

第二章 变压器

变压器是一种利用电磁感应原理，从一个电路向另一个电路传递电能或传输信号的一种电器，是电力系统中生产、输送、分配和使用电能的一种重要装置，也是电力拖动系统和自动控制系统中传递电能或传输信号的重要元件。

第一节 变压器的工作原理、分类及结构

变压器是一种静止的电机，它利用电磁感应原理将一种电压、电流的交流电能转换成同频率的另一种电压、电流的电能。换句话说，变压器的作用就是实现电能在不同等级之间的转换。

一、变压器的工作原理

下面以单相双绕组变压器为例分析其工作原理。

在一个闭合的铁心上缠绕两个绕组，其匝数既可以相同，也可以不同，但一般是不同的；两个绕组之间只有磁的耦合，而没有电的联系。如图 2.1 所示。

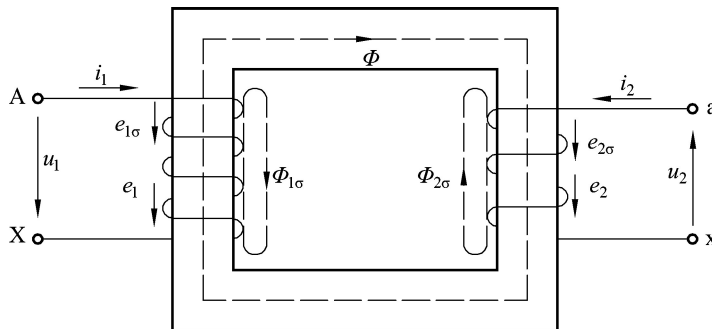


图 2.1 单相双绕组变压器原理图

与电源相连的绕组，接受交流电能，通常称为一次侧绕组（初级绕组、一次绕组），以 A、X 标注其出线端；与负载相连的绕组，送出交流电能，通常称为二次侧绕组（次级绕组、二次绕组），以 a、x 标注其出线端。一次侧的匝数、电压、电动势、电流分别以 n_1 、 u_1 、 e_1 、 i_1

来表示；二次侧的匝数、电压、电动势、电流分别以 n_2 、 u_2 、 e_2 、 i_2 来表示。

当一次侧绕组接通电源时，便会在铁心中产生与电源电压同频率的交变磁通。若忽略漏磁，该磁通便同时与一次侧、二次侧绕组相交链，耦合系数 $k_c = 1$ ，这样的变压器称为理想变压器。根据电磁感应定律，可写出电压、电动势的瞬时方程式分别为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 &= e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

于是可得电动势比为

$$\left| \frac{u_1}{u_2} \right| = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

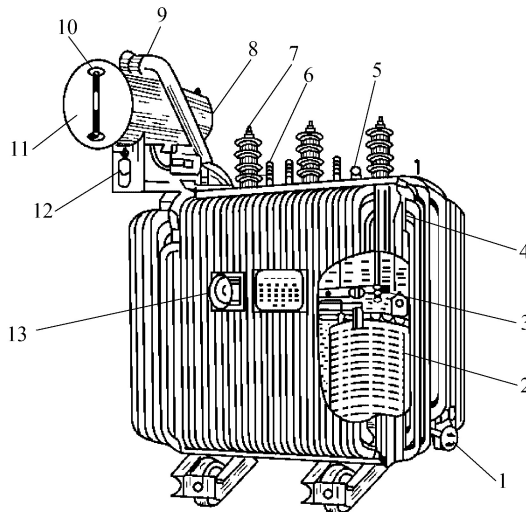
若磁通、电动势均按正弦规律变化， k 称为变压器的变比，也称为匝比，通常用有效值之间的比值来表示，即

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

式 (2.2) 表明，变压器一次侧、二次侧绕组的电压比就等于一次侧、二次侧绕组的匝数比。因此，要使一、二次绕组有不同的电压，只要使一次侧、二次侧绕组有不同的匝数即可。

二、变压器的基本结构

变压器的主要结构部件有铁心、绕组（铁心和绕组两个基本部分组成变压器的器身）以及放置器身且盛满变压器油的油箱。此外，还有一些为确保变压器运行安全的辅助器件。图 2.2 为一台油浸式电力变压器的外形图。



- 1—放油阀门；2—绕组；3—铁心；4—油箱；5—分接开关；6—低压套管；7—高压套管；
8—气体继电器；9—安全气道；10—油表；11—储油柜；12—吸湿器；13—湿度计

