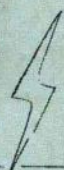


电 工 学



放射大专班试用

下 册

胡懋編

长沙市卫生学校

一九八二年

目 录

第五章 变压器	1
§ 5—1 概述	3
§ 5—2 变压器的工作原理	5
§ 5—3 变压器的等效电路	13
§ 5—4 变压器的功率损耗	16
§ 5—5 三相变压器	20
§ 5—6 其它变压器	30
一、单相小功率变压器	31
二、X线机用的灯丝变压器	31
三、X线机用高压变压器	32
四、自藕变压器	34
五、仪用互感器	40
第六章 电动机	43
§ 6—1 异步电动机——三相异步电动机	43
一、异步电动机的构造	43
二、异步电动机的转动原理	45
三、异步电动机的电路分析	54
四、异步电动机的功率传递和效率	64
五、异步电动机的转矩	65
六、异步电动机的使用常识	73
七、异步电动机的起动	77
§ 6—2 单相异步电动机	78
一、单相异步电动机的工作原理	78
二、单相异步电动机起动	82
§ 6—3 同步电动机	87

一、三相同步电动机	87
二、单相反应式同步电动机	88
§ 6—4 直流电机 (电动机、发电机)	91
一、直流电动机的基本原理	91
二、直流发电机的基本原理	92
§ 6—5 伺服电动机	94
一、交流伺服电动机	95
二、直流伺服电动机	96
第七章 低压控制电路及其应用	99
§ 7—1 常用低压控制电路	99
一、交流接触器	99
二、按钮	101
三、行程开关	101
四、万能转换开关	102
五、继电器	104
§ 7—2 异步电动机的控制与保护电路	113
一、电动机的基本控制电路	113
二、电动机的保护电路	118
三、几种常用控制电路的图形符号和文字符号	120
§ 7—3 灭弧装置的结构和原理	123
一、电弧的产生及熄灭	123
二、磁吹灭弧装置	125
三、灭弧栅灭弧装置	126
四、纵缝灭弧装置	127
五、零序控制灭弧装置	128
第八章 电子学基础	131
§ 8—1 二极管	131
一、二极管	132

二、三极管	134
三、四极管与五极管	138
四、复合管	140
五、闸流管	141
六、稳压管	143
§ 8-2 半导体(晶体管)二极管	150
一、半导体的基本特性	150
二、PN结	151
三、半导体二极管	154
§ 8-3 半导体(晶体管)三极管	156
一、结构型式	156
二、输出特性	164
§ 8-4 硅稳压管及稳压电路	173
一、硅稳压管	173
二、稳压原理	175
§ 8-5 可控硅及其工作原理	177
一、可控硅的结构	177
二、工作原理	178
§ 8-6 单结晶体管	181
一、单结晶体管的结构	181
二、单结晶体管的特点	181
三、单结晶体管的触发电路	185
§ 8-7 半导体元件应用举例	186
例一 磁通继电器	186
例二 晶体管限时器	188
三、曝光限制保护	

第五章 变压器

在讲变压器之前，我们来讲一下：

正弦交流电的相量表示法（复数符号法）。

在上册我们介绍了旋转矢量法。旋转矢量法在处理正弦量的加、减运算方面比三角函数法或波形图示法要方便得多，但对于乘除运算却并不适宜。如果采用复数表示正弦量，则其方法要简便得多。

关于复数和复数的三种表示式以及复数的基本运算规律，在中学的数学课已学过了，下面我们着重分析如何用复数表示正弦量。

上册讲过，一个正弦量有三个要素：振幅（或有效值）、初位相、频率，而对于同频率正弦量的合成，频率总是不变的，即频率是不参与计标的，可以暂时把它舍弃，只用振幅（或有效值）与初位相两个量即可完全地把一个正弦量表示出来。复数也具有两个量，正好可用来表示上述两个量，例如用复数指数形式的模表示正弦量的有效值，用幅角表示正弦量的初位相。因此用复数可以表示正弦量。这种表示正弦量的复数称为相量。用大写字母上面加一点表示，以区别于其他不代表正弦量的复数。因为复数有三种表示式，故相量也可以表示为三种形式。

