

# 电 工 学

下 册

华南师范学院物理系  
廖玄九 郭木森 屠广霖等合编

## 内 容 提 要

本书共十三章,分上、下两册。下册内容包括变压器、异步电动机、低压控制电器及其应用、直流电机、同步发电机、微型电机、可控硅及其应用。另有八个实验。

本书可作为高等师范院校物理系电工学课程的试用教材。

高等学校试用教材

## 电 工 学

下 册

华南师范学院物理系

廖玄九 郭木森 屠广霖等合编

\*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/32 印张 12.625 字数 305,000

1979年4月第1版 1979年9月第1次印刷

印数 00,001—80,000

书号 15012·0153 定价 1.05 元

# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第七章 变压器              | 1   |
| § 7-1 变压器的用途和分类      | 1   |
| § 7-2 变压器的空载运行       | 4   |
| § 7-3 变压器的负载运行       | 13  |
| § 7-4 变压器的等效电路       | 23  |
| *§ 7-5 变压器的功率损耗和效率   | 25  |
| § 7-6 三相变压器          | 30  |
| § 7-7 其他变压器          | 45  |
| 习题                   | 59  |
| 第八章 异步电动机            | 61  |
| § 8-1 异步电动机的构造       | 61  |
| § 8-2 异步电动机的转动原理     | 64  |
| *§ 8-3 三相异步电动机的定子绕组  | 75  |
| § 8-4 异步电动机的电路分析     | 85  |
| *§ 8-5 异步电动机的功率传递和效率 | 97  |
| § 8-6 异步电动机的转矩       | 98  |
| § 8-7 异步电动机的使用常识     | 108 |
| § 8-8 单相异步电动机        | 119 |
| § 8-9 直线异步电动机简介      | 129 |
| 习题                   | 131 |
| 第九章 低压控制电器及其应用       | 133 |
| § 9-1 常用低压控制电路       | 133 |
| § 9-2 异步电动机的控制与保护电路  | 150 |
| § 9-3 鼠笼式电动机自耦减压起动器  | 160 |
| *§ 9-4 简易步进式顺序控制器    | 164 |
| 习题                   | 177 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第十章 直流电机                  | 179 |
| § 10-1 直流电机的基本原理与构造       | 179 |
| § 10-2 直流电动机              | 185 |
| § 10-3 直流发电机              | 191 |
| 习题                        | 200 |
| 第十一章 同步发电机                | 201 |
| § 11-1 同步发电机的构造和原理        | 201 |
| § 11-2 同步发电机的运行特性和能量的转换过程 | 213 |
| *§ 11-3 同步发电机的励磁装置        | 223 |
| *§ 11-4 同步发电机的并网运行        | 230 |
| *§ 11-5 小型发电机的控制屏         | 241 |
| 习题                        | 246 |
| 第十二章 微型电机简介               | 247 |
| § 12-1 伺服电动机              | 247 |
| § 12-2 测速发电机              | 252 |
| § 12-3 步进电动机              | 255 |
| § 12-4 自整角机               | 259 |
| § 12-5 旋转变压器              | 263 |
| § 12-6 磁滞电动机              | 267 |
| 第十三章 可控硅及其应用              | 272 |
| § 13-1 可控硅简介              | 272 |
| § 13-2 可控硅的特性与主要参数        | 277 |
| § 13-3 单相可控整流电路           | 281 |
| § 13-4 三相桥式半控整流电路         | 288 |
| § 13-5 可控硅元件的选用与保护        | 294 |
| § 13-6 可控硅的触发电路           | 298 |
| *§ 13-7 直流电动机可控硅调速装置      | 314 |
| *§ 13-8 同步发电机可控硅励磁装置      | 318 |
| § 13-9 可控硅开关              | 326 |
| 习题                        | 328 |
| 电工实验指导                    | 329 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 实验七 三相变压器绕组始末端和连接组的判别····· | 329 |
| 实验八 异步电动机的使用·····          | 333 |
| 实验九 低压控制电器的使用·····         | 340 |
| 实验十 直流电机的使用·····           | 344 |
| 实验十一 同步发电机的使用·····         | 351 |
| 实验十二 异步发电机的使用·····         | 355 |
| 实验十三 微电机的认识和使用·····        | 357 |
| 实验十四 可控硅整流电路·····          | 359 |
| 附录四 单相小功率电源变压器的计算·····     | 364 |
| 附录五 异步电动机的常见故障·····        | 370 |
| 附录六 灭弧装置的结构和原理·····        | 376 |
| 附录七 异步发电机·····             | 380 |
| 附录八 磁流体发电·····             | 385 |
| 附录九 配电线路的计算与安全用电·····      | 391 |