图 2.2 油浸式电力变压器外形图

(一) 铁 心

表面具有绝缘膜的硅钢片铁心由铁心柱和铁轭两部分组成，是构成变压器磁路的主要部分。为了减小交变磁通在铁心中引起的损耗，铁心通常用厚度为 0.3 ~ 0.5 mm 的硅钢片叠装而成。图 2.3 (a)、(b) 所示的变压器，从外面看，线圈包围铁心柱，称为心式结构；图 2.4 所示的变压器，从外面看，铁心柱包围线圈，称为壳式结构。小容量变压器多采用壳式结构。交变磁通在铁心中引起涡流损耗和磁滞损耗，为使铁心的温度不致太高，在大容量的变压器的铁心中往往设置油道，而铁心则浸在变压器油中，当油从油道中流过时，可将铁心中产生的热量带走。

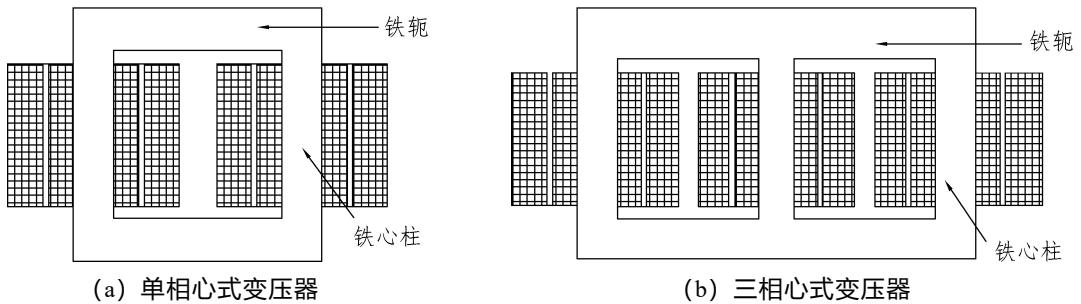


图 2.3 心式结构变压器

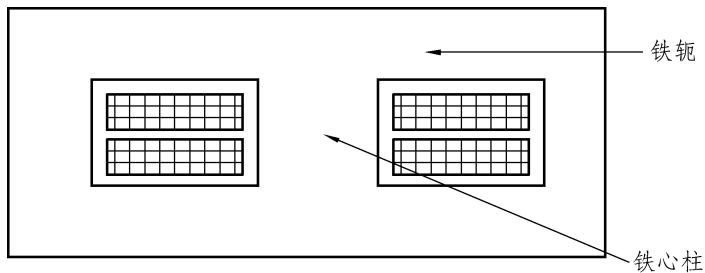


图 2.4 壳式结构变压器

(二) 绕 组

绕组是构成变压器电路的主要部分。一、二次侧绕组一般用铜或铝的绝缘导线缠绕在铁心柱上。高压绕组电压高，绝缘要求高，如果高压绕组在内，离变压器铁心近，则应加强绝缘，这将提高变压器的成本造价。因此，为了绝缘方便，一般将低压绕组紧靠着铁心，高压绕组则套装在低压绕组的外面。两个绕组之间留有油道，既可以起绝缘作用，又可以利用油把热量带走。在单相变压器中，高、低压绕组均分为两部分，分别缠绕在两个铁心柱上，两部分既可以串联又可以并联。三相变压器中属于同一相的高、低压绕组全部缠绕在同一铁心柱上。

只有绕组和铁心的变压器称为干式变压器。

大容量变压器的器身放在盛有绝缘油的油箱中，这样的变压器称为油浸式变压器。

(三) 其他结构部件

变压器的器身放在装有变压器油的油箱内。变压器油既是一种绝缘介质，又是一种冷却介质。为使变压器油能长久地保持良好状态，在变压器油箱上面装有圆筒形的储油柜。储油柜通过连通管与油箱相通，柜内油面高度随着油箱内变压器油的热胀冷缩而变动，储油柜使油与空气的接触面积减小，从而减少油的氧化和水分的侵入。另外气体继电器和安全气道是在故障时保护变压器安全的辅助装置。