下面我们先来规定正弦量与相量之间的对应关系：

例如：正弦电流 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$ 可以用相量

$$\dot{I} = I e^{j\varphi_i} = I \angle \varphi_i$$

来表示，注意在这样规定的相量表示式中舍弃了正弦量的时间因子（虚数单位在数学中用 j 表示、在电工学中为避免与电流混淆，改用 j 表示）如果给出相量要求出正弦量的瞬时值，则只需把式

$$\dot{i} = I e^{j\varphi_i} = I \angle \varphi_i \text{ 乘以 } \sqrt{2} \text{ (变为幅值) 和时间因子 } e^{j\omega t} \text{ 即得}$$

$$\sqrt{2} \dot{i} e^{j\omega t} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_i)} = I_m \cos(\omega t + \varphi_i) + j I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

然后取上式的虚部即为正弦波的瞬时值。

同理正弦波 $u = U_m \sin(\omega t - \varphi_u)$ 也可用相量表示：

$$\dot{U} = U e^{-j\varphi_u} = U \angle -\varphi_u$$

相量在复平面上的几何表示称为相量图，如图5-1所示。

注意，相量图与旋转矢量图是不同的，前者是在复平面上的几何表示，且没有旋转的概念，而后者是在实平面上的几何表示，并随时间逆时针方向旋转。但表示同频率各正弦波之间的相互关系时，相量图与旋转矢量图形式上是相似的。

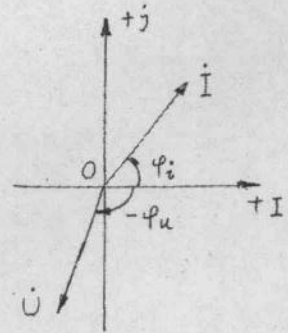


图5-1

上册讲过，表示正弦波时要规定它的正方向。正弦波用相量替换之后，我们仍然规定电路中的各个相量（如电动势、电压、电流等）的正方向与相应的正弦波瞬时值的正方向相同。

规定了正弦波与相量的对应关系后，我们进一步来证明用相量进行加减运算的结果是一致的，因此可以用较简单的相量运算来代替繁杂的三角函数运算，这种用相量代替正弦波进行交流电路运算的方法称为相量法（又叫复数符号法，简称符号法）。下面通过例子说明这种运算的等效性。

例：利用相量法求解图5-2(a)中的合成电动势。

图5-2(a)是一个串联电路，包含两个交流电压源。第一个电压源位于A和X之间，第二个位于Y和B之间。我们需要求解A和B之间的总电动势。

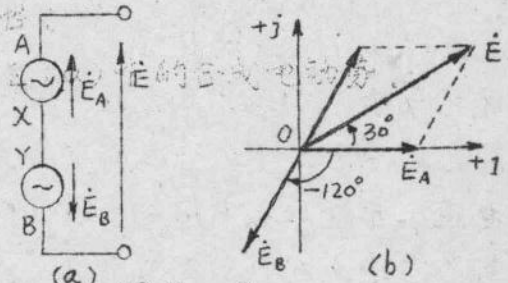


图5-2

解 由式 $e_A = E_m \sin \omega t$
 $e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$

其对应的相量为

$$\dot{E}_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ} = E_0 \quad \dot{E}_B = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{-j120^\circ} = E_0 \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$\dot{E} = \dot{E}_A - \dot{E}_B = \frac{3}{2} E_0 + j\frac{\sqrt{3}}{2} E_0 = \sqrt{3} E_0 e^{j30^\circ}$$

即 $e = \sqrt{3} (\frac{E_m}{\sqrt{2}}) \sin(\omega t + 30^\circ) = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t + 30^\circ)$
 故合成电动势的最大值为 $\sqrt{3} E_m$ 其相位较 e_A 超前 30° ，与用三角函数计算的结果相同。利用平行四边形法则求 $\dot{E}_A$ 与 $-\dot{E}_B$ 的几何和也能得到 $\dot{E}$ ，其结果也相同（见相量图 5-2(b)）。

