

高等学校試用教科书



电 工 学

DIANGONGXUE

第 二 册

浙江大学电机工程系电工学教研组編

(修 訂 本)

人 民 教 育 出 版 社

第二册 目录

第七章 变压器

7-1. 概述	195
7-2. 变压器的工作原理	196
7-3. 变压器的空载运行	198
7-4. 变压器的负载运行	202
7-5. 变压器的外特性和电压调整率	206
7-6. 变压器的损耗和效率	207
7-7. 三相电压的变换	210
7-8. 变压器的并联运行	214
7-9. 变压器的构造	216
7-10. 变压器的额定值和名牌数据	219
7-11. 自耦变压器	221
7-12. 仪用互感器	223
7-13. 电焊变压器	229

第八章 异步电机

8-1. 概述	230
8-2. 异步电机的构造	230
8-3. 旋轉磁場	237
8-4. 异步电动机的工作原理	242
8-5. 异步电动机的运行情况	244
8-6. 异步电动机的等值电路和矢量图	251
8-7. 异步电动机的损耗、效率和能量图	255
8-8. 异步电动机的电磁转矩和机械特性	256
8-9. 异步电动机的起动	262
8-10. 双鼠籠式和深槽式电动机	269
8-11. 异步电动机的调速	272
8-12. 异步电动机的反转	278
8-13. 异步电动机的制动	278
8-14. 提高异步电动机功率因数的方法	281
8-15. 异步电动机的工作特性	282

8-16. 异步电动机的额定值	283
8-17. 单相异步电动机	284
8-18. 异步发电机	288
8-19. 我国异步电机制造情况	289

第九章 同步电机

9-1. 概述	293
9-2. 同步电机的构造	293
9-3. 同步发电机的空载运行	297
9-4. 同步发电机的负载运行	298
9-5. 同步发电机的并联运行	301
9-6. 同步电动机	303
9-7. 改变激磁电流对同步电动机运行情况的影响	308
9-8. 同步电动机的起动	311
9-9. 单相同步电动机	312
9-10. 我国同步电机制造情况	313

第十章 直流电机

10-1. 直流电机的用途和构造	314
10-2. 电枢绕组和直流电势的获得	316
10-3. 直流电机电枢绕组内的感应电势	323
10-4. 直流电机的电磁转矩	325
10-5. 电枢反应	326
10-6. 电流的换向及改善换向的方法	329
10-7. 直流电机按激磁方法的分类	331
10-8. 他激发电机	334
10-9. 并激发电机	338
10-10. 串激发电机	341
10-11. 复激发电机	341
10-12. 直流电动机概述	342
10-13. 并激电动机	346
10-14. 串激电动机	348
10-15. 复激电动机	350
10-16. 直流电动机的起动	351
10-17. 直流电动机的反转	355
10-18. 直流电动机的调速	355
10-19. 直流电动机的制动	361
10-20. 直流电机的损耗、效率和额定值	364
10-21. 我国直流电机制造情况	366

第十一章 自动装置用电机

11-1. 交磁放大机	369
11-2. 自整角机系统	374
11-3. 执行电动机	377
11-4. 旋转变压器	381
11-5. 调相器	385
11-6. 测速发电机	386
11-7. 微型同步电动机	388

第十二章 电力拖动

12-1. 概述	396
12-2. 电动机的发热和冷却	400
12-3. 电动机功率的选择	403
12-4. 电动机种类和类型的选择	411
12-5. 电动机的运行与维护	417

第十三章 工业用低压电器

13-1. 概述	421
13-2. 非自动电器	423
13-3. 接触器和磁力起动器	431
13-4. 继电器	437
13-5. 低压熔断器	445
13-6. 电阻元件和变阻器	448
13-7. 电磁式执行电器	450
13-8. 电器的运行与维护	455

第十四章 电力拖动控制

14-1. 概述	458
14-2. 鼠笼电动机控制	461
14-3. 绕线电动机控制	464
14-4. 直流电动机控制	468
14-5. 发电机(或放大机)——电动机组控制	471
14-6. 磁放大器及其在电动机控制中的应用	475
14-7. 电动机转速调节的脉冲法及其控制	479
14-8. 电动机的同步旋转与随动系统	484
14-9. 金属加工机床的程序控制	487

第十五章 发输配电

15-1. 发电厂类型和我国电力工业的发展情况	498
15-2. 电力系统及供电线路	501

15-3. 变电所和配电所	510
15-4. 工业企业配电	515
15-5. 导线截面与熔断器的选择	516

第十六章 使用电气设备的安全技术

16-1. 概述	525
16-2. 工业企业内电气设备安全要求略述	527
16-3. 保护接地和接零	530
16-4. 保安防护用具	533
16-5. 急救	534

