

地 工 学

(下)

# 第十三章 变压器

## 13-1. 基本概念

电工技术的主要任务之一是把能量从藏有廉价的自然资源（水落差，泥炭，煤）的地方输送到分布有用户的许多地方去。在这时候，电力传输线的电压越高，则输送同样功率所需的电流越小，因而导线的截面积也就越小。因此，经济的远距离输电只有在高压下才是可能的。但是要在发电厂里直接发出为输送数百公里远所需的高压电是极端困难的，并且在如此高的电压下来应用电能也是很不便的，所以把低压的强电流转变为高压的但强度小到原来的许多分之一的电流或者倒过来的转变就显得十分必要了。在现代，这一问题只有依靠工作于交流电之下的变压器才能获得既简便又经济的解决。

从中心发电站到用户的路程上，在大多数情况下电能的变压至少三次（图 13-1）。在发电站，交流发电机给出的是高压（6—30 千伏）电流。但这种电压还不足以将电能作远距离的传输，因此，发电站要通过

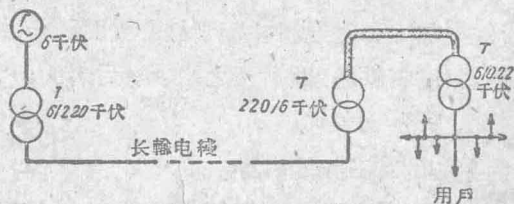


图 13-1. 现代供电示意图。

变压器才接到传输线，变压器将电压升高到 100—500 千伏。输电綫愈长，这一电压就应愈高。在这非常高的电压下，电能传输到工业中心的

用戶。在市郊变电所，电压降低到6—10千伏。在这样的电压下，使用地下電纜輸电綫就不会有特别的困难。电能用这种電纜傳輸到用电地点，在这里进行第三次变压，因此，用戶便有可能在低压(127—220伏)下使用电能。

图13-1给出了輸电的单綫示意图，即用一根綫表示三相系統所有三相的綫路。这一簡图清晰地表明，变压器的总功率应較安装在发电站上的所有发电机的总功率大二倍。从这里可以清楚地看出，在整个現代的供电系統中变压器起着十分重要的作用。

1876年，П. Н. 亚勃洛契柯夫(Яблочков)首先实际应用了变压器，他設計了变压器的結構，作为自己的电烛的供电之用。

变压器<sup>①</sup>是以互感現象(§5-5)为作用原理的靜止的电磁装置。在变压器里面，某一电压的交流电轉变为同頻率的另一电压的交流电。它有着在电方面互相絕緣的数个繞組(不少于两个)。和电源联接的繞組称作原繞組，其他向外电路輸出电能的繞組則称作副繞組。

如果原繞組端的电压——原电压  $U_1$  低于副电压  $U_2$ ，則变压器称为升压变压器；相反的情形則称作降压变压器 ( $U_1 > U_2$ )。繞組按照額定电压的相对大小分为高压繞組(BH)和低压繞組(HH)两种。

为了加强繞組間的磁的联系，两个繞組一齐装在一个用电工鋼片做成的閉合鉄心上。在頻率大約高于20千周/秒时，应用鉄心就不适宜了，这是由于鉄損加大和磁通將挤縮于鉄心表面的緣故(§10-2)。因此制造空心变压器(沒有鉄心)供高频之用。对后者的研究超出本課程的范围。

变压器分为单相的和三相的。

根据国定全苏标准(ГОСТ)，在变压器的名牌上标明下列的額定数据：表观功率；綫电压；額定功率时的綫电流；頻率；相数；接綫图和接綫組(§13-13)；短路电压(§13-9)；运行情况(持續的还是短时的)以

① 变压器的俄文名是 трансформатор，起源于拉丁字 transformare，意即轉換。

及冷却方法。

在图 13-2 上给出了变压器的主要符号表示法。

### 13-2. 变压器的作用原理

我們研究的主要对象是具有铁心的单相双绕组变压器。对于一切类型的变压器说来,这种变压器的工作过程和电气关系可以认为基本上具有代表性的。

加在原绕组两端的电压  $u_1$  (图 13-3) 在这个绕组里产生交变电流  $i_1$ 。和铁心线圈一样 (§ 10-2), 电流在变压器的铁心里激发出交变磁通  $\Phi$ 。由于这个磁通作周期变化, 在变压器的两个绕组里感应而生电动势:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

