$ 会在一次绕组中感应电动势 $e_{1\sigma}$, 并且一次绕组漏磁通 $\phi_{1\sigma}$ 的路径,大都在变压器油或空气等非铁磁材料中,无饱和现象,故可认为漏磁通 $\phi_{1\sigma}$ 与 i_0 成正比,则一次绕组的漏磁链为

$$\Psi_{1\sigma} = N_1 \phi_{1\sigma} = L_{1\sigma} i_0 \quad (1-7)$$

式中, $L_{1\sigma}$ 是一次绕组漏电感,为常数。

设电流 i_0 随时间按正弦规律变化,即

$$i_0 = \sqrt{2} I_0 \sin \omega t \quad (1-8)$$

则一次绕组漏感电动势 $e_{1\sigma}$ 为

$$\begin{aligned} e_{1\sigma} &= - \frac{d\Psi_{1\sigma}}{dt} = - L_{1\sigma} \frac{di_0}{dt} = - L_{1\sigma} \sqrt{2} I_0 \omega \cos \omega t \\ &= L_{1\sigma} \sqrt{2} I_0 \omega \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1\sigma m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-9)$$

由此可知,漏感电动势 $e_{1\sigma}$ 在相位上滞后 i_0 90° , 其有效值为

$$E_{1\sigma} = \frac{E_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} \omega L_{1\sigma} I_0}{\sqrt{2}} = \omega L_{1\sigma} I_0 = X_{1\sigma} I_0 \quad (1-10)$$

式中, $X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$, 为一次绕组漏电抗。

式(1-9)用相量形式表示为

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

(3) 一、二次绕组电动势平衡方程式

按图 1-6 中规定的参考方向,根据基尔霍夫第二定律,一次侧电动势平衡方程式为

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

当式(1-12)中各物理量均是按正弦规律变化时,可用相量形式表示为

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

将式(1-11)代入式(1-13)得

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 X_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-14)$$

式中, R_1 为一次绕组的电阻; $Z_1 = R_1 + jX_{1\sigma}$, 为一次绕组的漏阻抗。

空载时,一次侧的漏阻抗压降很小,若忽略漏阻抗压降,则

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-15)$$

由式(1-15)可得, $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 。因此,影响主磁通大小的因素是电源电压 U_1 、电源频率 f 和一次侧绕组匝数 N_1 。当电源频率 f 和一次侧绕组匝数 N_1 一定时,主磁通的大小取决于电源电压 U_1 的大小。

变压器空载时,二次绕组中只有主磁通产生的感应电动势 e_2 与其端电压 u_{20} 相平衡,则二次侧电动势平衡方程式为

$$u_{20} = e_2 \quad (1-16)$$

用相量形式表示为

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-17)$$

(4) 变压器的变比

在变压器中,一次绕组感应电动势与二次绕组感应电动势之比,称为变压器的变比,用 K 表示。即有

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-18)$$

上式表明,变压器的变比等于一、二次绕组匝数之比。

当变压器空载运行时,一、二次绕组端电压之比为

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-19)$$

由上可见,变压器空载运行时,变压器一次绕组与二次绕组的电压比就等于一次、二次绕组的匝数比。因此,只要改变一次和二次绕组的匝数,就可得到不同的电压,这就是变压器能够“变压”的原理。因此,当 $K > 1$ 时,称为降压变压器; $K < 1$ 时,称为升压变压器。

3. 空载电流

产生主磁通所需要的电流称作励磁电流,变压器空载运行时,负载电流为零,由空载电流 i_0 建立主磁通,故空载电流就是励磁电流。空载电流 i_0 可分成两个分量,一个是磁化电流 i_μ ,另一个是铁耗电流 i_{Fe} 。前者起单纯的磁化作用,是空载电流的无功分量,后者对应于磁滞损耗和涡流损耗,是空载电流的有功分量。

由 $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ 可知,主磁通的波形取决于外加电压的波形,当外加电压为正弦波时,主磁通也为一正弦波。由于铁磁材料的磁化曲线为非线性关系,因此,空载电流的大小和波形则取决于铁芯磁路的饱和程度,即取决于铁芯磁通密度 B_m 的大小。

在实际变压器中, $i_\mu \gg i_{Fe}$,磁化电流是空载电流的主要部分,因此在分析空载电流时,先不考虑磁滞损耗和涡流损耗,认为 $i_0 = i_\mu$ 。

在磁通密度 B_m 较小时,可认为磁路不饱和,磁化曲线是直线,磁化电流 i_μ 与其所产生的主磁通成正比。因此,当主磁通随时间正弦变化时, i_μ 亦随时间正弦变化。

当磁通密度 B_m 较大时,磁路开始饱和,磁化电流 i_μ 与主磁通变为非线性关系,当主磁通随时间正弦变化时, i_μ 不再按正弦变化,其波形可以通过作图法来确定。具体方法是:在主磁通随时间正弦变化的波形上取几点,按图 1-7 中箭头所示方向分别求出对应的磁化电流 i_μ 和 ωt ,这样便可得到磁化电流 i_μ 随时间变化的波形 $i_\mu = f(\omega t)$,如图 1-7 所示。