上例说明，以相量表示正弦量进行加、减运算可以代替三角函数运算，至于乘、除运算我们尚待以后再作讨论。

§5-1 概 述

一、变压器的用途：

变压器是一种静止的电口，可用来把某一数值的交变电压变换为同频率的另一数值的交变电压。

把交流电功率 $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ 从发电厂输送到用电的地方，通常要用很长的输电线。在输送功率 P 和负载的 $\cos \varphi$ 为定值的情况下，如果电压 U 愈高，则线路电流 I 愈小，因而输电线的截面可以减小，这就能够大量地节约导电材料的用料。由此可见，远距离输电时采用高电压是最为经济的，目前我国交流输电的电压已达 330 千伏，还有更高电压的超高压输电线路。这样高的电压，不论从发电机的安全运行方面或者从制造成本方面来考虑，都不容许由发电机直接产生。发电机的额定电压一般有 3.15 千伏、6.3 千伏、10.5 千伏等几种。因此在输电之前，必须利用

变压器把电压升高到所需的数值。

在用电方面，各类用电所需之电压不一，多数用电是220伏、380伏，少数电动机也有采用3000伏或6000伏的，X线机用的高压变压器输出电压一般为10万伏左右(100KV)；有些用电的额定电压较低，如机床上的照明灯为36伏，电子管的灯丝电压只有几伏，X线机用的X线管和高压整流管的灯丝电压一般为几伏到十几伏等。因此X线机，也要利用各种不同的变压器(自耦变压器、灯丝变压器、高压变压器等)把所需电压降低或升高。

综上所述，可知变压器是输电系统和X线机中不可缺少的至要设备之一。

二、变压器的分类：

1、按用途不同，大致可分以下几类：

(1) 电力变压器：电力系统用的输电变压器或配电变压器统称为电力变压器。

(2) 小功率电流变压器：利用变压器将220V的电压转变为所需的电压，这种变压器称为电流变压器。

(3) 调压变压器：在实际应用中，有时需要可以调节的电流电压，可以在变压器的原绕组(连接电源的绕组)中设置多个抽头或一个可以滑动的中心抽头，改变抽头的位置(即改变原、副绕组的匝数比)可以达到调节电压的目的，这种变压器称为调压变压器。调压变压器很多是采用自耦变压器的形式。自耦变压器是只有一个绕组的变压器，自耦变压器是X线机至要元件之一，下面我们将详细介绍。

(4) 仪用变压器：这是一种在高电压或大电流电路内配合测量仪表用的变压器；测高电压用的变压器(将高电压变低电压)叫电压互感器；测大电流用变压器(将大电流变小电流)叫电流

互感四。

(5) 专用变压器：冶金用的电炉变压器，化工用的整流变压器，电焊用的电焊变压器等。

2、按其本身结构不同，可分为：

(1) 双绕组变压器；

(2) 自耦变压器；

(3) 三绕组变压器；

(4) 多绕组变压器。

3、按其相数来分，可分为：

(1) 单相变压器；（如仪用电压变压器）

(2) 三相变压器；（如电力变压器）

(3) 多相变压器。（如大功率的整流设备用六相变压器等）。

§5-2 变压器的工作原理

最简单的变压器是由一个闭合的铁心和绕在铁心上的两个匝数不等的绕组组成的，如图5-3所示。为了减少涡流及磁滞损失，铁心是用涂有绝缘漆、厚度为0.35~0.5毫米的硅钢片叠成，同电源相连的绕组称为原绕组或初级绕组；同负载相连的绕组称为副绕组或次级绕组。