和 
$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt};$$

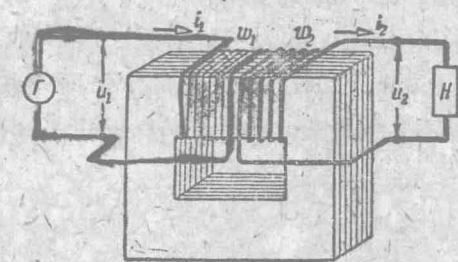


图 13-3. 具有铁心的双绕组变压器的装置图。

此处  $w_1$  和  $w_2$  分别为两个绕组的匝数。两个绕组中所感应的电动势的比值就等于这些绕组的匝数的比值:

的比值:

$$\lambda \quad \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

电动势的有效值和变压器磁通的幅值间的关系, 同铁心线圈一样, 可用以下的方程式来表示:

$$E_1 = 4.44f w_1 \Phi_m; \quad (13-1)$$

$$E_2 = 4.44f w_2 \Phi_m. \quad (13-2)$$

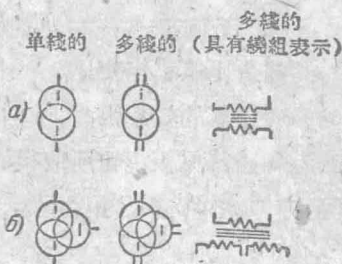


图 13-2. 变压器的符号。

a—具有铁心的单相变压器;

б—单相三绕组变压器。

因此,变压器的电动势的有效值間的比值也等于匝数間的比值:

$$E_1 : E_2 = w_1 : w_2 = k_{12} \quad (13-3)$$

这个比值称作变比。

变压器的效率很高,平均约为 98%; 这就使得在额定负载下可以认为变压器原级绕组所取得的功率和副级绕组所发出的功率近似地相等,亦即  $p_1 \approx p_2$  或  $u_1 i_1 \approx u_2 i_2$ , 于是,

$$i_1 : i_2 \approx u_2 : u_1 \approx w_2 : w_1$$

这个电流和电压瞬时值的比例对于幅值以至于有效值来说仍是正确的:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{U_2}{U_1} \quad (13-4)$$

这就是说,当负载接近于额定负载时,可以认为变压器各绕组中电流的比值等于相应的绕组中的电压或匝数的比值的倒数。

在变压器运行时,原绕组和副绕组中的电动势分别起着不同的作用。原绕组中所感应的电动势  $e_1$  是作为反对原电流  $i_1$  的变化而产生的。就相位来说,这个电动势差不多和电压  $u_1$  相反。和有感电路一样 (§ 7-7), 原电流

$$i_1 = \frac{u_1 + e_1}{R_1},$$

这里  $R_1$  是原绕组的有效电阻。由此得到原电压瞬时值的方程式:

$$u_1 = -e_1 + i_1 R_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_1 R_1, \quad (13-5)$$

这个式子可以看作是电平衡的条件: 加在原绕组两端的电压  $u_1$  永远为电动势  $e_1$  和绕组有效电阻上的电压降所平衡(第二项很小)。

副电路一边则另是一种情况。这里电流  $i_2$  是由电动势  $e_2$  所生的, 后者起着电源电动势的作用。当负载为纯电阻  $R_n$  时, 副电路的电流

$$i_2 = \frac{e_2}{R_2 + R_n},$$



其中  $R_2$  是副绕组的电阻<sup>①</sup>。

就第一次近似来说，副电流  $i_2$  对变压器原电路的影响将如下述。

经过副绕组的电流  $i_2$  力图在变压器铁心中产生磁通，后者决定于磁化力  $i_2 w_2$ 。按照楞次定律，这个磁通的方向必将与主磁通的方向相反；换句话说可以说，副电流力图削弱产生它的磁通。但是主磁通  $\Phi$  的减弱将破坏电平衡关系  $u_1 = i_1 R_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}$ ，而使原电压  $u_1$  的一边占优势，所以伴随着副电流的出现，原电流必将同时增加以抵消副电流的去磁作用而保持电的平衡关系。因此，副电流的任何变化必定会引起原电流相应的变化。由于  $i_1 R_1$  相当小，所以从工程准确度看来副电流差不多不会影响到变压器主磁通的幅值以及它的随时间而变化的性质，因此主磁通的幅值  $\Phi_M$  可以认为是一常数。这个常数  $\Phi_M$  可以表征变压器运行于不变的原级外施电压  $U_1$  时的情形。

