

高等学校教学用书



电 工 学

下 册

亚·谢·卡萨特金 著
米·亚·毕烈卡林

人民教育出版社

目 录

第十三章 变压器	303
13-1. 基本概念	303
13-2. 变压器的作用原理	305
13-3. 变压器的空载运行	307
13-4. 任载变压器绕组中的电流	310
13-5. 副电压与副绕组漏磁	311
13-6. 任载变压器的向量图	312
13-7. 归化的变压器	314
13-8. 变压器的等效电路	316
13-9. 短路试验	319
13-10. 变压器任载时副电压的变化	320
13-11. 效率	322
13-12. 三相变压器	323
13-13. 绕组联接组	326
13-14. 自耦变压器	327
13-15. 三绕组变压器	329
13-16. 变压器的并联运行	330
13-17. 铁心和绕组的装设	331
13-18. 变压器的发热及其功率	333
13-19. 变压器的冷却	334
13-20. 仪用互感器	337
13-21. 实验 单相变压器	345
13-22. 实验 三相变压器	348
第十四章、异步电机	351
14-1. 概论	351
14-2. 定子旋转磁场	354
14-3. 定子和转子绕组的设置	356
14-4. “电角度”的概念 绕组系数	360
14-5. 定子和转子的电势	361

14-6. 异步电机的磁通	368
14-7. 转子电流	368
14-8. 异步电机向量图	367
14-9. 和运转着的异步电机等效的变压器	369
14-10. 能量平衡	370
14-11. 转矩	372
14-12. 异步电机的等效电路	373
14-13. 异步电机的机械特性	375
14-14. 绕线式电动机(分相转子电动机)	381
14-15. 挤流式电动机	383
14-16. 减小鼠笼式电动机起动电流的方法	385
14-17. 速率调节	387
14-18. 功率因数	390
14-19. 损耗与效率	392
14-20. 异步电动机作为电磁制动器 感应调压器和调相器的运用	393
14-21. 异步发电机	396
14-22. 单相异步电动机	397
14-23. 实验 短路型转子异步电动机研究	400
14-24. 实验 绕线式异步电动机研究	404
第十五章 同步电机	409
15-1. 基本概念	409
15-2. 发电机的空载运转	416
15-3. 电枢反应	419
15-4. 同步电机的向量图	421
15-5. 发电机的损失和效率	433
15-6. 发电机的接入并联运用	425
15-7. 同步电动机的起动	427
15-8. 同步电机的电磁转矩	428
15-9. 同步功率和同步转矩	432
15-10. 改变激磁的影响	434
15-11. 同步电动机的特性	439
第十六章 换向器式电机	441
16-1. 换向器的意义	441
16-2. 直流电机的主要部分	441
16-3. 换向器的作用原理	443
16-4. 鼓形电枢 折绕组和波绕组	446
16-5. 电枢的电动势	447

目 录

16-6. 制动力矩和制动转矩	448
16-7. 电枢反应	449
16-8. 换向	458
16-9. 直流电机按激磁方法的分类	457
16-10. 他激发电机	459
16-11. 并激发电机	462
16-12. 串激发电机	466
16-13. 复激发电机	467
16-14. 发电机的并联运用	468
16-15. 直流电动机	470
16-16. 并激电动机	473
16-17. 串激电动机	478
16-18. 复激电动机	480
16-19. 变交流为直流的电动机-发电机组	480
16-20. 电机放大器	481
16-21. 单幅换流机	489
16-22. 交流换向器式电动机	492
16-23. 实验 并激发电机和他激发电机	497
16-24. 实验 并激电动机研究	500
16-25. 实验 串激电动机研究	503
16-26. 实验 电机放大器研究	505
第十七章 电子和离子器件	508
17-1. 电子学的发展	508
17-2. 电子与离子器件的分类	510
17-3. 热电子发射	511
17-4. 二极管	518
17-5. 二极管的参数	517
17-6. 三极管	519
17-7. 三极管的参数	524
17-8. 多极管	526
17-9. 电子束管	529
17-10. 充气管	532
17-11. 闸流管	534
17-12. 汞弧整流器的作用原理	536
17-13. 汞弧整流器的引燃与激励	538
17-14. 多相整流器	539
17-15. 金属汞弧整流器	541