原副绕组都是用绝缘导线所绕成，虽然原副绕组在电路上是相互分开的，但二者却处在同一磁路上。

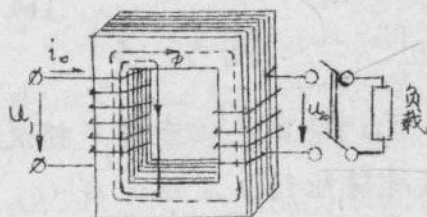


图5-3

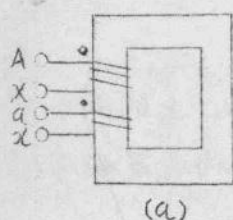
一、变压器的空载运行：

1、空载运行的工作原理：变压器主要是由电路和磁路两部分组成。例如单相变压器，是由一个原绕组（初级绕组）和一个

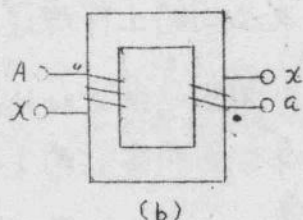
副绕组（次级绕组）绕在一个闭合的铁心上，它们匝数不同，且彼此绝缘。每个绕组都有二个出线端头，这些端头通常接到变压器的箱盖上并给以一定的标记。习惯上高压绕组的两个端头用A和X表示，低压用a和x表示。A与a表示始端（又叫首端），X和x表示末端（又叫尾端）。

对于单相变压器的始、末端，一般来说有两种不同的规定方法：一种是把原、副绕组同极性的端钮规定为始端；另一种是把原、副绕组不同极性的端钮规定为始端。如图5-4(a)所示，是采用第一种规定方法，图中两个始端A和a是同极性的。

如果把副绕组沿着铁心移到另一铁心柱上，则变为图5-4(b)所示的情形。如果原、副绕组的绕向不同，则始、末端如图5-3所示。



(a)



(b)

图 5-4

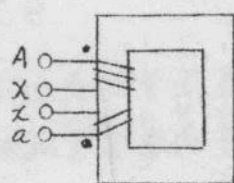


图 5-5

下面讨论变压器空载（指原边接上电源而副边开路）的情形。

设原绕组接上正弦电压 u_1 ，原绕组中即有交变电流 i （称空载电流或励磁电流）通过。原绕组的磁通势 $F_0 = i_0 N_1$ ，产生的磁通绝大部分通过铁心而闭合，这大部分磁通与原、副绕组相链，称为主磁通，用 Φ 表示。主磁通穿过原、副绕组并在其中分别产生感应电动势 e_1 、 e_2 ，称为主磁感应电动势，原绕组的磁通势 F 。除了产生主磁通 Φ 以外，还产生一小部分经空气成闭合回路，仅与原绕组链链而不通过副绕组的磁通，称为漏磁通，以 Φ_l 表示。漏磁通在原绕组中亦产生感应电动势 e_{l1} ，称为漏磁感应电动势。下面我们讨论原、副绕组的电压关系，在此之前，

有必要先规定原、副绕组各量的正方向。

因为原绕组对电流来说相当于负载，故原绕组的几个物理量 u_1 、 i_0 、 e_1 、 e_{l1} 的正方向可以采用“电动机惯例”来确定（见图 5-6）。主磁通 Φ_0 的正方向可根据 i_0 的正方向用右手螺旋法则确定。副绕组感应电动势 e_2 的正方向可根据 Φ_0 的正方向用右手螺旋关系确定，根据图示的绕向， e_2 的正方向应以始端 a 指向末端 x 。因为副绕组对负载来说相当于电源，故可采用“发电机惯例”确定端电压 u_{20} 的正方向。

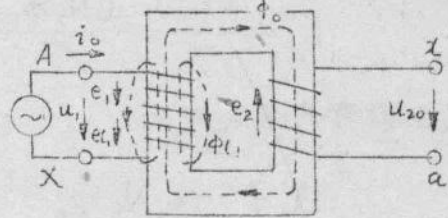


图 5-6

的正方向应以始端 a 指向末端 x 。因为副绕组对负载来说相当于电源，故可采用“发电机惯例”确定端电压 u_{20} 的正方向。

2、变压器的空载运行的原、副绕组的电压平衡关系：

(1) 主磁感应电动势

设原绕组接上正弦交流电压 u_1 ， u_1 在线心中产生正弦变化的主磁通

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t$$

主磁通在原绕组产生主磁感应电动势

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -\omega N_1 \Phi_{0m} \cos \omega t$$

$$= \omega N_1 \Phi_{0m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

式中 $E_{1m} = \omega N_1 \Phi_{0m}$ 为 e_1 的幅值，其有效值为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_{0m}$$

写成相量关系式即为

$$\dot{E}_1 = -j \omega N_1 \dot{\Phi}_0$$

同理，主磁通 Φ_0 在副绕组亦产生主磁感应电动势

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_o}{dt} = -\omega N_2 \Phi_{om} \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