### 13-3. 变压器的空载运行

在变压器的原绕组上加以额定电压  $U_1$ ，而将副电路开路，这就是变压器的空载运行。变压器在这种运行情况下实质上与铁心线圈毫无区别。图 13-4 所表示的向量图差不多就是相应的铁心线圈的向量图的重复，所不同的只是某些符号变了，另外还增添了一个向量  $E_2$ 。

经过原绕组的变压器空载电流  $I_0$ ，以它的磁化力  $I_0 w_1$  激发出铁心里的磁通  $\Phi$  和原绕组漏磁通  $\Phi_{p1}$ 。后者全部或部分地

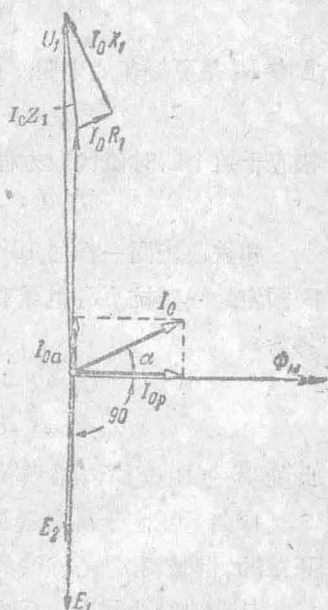


图 13-4. 空载运行时变压器的向量图。

① 我们在此暂且不考虑由于漏磁存在而产生的原、副绕组的感抗，关于这方面的問題将在以下提出。

经过空气而闭合,但不穿过副绕组。根据和一般线圈同样的理由,可以认为,当绕组端电压  $u_1$  是正弦波形时,铁心的磁通也具有正弦波形,也就是说  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ 。这个磁通在变压器的两个绕组中感应出电动势:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_1 \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

和 
$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_2 \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

亦即两个电动势在相位上都落后于磁通四分之一周期。原级漏磁通  $\Phi_{p1}$  在原绕组中感应产生电动势  $e_{p1}$ 。可以认为,原绕组中电流  $i_0$  的瞬时值就决定于外施电压和绕组中两个感应电动势的共同作用,所以,

$$i_0 = \frac{u_1 + e_1 + e_{p1}}{R_1},$$

其中  $R_1$  是原绕组的电阻。换个样子写:

$$u_1 = (-e_1) + i_0 R_1 + (-e_{p1}).$$

相应于这个瞬时值代数方程的有效值向量方程为:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 R_1 + (-\dot{E}_{p1}).$$

和铁心线圈一样 (§ 10-6), 电压  $(-\dot{E}_{p1})$  可以用电流  $\dot{I}_0$  和原绕组的固定的漏感抗  $jX_1$  的乘积来表示, 亦即  $-\dot{E}_{p1} = \dot{I}_0 jX_1$ 。于是原电压将为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) = \\ &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 Z_1, \end{aligned} \quad (13-6)$$

此处  $Z_1 = R_1 + jX_1$ , 称作原绕组的内阻抗。

作向量图宜于从向量  $\dot{\Phi}_m$ ——铁心磁通开始。电流  $\dot{I}_0$  实际上是非正弦的,但是,和铁心线圈的情况一样,为了简化关系,我们用等效正弦波来替代它 (§ 10-3)。后者的向量超前于磁通向量一个磁滞角  $\alpha$ 。两个电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$  的向量都落后  $90^\circ$  于  $\dot{\Phi}_m$ 。最后,按照电压方程 (13-6) 来决定  $\dot{U}_1$ : 作向量  $(-\dot{E}_1)$ , 它恰与  $\dot{E}_1$  相反,然后在  $(-\dot{E}_1)$  上加上平行于  $\dot{I}_0$  的向量  $\dot{I}_0 R_1$  和超前  $\dot{I}_0 90^\circ$  的向量  $\dot{I}_0 X_1$ 。内阻抗电压降