17-16. 引燃管.....	544
17-17. 半导体二极管.....	546
17-18. 半导体三极管(晶体管).....	554
17-19. 半导体三极管的参数.....	557
17-20. 光电管.....	561
第十八章 电子和离子设备	568
18-1. 概述.....	568
18-2. 电子管放大器.....	569
18-3. 电子管振荡器.....	576
18-4. 半导体三极管放大器.....	579
18-5. 光电继电器.....	583
18-6. 电子管示波器.....	585
第十九章 电力拖动	589
19-1. 电力拖动的发展.....	589
19-2. 电力拖动的运行分类.....	592
19-3. 电动机功率的选择.....	594
19-4. 电动机的电流种类和类型的选择.....	599
第二十章 电器	602
20-1. 电弧的熄灭.....	602
20-2. 自动断路器.....	603
20-3. 控制器.....	606
20-4. 接触开关.....	607
20-5. 高压断路器.....	609
20-6. 继电器和继电保护.....	615
第二十一章 电照	620
21-1. 电照的发展.....	620
21-2. 光度量与光度单位.....	623
21-3. 电气光源.....	629
21-4. 照明器具.....	638
21-5. 对人工照明的主要要求.....	642
21-6. 灯的布置.....	646
21-7. 照度算法.....	648
第二十二章 电能的生产、传输和分配	654
22-1. 苏联发电厂的建设.....	654
22-2. 发电厂电力网的电压.....	659

22-3. 发电厂的负载.....	662
22-4. 发电厂的分类.....	664
22-5. 电力系统.....	672
22-6. 原子能发电厂.....	674
22-7. 电力网的分类.....	678
22-8. 导线上电荷载的计算.....	682
22-9. 根据电压损失计算直流导线.....	683
22-10. 三相电路的计算.....	685
22-11. 导线截面按发热的选择和保险器导线的选择.....	688
22-12. 电力网的材料和构成的元件.....	691
22-18. 变电所.....	698

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

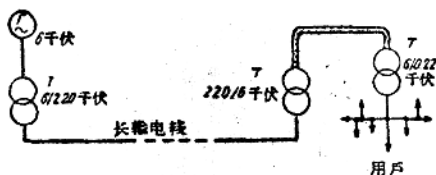


图13-1. 现代供电示意图。

变压器才接到传输线,变压器将电压升高到100—500千伏。输电线路愈长,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別的困难。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,在整个现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^①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 Φ 。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:

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

$$\text{和 } e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt};$$

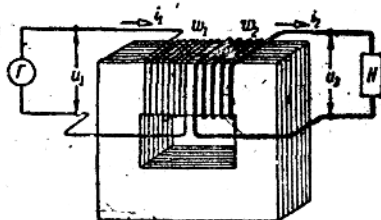


图 13-3. 具有铁心的双绕组变压器的装置图。此处 w_1 和 w_2 分别为两个绕组的匝数。两个绕组中所感应的电动势的比值就等于这些绕组的匝数的比值:

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

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:

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

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

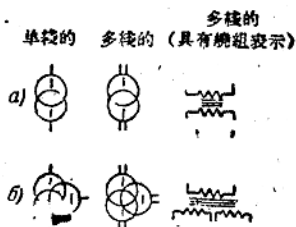


图 13-2. 变压器的符号。

a—具有铁心的单相变压器;

b—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,平均約为 98%;这就使得在額定負載下可以认为变压器原級繞組所取得的功率和副級繞組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來說仍是正确的:

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

这就是說,当負載接近于額定負載时,可以认为变压器各繞組中电流的比值等于相应的繞組中的电压或匝数的比值的倒数。

在变压器运行时,原繞組和副繞組中的电动势分別起着不同的作用。原繞組中所感应的电动势 e_1 是作为反对原电流 i_1 的变化而产生的。就相位來說,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 是原繞組的有效电阻。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:加在原繞組两端的电压 u_1 永远为电动势 e_1 和繞組有效电阻上的电压降所平衡(第二項很小)。

副电路一边則另是一种情况。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。当負載为純电阻 R_n 时,副电路的电流

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

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 Φ_{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 Φ_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 α 。两个电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 的向量都落后 90° 于 Φ_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

$I_1 Z_1$ 封閉了內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,內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负载时的內电压降 $I_1 Z_1$ 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 $\dot{E}_1$ (相位相差 180°); 又由于副繞組中没有电流,所以副电压 $\dot{U}_2$ 就等于鉄心磁通在副繞組中所感应的电动势 $\dot{E}_2$ 。这样一来,空载时两边的电压差不多是可以认为分別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:

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (18-7)$$

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, 則鉄心中的损失将太大而且磁化电流会过大因而使设备的功率因数 $\cos \varphi$ 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 $I_0^2 P_1$ 。绕组的铜损在满载时为 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 比较很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 Φ_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:

$$I_1 = I_0 + \left(-I_2 \frac{w_2}{w_1} \right),$$

向量

$$-I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_2' \quad (13-10)$$

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

$$I_1 = I_0 + I_2', \quad (13-11)$$

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

$$I_1 \approx I_2';$$

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,我们已经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 Φ_{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

$$E_{p2} = 4.44 f w_2 \Phi_{p2m}。$$

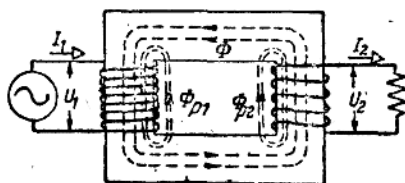


图 13-5. 任載变压器的磁通。

这么一来, 在任載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_m 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:

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2 + \dot{E}_{p2}}{R_2 + Z_m},$$

其中 R_2 为副绕组的电阻(铜的电阻)。

因为 $\dot{I}_2 Z_m = \dot{U}_2$ 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 $(-\dot{E}_{p2}) = \dot{I}_2 j X_2$, 此处 X_2 为副级漏感抗。因此,

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + j X_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2。 \quad (13-12)$$

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. 任載变压器的向量图

任載变压器的向量图(图 13-6)清晰地表明了它的电压与电流间

的关系。画这个向量图时最好先从主磁通 Φ_m 开始。电流 I_0 的向量越前于 Φ_m 一个磁滞角 α ，而电动势 $\vec{E}_2$ 落后 90° 于 Φ_m 。副电流 I_2 的向量与 $\vec{E}_2$ 在相位上相距某一角度 ψ_2 。

在负载含有电感的情况下，也就是当 $Z_n = R_n + jX_n$ 时，上述的角度将为

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

以这个角度从 $\vec{E}_2$ 作出 $\vec{I}_2$ 来。为了画出副电压 $\vec{U}_2$ 的向量应该从 $\vec{E}_2$ 中减去副绕组的电抗降 $\vec{I}_2 jX_2$ 和电阻降 $\vec{I}_2 R_2$ 。 $\vec{I}_2 jX_2$ 的向量越前 90° 于 $\vec{I}_2$ ；为了得到这个向量，从 $\vec{E}_2$ 的端点作一垂直于 $\vec{I}_2$ 的直线，并从同一段点出发在此直线上截取长度等于 $I_2 X_2$ 的一段便是。从 $I_2 X_2$ 的另一端作平行于 $\vec{I}_2$ 的直线，在此直线上截取长度为 $I_2 R_2$ 的一段便得 $\vec{I}_2 Z_2$ 。 $\vec{I}_2 Z_2$ 的向量就是副绕组内电压降三角形的斜边。用这个方法得到 $\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - \vec{I}_2 Z_2$ ，它越前于 $\vec{I}_2$ 的角度为

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

把电流 $\vec{I}_1$ 和归化副电流 $\vec{I}_2' = -\vec{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$ 向量相加，我们可以得到原电流的向量。 $\vec{I}_1$ 与 $\vec{I}_2$ 的方向相反。至于原电压向量 $\vec{U}_1$ 则可用和空载向量图一样的法子画出来。

在对 Φ_m 越前 90° 的向量 $(-\vec{E}_1)$ 上，加以原绕组的内电压降向量：平行于 $\vec{I}_1$ 的电阻降 $\vec{I}_1 R_1$ 和对 $\vec{I}_1$ 越前 90° 的电抗降 $\vec{I}_1 X_1$ 。用此法所得的向量 $\vec{U}_1$ 以 φ_1 角越前于 $\vec{I}_1$ 。这角度大于 φ_2 ，因为有磁化电流和变压器内电感抗的缘故。

当副电路中的负载含有较大的电容，亦即当 $Z_n = R_n - jX_n$ 时（图

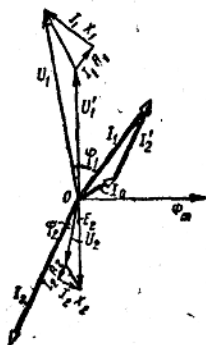


图 13-6. 负载含有电阻和感抗的变压器的向量图。