式中 $E_{2m} = \omega N_2 \Phi_{om}$ 为 e_2 的幅值，其有效值为

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \Phi_{om}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_{om}$$

写成相量关系式即为

$$\dot{E}_2 = -j\omega N_2 \dot{\Phi}_o$$

由此可得：

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_{om}}{4.44 f N_2 \Phi_{om}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

式中 K 称为变压器的变比或匝数比，它是变压器的重要参数之一。

(2) 漏磁感应电动势

因为漏磁通 ψ_{L1} 过空气而闭合，空气的导磁率为一常数，故磁链 $\psi_{L1} = N_1 \phi_{L1}$ (磁通与匝数的乘积叫磁链) 与 i_o 成正比，即

$$\psi_{L1} = N_1 \phi_{L1} = L_{L1} i_o$$

式中比例常数 $L_{L1} = \frac{\psi_{L1}}{i_o}$ 称为原绕组的漏电感。我们在上册第二章

讨论过纯电感电路：

设通过电感电路的电流

$$i = I_m \sin \omega t \text{ 换成相量表示 } \dot{I} = I e^{j0^\circ}$$

由式 $u = iR - e_L = -e_L = u_L$ 有

$$\begin{aligned} u_L = -e_L &= L \frac{di}{dt} = I\omega L \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

(式中 $U_m = E_m = I_m \omega L$) 换成相量表示

$$\dot{U}_L = -\dot{E}_L = I\omega L e^{j\frac{\pi}{2}} = jI\omega L e^{j0^\circ} = jX_L \dot{I}$$

仿照此讨论可得漏磁感应电动势为

$$\dot{E}_L = -j\dot{I}_0 \omega L_{L1} = -j\dot{I}_0 X_{L1}$$

式中 $X_{L1} = \omega L_{L1}$ 也是常数，表示对应于原绕组漏磁通的漏电抗，漏电抗的电压降为

$$\dot{U}_{L1} = -\dot{E}_L = j\dot{I}_0 X_{L1}$$

上面两式表明， $\dot{E}_L$ 落后于 $\dot{I}_0$ 90° ，而 $\dot{U}_{L1}$ 则超前于 $\dot{I}_0$ 90° 相角。

主磁通与漏磁通都是原绕组所产生的，为什么要把它们分开来处理呢？其原因：一是由于它们的性质不同，漏磁通与电流有线性关系。而主磁通受铁心磁饱和及磁滞的影响，它与电流间的关系是非线性的；二是由于主磁通和漏磁通，在电路中所起的作用也不同。漏磁通只与原绕组连锁，其值仅由初级电流决定，它对原绕组电路仅起电抗压降的作用，与副绕组无关；而主磁通与原副绕组均连锁，其值由初、次级电流共同决定，它产生主磁感应电动势 E_1 与 E_2 ，起传递电功率的桥梁作用。

3. 原、副绕组的电压平衡方程：

设原绕组的电阻为 R_1 ，当电流 $\dot{I}_0$ 通过 R_1 时将产生压降 $\dot{I}_0 R_1$ ，根据一段含源电路的欧姆定律并注意各量的正方向得

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 R_1 - \dot{E}_1 - \dot{E}_L$$

把式 $\dot{E}_L = -j\dot{I}_0 \omega L_{L1} = -j\dot{I}_0 X_{L1}$ 代入上式得

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{L1} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_{L1}) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1\end{aligned}$$

式中 $Z_1 = R_1 + jX_{L1}$ 为原绕组的漏阻抗，上式即为空载时原绕组的电压平衡方程式。在空载的情况下，因为 $\dot{I}_0$ 的数值很小（ $\dot{I}_0$ 一般为额定电流的 3~6%），压降 $\dot{I}_0 Z_1$ 的数值与 $\dot{E}_1$ 的数值相比要小得多（前者约为后者的百分之零或几），可以忽略不计，故仍可近似地认为