$I_1 Z_1$  封閉了内电压降的直角三角形,后者以电阻降和电抗降为其勾股。

但是我們所画的空载向量图只在定性关系上是正确的。当实际地画真正的变压器的向量图时,为了保持定量的关系,内电压降的三角形将差不多变成一个点。設計变压器时要使得它在滿負載时的内电压降  $I_1 Z_1$  只占  $U_1$  的很小的一个百分数。就空载电流  $I_0$  來說,也只占額定原电流的 3—10% (变压器越大,百分数越小); 所以,  $I_0 Z_1$  是很小的。上述的这种情况就用来在实际工作中根据空载試驗以决定变压器的变比。在空载的情况下,原电压  $U_1$  的数值差不多就等于电动势  $E_1$  (相位相差  $180^\circ$ ); 又由于副繞組中沒有电流,所以副电压  $U_{20}$  就等于鉄心磁通在副繞組中所感应的电动势  $E_2$ 。这样一来,空载时两边的电压差不多是可以认为分别等于相应的电动势的,而根据后者之間的比例可以决定变比:

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}} \quad (13-7)$$

在变压器的名牌上,这个比值用空载时額定电压間的比例的形式表示,例如, 6000/230 伏。因为同一个变压器既可用作降压变压器,又可用作升压变压器,所以名牌上的变比通常只标出高电压对低电压的比例。

給定了电压  $U_{20}$  的数值和鉄心截面  $S$ , 就可以大体上确定变压器繞組的匝数。根据  $U_{20} = E_2 = 4.44 f w_2 S B_m$ , 所以

$$w_2 = \frac{U_{20}}{4.44 f S B_m}$$

磁感应强度  $B_m$  的数值的选择应使得鉄心的材料得到充分的利用: 磁感应强度如太小,鉄心就未全部利用; 磁感应强度如太大,則鉄心中的損失将太大而且磁化电流会过大因而使設備的功率因数  $\cos \varphi$  恶化。对于变压器,  $B_m$  大致在 1 至 1.4 韦/平方米 (即 10000 至 14000 高斯) 的范围以内,变压器越大且其冷却很有力时,磁感应强度可越大。



变压器空载电流  $I_0$  的计算和铁心线圈中电流 (§ 10-4) 的计算一样: 无功分量  $I_{0p}$  根据变压器的磁路计算来确定, 而有功分量  $I_{0a}$  则根据铁损来确定。在大多数情形下, 有功分量小于  $I_0$  的 10%, 所以对于后者的有效值

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}$$

的影响很小; 因此, 如果仅仅根据无功分量的计算来决定空载电流的有效值的话, 其误差也是极小的 (约为 0.5%)。

空载情况下变压器所取得的功率消耗于铁损和原绕组的铜损  $I_0^2 R_1$ 。绕组的铜损在满负载时为 0.25% 至 2% (变压器功率越大, 则铜损越小), 而在空载时由于  $I_0$  比较小所以比之铁损就微不足道了。因此变压器空载时的所有功率实际上可说都消耗于铁损。根据这一点, 空载试验也可以决定变压器的铁损。

#### 13-4. 任载变压器绕组中的电流

运行情况下的变压器, 其原电压  $U_1$  差不多是不随负载而变的。

副绕组与任一负载接通时, 其中就有电流  $I_2$ , 它的磁化力  $I_2 w_2$  将力图削弱铁心磁通, 因而也将减弱  $E_1$ 。但是, 这正破坏了电的平衡, 所以磁化力  $I_1 w_1$  将增加以维持平衡, 这样也就使得铁心的磁通 (其幅值  $\Phi_m$ ) 差不多就保持不变。相应于这一个磁通有一个恒定的磁化力的数值, 不论任载或空载, 它都是不变的。

这样说来, 在任载变压器中的磁通是由原级磁化力  $I_1 w_1$  和副级磁化力  $I_2 w_2$  的共同作用所产生, 但这两个磁化力的向量和, 差不多可以认为等于恒定的空载电流磁化力的数值:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1 \quad (13-8)$$

或者

$$\dot{I}_1 w_1 = (-\dot{I}_2 w_2) + \dot{I}_0 w_1, \quad (13-9)$$

也就是说, 原电流的磁化力平衡了副电流的去磁作用而维持了铁心中

的磁通。

磁化力之间的关系(13-9)很容易转换为电流间的关系,把式中各项都以  $w_1$  除之:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left( -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \right),$$