第七章 变压器

7-1. 概述

变压器是一种静止的电器，用来把某一电压的交流电能转换成同频率的另一电压的交流电能。

将电能从发电厂输送到用电的地方，在输电线上要损耗一部分功率，这一功率损耗 ΔP_A 决定于通过电线上电流 I 和电线电阻 r_A 的大小，即 $\Delta P_A = I^2 r_A$ 。在输送一定的功率 P 、在一定的输电距离 l 和负载的功率因数 $\cos \varphi$ 一定时，电线上的功率损耗将为：

$$\Delta P_A = I^2 r_A = \left(\frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 \frac{l}{\gamma S} = C \frac{1}{U^2 S}, \quad (7-1)$$

式中 γ 为电线的电导系数， S 为电线的截面积， $C = \frac{Pl}{\cos^2 \varphi \gamma}$ 为一常数。

从式(7-1)中可以看出，如电线所用材料一定时，电压 U 愈高，则功率损耗 ΔP_A 愈小；如容许的功率损耗 ΔP_A 为一定时，电压 U 愈高，则电线的截面积 S 愈小，因而可节省电线材料。从分析中可见，采用高电压输电是很经济的。在苏联由列宁伏尔加水电站到莫斯科间采用 500 千伏的高压输电，我国东北在解放后也已建立了 220 千伏的高压输电系统。随着我国工农业生产的大跃进，输送功率和输电距离的增加，将建立更高电压的输电系统。

但这样高的电压无论从发电机的安全运行和制造成本的观点来看，是不容许由发电机直接产生的，同样地也不容许被用电设备（如电动机、电灯等）直接使用。为此，必须在整个电能的产生、输送、分配和

使用的过程中, 随我们的需要将电压升高或降低。利用变压器就可既经济, 又方便地完成这一任务, 所以变压器是现代输电和配电系统中不可缺少的环节。

最简单的电能输送系统, 可用图 7-1 所示线路图表示, 其中 G 为发电机, T_1 为升压变压器, T_2 为降压变压器, L 为输电线路, H 为用电设备 (负载)。

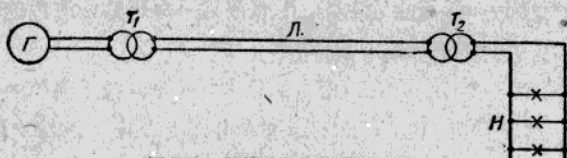


图 7-1. 最简单的电能输送系统。

除了上述电能输送系统中用的电力变压器外, 还有许多供特殊用途的变压器, 如自耦变压器、仪用互感器、电焊变压器等。虽然变压器的种类很多, 用途不同, 但它们的工作原理都是基于电磁感应现象。

7-2. 变压器的工作原理

最简单的变压器由一闭合铁芯, 其上绕以匝数不同的二个绕组而构成, 如图 7-2 所示。其中一个绕组与电源相连接, 称为原绕组, 另一个绕组与负载相连接, 称为副绕组。如原绕组的端电压 (称原级电压) U_1 小于副绕组的端电压 (称副级电压) U_2 , 则称为升压变压器; 在相反

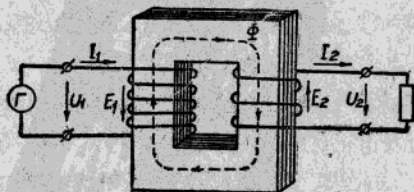


图 7-2. 变压器的工作原理。

的情况下 ($U_1 > U_2$) 则称为降压变压器。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。

当原绕组两端接上交变电压 U_1 时, 则将有交变电流 I_1 通过原绕组, 此时在铁芯中产生了交变磁通 Φ , 其沿铁芯而闭合。因此, 磁通 Φ 不仅与原绕组相交链, 且与副绕组相交链, 这样就在原、副绕组间建立起磁的联系。

由于磁通 Φ 的交变, 根据电磁感应定律将在原、副绕组中感应电势:

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

和

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

式中 w_1 和 w_2 为原、副绕组的匝数。

当外加电压 U_1 按正弦变化时, 则磁通 Φ 也将按正弦变化。设

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

则

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = \\ &= -w_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = \\ &= 2\pi f w_1 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= E_{m1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned} e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = \\ &= -w_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = \\ &= 2\pi f w_2 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= E_{m2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