$$\dot{U} \approx -\dot{E}_1$$

只考虑磁势关系时，有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_{0m}$$

上式说明：当频率 f 、匝数 N_1 一定时， Φ_{0m} 与 U_1 （或 E_1 ）成正比，上式是电工计标中最重要的基本公式之一。

对于副绕组，因为空载时 $I_2 = 0$ ，故副绕组的端电压 $\dot{U}_{20}$ 等于它的主磁感应电动势 $\dot{E}_2$ 即

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

上式为空载时副绕组的电压平衡方程。只考虑数值，有

$$\dot{U}_{20} = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_{0m}$$

因此对于空载的变压器有

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

上式说明：空载时变压器原、副绕组的电压比近似等于匝数比。因此，变压器有变换电压的作用，选择不同的匝数比，就可以达到改变电压的目的。当 $N_1 > N_2$ ($K > 1$) 时， $U_1 > U_{20}$ ，这种变压器称为降压变压器。当 $N_1 < N_2$ ($K < 1$) 时， $U_1 < U_{20}$ ，这种变压器称为升压变压器。

对于已经制成的变压器，其 K 为定值。加在原绕组两端的电压必须为其额定值，因为由铁心线圈中的电压同电流的关系可知，当外加电压比额定电压略有超过时，原绕组中通过的电流将大大地增加，如果把额定电压为 110 伏的变压器误接到 220 伏的线路上，则原绕组中的电流将剧烈地增大，致使变压器烧毁。

二、变压器的负载运行：

把变压器原绕组加上额定电压，副绕组接上负载，这种情形称为变压器的负载运行，如图 5-7 所示（各物理量的正方向均已标在图中）。实验表明（图 5-8）：变压器副绕组接上负载后，副边出现电流 I_2 ，原边电流也从原来的空载电流 I_0 增加到 I_1 ，若改变负载，则 I_1 将随着 I_2 的增大而增大。

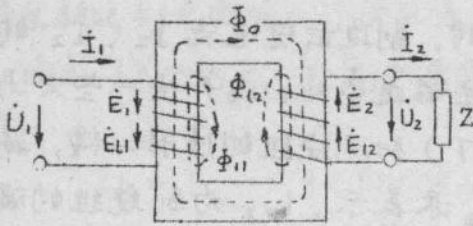


图 5-7

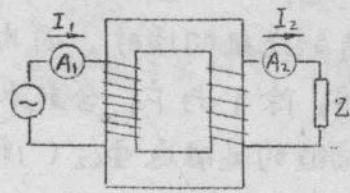


图 5-8

我们知道，原副绕组之间并不存在“电”的联系，那么原边电流 I_1 ，为什么会随着副边电流 I_2 而变化呢？要说明这一点，必须先了解负载运行时变压器的一些基本物理过程和基本关系。

上面讲过，变压器在空载时，铁心中的主磁通量，仅由原边电流 I_1 产生的磁通势 $I_1 N_1$ 所决定，外加电压 U_1 与原绕组的感应电动势 E_1 等值反相，互相平衡。但当副边出现电流 I_2 时，情况就发生了变化。电流 I_2 所产生的磁通势 $I_2 N_2$ 与原绕组的磁通势是作用在同一磁路内的，铁心中的主磁通由原副绕组的磁通势共同决定， I_2 的出现，使铁心中主磁通改变，从而导致原绕组主磁感应电动势 E_1 发生变化，因此原绕组的电压平衡关系（见 $U_1 = -E_1 + I_1 Z_1$ ）即被打破，原边电流即从 I_1 变为 I_1' ，原、副绕组将出现新的电压平衡关系，下面分别进行讨论。

1、原、副绕组的电压平衡方程：

上面讲过，变压器从空载到负载，外加电压 U_1 没有改变。然而电流却从 I_1 变为 I_1' ，因此原绕组的电压平衡方程也从式 $U_1 = -E_1 + I_1 Z_1$ 相应变为：

$$U_1 = -E_1 + I_1' Z_1 = -E_1 + I_1' R_1 + j I_1' X_{L1}$$

由于原绕组的漏阻抗 Z_1 的数值很小，即使在额定负载的情况下， Z_1 与 E_1 相比较，仍然可以忽略，所以仍可近似地认为：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$