从图 1-7 可以看出,当主磁通随时间正弦变化时,由磁路饱和而引起的非线性,将导致磁化电流成为尖顶波;磁路越饱和,磁化电流的波形越尖,即畸变越严重。若对该尖顶波进行傅里叶级数分解,可得与主磁通的波形同相位的基波和一系列奇次谐波,除基波外,以三次谐波的幅值最大。这就是说,在变压器中,为了建立正弦波的主磁通,由于铁磁材料磁化曲线的非线性关系,空载电流中必定包含三次谐波分量,如图 1-8 所示。

实际上铁芯中是存在磁滞损耗和涡流损耗的,当同时考虑磁滞损耗和涡流损耗时,则在空载电流 i_0 中除了磁化电流 i_μ 外,还应有一个与 $-e_1$ 同相位的有功分量 i_{Fe} ,它从电网吸收有功功率来补偿铁耗。

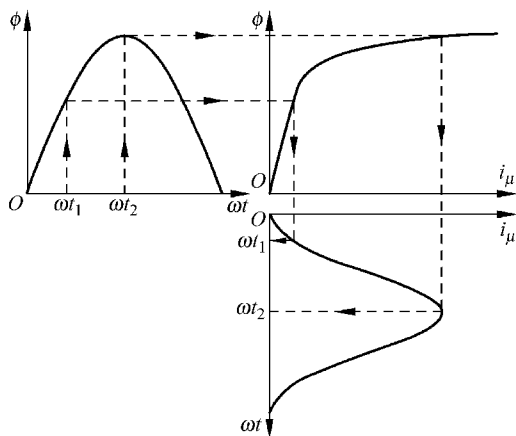


图 1-7 不考虑铁耗时的空载电流的波形

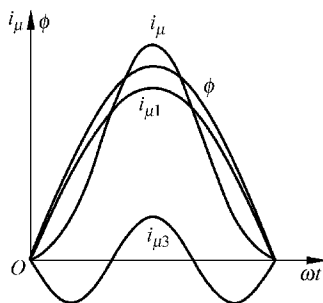


图 1-8 空载电流分解为基波和三次谐波

因此空载电流 i_0 是由有功分量 i_{Fe} 和无功分量 i_μ 组成的, 可将空载电流 i_0 写成

$$i_0 = i_\mu + i_{Fe} \quad (1-20)$$

从上面的分析可知, i_μ 和 i_0 都不是正弦波, 因此不能用相量形式来表示。工程上为了便于计算和分析, 常用一个等效正弦波电流来代替实际的空载电流 i_0 , 使等效正弦波电流的频率、有效值与实际空载电流 i_0 相等, 相位超前主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁耗角 α 。这样可以把空载电流 $\dot{I}_0$ 分解为 $\dot{I}_\mu$ 和 $\dot{I}_{Fe}$ 两个分量, 即

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} \quad (1-21)$$

式中, $\dot{I}_\mu$ 与主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 同相位, 是空载电流的无功分量; $\dot{I}_{Fe}$ 超前主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 90° , 是空载电流的有功分量。

4. 空载运行时的等效电路和相量图

(1) 等效电路

在变压器中, 既有电路问题又有磁路问题, 如果能将变压器中的电和磁之间的相互关系, 用一个纯电路的形式来表示, 将使分析计算大为简化。这种表示变压器在正常运行时的电磁关系的电路称为等效电路。

由前面的分析可知

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1$$

从电路的观点来看, 其中漏感电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 看做是电流 $\dot{I}_0$ 流过漏电抗 $X_{1\sigma}$ 所引起的电压降。现用同样的方法来处理由主磁通所产生的感应电动势 $\dot{E}_1$, 考虑到主磁通在铁芯中引起的铁耗, 故不能单纯地引入一个电抗, 还应引入一个电阻, 即用一个阻抗 Z_m 把 $\dot{E}_1$ 和电流 $\dot{I}_0$ 联系起来, 其表达式为

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 R_m + j\dot{I}_0 X_m = \dot{I}_0 Z_m \quad (1-22)$$

式中, $Z_m = R_m + jX_m$, 为变压器的励磁阻抗; R_m 为变压器的励磁电阻, 对应于铁耗的等效电阻; X_m 为变压器的励磁电抗。

将式(1-22)代入(1-14)中, 得

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 Z_m + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (R_m + jX_m) + \dot{I}_0 (R_1 + jX_{1\sigma}) \quad (1-23)$$

相应的等效电路如图 1-9 所示。

由变压器等效电路可知, 变压器空载运行时, 可看成两个电抗器串联的电路, 其中一个没有铁芯, 其阻抗为一次绕组的漏阻抗 R_1 和 $X_{1\sigma}$, R_1 是一次绕组的电阻, $X_{1\sigma}$ 反映一次绕组漏磁通的作用; 另一个有铁芯, 其由励磁阻抗 R_m 和 X_m 组成, R_m 反映铁芯中的铁耗, X_m 反映主磁通的作用。从前面的分析可知, R_1 和 $X_{1\sigma}$ 为常数, 而 R_m 和 X_m 不是常数, 其与铁芯的饱和程度有关。当外加电压 U_1 增大时, 主磁通和感应电动势都将成比例增大, 磁路将饱和, 空载电流必须大大增加。因此, R_m 和 X_m 将随着磁路饱和程度的增加而减小。但是, 在实际变压器中, 由于外加电压 U_1 在额定值左右变化不大, 故在定量计算时, 可认为 Z_m 基本不变。