向量

$$-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}'_2 \quad (13-10)$$

是原电流中用以平衡副电流的去磁作用的分量。它称作归化的副电流。于是原电流

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2, \quad (13-11)$$

也就是说,原电流等于空载电流与归化的副电流的几何和。

副电流自零开始增加,原电流则自空载电流开始上升。当满载时,原电流将达到这样一个数值,其时空载电流只占它的一个很小的百分数,所以满载时的近似计算可以略去空载电流,认为

$$\dot{I}_1 \approx \dot{I}'_2;$$

于是,在此情况下

$$I_1 \approx I_2 \frac{w_2}{w_1},$$

或

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1},$$

在 § 13-2 里,我们已从变压器的能量关系中得出了这个近似的关系。

### 13-5. 副电压与副绕组漏磁

副电流的磁化力  $I_2 w_2$  力图产生两种磁通:铁心中的磁通和副级漏磁通。其中第一部分与主磁通方向相反,为原电流的磁化力  $I_1 w_1$  所抵消;剩下的就只有比较小的副级漏磁通  $\Phi_{p2}$ 。这个磁通完全经由或部分地经由空气或其他非磁性材料而闭合。它围绕着副绕组但不经

过原绕组(图 13-5)。在副绕组中, 这个磁通感应产生一个不大的电动势  $e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_{p2}}{dt}$ 。如果把漏磁通当作是正弦的, 那末副级漏磁电动势的有效值将为

$$E_{p2} = 4.44 f w_2 \Phi_{p2m} \circ$$

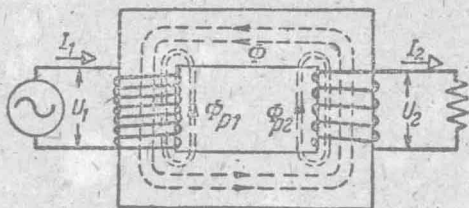


图 13-5. 任载变压器的磁通。

这么一来, 在任载变压器的副绕组中就有两部分电动势: 其中之一为主磁通所生的  $E_2$ , 另一为副级漏磁所生的  $E_{p2}$ 。因此, 与阻抗  $Z_n$  接通的副绕组的电流  $I_2$  将由这两个电动势的作用所产生:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 + \dot{E}_{p2}}{R_2 + jZ_n},$$

其中  $R_2$  为副绕组的电阻(铜的电阻)。

因为  $\dot{I}_2 Z_n = \dot{U}_2$  为副绕组两端的电压, 所以

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + (-\dot{E}_{p2}).$$

和原级漏磁通一样, 副级漏磁通也可以认为与它的激磁电流成正比。这就是  $(-\dot{E}_{p2}) = \dot{I}_2 jX_2$ , 此处  $X_2$  为副级漏感抗。因此,

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2. \quad (13-12)$$

在这个式子里,  $Z_2$  是副绕组的内阻抗而  $\dot{I}_2 Z_2$  是它的内阻抗降。 $Z_2$  和  $Z_1$  一样, 是一个相对恒定的量。

### 13-6. 任载变压器的向量图

任载变压器的向量图(图 13-6)清晰地表明了它的电压与电流间

的關係。畫這個向量圖時最好先從主磁通  $\dot{\Phi}_m$  開始。電流  $I_0$  的向量越前於  $\dot{\Phi}_m$  一個磁滯角  $\alpha$ ，而電動勢  $\dot{E}_2$  落后  $90^\circ$  於  $\dot{\Phi}_m$ 。副電流  $I_2$  的向量與  $\dot{E}_2$  在相位上相距某一角度  $\psi_2$ 。

在負載含有電感的情況下，也就是當  $Z_n = R_n + jX_n$  時，上述的角度將為

$$\psi_2 = \arctan \frac{X_2 + X_n}{R_2 + R_n}。$$

以這個角度從  $\dot{E}_2$  作出  $\dot{I}_2$  來。為了畫出副電壓  $U_2$  的向量應該從  $\dot{E}_2$  中減去副繞組的電抗降  $\dot{I}_2 jX_2$  和電阻降  $\dot{I}_2 R_2$ 。 $\dot{I}_2 jX_2$  的向量越前  $90^\circ$  於  $\dot{I}_2$ ；為了得到這個向量，從  $\dot{E}_2$  的端點作一垂直於  $\dot{I}_2$  的直線，並從同一端點出發在此直線上截取長度等於  $I_2 X_2$  的一段便是。從  $I_2 X_2$  的另一端作平行於  $\dot{I}_2$  的直線，在此直線上截取長度為  $I_2 R_2$  的一段便得  $\dot{I}_2 R_2$ 。 $\dot{I}_2 Z_2$  的向量就是副繞組內電壓降三角形的斜邊。用這個方法得到  $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$ ，它越前於  $\dot{I}_2$  的角度為

$$\varphi_2 = \arctan \frac{X_n}{R_n}。$$

把電流  $\dot{I}_0$  和歸化副電流  $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$  向量相加，我們可以得到原電流的向量。 $\dot{I}'_2$  與  $\dot{I}_2$  的方向相反。至於原電壓向量  $\dot{U}_1$  則可用和空載向量圖一樣的法子畫出來。