再看副绕组的情形。因为负载时，副边出现电流 $\dot{I}_2$ ， $\dot{I}_2$ 的磁通势 $\dot{F}_2$ 除了与 $\dot{F}_1$ 合起来产生主磁通 $\dot{\Phi}$ 外，还产生一些只与副绕组相链的漏磁通 $\dot{\Phi}_{l2}$ （图 5-7）和原绕组的情形一样，漏磁通可用对应的漏电抗 $X_{l2} = \omega L_{l2}$ 来表示， L_{l2} 为副绕组的漏电感，因此电流 $\dot{I}_2$ 通过副绕组时，除了在副绕组的电阻 R_2 上产生压降 $\dot{I}_2 R_2$ 外，还要产生一个漏电抗压降 $\dot{U}_{l2} = -\dot{E}_{l2} = j\dot{I}_2 X_{l2}$ 。令 $Z_2 = R_2 + jX_{l2}$ ， Z_2 称为副绕组的内阻抗，则 $\dot{I}_2$ 通过内阻抗 Z_2 产生的压降为 $\dot{I}_2 Z_2$ 。根据全电路欧姆定律，可以写出负载时副绕组的电压平衡方程为：

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_{l2}$$

设变压器的负载 $Z = R + jX$ ，则有

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z$$

代入式 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$ 则有

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 Z = \dot{I}_2 (Z_2 + Z) = \dot{I}_2 Z_{dx}$$

式中 $Z_{dx} = Z_2 + Z$ 称为等效阻抗，它的模为

$$Z_{dx} = \sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_{l2} + X)^2}$$

因而电流 I_2 可由下式求出：

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_{dx}} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_{l2} + X)^2}}$$

电流 $\dot{I}_2$ 滞后于 $\dot{E}_2$ 的相角差 θ 为：

$$\theta = +g^{-1} \frac{X_{l2} + X}{R_2 + R}$$

θ 称为内功率因数角，注意 θ 与负载的功率因数角 $\varphi_2 = +g^{-1} \frac{X}{R}$ 是不同的（ φ_2 是 $\dot{I}_2$ 落后于 $\dot{U}_2$ 的相角差）。

2. 磁通势平衡方程：

上面讲过，变压器从空载至负载时，因副边出现磁通势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ，引起原边电流增加，以致原边的磁通势亦相应从

$\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ 增加到 $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$ 。那么，在什么样的条件下，磁通势将重新达到平衡呢？下面就来讨论这个问题。

由式 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 与 $\dot{E}_1 = 4.44 f N_1 \Phi_{0m}$ 可得在负载的情况下仍有

$$\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

上式与式 $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = 4.44 f N_1 \Phi_{0m}$ 对比可得

$$\Phi_{0m} = \Phi_m$$

这就是说，当 $\dot{U}_1$ 、 f 、 N_1 不变时，变压器在空载时的主磁通 Φ_{0m} 与负载时的主磁通 Φ_m 几乎是相等的。

由于磁通是由磁通势所产生的，所以主磁通几乎保持不变，磁通势也几乎维持不变，由此可得

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

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

上式称为磁通势平衡方程。这是变压器有负载情况下所遵从的一般规律，不论负载如何变动，上式始终是成立的。上式说明：变压器有负载时，副绕组出现磁通势 $\dot{I}_2 N_2$ 。此时在原绕组必将同时产生一个磁通势，它总是与副绕组的磁通势等值而反相，使总的磁通势仍能保持空载时的值 $\dot{I}_0 N_1$ ，可见，由总的磁通势在铁心中所产生的工作磁通量几乎是无关的。

把式 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$ 两边除以 N_1 ，移项后得

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

式中 $\dot{I}' = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2$ 。上式是变压器负载运行时，原、副绕组电流的一般关系式。此式说明：原边电流 $\dot{I}_1$ 可看作由两个分量组成：其中 $\dot{I}_0$ （即空载电流）是用来产生主磁通的，称为励磁分量；而 $\dot{I}'$ 是用来补偿副边电流 $\dot{I}_2$ 对变压器的影响，称为负载分量。因为在额定负载时，空载电流 I_0 只占原绕组百分之几，所以上式中 $\dot{I}_0$ 可以略去不计，公式可近似地写为：