三、变压器的额定值

按照国家标准规定，标注在铭牌上的、代表变压器在规定使用环境和运行条件下的主要技术数据，称为变压器的额定值（或称为铭牌数据）。变压器的额定值主要有以下几项。

(1) 额定容量：变压器在正常运行时的视在功率，通常以 S_N 来表示，单位为伏安 (V·A) 或千伏安 (kV·A)。对于一般的变压器，一、二次侧的额定容量都设计成相等。

(2) 额定电压：在正常运行时，规定加在一次侧绕组上的电压，称为一次侧的额定电压，以 U_{1N} 来表示；当二次侧绕组开路（空载）、一次侧绕组加额定电压时，二次侧绕组的测量电压即为二次侧额定电压，以 U_{2N} 来表示。在三相变压器中，额定电压是指线电压，单位为伏 (V) 或千伏 (kV)。

(3) 额定电流：根据额定容量和额定电压计算出来的电流值。一、二次侧的额定电流分别用 I_{1N} 、 I_{2N} 来表示，单位为安 (A)。

(4) 额定频率：我国以及大多数国家都规定额定频率 $f_N = 50$ Hz。

额定容量、额定电压和额定电流之间的关系如下：

$$S_N = I_{1N}U_{1N} = I_{2N}U_{2N} \quad (\text{单相变压器})$$

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

此外，变压器铭牌上一般还会标注效率、温升、绝缘等级等参数。

第二节 变压器的空载运行

变压器的一次侧绕组接在电网上、二次侧绕组开路时的运行状态，称为空载运行。此时， $i_2 = 0$ ，变压器内部的物理过程比较简单，下面先从变压器这样一个最简单的情况来研究其电磁过程。

一、空载运行时的物理状况

变压器的各电磁量都是交流量，为分析和计算方便，必须规定出其正方向。图 2.5 所示变压器各量的正方向是遵循惯例、按下面所述的相应电磁规律来规定的。

(1) u_1 、 u_2 ： u_1 的正方向规定由首端指向末端； u_2 的正方向规定从末端指向首端。

(2) Φ_m 、 Φ_σ ：其正方向与产生它们的电流符合右手螺旋定则。因此，判定磁通的正方向时必须注意绕组的绕向。

(3) e_1 、 $e_{1\sigma}$ 和 e_2 、 $e_{2\sigma}$ ：正方向与产生它们的磁通符合右手螺旋定则，即符合电磁感应定律

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

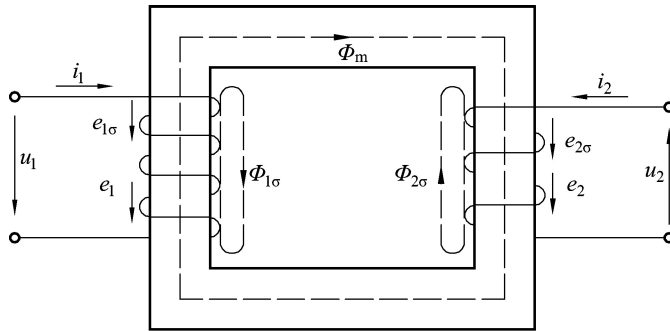


图 2.5 变压器工作原理示意图

(4) i_1 、 i_2 ：正方向与相应的电势方向一致。

变压器空载时各量的正方向规定与上述类似，如图 2.6 所示。

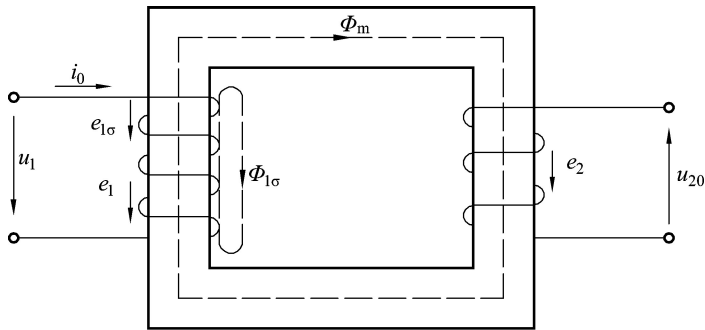


图 2.6 变压器空载运行原理图

变压器在空载运行时，一次侧绕组 N_1 接入电压为 u_1 的电网后，便会有空载电流 i_0 流过，进而产生空载交变磁势 $F_0 = i_0 N_1$ ，建立空载磁场。磁场由两部分磁通组成：因为铁心磁导率比油或空气的磁导率大得多，绝大部分磁通存在于铁心中，这部分磁通同时与一次侧、二次侧绕组相交链，称为主磁通 Φ_m ；少量的磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 只与一次侧绕组相交链，称为一次侧漏磁通。由于主磁通同时与一次侧、二次侧绕组相交链，因此从一次侧到二次侧的能量传递主要是依