电势 e_1 和 e_2 的有效值:

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4.44 f w_1 \Phi_m \quad (7-2)$$

和

$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4.44 f w_2 \Phi_m \quad (7-3)$$

用复数符号法表示时:

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f w_1 \dot{\Phi}_m \quad (7-4)$$

和

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f w_2 \dot{\Phi}_m \quad (7-5)$$

因此从式(7-2)和式(7-3)可得:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (7-6)$$

比值 k 称为变比。

由于变压器原、副绕组本身的阻抗电压降一般很小(如后分析中所指出),所以 $U_1 \approx E_1$ 和 $U_2 \approx E_2$ 。

这样

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (7-7)$$

从式(7-7)中可见,当原、副绕组的匝数 w_1 和 w_2 不同时,则变压器可将某一电压的交流电转换成同频率另一电压的交流电,此时电能自原绕组输入,通过电磁感应的形式传递给副绕组而输送给负载。

7-3. 变压器的空载运行

所谓变压器的空载运行就是变压器的原绕组端加上额定电压而副绕组端开路(不接负载)时的工作情况。如图7-3所示。

当原绕组接上电压 U_1 时,在原绕组内将有电流通过,这电流称为空载电流 I_0 。此时磁路中由于磁势 $I_0 w_1$ 的作用将产生磁通,因铁芯的磁导系数远大于空气的磁导系数,所以磁通的绝大部分都经过铁芯而闭合,这部分与原、副绕组都相交链的磁通称为主磁通 Φ ; 另有很小

一部分经过原绕组附近空间闭合而只与原绕组相交链的磁通称为原绕组漏磁通 Φ_{1s} 。

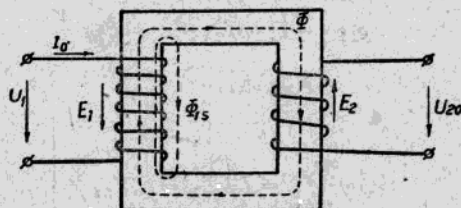


图 7-3. 变压器的空载运行。

因变压器铁芯的磁导系数甚大，所以由较小的磁势 $I_0 w_1$ 即能产生足够的主磁通 Φ 。一般变压器的空载电流 I_0 约为额定电流的 3—8%。

如前所述，交变磁通在铁芯中要产生磁滞和涡流损耗，所以空载电流 I_0 的相位超前于主磁通 Φ 一个角度 α 。

根据电磁感应定律，主磁通 Φ 将在原、副绕组中感应电势：

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f w_1 \dot{\Phi}_m$$

和

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f w_2 \dot{\Phi}_m。$$

同时漏磁通 Φ_{1s} 也将在原绕组中感应电势

$$e_{1s} = -w_1 \frac{d\Phi_{1s}}{dt}。$$

由于漏磁通 Φ_{1s} 大部分是经过空气而闭合的，所以它与电流成正比，且与电流同相。

这样

$$\begin{aligned} e_{1s} &= -w_1 \frac{d\Phi_{1s}}{dt} = \\ &= -\frac{d\psi_{1s}}{dt} = \\ &= -L_{1s} \frac{di_0}{dt}。 \end{aligned}$$

其中 $L_{1s} = \frac{\Psi_{1s}}{i_0}$ 为原绕组的漏电感。

当电流作正弦变化 $i_0 = I_{m0} \sin \omega t$ 时, 则可得:

$$\begin{aligned} e_{1s} &= -I_{m0} \omega L_{1s} \cos \omega t = \\ &= E_{m1s} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned}$$

其有效值

$$E_{1s} = \frac{E_{m1s}}{\sqrt{2}} = I_0 \omega L_{1s} = I_0 X_1, \quad (7-8)$$

其中 $X_1 = \omega L_{1s}$ 为原绕组的漏感抗。用复数符号法表示时:

$$\dot{E}_{1s} = -j \dot{I}_0 X_1. \quad (7-9)$$

根据克希荷夫第二定律, 在原绕组所组成的电路 (原电路) 中可列出电压平衡方程式:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1s} + \dot{I}_0 r_1, \quad (7-10)$$

其中 r_1 为原绕组的电阻。

因此当变压器在空载时, 原绕组端的外加电压 U_1 由三部分电压所平衡:

(1) 克服由主磁通 Φ 所感应的电势 E_1 所需的电压 $-E_1$, 它超前于主磁通 90° ;