(2) 相量图

根据变压器空载运行时的电磁关系和式(1-14)、式(1-17), 变压器空载运行时的相量图如图 1-10 所示。作图具体步骤如下: 以主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 为参考量, 令其初相角为零; 根据式(1-5)、式(1-6)可知, $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 滞后主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 90° ; 由上面的分析可知, 空载电流 $\dot{I}_0$ 超前主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁耗角 α , 并且空载电流 $\dot{I}_0$ 在一次绕组电阻上的电压降 $\dot{I}_0 R_1$ 与 $\dot{I}_0$ 同相位, 在一次绕组漏电抗上的电压降 $\dot{I}_0 X_{1\sigma}$ 超前 $\dot{I}_0$ 90° 。然后根据变压器空载时的一、二次电压平衡方程式, 便可画出 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_{20}$ 。

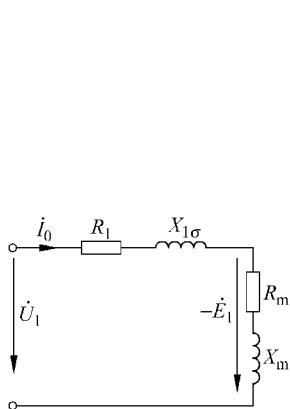


图 1-9 变压器空载时的等效电路

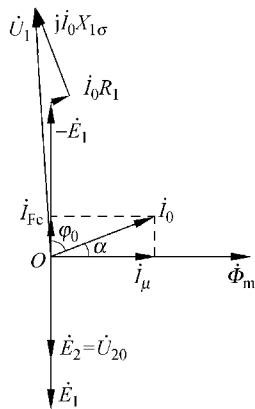


图 1-10 变压器空载时的相量图

从变压器的空载相量图可知, $\dot{I}_0$ 在横轴上的分量为磁化电流 $\dot{I}_\mu$, 在纵轴上的分量为铁耗电流 $\dot{I}_{Fe}$ 。 $\dot{I}_0$ 与 $\dot{U}_1$ 之间的夹角 φ_0 为变压器空载时的功率因数角。

1.2.2 变压器的负载运行

当变压器的一次绕组接到交流电源,二次绕组接上负载阻抗 Z_L 时,二次绕组中便有电流流过,这种情况称为变压器的负载运行,如图 1-11 所示。

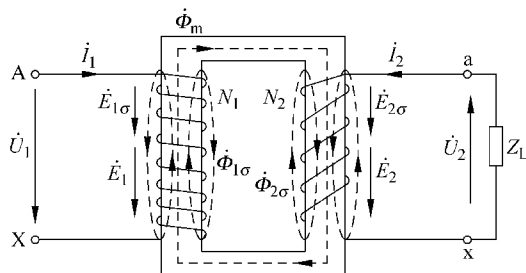


图 1-11 变压器的负载运行

1. 负载运行时的电磁过程

变压器负载运行时,二次绕组接有负载阻抗 Z_L ,在感应电动势 $\dot{E}_2$ 的作用下,二次绕组中便有电流 $\dot{I}_2$ 流过,该电流产生磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 。根据全电流定律,铁芯中的主磁通应由一、二次绕组的合成磁动势 $\dot{F}_m$ 所产生。由于磁动势 $\dot{F}_2$ 的作用,铁芯内的主磁通趋于改变。相应地,一次绕组的电动势 $\dot{E}_1$ 亦趋于改变,并引起一次绕组电流发生变化,从空载时的 $\dot{I}_0$ 变为负载时的 $\dot{I}_1$ 。此时,外加电压 $\dot{U}_1$ 与反电动势 $-\dot{E}_1$ 和漏阻抗压降 $\dot{I}_1 Z_1$ 相平衡,使原来空载时处于平衡状态的电磁关系被打破,继而变压器中各电磁量要重新达到新的平衡状态。

空载时由于漏阻抗很小,外施电压 $\dot{U}_1$ 近似与反电动势 $\dot{E}_1$ 相等。负载时,虽然 $\dot{I}_1$ 比 $\dot{I}_0$ 大,但因 $\dot{I}_1$ 一般不超过额定值,一次侧漏阻抗压降 $\dot{I}_1 Z_1$ 与 $\dot{E}_1$ 相比仍然很小,故 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{\Phi}_m$ 都几乎不变,仍可近似认为电动势 $\dot{E}_1$ 与外施电压 $\dot{U}_1$ 相等。由此可见,变压器在负载时,由于 $\dot{I}_2$ 和 $\dot{F}_2$ 的出现,要影响主磁通的变化,为维持主磁通基本不变,一次侧电流和磁动势必须随之增加,以抵消 $\dot{F}_2$ 的影响。当二次侧电流变化时,一次侧电流也必然随之变化。

变压器在负载时,一、二次侧的磁动势 $\dot{F}_1$ 和 $\dot{F}_2$,除了联合产生铁芯中的主磁通外, $\dot{F}_1$ 还要产生交链一次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$, $\dot{F}_2$ 还要产生交链二次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ 。由于漏磁场分布很复杂, $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 和 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ 均是指分别交链全部的一次绕组和全部二次绕组的等效漏磁通。