靠主磁通的媒介而实现的。

选择图 2.6 所示的正方向，根据基尔霍夫第二定律 (KVL) 及电磁感应定律，可得

$$u_1 = i_0 r_1 - e_{1\sigma} - e_1 = i_0 r_1 + N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$u_{20} = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

如果各物理量均按正弦规律变化，便可用如下的相量形式来表示：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 - \dot{E}_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

(一) 感应电动势

首先研究主磁通所产生的感应电动势。由于漏磁通远小于主磁通，故 $e_{1\sigma} \ll e_1$ ，空载时的一次侧绕组压降也很小。忽略这两者（它们之和只有 u_1 的 0.2% 左右）的影响时，可认为 $u_1 \approx e_1$ 。可见当 u_1 为正弦波时， e_1 和 Φ_m 也按正弦规律变化。

设 $\Phi_m = \Phi_m \sin \omega t$ ，则

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \sqrt{2} E_1 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} = \omega N_2 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \sqrt{2} E_2 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

e_1 、 e_2 的有效值分别为

$$E_1 = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

相应的相量表达式为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

由上式可以看出， \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 的相位都比产生它们的磁通 $\dot{\Phi}_m$ 滞后 90° 。由以上分析可以得到

$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ ， k 称为变压器的变比。由此可见，只要选择适当的一次侧、二次侧绕组匝数，

就可以产生所需要的电压。考虑到 $u_1 \approx e_1$ ，于是有

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

实际上变压器在空载运行时，存在少量的与一次侧绕组相交链的漏磁链 $\Phi_{1\sigma}$ ，它也是随时间交变的，因而也会在一次侧绕组中感应产生漏电动势 $e_{1\sigma}$ ，下面对其进行分析。

由于漏磁通的路径大部分在磁导率比较小的空气或油中，它一般不会饱和，可以认为漏

磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 与空载电流 i_0 成正比，所以 $\Phi_{1\sigma}$ 是一常数。于是可得漏磁通产生的感应电动势为

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} = -L_{1\sigma} \frac{di_0}{dt}$$

当 i_0 按正弦规律变化时，上式可以写成相量形式：

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -jX_{1\sigma} \dot{I}_0$$

(二) 空载电流

变压器的空载电流 i_0 一方面建立磁场，另一方面要补偿空载运行时变压器的损耗。前者仅起磁化作用，称为励磁电流或磁化电流，是 i_0 中的无功分量，以 i_m 表示；后者是有功分量，以 i_{Fe} 表示。因此， $i_0 = i_m + i_{Fe}$ 。一般来说， i_{Fe} 极小，为简化起见，常忽略 i_{Fe} ，将 i_0 看成励磁电流，即 $i_0 \approx i_m$ 。

由于变压器的铁心材料是铁磁物质，有磁饱和现象存在，其饱和程度对 i_0 的大小、波形都有一定的影响。

(1) 当铁心未饱和时，磁通与励磁电流之间按线性关系变化，如图 2.7 所示。在这种情况下，如果磁通随时间正弦变化，则励磁电流也是正弦波，并且它们在时间上同相位。

(2) 当铁心饱和时，铁磁材料的磁化曲线便是呈饱和特性的曲线，励磁电流和磁通之间便失去了线性关系。

当磁通为正弦波时，励磁电流则是一个尖顶波，如图 2.8 (a) 所示。此时可采用谐波分析方法，将 i_m 分解成基波和一系列高次谐波。由于励磁电流关于横轴对称，故只存在奇次谐波，即

$$i_m = i_{m1} \sin \omega t + i_{m3} \sin 3\omega t + i_{m5} \sin 5\omega t + \dots$$