# 第七章 变 压 器

## 内 容 提 要

变压器是一种静止的用电器，它具有变换电压、变换电流和变换阻抗的特性，因此在工农业生产中得到广泛的应用。

掌握变压器的基本原理不仅对了解变压器的性能及使用是必须的，而且对理解后面将要讲述的旋转电机也有很大的帮助。因此，本章着重讲述单相变压器的基本原理、空载与负载运行的物理过程、电压平衡方程与磁势平衡方程、相量图、等效电路以及功率损耗等关系，此外还介绍了三相变压器和其他变压器。

### § 7-1 变压器的用途和分类

变压器因为具有变换电压、变换电流和变换阻抗的作用，因此，它的用途是多方面的。例如，在电力工业中，它是输配电系统中的一个主要元件。此外，它还广泛用于各种电器设备，以提供各种不同的电压或电流。按其用途不同，变压器大致可分以下几类：

#### 1. 电力变压器

大发电厂一般都建立在水力资源丰富的地方或靠近燃料产区，用户则分散在远离电厂的各地区，这样从发电到用电就要建立电力输送和分配的线路，输配电线路通常称为电力网。

从大电站到用电中心，一般都在几百公里以上，要把电能从发电站输送到这样远的地方，要解决什么问题呢？

众所周知,当电流流过导线时,就会有一部分电能转换为热能而损耗了。对于三相三线制输电线路所损耗的电功率为

$$\Delta P = 3I^2 R \quad (7-1-1)$$

式中  $R$  为每一条电线的电阻,  $I$  为输电线上的电流,其值为

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \quad (7-1-2)$$

其中  $P$  为输送的电功率,  $U$  为输电线路的线电压,  $\cos \varphi$  为每相负载的功率因数。设输电距离为  $l$ , 输电导线的截面积为  $S$ , 电导率为  $\gamma$ , 则有

$$R = \frac{l}{\gamma S} \quad (7-1-3)$$

将式(7-1-2)和式(7-1-3)代入式(7-1-1)得

$$\Delta P = 3 \left( \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \right)^2 \frac{l}{\gamma S} = C \frac{1}{U^2 S} \quad (7-1-4)$$

式中  $C = \frac{P^2 l}{\gamma \cos^2 \varphi}$ , 在输送功率  $P$ 、输电导线长度  $l$ 、电导率  $\gamma$  以及负载功率因数  $\cos \varphi$  为一定的情况下,  $C$  是一个常数。

从上式看出,当输电线截面积一定时,电压  $U$  愈高则功率损耗  $\Delta P$  愈小;另一方面,如允许的功率损耗为一定时(一般不得超过输送功率的 10%),电压愈高,则输电导线的截面积愈小,即能节约输电导线所用的材料。

但是,输电的电压愈高,输电线路的造价就愈高。因此,不能盲目提高输电电压,而必须根据统筹兼顾的原则,做到既有利于节约投资,又能减少功率损耗。按我国现在情况来看,送电距离在 200 至 300 公里时采用 220 千伏的电压输电;在 100 公里左右时采用 110 千伏;在 50 公里左右时采用 35 千伏;在 15 至 20 公里时采用 10 千伏。

高压输电有利于减少电功率的损耗,但是,从发电方面看,要

发电机产生象 220 千伏那样的高压，不论从结构上还是从安全运行方面都有不少困难。从用电方面看，大量的用电设备（例如电动机、电炉、电灯等）更不能使用高电压，因此，从发电、输电到用电的过程，必须将电压升高或降低，这就需要应用变压器来改变电压。电能从产生、输送到用电的过程如图 7-1-1 所示，其中 1、2、3、4 为