2. 负载时的磁动势平衡方程式

变压器负载运行时,主磁通是由一、二次绕组磁动势 $\dot{F}_1$ 和 $\dot{F}_2$ 的合成磁动势 $\dot{F}_m$ 所产

生,而空载时的主磁通是由空载磁动势 $\dot{F}_0$ 所产生。由于变压器负载和空载时的主磁通基本相等,故合成磁动势 $\dot{F}_m$ 应与空载磁动势 $\dot{F}_0$ 基本相等,则负载时的磁动势平衡方程式为

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m = \dot{F}_0 \quad (1-24)$$

或

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-25)$$

将式(1-25)移项并整理后得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{K}\right) = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L} \quad (1-26)$$

式中, $\dot{I}_{1L} = -\frac{\dot{I}_2}{K}$, 为一次侧电流的负载分量。

式(1-26)表明,变压器负载时一次绕组的电流 $\dot{I}_1$ 由两部分组成: $\dot{I}_0$ 用于在铁芯中产生主磁通 $\dot{\Phi}_m$, $\dot{I}_{1L}$ 用以抵消二次侧电流 $\dot{I}_2$ 所产生的磁动势,即

$$\dot{I}_{1L} N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0 \quad (1-27)$$

或

$$\dot{I}_{1L} = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad (1-28)$$

3. 负载时的电动势平衡方程式

变压器负载运行时,各物理量的参考方向如图 1-11 所示。负载时,主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 分别在一次绕组和二次绕组中感应电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$,一次绕组和二次绕组漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 和 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ 分别在一次绕组和二次绕组中产生漏感电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 和 $\dot{E}_{2\sigma}$ 。

用与空载时同样的处理方法,漏感电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 和 $\dot{E}_{2\sigma}$ 分别用漏电抗压降 $-j\dot{I}_1 X_{1\sigma}$ 和 $-j\dot{I}_2 X_{2\sigma}$ 表示,即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_1 X_{1\sigma} \quad (1-29)$$

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 X_{2\sigma} \quad (1-30)$$

式中, $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 分别为一次绕组和二次绕组的漏电抗,均为常数。

按图 1-11 所示的参考方向,根据基尔霍夫第二定律,一次侧电动势平衡方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_1 R_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_{1\sigma} + \dot{I}_1 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-31)$$

二次侧电动势平衡方程式为

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2\sigma} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{2\sigma} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-32)$$

式中, R_2 为二次绕组的电阻; $Z_2 = R_2 + jX_{2\sigma}$, 为二次绕组的漏阻抗。

根据图 1-11 所示的参考方向,二次绕组端电压 $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$ 。

综上所述,可得出变压器负载运行时的基本方程式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ \dot{E}_1 &= K\dot{E}_2 \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \frac{1}{K}\dot{I}_{1L} \\ -\dot{E}_1 &= \dot{I}_0 Z_m \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 Z_L \end{aligned} \right\} \quad (1-33)$$

式(1-33)综合了负载时变压器内部的电磁关系,利用这些方程式,可以分析和计算变压器的各种运行性能。

4. 负载时的等效电路及相量图

虽然根据变压器的基本方程式,可以对变压器的运行进行定量计算;但由于一般电力变压器的变比 K 的数值较大,其一、二次侧电压、电流和阻抗数值相差较大,实际计算时非常不方便,且精度低,画相量图时更困难;又由于与变压器空载运行时一样,负载运行时电磁关系也可用一个等效电路来正确表示;因此,为了简化计算和方便推导出等效电路,常采用折算法来解决上述问题。

(1) 折算法

变压器的折算通常是将二次绕组折算到一次绕组,也就是假想一个与一次绕组具有相等匝数的等效绕组,并以此代替原来具有 N_2 匝数的二次绕组,使折算前后变压器内部的电磁关系和功率关系不发生改变,使具有 N_1 匝数的二次绕组与具有 N_2 匝数的实际二次绕组完全等效。折算后,二次绕组的各物理量都将发生变化,用原物理量的符号加“'”来表示。

从磁动势平衡关系可知,二次侧电流对一次侧的影响是通过二次磁动势 $N_2 I_2$ 起作用,所以只要折算前后二次绕组的磁动势保持不变,一次绕组将从电网吸收同样大小的功率和电流,并有同样大小的功率传递给二次绕组。

① 二次侧电流的折算

根据折算前后二次绕组磁动势不变的原则,可得

$$N_1 \dot{I}'_2 = N_2 \dot{I}_2 \quad (1-34)$$

由此可得二次电流的折算值 $\dot{I}'_2$ 为

$$\dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{K} \dot{I}_2 \quad (1-35)$$

② 二次侧电动势的折算

由于折算前后二次绕组的磁动势不变,因此铁芯中的主磁通将保持不变,根据电动势与匝数成正比的关系,则有

$$\frac{\dot{E}'_2}{N_1} = \frac{\dot{E}_2}{N_2} \Rightarrow \dot{E}'_2 = \frac{N_1}{N_2} \dot{E}_2 = K\dot{E}_2 = \dot{E}_1 \quad (1-36)$$