在工程上，通常用一个等效的正弦波代替尖顶波，且等效的正弦波与基波具有相同的频率和相位。该等效正弦波的幅值为

$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + I_{3m}^2 + \dots}$$

如果励磁电流是正弦波，磁通便为一平顶波，如图 2.8 (b) 所示。

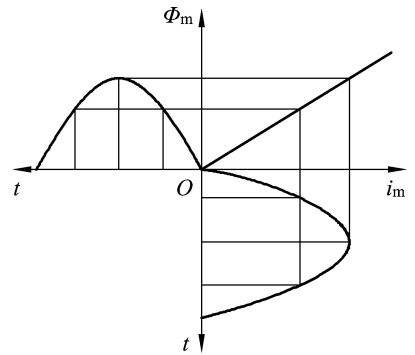
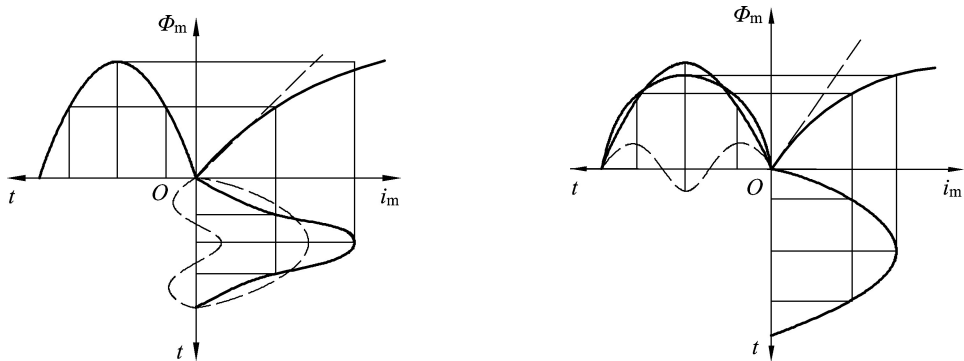


图 2.7 铁心未饱和时励磁电流和磁通波形图



(a) 磁通为正弦波，励磁电流为尖顶波

(b) 励磁电流为正弦波，磁通为平顶波

图 2.8 磁路饱和时励磁电流和磁通波形图

二、空载运行时的电动势平衡方程式、相量图以及等效电路

(一) 电动势平衡方程式

为简单起见，上面的分析有时是在忽略漏磁通和一次侧绕组电阻的情况下进行的。然而，它们都是客观存在的，考虑到其影响，有

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{I}_0 R_1 + jX_{1\sigma} \dot{I}_0 - \dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_1 - \dot{E}_1 \\ \dot{U}_{20} &= \dot{E}_2\end{aligned}$$

相应的瞬时值表达式为

$$\begin{aligned}u_1 &= i_0 Z_1 - e_1 \\ u_{20} &= e_2\end{aligned}$$

(二) 相量图及等效电路

根据变压器空载运行时的实际物理情况，可以把一次侧绕组等效为一个电阻、一个空心线圈和一个实心线圈串联组成，如图 2.9 所示。电阻即为绕组内阻，空心线圈所产生的磁通为一次侧绕组的漏磁通，实心线圈产生的磁通为铁心中的主磁通。这样就可以把实际的一次侧绕组与三个理想元件相等效，便于做进一步分析。

空载电流 i_0 流过实心线圈时，便会产生主磁通 Φ_m ，该磁通在与一次侧、二次侧绕组相交链的同时，也会在铁心中产生磁滞损耗和涡流损耗。所以， i_0 由产生磁通的无功分量 i_m 和用以补偿铁心损耗的有功分量 i_{Fe} 共同组成，即 $i_0 = i_m + i_{Fe}$ 。为了弄清这三者之间的相位关系，可进一步把实心线圈等效为一个电阻与一个线圈相并联的形式。其中， i_{Fe} 流过电阻 R'_m 所消耗的功率与铁心的损耗相等效， i_m 流过 X'_m 则产生主磁通，如图 2.10 所示。这样等效完全不改变变压器空载运行时的实际情况，由此便得出这 3 个电流量之间的相位关系，如图 2.11 所示。