图 7-1-1

输电变压器，5 为配电变压器。从发电厂发出的交流电需要升压到 220 千伏后输送到远处，经中心变电站的输电变压器变为 110 千伏再送到各变电站，变电站再把电压变为 35 千伏送给各变电所，变电所又将电压变为 10 千伏送至各用户的配电变压器，配电变压器再把电压变为 380/220 伏，供给用户的用电设备使用。应当指出，这里所说的只是大型水电站的典型输电方式，从发电到输电，中间经过五次变压（一升、四降），对于中型水电站来说，变压的次数就少一些。输电变压器与配电变压器统称为电力变压器。

### 2. 小功率电源变压器

各种用电设备都要求应用一种或多种电压的交流电源，例如五灯电子管收音机需要 5V, 6.3V,  $2 \times 250V$  三种电压的电源，因此需要利用变压器将 220V 的电压转变为所需要的电压，这种变压器称为电源变压器。

### 3. 调压变压器

在实际应用中，有时需要可以调节的电源电压，这时可以在变压器的原绕组中设置多个抽头或设置一个可以滑动的中心抽头，改变抽头的位置就可以改变原、副绕组的匝数比，在副绕组中就可获得所需的电压，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,不过绕组的一部分是原副绕组的公用绕组,可以通过副绕组的分接点的移动来改变原副绕组的匝数比,以达到调压的目的。

#### 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,因高电压或大电流不能直接用仪表测量,要通过变压器(高电压变低电压)或变流器(大电流变小电流)后才能测量,前者称为电压互感器,后者称为电流互感器。

#### 5. 专用变压器

在工矿中有各种特殊用途的变压器,如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。

按其本身结构不同,变压器又可分为:

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。

其中双绕组变压器(具有两个绕组)应用最广。

此外,若按相数来分,还可分为:

1. 单相变压器(如仪用电源变压器等);
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)。

## §7-2 变压器的空载运行

变压器主要是由电路和磁路两部分组成。最简单的单相变压器是由一个闭合的铁心和绕在铁心上的两个匝数不同、彼此绝缘的绕组构成的(图7-2-1)。与电源相接的绕组称为原绕组(或初

级绕组), 与负载相接的绕组称为副绕组(或次级绕组)。每个绕组都有两个出线端头, 这些端头通常接到变压器的箱盖上并给以一

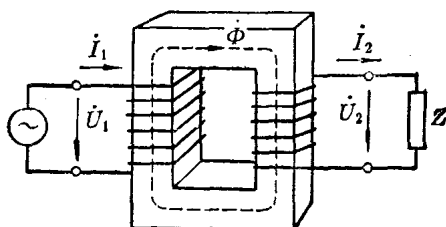


图 7-2-1

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。本书采用第一种规定方法, 如图 7-2-2(a) 所示, 图中两个始端  $A$  和  $a$  是同极性的。

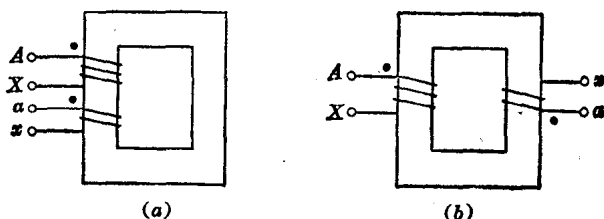


图 7-2-2

如果把副绕组沿着铁心移到另一铁心柱上, 则变为图 7-2-2(b) 所示的情形。如果原、副绕组的绕向不同, 则始、末端如图 7-2-3 所示。

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

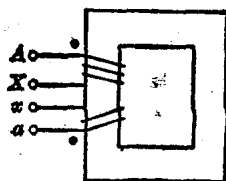


图 7-2-3

即有交变电流  $i_0$  (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, 这部分磁通与原、副绕组相链, 称为主磁通, 用  $\phi_0$  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  $F_0$  除了产生主磁通  $\phi_0$  以外, 还产生一小部分经空气成闭合回路、仅与原绕组相链而不通过副绕组的磁通, 称为漏磁通, 以  $\phi_{l1}$  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。下面我们要讨论原、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。