③ 二次侧阻抗的折算

根据折算前后功率传递关系不变,故折算前后铜耗和无功功率都不变,则

$$I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2 \Rightarrow R_2' = \left(\frac{I_2}{I_2/K} \right)^2 R_2 = K^2 R_2 \quad (1-37)$$

同理

$$I_2'^2 X_{2\sigma}' = I_2^2 X_{2\sigma} \Rightarrow X_{2\sigma}' = \left(\frac{I_2}{I_2/K} \right)^2 X_{2\sigma} = K^2 X_{2\sigma} \quad (1-38)$$

$$Z_2' = R_2' + jX_{2\sigma}' = K^2 (R_2 + jX_{2\sigma}) = K^2 Z_2 \quad (1-39)$$

④ 二次侧端电压的折算

$$\begin{aligned} \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = K \dot{E}_2 - \frac{1}{K} \dot{I}_2 K^2 Z_2 \\ &= K (\dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2) = K \dot{U}_2 \end{aligned} \quad (1-40)$$

综上所述,当二次绕组折算到一次绕组时,电动势和电压应乘以 K 倍,电流乘以 $1/K$ 倍,电阻、电抗、阻抗乘以 K^2 倍。

折算后,式(1-33)变为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_2' \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \\ \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0 Z_m \\ \dot{U}_2' &= \dot{I}_2' Z_2' \end{aligned} \right\} \quad (1-41)$$

(2) 等效电路

① T形等效电路

根据式(1-41),可画出变压器负载运行时的等效电路,如图1-12所示。若只看变压器本身的三个阻抗,其形状像字母T,故称T形等效电路。

工程上常用等效电路来分析、计算变压器各种实际运行问题。应当指出,利用折算到一次侧的等效电路算出的一次绕组各物理量,均为变压器的实际值;二次绕组中各物理量则为折算值,欲得其实际值,对电流应乘以变比 K ,对电压应除以变比 K 。

② Γ 形等效电路

T形等效电路能准确地反映变压器运行时的实际物理情况,但它含有串、并联支路,在进行运算时较为复杂。对于一般的电力变压器,额定负载时,一次绕组的漏阻抗压降 $I_{1N} Z_1$ 仅占额定电压 U_{1N} 的百分之几,并且供给励磁的空载电流分量 I_0 又远小于额定电

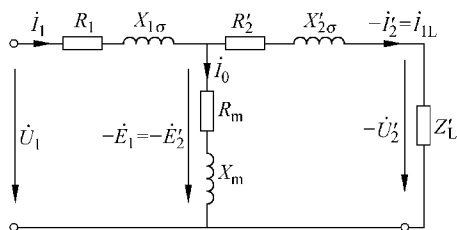


图 1-12 变压器的 T 形等效电路

流 I_{1N} 。因此,将 T 形等效电路中的励磁支路前移与电源端并联,得到近似的 Γ 形等效电路,如图 1-13 所示。该等效电路只有励磁支路和负载支路两并联支路,使计算大为简化,且不会带来太大误差。

③ 简化的等效电路

对于一般的电力变压器,由于 $I_0 \ll I_{1N}$,故在对变压器负载运行时的二次侧电压变化、并联运行的负载分配,以及变压器短路等问题作定量分析计算时,可将励磁电流忽略不计,认为励磁支路断开,则等效电路将简化成一串联电路,如图 1-14 所示,此电路称为变压器简化等效电路。

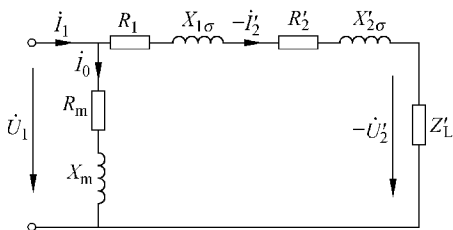


图 1-13 近似的 Γ 形等效电路

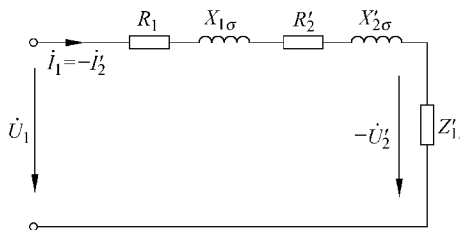


图 1-14 变压器简化等效电路

在变压器近似的 Γ 形等效电路和简化等效电路中,将一次和二次侧的参数合并,得

$$\left. \begin{aligned} R_k &= R_1 + R_2' \\ X_k &= X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \\ Z_k &= R_k + jX_k \end{aligned} \right\} \quad (1-42)$$

式中, R_k 为变压器的短路电阻; X_k 为变压器的短路电抗; Z_k 为变压器的短路阻抗。

这三个参数可以用实验的方法测得。

(3) 相量图

相量图不仅可以表明变压器中的电磁关系,而且还可较直观地看出变压器中各物理量的大小和相位关系。根据折算后的基本方程式(1-41)可以画出变压器负载运行时的相量图。图 1-15 为感性负载时变压器的相量图。