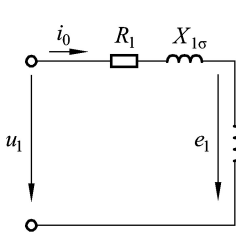


图 2.9 空载时一次侧绕组等效图

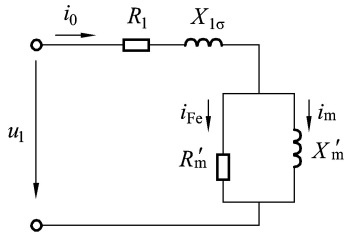


图 2.10 空载时电流分析等效图

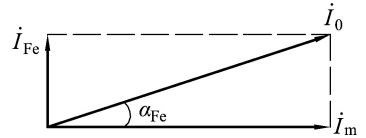


图 2.11 励磁电流相量图

从图 2.11 可以看出, i_0 在相位上超前 i_m 一个 α_{Fe} 角, 这是由于磁通流过铁心时产生铁耗引起的, 故可以把这一角度称为铁耗角。把 R'_m 和 X'_m 并联支路经过串并联等效变换, 便可等效为一个电阻 R_m 和一个电感 X_m 相串联的形式。考虑到 $i_0 \approx i_m$, 于是有

$$\dot{E}_1 = \dot{i}_0 (R_m + jX_m) = \dot{i}_m (R_m + jX_m)$$

通过以上的分析, 便可以得到变压器在空载运行时的等效电路, 如图 2.12 所示。

在绘制相量图时, 可以选择 $\dot{\Phi}_m$ 为参考相量, \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 在相位上滞后 $\dot{\Phi}_m$ 90° , \dot{i}_0 超前 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁耗角 α_{Fe} , 根据公式便可进一步得到 \dot{U}_1 。相量图如图 2.13 所示。

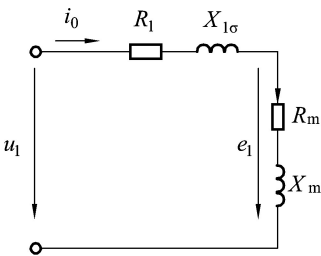


图 2.12 变压器空载时的等效电路图

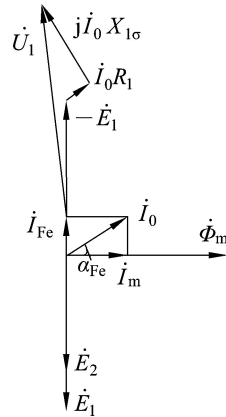


图 2.13 变压器空载运行时的相量图

第三节 变压器的负载运行

一次侧绕组接通额定电压、二次侧绕组接上负载 Z_L 时的运行状态, 称为变压器的负载运行, 其工作原理见图 2.5。

一、负载运行时的物理状况

二次侧接上了负载 Z_L 后, 在感应电动势 \dot{E}_2 的作用下, 二次侧绕组便会有电流 \dot{i}_2 产

生，进而产生磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ，该磁动势也作用在主磁路上，企图改变空载运行时 \dot{I}_m 所建立起来的主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 。正是 \dot{I}_2 的出现，使变压器负载运行时内部的物理情况与空载运行时有所不同。但是，一般变压器 Z_1 是很小的，即便是在额定运行时， $I_1 Z_1$ 也只占到 U_1 的 2%~6%，故仍可忽略，所以有 $U_1 \approx E_1$ 。所以只要一次侧绕组所加电压 U_1 不变，就可以认为变压器由空载到负载时 \dot{E}_1 保持不变，这在工程上是完全允许的。由 $\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$ 可知， $\dot{\Phi}_m$ 也基本保持不变，这就是变压器恒磁通原理，即无论变压器工作在空载状态还是负载状态，其主磁通都近似保持不变。由此可知，负载与空载时，产生主磁通的总磁动势应该相同，即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$$

于是有

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right)$$

上式表明，变压器从空载到负载，二次侧绕组中便会有电流产生。与此同时，一次侧绕组中必定产生一个电流增量 $\left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right)$ ，来抵消 \dot{F}_2 对主磁通的影响，以保持恒磁通关系，这样才能把电能从一次侧绕组传递到二次侧绕组。

二、负载运行时的基本方程式

(一) 磁动势平衡方程式

由前面的讨论可知，变压器在负载运行时的磁动势平衡方程为

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$$

即

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right)$$

上式表明，负载运行时，一次侧绕组中的电流 \dot{I}_1 可以看成是由两部分组成：一部分为产生主磁通的励磁分量 \dot{I}_0 ，一部分为抵消二次侧绕组磁动势作用的负载分量 $\left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right)$ 。

(二) 电动势平衡方程式

变压器在负载运行时，除了一次侧、二次侧绕组共同产生主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 外，还会分别产生只与自身绕组相交链的少量漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 、 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ ，它们又分别会在一次侧、二次侧绕组中