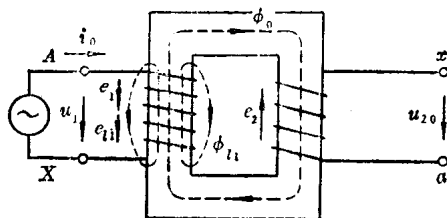


图 7-2-4

因为原绕组对电源来说相当于负载, 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7-2-4), 主磁通  $\phi_0$  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  $\phi_0$  的正方向用右手螺旋关系确定, 根据图示的绕向,  $e_2$  的正方向应从始端  $a$  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。

## 一、原、副绕组的电压平衡关系

### 1. 主磁感应电动势

设原边接上正弦交流电压  $u_1$ ,  $u_1$  在铁心中产生正弦变化的主磁通

$$\phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t \quad (7-2-1)$$

主磁通在原绕组产生主磁感应电动势

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi_0}{dt} = -\omega N_1 \Phi_{0m} \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_{0m} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ &= E_{1m} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (7-2-2)$$

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

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_{0m} \quad (7-2-3)$$

写成相量关系式即为

$$\dot{E}_1 = -j\omega N_1 \dot{\Phi}_0 \quad (7-2-4)$$

同理, 主磁通  $\phi_0$  在副绕组亦产生主磁感应电动势

$$\begin{aligned} e_2 &= -N_2 \frac{d\phi_0}{dt} = -\omega N_2 \Phi_{0m} \cos \omega t = E_{2m} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ &= E_{2m} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (7-2-5)$$

式中  $E_{2m} = \omega N_2 \Phi_{0m}$  为  $e_2$  的幅值, 其有效值为

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_{0m} \quad (7-2-6)$$

写成相量关系式即为

$$\dot{E}_2 = -j\omega N_2 \dot{\Phi}_0 \quad (7-2-7)$$

由式(7-2-3)及式(7-2-6)可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (7-2-8)$$

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

因为漏磁通通过空气而闭合, 空气的导磁率为一常数, 故磁链  $\Psi_{l1} = N_1 \phi_{l1}$  应与  $i_0$  成正比, 即

$$\Psi_{l1} = N_1 \phi_{l1} = L_{l1} i_0 \quad (7-2-9)$$

式中比例常数  $L_{l1} = \frac{\Psi_{l1}}{i_0}$  称为原绕组的漏电感。仿照第一章 § 1-3 中

对纯电感电路中的讨论可得漏磁感应电动势为

$$\dot{E}_{l1} = -j\dot{I}_0 \omega L_{l1} = -j\dot{I}_0 X_{l1} \quad (7-2-10)$$

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

$$\dot{U}_{l1} = -\dot{E}_{l1} = j\dot{I}_0 X_{l1} \quad (7-2-11)$$

上面两式表明,  $\dot{E}_{l1}$  落后于  $\dot{I}_0 90^\circ$ , 而  $\dot{U}_{l1}$  则超前于  $\dot{I}_0 90^\circ$  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, 故漏磁电动势可用漏电抗表示(见式 7-2-10); 而主磁通因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, 故主磁感应电动势只能表示为式(7-2-4)的形式。二是由于主磁通和漏磁通在电路中所起的作用也不同, 漏磁通只与原绕组相链, 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(见式 7-2-11), 与副绕组无关; 而主磁通与原、副绕组均相链, 其值由初、次级电流共同决定, 它产生主磁感应电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$ , 起传递功率的桥梁作用。

### 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

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 R_1 - \dot{E}_1 - \dot{E}_{l1}$$

把式(7-2-10)代入上式得

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{l1} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_{l1}) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \end{aligned} \quad (7-2-12)$$

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 ( $I_0$  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点几), 可以忽略不计, 故仍可近

似地认为

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (7-2-13)$$

只考虑数量关系时,有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_{0m} \quad (7-2-14)$$

上式说明: 当频率  $f$ 、匝数  $N_1$  一定时,  $\Phi_{0m}$  与  $U_1$  (或  $E_1$ ) 成正比, 上式是电工计算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