相量图的画法视给定情况而定。假定已知 U_2 、 I_2 、 $\cos \varphi_2$ 以及变压器的参数 K 、 R_1 、 $X_{1\sigma}$ 、 R_2 、 $X_{2\sigma}$ 、 X_m 和 R_m 等,则画相量图步骤如下:先由变比 K 算出 U_2' 、 I_2' 、 R_2' 、 $X_{2\sigma}'$,再根据负载性质按比例尺画出 $\dot{U}_2'$ 和 $\dot{I}_2'$ 相量,它们之间的夹角为 φ_2 ;在 $\dot{U}_2'$ 末端加上二次侧漏阻抗压 $\dot{I}_2' R_2'$ 和 $j \dot{I}_2' X_{2\sigma}'$,使得相量 $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$;然后作 $\dot{\Phi}_m$ ($\dot{\Phi}_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1}$) 领先 $\dot{E}_1$ 90° ,画 $\dot{I}_0$ 领先 $\dot{\Phi}_m$ 角 α , ($\alpha = \arctan \frac{R_m}{X_m}$),在 $\dot{I}_0$ 末端加上一 $\dot{I}_2'$ 使得 $\dot{I}_1$,最后画 $-\dot{E}_1$ 与 $\dot{E}_1$ 相反,在 $-\dot{E}_1$

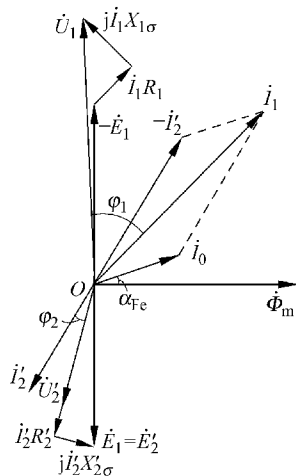


图 1-15 感性负载时变压器的相量图

末端加上一次侧漏阻抗压降 $\dot{I}_1 R_1$ 和 $j\dot{I}_1 X_{2\sigma}$, 使得外施电压 $\dot{U}_1$ 。 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_1$ 之间的夹角为 φ_1 , $\cos \varphi_1$ 为变压器负载运行时一次侧的功率因数。由图 1-15 可见, 变压器在感性负载下, 其二次侧端电压 $\dot{U}'_2 < \dot{E}'_2$ 。这说明变压器带感性负载时, 二次侧的端电压将要下降。

图 1-15 的相量图在理论分析上是有意义的。在实际应用时较复杂, 也有困难, 因为对已经制造的变压器很难用实验方法将一次、二次绕组的漏电抗 $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 分开。因此, 在分析变压器负载的问题时, 常根据图 1-14 所示的简化等效电路来画相量图。假定已知 $\dot{U}'_2$ 、 $\dot{I}'_2$ 和 $\cos \varphi_2$ 及参数 R_k 和 X_k , 因已忽略了 $\dot{I}_0$, 而 $\dot{I}_1 = (-\dot{I}'_2)$, 在 $-\dot{U}'_2$ 末端加上短路阻抗压降 $\dot{I}_1 R_k$ 和 $j\dot{I}_1 X_k$, 便得一次侧外施端电压 $\dot{U}_1$, 如图 1-16 所示。

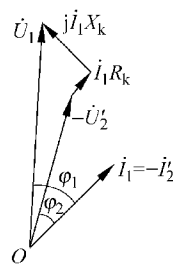


图 1-16 感性负载时变压器的简化相量图

以上所述的基本方程式、等效电路和相量图, 是分析变压器运行的三种方法, 其物理本质是一致的。基本方程式概括了变压器中的电磁关系, 当定性讨论各物理量间关系时, 宜采用方程式; 等效电路和相量图是基本方程式的另一种表达形式, 在进行定量计算时, 等效电路较为方便, 在讨论各物理量之间大小和相位关系时, 则相量图比较直观。

1.3 变压器的参数测定

由以上分析可知, 要分析变压器的运行性能, 必须知道其参数。这些参数可用计算的方法求得, 也可用实验的方法进行测量。本节主要介绍通过空载实验和短路实验来测量变压器的参数。

1.3.1 空载实验

变压器空载实验的目的是通过测量空载电流 I_0 、电压 U_1 、 U_{20} 及损耗 p_0 , 来计算变压器变比 K 、铁耗 p_{Fe} 和励磁阻抗 Z_m 。图 1-17 所示为单相变压器的空载实验接线。

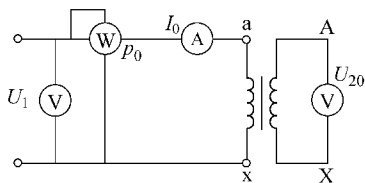


图 1-17 单相变压器的空载实验接线

实验时, 变压器的一次侧外加额定电压 U_{1N} , 二次侧开路, 测量空载电流 I_0 、二次侧开路电压 U_{20} 及空载损耗功率 p_0 。

空载实验时, 由于空载电流 I_0 很小, 它所产生的铜耗 $I_0^2 R_1$ 可忽略不计。故可近似地认为空载损耗全部是铁损耗, 即 $p_0 = p_{Fe}$ 。又由于变压器中主磁通远大于其漏磁通, 因此 $Z_m \gg Z_1$, 即空载总阻抗 $Z_0 = Z_m + Z_1$ 近似等于励磁阻抗 Z_m 。

于是, 根据实验结果可以计算出变压器的参数

$$\left. \begin{aligned} Z_m &\approx Z_0 = \frac{U_{1N}}{I_0} \\ R_m &= \frac{p_{Fe}}{I_0^2} \approx \frac{p_0}{I_0^2} \\ X_m &= \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-43)$$