在對  $\dot{\Phi}_m$  越前  $90^\circ$  的向量  $(-\dot{E}_1)$  上，加以原繞組的內電壓降向量：平行於  $\dot{I}_1$  的電阻降  $\dot{I}_1 R_1$  和對  $\dot{I}_1$  越前  $90^\circ$  的電抗降  $\dot{I}_1 X_1$ 。用此法所得的向量  $\dot{U}_1$  以  $\varphi_1$  角越前於  $\dot{I}_1$ 。這角度大於  $\varphi_2$ ，因為有磁化電流和變壓器內電感抗的緣故。

當副電路中的負載含有較大的電容，亦即當  $Z_n = R_n - jX_n$  時（圖

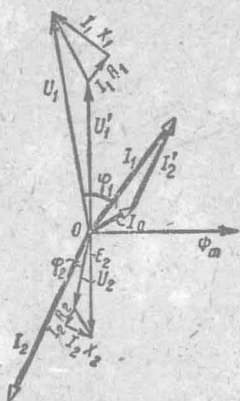


圖 13-6. 負載含有電阻和感抗的變壓器的向量圖。

13-7), 变压器的向量图将有独特的变化。当然, 向量图的作法和以前完全一样, 但是它的一般形状却有了显著的不同。电容性负载下,  $\dot{I}_2$  越前于  $\dot{E}_2$  的角度是

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_m - X_2}{R_m + R_2}。$$

负载的电容抗和副绕组的漏感抗有一部分是相互抵消的, 由于这个缘故,  $\dot{U}_2$  可能大于  $\dot{E}_2$ 。电流  $\dot{I}'_2$  的容性分量的一部分为  $\dot{I}_0$  的感性分量所抵消, 因此  $I_1 < I_2$ 。最后, 原电压  $U_1$  也可以小于  $(-E_1)$ , 因为原电路中容性

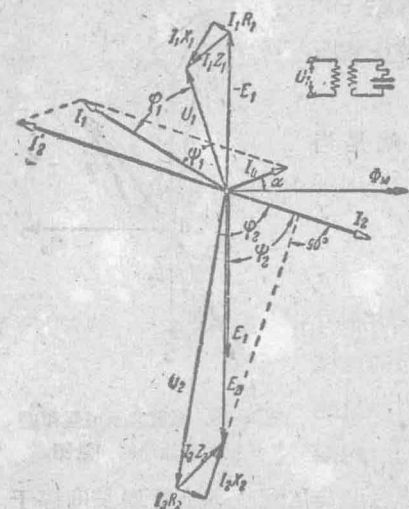


图 13-7. 电容性负载时变压器的向量图。反应的一部分将被原绕组的漏感所补偿。 $\dot{U}_1$  和  $\dot{I}_1$  之间的相角差比  $\dot{U}_2$  和  $\dot{I}_2$  之间的相角差小, 这是由于副电路的容性反应在传到原电路时其中一部分为变压器的内电感所抵消的缘故。

### 13-7. 归化的变压器

在大多数情形下, 变压器的变比是相当高的。因此要在变压器向量图上把高压边和低压边的电压, 例如 6000 伏和 230 伏, 用同一比例尺画出来是有困难的。此外, 最好使得原电路和副电路的参数——它们的电阻和电抗能够直接地加以比拟。如果我们把副绕组的匝数“转化”为原绕组的匝数, 亦即把  $w_1 \neq w_2$  的实在的变压器用变比为 1 的假想的归化变压器来替代的话, 那末分别属于变压器两边的各个量之间的关系就变得简单而且明白了。