(2) 克服由漏磁通 Φ_{1s} 所感应的电势 E_{1s} 所需的电压 $-E_{1s} = -I_0 X_1$, 这部分电压通常称为漏抗电压降, 它超前于电流 90° ;

(3) 在原绕组电阻 r_1 上的电压降 $I_0 r_1$, 它与电流同相。

如将式(7-9)代入式(7-10)中, 则得:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 r_1 = \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (r_1 + j X_1) = \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1, \end{aligned} \quad (7-11)$$

其中 $Z_1 = r_1 + j X_1$ 为原绕组的复数阻抗。

变压器在空载时, 其阻抗电压降 $I_0 Z_1$ 很小, 一般不超过原绕组外

加电压 U_1 的 1%。若将此阻抗电压降忽略不计,则

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44 f w_1 \dot{\Phi}_m \quad (7-12)$$

在空载时,变压器的副绕组是开路的,副绕组内的电流 I_2 等于零,所以它的端电压 U_{20} 等于主磁通所感应的电势 E_2 , 即

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 = -j4.44 f w_2 \dot{\Phi}_m \quad (7-13)$$

这样一来,在空载时原、副绕组电压之比值可认为就等于其电势之比值:

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_0 \quad (7-14)$$

此比值通常标明在变压器的名牌上,例如“121/11 千伏”。因为有些变压器既可作升压变压器又可作降压变压器,所以变比 k 通常指高压绕组电压对低压绕组电压之比。

变压器运行时各物理量间的相互关系,可用矢量图很清楚地表示出来。当画矢量图时,从主磁通的矢量 $\dot{\Phi}_m$ 画起较为简单。将矢量 $\dot{\Phi}_m$ 画在与横轴的正方向一致(图 7-4),空载电流 I_0 的矢量超前于 $\dot{\Phi}_m$ 的矢量 α 角,电势 E_1 和 E_2 的矢量均落后于 $\dot{\Phi}_m$ 的矢量 90° 。为了作出 U_1 的矢量,根据(7-11)可作矢量 $-\dot{E}_1$,它与矢量 $\dot{E}_1$ 相反,再从其矢量端点沿平行于 $\dot{I}_0$ 方向作电阻电压降的矢量 $\dot{I}_0 r_1$,又在矢量 $\dot{I}_0 r_1$ 端点沿超前 $\dot{I}_0 90^\circ$ 的方向作漏抗电压降的矢量 $j\dot{I}_0 X_1$, 矢量 $\dot{I}_0 r_1$ 和 $j\dot{I}_0 X_1$ 的合成矢量为阻抗电压降 $\dot{I}_0 Z_1$ 的矢量。最后从 O 点作与矢量 $\dot{I}_0 Z_1$

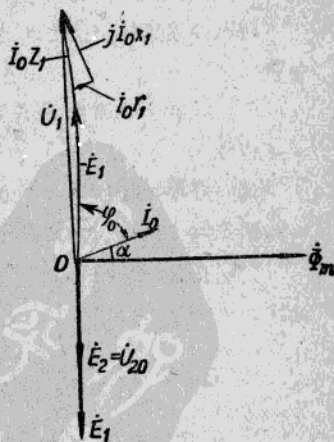


图 7-4. 变压器空载运行时的矢量图。

端点相连的矢量,即得电压 U_1 的矢量。在空载时电压 U_{20} 的矢量即为

电势 E_2 的矢量。

实际上阻抗电压降 $I_0 Z_1$ 仅占电压 U_1 中很小的一部分, 图 7-4 上是夸大了的表示。

从图 7-4 中可见, 由于 α 角很小(约为 $5-6^\circ$), 电压 U_1 的矢量几与 $-E_1$ 的矢量同相, 所以变压器在空载时其功率因数 $\cos \varphi_0$ 甚低, 约在 $0.05-0.12$ 间。