实验时应注意以下几点:

(1) 为了便于实验和安全起见,一般低压侧加额定电压,高压侧开路,故计算得到的励磁阻抗参数均是低压侧的数值,若要折算到高压侧,必须乘以高压侧对低压侧变比的平方。

(2) 对三相变压器而言,应用上述公式计算时须采用每相的数值,即相电压、相电流及一相的损耗进行计算。

(3) 由于 Z_m 的大小与磁路的饱和程度有关,故在不同的电压下测出的数值不同,应取额定电压点的测量数据来计算励磁阻抗。

1.3.2 短路实验

通过变压器的短路实验可以计算出变压器的短路损耗 p_k 和短路阻抗 Z_k 。单相变压器短路实验的接线,如图 1-18 所示。实验时,把二次绕组短路,一次绕组上加一可调的低电压。调节外加的低电压,使一次电流达到额定电流,测量此时的一次电压 U_k 、输入功率 p_k 和电流 I_k ,由此即可确定等效漏阻抗。

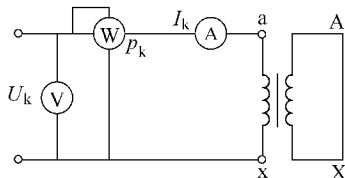


图 1-18 单相变压器短路实验的接线

由于短路实验时外施电压很低,主磁通很小,铁耗和励磁电流均可忽略不计,故在短路情况下可采用

变压器的简化等效电路进行分析。由于铁耗 p_{Fe} 很小,可认为此时输入功率 p_k 完全消耗在一次、二次绕组的铜耗上,即 $p_{Cu} = p_k$ 。

根据短路实验测得的 U_k 、 I_k 和 p_k ,可算出

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= \frac{U_k}{I_k} \\ R_k &= \frac{p_{Cu}}{I_k^2} = \frac{p_k}{I_k^2} \\ X_k &= \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-44)$$

由于线圈电阻的大小随温度变化而变化,而实验时的温度和变压器实际运行不同。为了正确反映额定工作状态的情况,按国家标准规定,短路阻抗参数及短路损耗应该换算到工作温度 75°C 时的数值。

对于铜线变压器可按下式换算:

$$R_{k75^\circ\text{C}} = R_{k\theta} \frac{235 + 75}{235 + \theta} \quad (1-45)$$

$$X_{k75^\circ\text{C}} = \sqrt{R_{k75^\circ\text{C}}^2 + X_k^2} \quad (1-46)$$

式中, θ 为实验时的室温值。

对于铝线变压器, 式(1-45)中的常数 235 应改为 228。

实验时需要注意的是:

(1) 为了便于测量, 短路实验通常在高压绕组接电源, 低压绕组直接短接。短路实验时由于电压在高压侧, 测出的参数是折算到高压侧的数值。如要求低压侧的数值, 应除以 K^2 。

(2) 由于变压器中漏磁场的情况很复杂, 因此从测出的短路电抗 X_k 中无法把 $X_{1\sigma}$ 、 $X'_{2\sigma}$ 分开, 若需要将两者分开时, 可假定 $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_k}{2}$ 。

(3) 对三相变压器而言, 应用上述公式时, 须采用每相的数值进行计算。

1.3.3 阻抗电压

短路实验时, 使短路电流达到额定电流时一次侧所加的电压, 称为短路电压或阻抗电压。显然, 阻抗电压是原边额定电流 I_{1N} 在短路阻抗 $Z_{k75^\circ\text{C}}$ 上的压降, 通常用原边额定电压 U_{1N} 的百分数表示, 即

$$u_k = \frac{I_{1N} Z_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% \quad (1-47)$$

阻抗电压有电阻分量 u_{kr} 和电抗分量 u_{kx} 分别为

$$\left. \begin{aligned} u_{kr} &= \frac{I_{1N} R_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% \\ u_{kx} &= \frac{I_{1N} X_k}{U_{1N}} \times 100\% \\ u_k &= \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-48)$$

阻抗电压标在变压器的铭牌上, 是变压器的一个重要参数。阻抗电压的大小反映变压器在额定负载运行时漏阻抗压降的大小。从运行性能考虑, 希望阻抗压降小一些, 使变压器输出电压随负载变化波动小一些; 但阻抗电压太小时, 变压器因某种原因而引起短路时的电流太大, 可能损坏变压器。因此, 从限制变压器短路电流的角度来看, 则希望阻抗压降大一些, 这样可使电流小一些。一般中小型电力变压器的 u_k 为 $4\% \sim 10.5\%$, 大型的为 $12.5\% \sim 17.5\%$ 。

例 1-2 一台单相变压器, $S_N = 20\,000 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N}/U_{2N} = \frac{220}{\sqrt{3}}/11 \text{ kV}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$, 空

载实验在低压侧进行, 测得 $U_1 = 11 \text{ kV}$, $I_0 = 45.4 \text{ A}$, $p_0 = 47 \text{ W}$; 短路实验在高压侧进行, 测得 $U_k = 9.24 \text{ kV}$, $I_k = 157.5 \text{ A}$, $p_k = 129 \text{ W}$ 。试计算(实验时温度为 15°C , 变压器线圈采用铜线):