在进行这样的归化时, 应该使原绕组的情况不变, 而在副电路中则



应保持其能量关系——有功功率和无功功率(因为它们与变比无关)以及它们在副电路各部分的分配都不改变。

由此也自然地得出结论:在归化时不应该改变所归化的各部分的电压与电流之间的相角差。所有经过适当方式而改写的副绕组的各个量,我们称之为归化量并标之以符号(')。

根据能量关系应该不变的条件,对于所有同名的量在归化时其归化系数都应该是一样的,所以只要决定任一个电压或电动势的归化系数便够了。

在  $w_1 = w_2$  时,电动势  $E'_2 = E_1$ , 又因  $E_1 = \frac{w_1}{w_2} E_2 = k_{12} E_2$ , 所以副电动势的归化量

$$E'_2 = k_{12} E_2 = E_1. \quad (13-13)$$

同样的归化系数可以用于所有的副电压:

$$U'_2 = k_{12} U_2; \quad I'_2 R'_2 = k_{12} I_2 R_2; \quad I'_2 X'_2 = k_{12} I_2 X_2.$$

副绕组的表观功率在归化时其数值应保持不变:

$$S_2 = E_2 I_2 = E'_2 I'_2 = k_{12} E_2 I'_2;$$

于是,

$$I'_2 = \frac{1}{k_{12}} I_2 = \frac{w_2}{w_1} I_2; \quad (13-14)$$

副绕组的归化副电流在数值上就等于原电流中平衡副电流的去磁作用的那个分量,但在相位上二者恰相反。

从有功功率不变的条件可得:

$$I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2' = \frac{1}{k_{12}^2} I_2^2 R_2',$$

所以副绕组电阻的归化量为

$$R_2' = k_{12}^2 R_2. \quad (13-15)$$

无功功率  $Q$  在归化时亦应维持不变,因此

$$I_2^2 X_2 = I_2'^2 X_2' = \frac{1}{k_{12}^2} I_2^2 X_2',$$

这就可以决定副绕组电感抗的归化量:

$$X'_2 = k_{12}^2 X_2 \quad (13-16)$$

归化的变压器向量图与上述图 13-6 的向量图的区别仅是：其中  $E_1 = E'_2$ ，同时可以将原、副电压及电流直接比较。这样便可能，例如，直接用伏特为单位来决定归化到副绕组上的变压器压损：

$$\Delta U = U_1 - U'_2。$$

### 13-8. 变压器的等效电路

为了计算方便，有时也为了便于研究复杂的电路，可以用一个阻抗的组合——等效电路来代替实际的变压器。当等效电路接在变压器原来所在的位置时，它将从原电路中取得与原来的变压器一样的功率，并且其电流和相角也一样。当然，等效电路只是作为一个负载在原电路里代替变压器——等效电路是没有变压器作用的。

用变压器的各个参数，我们来立出决定等效电路的参数方程式：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_1 + (-\dot{E}_1) = \dot{I}_1 Z_1 - k_{12} \dot{E}_2 \\ \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 Z_2 + \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 Z_n \end{aligned} \right\} \quad (13-17)$$

把  $\dot{I}_2 = -\dot{I}'_2 k_{12}$  代入后一式，并把  $\dot{E}_2$  的表达式代入  $\dot{U}_1$  的方程，则得

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}'_2 k_{12}^2 Z_2 + \dot{I}'_2 k_{12}^2 Z_n。$$

此处  $k_{12}^2 Z_2 = Z'_2$  是副绕组内阻抗的归化量，而  $k_{12}^2 Z_n = Z'_n$  是联接于变压器副电路的负载阻抗的归化量。如此就得到等效电路的第一个方程式：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}'_2 Z'_2 + \dot{I}'_2 Z'_n \quad (13-18)$$

电压  $(-\dot{E}_1)$  正比于铁心磁通  $\Phi_m$ 。由于铁心的  $\mu$  不是常量的缘故， $\Phi_m$  和电流  $I_0$  的关系是非直线的。但是在变压器运行时磁通变化不大，所以可以不顾非线性关系而认为  $\Phi_m$  正比于  $I_0$ 。从这一论点出发可以认为  $(-\dot{E}_1)$  正比于  $I_0$ 。因为上述二向量间的相角差小于  $90^\circ$  (图 13-8)，所以可以把其间比例常数当作某一阻抗  $Z_{12}$ ，后者称作激磁电路的阻抗。那么， $-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_{12}$ 。把这个关系代入原电压的方

程式(13-17), 則得等效电路的第二个方程式:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_0 Z_{12} \quad (13-19)$$