在空载时, 自电源输入原电路的功率

$$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0. \quad (7-15)$$

由于空载时变压器没有功率输出, 所以这部分功率是消耗在由磁滞和涡流所产生的铁损 P_{cm} 和原绕组电阻的铜损 P_M 上

$$P_0 = P_{cm} + P_M = (P_e + P_g) + I_0^2 r_1. \quad (7-16)$$

实际上, 变压器空载时的铜损 $I_0^2 r_1$ 甚小, 通常小于空载时总损耗的 2%, 所以可忽略不计。

这样, 变压器在空载时自电源输入原电路的功率可认为就消耗在铁损上, 即

$$P_0 \approx P_{cm}. \quad (7-17)$$

7-4. 变压器的负载运行

当变压器原绕组端加上额定电压, 副绕组端和负载相连接, 变压器就在负载情况下运行, 如图 7-5 所示。此时在副绕组电势 E_2 的作用

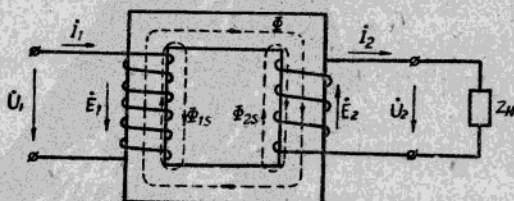


图 7-5. 变压器的负载运行。

下, 副繞組和負載所組成的电路 (称副电路) 內就有电流 I_2 通过, 并在磁路上作用着磁势 $I_2 w_2$ 。当副繞組中有电流 I_2 存在时, 将使原繞組內的电流发生变化, 而变至 I_1 值。因此在負載时, 鉄芯中的主磁通 Φ 乃由原繞組的磁势 $I_1 w_1$ 和副繞組的磁势 $I_2 w_2$ 所共同产生。

由于变压器原繞組的阻抗 Z_1 很小, 因此在原繞組內的阻抗电压降 $I_1 Z_1$ 相对于外加电压 U_1 可忽略不計。

这样

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44 f w_1 \dot{\Phi}_m. \quad (7-18)$$

从式(7-18)可見, 当外加电压 U_1 和其頻率 f 不变时, 則主磁通的幅值 Φ_m 也基本上保持不变。这就是說在負載时的合成磁势和空載时的磁势相等:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1. \quad (7-19)$$

上式即为变压器負載运行时的磁势平衡方程式。

如将式(7-19)中 $\dot{I}_2 w_2$ 項移至等式右边, 且等式两边除以 w_1 , 則得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2 \right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{1}{k} \dot{I}_2 \right). \quad (7-20)$$

如使

$$-\frac{1}{k} \dot{I}_2 = \dot{I}'_1, \quad (7-21)$$

則

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_1. \quad (7-22)$$

式(7-22)說明原电路中电流 I_1 (称原級电流) 由两个分量組成: 其中 I_0 是用来产生主磁通 Φ 的, 称激磁分量; 而 I'_1 是用来抵償副电路中电流 I_2 (称副級电流) 对磁路的影响, 称負載分量。

实际上当外加电压 U_1 和其頻率 f 不变时, 鉄芯內的主磁通也基本上保持不变[見式(7-18)], 故当負載时, 随着副級电流 I_2 的产生, 原电路中必相应增加一分量 I'_1 以抵償副級电流 I_2 对磁路的影响, 使鉄芯中的主磁通基本上保持不变。

如前所述, 空載电流 I_0 仅占額定电流的百分之几, 因此在額定負

載时可忽略不計, 此时

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{1}{k} \dot{I}_2 = \dot{I}'_1, \quad (7-23)$$

从式 (7-23) 可見, I_1 和 I_2 在相位上几乎相差 180° , 在有效值的大小上相差 $\frac{1}{k}$ 倍。

根据克希荷夫第二定律, 变压器在負載运行时, 原电路的电压平衡方程式为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1S} + \dot{I}_1 r_1 = \\ &= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 r_1 = \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jX_1) = \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1. \end{aligned} \quad (7-24)$$

相应地副电路的电压平衡方程式为:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2S} - \dot{I}_2 r_2, \quad (7-25)$$

其中 E_{2S} 为由副繞組的漏磁通 Φ_{2S} 所感应的电势。同样地它也可用一漏抗电压降 $I_2 X_2$ 来表示, 即

$$\dot{E}_{2S} = -j\dot{I}_2 X_2, \quad (7-26)$$

其中 $X_2 = \omega L_{2S}$ 为副繞組的漏感抗, 而 L_{2S} 为其漏电感。这样一来:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_2 - \dot{I}_2 r_2 = \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jX_2) = \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2. \end{aligned} \quad (7-27)$$

其中 $Z_2 = r_2 + jX_2$ 为副繞組的复数阻抗。

如負載阻抗为 $Z_n = r_n + jX_n$, 則

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{I}_2 Z_n. \quad (7-28)$$

由此

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2 + Z_n} \quad (7-29)$$

或

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2 + r_n)^2 + (X_2 + X_n)^2}}, \quad (7-30)$$

和

$$\Psi_2 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_2 + X_n}{r_2 + r_n} \quad (7-31)$$