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (7-2-15)$$

上式为空载时副绕组的电压平衡方程。只考虑数值, 有

$$U_{20} = E_2 = 4.44fN_2\Phi_{0m} \quad (7-2-16)$$

因此对于空载的变压器有

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (7-2-17)$$

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。

## 二、空载运行时变压器的相量图

为了把变压器原、副绕组端电压  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_{20}$ 、主磁感应电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$ 、空载电流  $\dot{I}_0$  及主磁通  $\dot{\Phi}_0$  等各个量之间的关系直观地表示出来, 可以作出空载运行时变压器的相量图, 作相量图时先要选取一个参考相量, 因为变压器的原、副绕组之间是通过主磁通  $\dot{\Phi}_0$  相互联系起来的, 其余各量与  $\dot{\Phi}_0$  的关系都比较密切, 所以宜选  $\dot{\Phi}_0$  作为参考。只要找出  $\dot{\Phi}_0$  与其他各量的关系, 即可作出相量图。

### 1. $\phi_0$ 与空载电流 $i_0$ 的关系

如果忽略铁心磁饱和及磁滞与涡流的影响,则可认为  $\phi_0$  与  $i_0$  成正比(图 7-2-5a)。若主磁通  $\phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t$  为一正弦波,则  $i_0$  也是正弦波(图 7-2-5b)。但若考虑磁饱和及磁滞与涡流的影响,则  $\phi_0$  与  $i_0$  不存在简单的正比例关系。

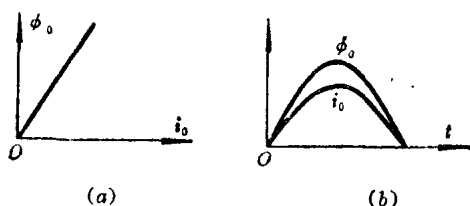


图 7-2-5

首先考虑磁饱和的影响。这时  $\phi_0$  与  $i_0$  的关系由铁心的磁化曲线决定(图 7-2-6a), 这时即使主磁通  $\phi_0$  仍为正弦波, 但电流  $i_0$  不再是正弦波了。这一结论可通过作图法求得。先作正弦磁通  $\phi_0$  的曲线(图 7-2-6b), 并在磁通曲线上选磁通为某一数值的一点(如图 b 中的点 1), 过该点作平行于横轴的直线交磁化曲线于点

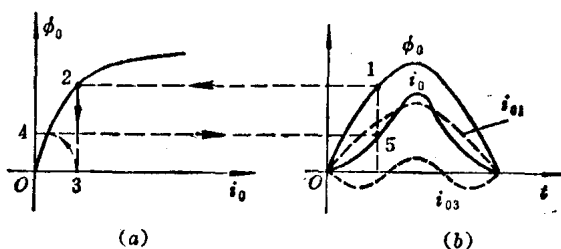


图 7-2-6

2, 从磁化曲线可以求出对应于该磁通值的电流值(即从点 2 作垂线交横轴线于点 3) 再把该电流值转画到图(b)上(把点 3 的电流值转画到纵轴上, 得点 4, 然后过点 4 作平行于横轴的直线, 与过点 1 的垂线相交, 得点 5, 即为同一时刻对应于该磁通值的电流值), 其余各点可类似作出。由图(b)可见, 当磁通  $\phi_0$  为一正弦波时, 由于磁饱和的影响, 电流  $i_0$  的波形变为对称的尖顶波。

在第四章曾经指出, 非正弦周期电流可用等效正弦电流来代替(否则不能用相量表示)。由表 4-1 可知, 对称尖顶波电流  $i_0$  可分解为基波  $i_{01}$ 、三次谐波  $i_{03}$  等分量(图 7-2-6b)。其等效正弦电流(用  $\dot{I}_0$  表示)的频率与基波  $i_{01}$  相同, 亦即与  $\phi_0$  同频率, 且与  $\phi_0$  同相(参看本书上册 § 4-6 例 2)。

其次再考虑磁滞的影响。这时磁通  $\phi_0$  与励磁电流  $i_0$  的关系应由磁滞回线(图 7-2-7a)来决定。只要重复上述的作图法, 可以求得电流的波形如图 7-2-7(b)所示。由图可见, 由于磁滞的影响,