原电流的方程:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 \quad (13-20)$$

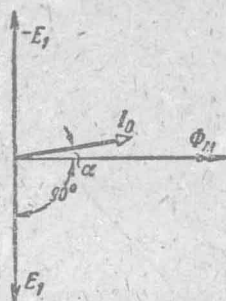


图 13-8. 磁通磁化电流和感应电动势的向量图。

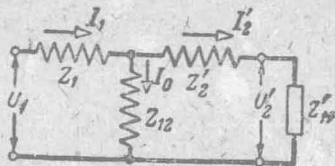


图 13-9. 变压器的 T 形等效电路。

作为等效电路的第三个方程式。

上述三个方程可以看作是图 13-9 中的綫路根据克希荷夫两个定律所写出的方程。这样就得到原来的变压器的 T 形等效电路, 其中  $Z_1$  代表了原繞組,  $Z_2'$  代表了副繞組, 而  $Z_{12}$  代表激磁电路。阻抗  $Z'_n$  代表接通副繞組的負載, 所以归在变压器等效电路之外。  $Z'_n$  的变化相当于負載的变化, 再根据等效电路中电流和部分电压的变化可以研究真实的变压器中的情况。

与变压器的向量图的区别是, 等效电路的向量图中副电压和电流的向量归化到原繞組上, 并轉过  $180^\circ$ 。宜从向量  $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$  开始画这一向量图 (图 13-10)。和这一向量相比, 归化的副电流的向量  $I'_2$  要落后一定的角度

$$\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 \pm X'_n}{R'_2 + R'_n}$$

而磁化电流  $I_0$  的向量則落后  $90^\circ - \alpha$ 。其他副电压向量的作图和 在变压器的向量图 (图 13-6) 中一样: 从向量  $\dot{E}'_2$  的末端作垂直于  $I'_2$  的垂綫, 在这垂綫上标以  $I'_2 X'_2$  等等。接着将  $\dot{I}'_2$  和  $\dot{I}_0$  相加, 求出  $\dot{I}_1$ , 然后在变压器的向量图中一样, 画原电压向量  $\dot{I}_1 R_1$ ,  $\dot{I}_1 X_1$ ,  $\dot{I}_1 Z_1$  和  $U_1$ 。等效电路的向量图时常称为归化的变压器向量图。

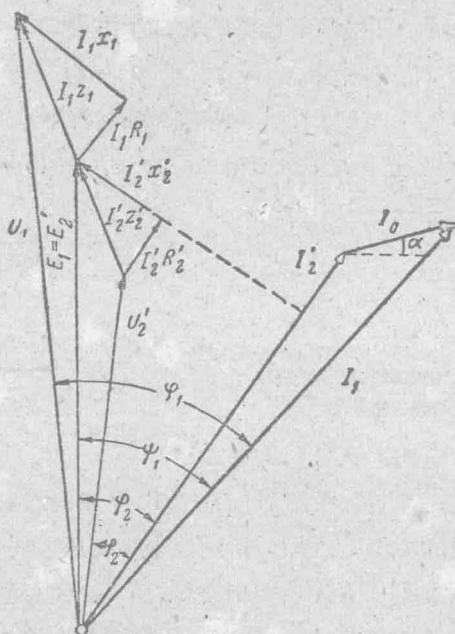


图 13-10. 图 13-9 等效电路的向量图。

对于已制成的变压器，实际上不可能分别地决定  $X_1$  和  $X_2$ ，这样便使画相应的等效电路时遇到困难；为了使这种作图变得非常简单，只要忽略电流  $\dot{I}_0$  就行；因此，认为  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2'$ 。上面已经指出， $I_0$  等于  $I_1$  额定值的 3—10%。

但是，由于忽略  $I_0$  所引起的误差将由于  $\dot{I}_2'$  和  $\dot{I}_0$  是几何相加而减少。此外，在计算变压器中的电压降时，这一误差并不重要，因为它仅是影响电压降  $\dot{I}_1 Z_1$ ，而这一电压降本身只有  $U_1$  的 3—5%。

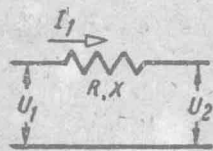


图 13-11. 变压器的简化等效电路。

如果省略电流  $I_0$  的支路，则在简化了的等效电路(图 13-11)中，线段  $Z_1$  和  $Z_2'$  就简直是串联着了，而且它们的电阻和电抗便可以相加：

$$R_1 + R_2' = R, \quad X_1 + X_2' = X,$$