当作矢量图时,可先从主磁通的矢量 Φ_m 开始,使其与横轴的正方向一致(图 7-6)。电流 I_0 的矢量导前于 Φ_m 的矢量 α 角,电势 E_1 和 E_2 的矢量均落后于 Φ_m 的矢量 90° 。若负载为感性的,则电流 I_2 的矢量落后于 E_2 矢量 ψ_2 角,此角决定于负载阻抗和变压器副绕组阻抗的大小[见式(7-31)]。为了作出副级电压 U_2 的矢量,应从 E_2 的矢量上减去漏抗电压降 $j\dot{I}_2 X_2$ 和副绕组内部电阻电压降 $\dot{I}_2 r_2$ [见式(7-27)]。从 E_2 矢量的端点作矢量 $-j\dot{I}_2 X_2$,它落后于 I_2 的矢量 90° ,再自矢量 $-j\dot{I}_2 X_2$ 的端点作与 I_2 的矢量相差 180°

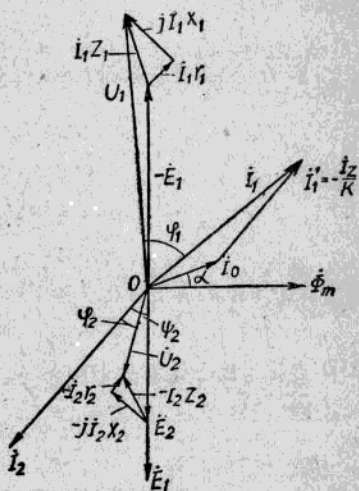


图 7-6. 变压器负载运行时的矢量图。

的矢量 $-\dot{I}_2 r_2$, 矢量 $-j\dot{I}_2 X_2$ 和 $-\dot{I}_2 r_2$ 的合成矢量为矢量 $-\dot{I}_2 Z_2$ 。连接 O 点与矢量 $-\dot{I}_2 Z_2$ 的端点即得 U_2 的矢量,它与矢量 $\dot{I}_2$ 的相位差 φ_2 是负载的功率因数角。原电流 I_1 的矢量为 I_0 的矢量与 $\dot{I}_1' = -\frac{\dot{I}_2}{k}$ 的矢量之和[式(7-22)]。后者与矢量 $\dot{I}_2$ 的方向相反。最后,原级电压 U_1 的矢量可如作变压器空载时的矢量图一样的方法作出。从导前于矢量 Φ_m 90° 的矢量 $-\dot{E}_1$ 端点作原绕组内部电阻电压降 $I_1 r_1$ 的矢量,它与 I_1 的矢量同相;再从 $I_1 r_1$ 的矢量端点作漏抗电压降 $j\dot{I}_1 X_1$ 的矢量,它导前于 I_1 的矢量 90° ,矢量 $\dot{I}_1 r_1$ 和 $j\dot{I}_1 X_1$ 的合成矢量为阻抗电压降 $\dot{I}_1 Z_1$ 的矢量。连接 O 点与矢量 $\dot{I}_1 Z_1$ 的端点即得 U_1 的矢量。它与矢量

I_1 的相位差 φ_1 为变压器原电路的功率因数角。

实际上,由于原、副绕组内部的阻抗电压降 $I_1 Z_1$ 和 $I_2 Z_2$ 很小,所以 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 和 $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$ 。

这样

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_0 \quad (7-32)$$

此外,在额定负载时,激磁电流 I_0 相形甚小,可忽略不计,所以

$$I_1 \approx I'_1 = -\frac{1}{k} I_2,$$

这样

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{k} \quad (7-33)$$

从图 7-6 可见,此时原电路的功率因数 $\cos \varphi_1$ 主要决定于负载的功率因数 $\cos \varphi_2$, 即

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \quad (7-34)$$

变压器在负载运行时,自电源输入原电路的功率

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1; \quad (7-35)$$

副电路输出的功率

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (7-36)$$

如考虑到式(7-32)、(7-33)和(7-34)的关系,则可得

$$P_1 \approx P_2 \quad (7-37)$$

这实际上是反映了能量守恒定律。如忽略变压器在工作时的损耗不计,则原电路输入的功率必等于副电路输出的功率。此时能量以主磁通 Φ 作媒介通过电磁感应的形式,从原电路传递到副电路。

7-5. 变压器的外特性和电压调整率

从变压器负载运行时的矢量图(图 7-6)上可以看出,当外加电压 U_1 不变时,随着副级电流 I_2 的增加,由于在绕组内部阻抗电压降的增加,将使副级电压 U_2 发生变化。