(1) 折算到高压侧的 T 形等效电路参数(假定 $R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}$, $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_k}{2}$);

(2) 短路电压及各分量的百分值。

解 (1) 低压侧励磁阻抗

$$Z_m = \frac{U_1}{I_0} = \frac{11 \times 10^3}{45.4} = 242.3(\Omega)$$

低压侧励磁电阻

$$R_m = \frac{p_0}{I_0^2} = \frac{47 \times 10^3}{45.4^2} = 22.8(\Omega)$$

低压侧励磁电抗

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{242.3^2 - 22.8^2} = 241.2(\Omega)$$

高压侧对低压侧的变比

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{220/\sqrt{3}}{11} = 11.55$$

折算到高压侧的励磁阻抗

$$Z'_m = K^2 Z_m = 11.55^2 \times 242.3 = 32\,323.4(\Omega)$$

折算到高压侧的励磁电阻

$$R'_m = K^2 R_m = 11.55^2 \times 22.8 = 3041.6(\Omega)$$

折算到高压侧的励磁电抗

$$X'_m = K^2 X_m = 11.55^2 \times 241.2 = 32\,176.7(\Omega)$$

高压侧短路阻抗

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{9.24 \times 10^3}{157.5} = 58.7(\Omega)$$

高压侧短路电阻

$$R_k = \frac{p_k}{I_k^2} = \frac{129 \times 10^3}{157.5^2} = 5.2(\Omega)$$

高压侧短路电抗

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{58.7^2 - 5.2^2} = 58.5(\Omega)$$

折算到 75℃ 时短路电阻

$$R_{k75^\circ\text{C}} = \frac{235 + 75}{235 + 15} R_k = \frac{235 + 75}{235 + 15} \times 5.2 = 6.45(\Omega)$$

折算到 75℃ 时短路阻抗

$$Z_{k75^\circ\text{C}} = \sqrt{R_{k75^\circ\text{C}}^2 + X_k^2} = \sqrt{6.448^2 + 58.5^2} = 58.9(\Omega)$$

T 形等效电路一、二次侧的电阻

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{k75^\circ\text{C}}}{2} = \frac{6.45}{2} = 3.23(\Omega)$$

T 形等效电路一、二次侧的电抗

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_k}{2} = \frac{58.5}{2} = 29.25(\Omega)$$

(2) 一次侧额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{20\,000 \times 10^3}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} = 157.5(\text{A})$$

短路电压的百分值

$$u_k = \frac{I_{1N} Z_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{157.5 \times 58.9}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} \times 100\% = 7.30\%$$

短路电压电阻分量的百分值

$$u_{kr} = \frac{I_{1N} R_{k75^\circ\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{157.5 \times 6.45}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} \times 100\% = 0.80\%$$

短路电压电抗分量的百分值

$$u_{kx} = \frac{I_{1N} X_k}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{157.5 \times 58.5}{220 \times 10^3 / \sqrt{3}} \times 100\% = 7.25\%$$

1.3.4 标么值

从上面变压器的参数计算中可以看出,由于各物理量的实际值可能太大、太小甚至彼此相差多个数量级,这给计算带来了很大不便。因此,在计算变压器参数时,常采用其标么值系统。

实际上,在其他电气工程计算中,为了计算方便和参数之间便于比较,往往不用其实际值进行计算,也常采用标么值系统。一个物理量的实际值与某一选定的具有同单位的基值之比,称为该物理量的标么值,即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基值}}$$

在工程上常用各物理量的额定值作为基值。在变压器中,通常功率取额定视在功率作基值,一、二次侧电压和电流分别取它们的额定值作基值,其他各量的基值则由各量纲之间的换算关系来确定。通常用该物理量原来的符号在右上角加“*”来表示其标么值。变压器的各标么值如下。

(1) 取一、二次侧电压基值为 U_{1N}, U_{2N} , 则一、二次侧电压标么值为

$$U_1^* = \frac{U_1}{U_{1N}}, \quad U_2^* = \frac{U_2}{U_{2N}}$$

(2) 取一、二次电流基值为 I_{1N}, I_{2N} , 则一、二次侧电流标么值为

$$I_1^* = \frac{I_1}{I_{1N}}, \quad I_2^* = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

(3) 取一、二次侧阻抗基值为 $Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}}, Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}}$, 则一、二次侧阻抗标么值为

$$Z_1^* = \frac{Z_1}{Z_{1N}} = \frac{I_{1N}}{U_{1N}} Z_1, \quad Z_2^* = \frac{Z_2}{Z_{2N}} = \frac{I_{2N}}{U_{2N}} Z_2$$

采用标么值有以下优点:

(1) 用标么值表示的各参数以及性能数据变化范围小,与变压器容量无关,便于对不同容量的变压器进行比较,如短路电压约为 $5\% \sim 10\%$;

(2) 采用标么值后,折算值和未折算值相等,故二次侧各物理量不需要折算。例如

$$Z_2^* = \frac{Z_2}{Z_{2N}} = \frac{I_{2N}}{U_{2N}} Z_2 = \frac{I_{2N} Z_2 K^2}{K U_{2N}} = \frac{I_{1N}}{U_{1N}} Z_2' = Z_2'^*$$