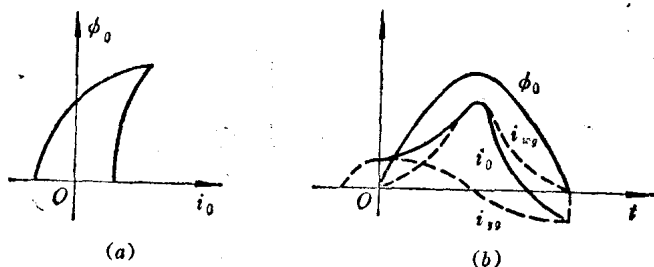


图 7-2-7

响, 励磁电流  $i_0$  变为倾斜的尖顶波。它可看作是由两个分量组成: 一个是无功分量  $i_{w0}$ , 是对称的尖顶波, 其等效正弦电流用相量  $\dot{I}_{w0}$  表示, 该分量是使磁路磁化的磁化电流, 其相位仍与  $\phi_0$  相同; 另一个是有功分量  $i_{r0}$ ,  $i_{r0}$  可近似看作正弦波, 用相量  $\dot{I}_{r0}$  表示, 其相位超前于  $\phi_0 90^\circ$ 。因为电路中有磁滞功率损耗, 所以励磁电流中出现了有功分量, 而有功分量的出现, 正是造成电流  $i_0$  波形变倾斜的原因。

如果再考虑涡流的影响, 则铁心中还出现涡流损耗, 因而进一步增大励磁电流的有功分量, 使  $i_0(t)$  的波形进一步倾斜, 因为有功分量代表铁心所消耗的功率(包括磁滞和涡流的损耗, 合称铁损), 所以又称铁损分量。

## 2. 空载运行时变压器相量图的作法

(1) 在水平方向作参考相量  $\dot{\Phi}_0$  (图 7-2-8);

(2) 作  $\dot{I}_0$ : 根据上述, 励磁电流(用等效正弦电流  $\dot{I}_0$  代替)由无功分量  $\dot{I}_{w_0}$  (与  $\dot{\Phi}_0$  同相) 及有功分量  $\dot{I}_{r_0}$  (超前于  $\dot{\Phi}_0 90^\circ$ ) 合成, 因此可作  $\dot{I}_0$  超前于  $\dot{\Phi}_0$  一个  $\delta$  角。 $\delta$  称为铁损角;

(3) 根据式(7-2-4)、(7-2-7)可作出  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  均落后于  $\dot{\Phi}_0 90^\circ$  相角, 二者同相;

(4) 根据式(7-2-12)、(7-2-15)可作  $\dot{U}_1$  及  $\dot{U}_{20}$ 。 $\dot{U}_1$  的作法如下: 先作  $-\dot{E}_1$ , 从  $-\dot{E}_1$  末端沿平行于  $\dot{I}_0$  的方向作  $\dot{I}_0 R_1$ , 从  $\dot{I}_0 R_1$  的末端沿垂直于  $\dot{I}_0$  的方向作相量  $j\dot{I}_0 X_{11}$ , 从原点出发作一相量至相量  $j\dot{I}_0 X_{11}$  的末端, 即为相量  $\dot{U}_1$ 。注意, 作图时为了清楚起见, 采用夸大的画法。事实上  $\dot{U}_1$  很接近  $-\dot{E}_1$ 。由图可见,  $\dot{U}_1$  与  $\dot{U}_{20}$  几乎是反相的。

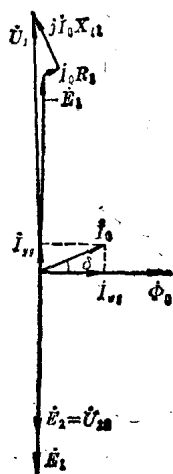


图 7-2-8

## 小 结

1. 单相变压器的基本结构包括原、副绕组和铁心。两个绕组的同极性端规定为始端, 另外两个端头即为末端。原绕组中各量的正方向采用“电动机惯例”确定之, 副绕组则采用“发电机惯例”来确定。

2. 变压器在空载运行时的主要电磁关系如下:

