

高等学校教材

# 电 工 学

中 册

秦 曾 煌 編

高 等 教 育 出 版 社

# 电 工 学

中 册

秦 曾 煌 編

高 等 教 育 出 版 社

本书系按照 1962 年 5 月高等工业学校教学工作會議審訂的  
高等工业学校本科五年制机械制造类专业适用的《电工学教学  
大綱(試行草案)》編写的。全书分三册出版。上册包括电路、磁路  
及电工測量部分;中册包括电机、控制及供电部分;下册包括工业  
电子技术与非电量的电测法部分。每册均附有习题。

本书由西安交通大学袁旦庆同志审閱,并經高等工业学校电  
工課程教材編审委员会电工学及电工基础教材編审小組复审通过。

本书可作为高等工业学校本科五年制机械制造类专业电  
学課程的試用教科书,也可供有关工程技术人员参考。

## 电 工 学

中 册

---

秦 曾 焯 編

北京市书刊出版业營業許可証出字第 119 号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

---

统一书号 K15010·1173 开本 850×1108  $\frac{1}{32}$  印张 5  $\frac{1}{2}$

字数 139,000 印数 0,001—12,000 定价(7) 0.70

1965 年 6 月第 1 版 1965 年 6 月北京第 1 次印刷

# 中册目录

## 第二部分 电机、控制及供电

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第八章 变压器</b> .....      | 1  |
| 8-1. 变压器的功用.....          | 1  |
| 8-2. 变压器的构造.....          | 2  |
| 8-3. 变压器的作用原理.....        | 4  |
| 8-4. 变压器中的磁通势平衡.....      | 7  |
| 8-5. 变压器的外特性和电压变动率.....   | 9  |
| 8-6. 三相变压器.....           | 9  |
| 8-7. 变压器的功率与效率.....       | 11 |
| 8-8. 自耦变压器.....           | 13 |
| 8-9. 互感器.....             | 14 |
| 8-10. 电焊变压器.....          | 17 |
| <b>第九章 异步电动机</b> .....    | 19 |
| 9-1. 电动机概述.....           | 19 |
| 9-2. 三相异步电动机的构造.....      | 20 |
| 9-3. 旋轉磁場.....            | 23 |
| 9-4. 三相异步电动机的作用原理.....    | 27 |
| 9-5. 定子电路.....            | 28 |
| 9-6. 轉子电路.....            | 30 |
| 9-7. 三相异步电动机中的磁通势平衡.....  | 33 |
| 9-8. 三相异步电动机的功率与效率.....   | 35 |
| 9-9. 三相异步电动机的轉矩与机械特性..... | 36 |
| 9-10. 三相异步电动机的起动.....     | 45 |
| 9-11. 双鼠籠式异步电动机.....      | 51 |
| 9-12. 三相异步电动机的逆轉.....     | 52 |
| 9-13. 三相异步电动机的調速.....     | 52 |
| 9-14. 三相异步电动机的制动.....     | 55 |
| 9-15. 三相异步电动机功率因数的提高..... | 57 |
| 9-16. 单相异步电动机.....        | 58 |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 9-17. 两相异步电动机           | 61         |
| 9-18. 三相异步电动机的铭牌数据      | 62         |
| 9-19. 我国三相异步电动机的主要系列    | 64         |
| <b>第十章 同步电机</b>         | <b>65</b>  |
| 10-1. 同步电机的构造           | 65         |
| 10-2. 同步发电机             | 67         |
| 10-3. 同步电动机             | 71         |
| 10-4. 励磁电流对同步电动机运行情况的影响 | 74         |
| <b>第十一章 直流电机</b>        | <b>76</b>  |
| 11-1. 直流电机的用途           | 76         |
| 11-2. 直流电机的构造与基本作用原理    | 76         |
| 11-3. 直流电机的电枢绕组         | 79         |
| 11-4. 直流电机的电动势          | 82         |
| 11-5. 直流电机的电磁转矩         | 83         |
| 11-6. 电枢反应              | 85         |
| 11-7. 电流的换向             | 86         |
| 11-8. 直流发电机按励磁方法的分类     | 88         |
| 11-9. 他励发电机             | 89         |
| 11-10. 并励发电机            | 92         |
| 11-11. 复励发电机            | 95         |
| 11-12. 直流电动机按励磁方法的分类    | 96         |
| 11-13. 并励电动机的机械特性       | 96         |
| 11-14. 并励电动机的起动与逆转      | 100        |
| 11-15. 并励电动机的调速         | 101        |
| 11-16. 直流发电机-电动机组       | 105        |
| 11-17. 交磁电机放大机          | 107        |
| 11-18. 串励电动机            | 109        |
| 11-19. 复励电动机            | 113        |
| <b>第十二章 电动机的选择</b>      | <b>114</b> |
| 12-1. 电力拖动概述            | 114        |
| 12-2. 电动机的发热与冷却         | 115        |
| 12-3. 电动机容量的选择          | 118        |
| 12-4. 电动机种类与型式的选择       | 127        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第十三章 低压控制电器与基本控制线路</b> ..... | 131 |
| 13-1. 概述.....                   | 131 |
| 13-2. 非自动电器.....                | 132 |
| 13-3. 自动电器.....                 | 135 |
| 13-4. 继电器接触器自动控制的基本线路.....      | 140 |
| <b>第十四章 工业企业供电与安全用电</b> .....   | 149 |
| 14-1. 发电、输电概述.....              | 149 |
| 14-2. 工业企业配电.....               | 151 |
| 14-3. 导线种类及其敷设.....             | 153 |
| 14-4. 根据发热选择导线截面和相应的熔断丝.....    | 154 |
| 14-5. 根据容许电压损失选择导线截面.....       | 157 |
| 14-6. 安全用电.....                 | 161 |
| 14-7. 节约用电的意义和措施.....           | 164 |
| <b>附录</b> .....                 | 168 |
| 附录一 电工绝缘材料按耐热性能的分级.....         | 168 |
| 附录二 三相异步电动机的技术数据.....           | 169 |
| <b>习题</b> .....                 | 171 |
| 第八章.....                        | 171 |
| 第九章.....                        | 172 |
| 第十一章.....                       | 174 |
| 第十二章.....                       | 175 |
| 第十三章.....                       | 177 |
| 第十四章.....                       | 177 |

## 第二部分 电机、控制及供电

### 第八章 变压器

#### 8-1. 变压器的功用

变压器是一种常见的电气设备，它的功用是根据生产上的需要将交变电压升高或降低，而不改变其频率。

在输电方面以用高压较为经济，其理由如下：我们知道，当输送功率  $P=UI \cos \varphi$  及负载的功率因数  $\cos \varphi$  为一定时，电压  $U$  愈高，则输电綫上的电流  $I$  愈小；而綫路的功率损失为

$$\Delta P_l = I^2 R_l = \left( \frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 \frac{l}{\gamma S} = K \frac{1}{U^2 S}. \quad (8-1)$$

可见，当输电距离  $l$ 、输电綫所用材料（电导率为  $\gamma$ ）及输电綫的截面积  $S$  为一定时，电压愈高，则綫路损失愈小；当容許的綫路损失为一定时，电压愈高，则输电綫的截面积愈小。因此，高压输电可以达到输电经济的目的。我国国家标准所规定的输电綫的额定电压有 35、60、110、154、220 及 330 千伏等几种，而通常发电机的端电压，因受到绝缘和制造技术上的限制，一般不高于 15.75 千伏，因此，要得到这样高的电压必须在发电的一端利用变压器将电压升高。

在用电方面则都是用低压的。这一方面是为了安全，另一方面是为了使受电设备的绝缘问题容易解决。所以，在用电的一端，还要利用变压器将输电电压降低。我国现行受电设备的额定电压如下：

电 灯：单相 220 伏。

电 热：单相 220 伏；三相 380 伏。

电动机：单相 220 伏；三相 380 伏、3000 伏、6000 伏。

最简单的电能输送系统如图 8-1 所示。

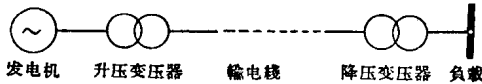


图 8-1. 最简单的电能输送系统。

此外，由于只有几种标准的电源电压，而实际应用上需要多种多样的电压，例如，供机床照明用的电压为 36 伏，电子管灯丝电压为 6.3 伏和 5 伏。采用变压器就能灵活地解决这个问题。

在输电系统中所使用的变压器称为电力变压器。此外，尚有自耦变压器、互感器及各种专用变压器（用于电焊、电炉及整流等）。变压器的种类很多，应用范围极广，但是它们的基本构造、作用原理以及分析它们的方法是相同的。

## 8-2. 变压器的构造

变压器由闭合铁心和高压、低压绕组等几个主要部分构成。按绕组与铁心配置的情况，变压器可分为心式和壳式两种。图 8-2 所示的是单相和三相心式变压器，图 8-3 所示的是单相壳式变压器。

心式变压器的用铁量比较少，构造比较简单，绕组的安装和绝缘也比较容易，因此变压器多半制成心式。壳式变压器的用铜量比较少，散热比较容易，常用作小型变压器和低压大电流的变压器（如电焊变压器、电炉变压器等）。

为了减少铁损，铁心通常用厚度为 0.35—0.5 毫米的硅钢片叠成，片与片之间互相绝缘。

变压器的绕组通常有筒形（图 8-2）和盘形（图 8-3）两种。采



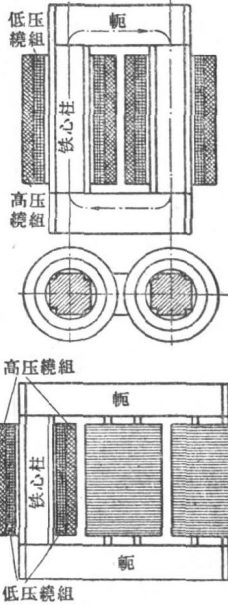


图 8-2. 单相和三相心式变压器。

用筒形绕组时, 低压绕组在内(其电压较低, 容易与铁心绝缘), 高压绕组在外。采用盘形绕组时, 则高压绕组与低压绕组交替放置。

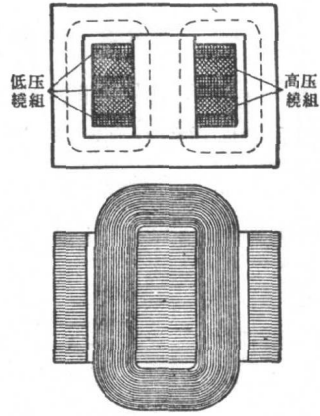


图 8-3. 单相壳式变压器。

由于变压器在工作时要产生铜损和铁损(见 6-5 节), 故绕组和铁心都要发热。因此, 必须考虑变压器的冷却问题。变压器的

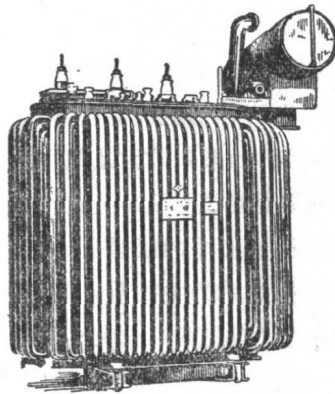


图 8-4. 具有散热油管的变压器。

冷却方式通常有空气自冷式和油冷式两种。小型变压器常借空气的对流作用以自冷。功率较大的则浸在变压器油中，利用油的对流作用以散热，油箱外壁装有散热片或油管(图8-4)。大型变压器中还采用吹风或强迫油循环等冷却方式。

### 8-3. 变压器的作用原理

图8-5所示的是变压器的原理图。为了便于分析，我们将高压绕组和低压绕组分别画在两边。与电源相联的称为原绕组，与负载相联的称为副绕组。降压变压器的原绕组是高压绕组，副绕组是低压绕组。升压变压器则相反。原、副绕组的匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。

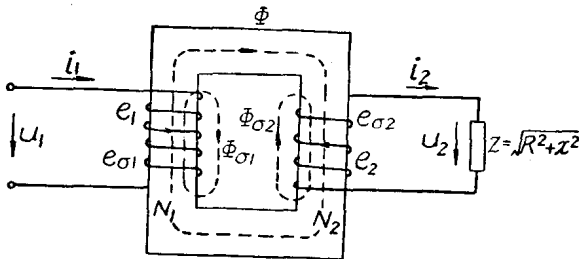
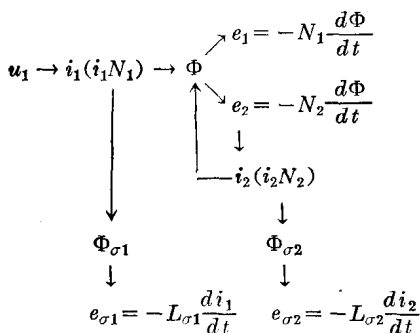


图8-5. 变压器的原理图。

当原绕组接上交流电压  $u_1$  时，原绕组中便有电流  $i_1$  通过。原绕组的磁通势  $i_1 N_1$  产生的磁通绝大部分通过铁心而闭合，从而在副绕组中感应出电动势。如果副绕组是闭合的，那么副绕组中就有电流  $i_2$  通过。副绕组的磁通势  $i_2 N_2$  也产生磁通，其绝大部分也通过铁心而闭合。因此，铁心中的磁通是一个由原、副绕组的磁通势共同产生的合成磁通，它称为主磁通或工作磁通，用  $\Phi$  表示。主磁通穿过原绕组和副绕组而在其中感应出的电动势分别为  $e_1$  和  $e_2$ 。此外，原、副绕组的磁通势还分别产生漏磁通  $\Phi_{\sigma 1}$  和  $\Phi_{\sigma 2}$  (仅与本绕组相链)，从而在各自的绕组中分别产生漏磁电动势  $e_{\sigma 1}$  和  $e_{\sigma 2}$ 。

上述的电磁关系可表示如下:



根据基尔霍夫第二定律, 对原绕组电路可列出与式(6-14)相同的电压方程, 即

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_1 R_1$$

或

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + (-e_{\sigma 1}) + (-e_1) \\ &= i_1 R_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + (-e_1). \end{aligned} \quad (8-2)$$

通常原绕组上所加的是正弦电压  $u_1$ 。在正弦电压作用的情况下, 上式可用复数表示, 即

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 R_1 + (-\dot{E}_{\sigma 1}) + (-\dot{E}_1) \\ &= \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 x_1 + (-\dot{E}_1) \\ &= \dot{I}_1 Z_1 + (-\dot{E}_1). \end{aligned} \quad (8-3)$$

式中  $R_1$  和  $x_1 = \omega L_{\sigma 1}$  分别为原绕组的电阻和感抗(漏磁感抗, 由漏磁通产生);  $\dot{I}_1 Z_1$  为原绕组阻抗上的电压降。

由于原绕组的电阻  $R_1$  和感抗  $x_1$ (或漏磁通  $\Phi_{\sigma 1}$ ) 较小, 故电压降  $\dot{I}_1 Z_1$  与主磁通电动势  $\dot{E}_1$  比较起来常可忽略, 于是

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

当电源电压  $u_1$  按正弦规律变化时, 主磁通  $\Phi$  也将按正弦规律变化。根据式(6-18), 感应电动势  $e_1$  的有效值为

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \approx U_1 \quad (8-4)$$

同理, 对副绕组电路可列出

$$e_2 + e_{\sigma 2} = i_2 R_2 + u_2$$

或

$$\begin{aligned} e_2 &= i_2 R_2 + (-e_{\sigma 2}) + u_2 \\ &= i_2 R_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + u_2. \end{aligned} \quad (8-5)$$

如用复数表示, 则为

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 R_2 + (-\dot{E}_{\sigma 2}) + \dot{U}_2 \\ &= \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 x_2 + \dot{U}_2 \\ &= \dot{I}_2 Z_2 + \dot{U}_2. \end{aligned} \quad (8-6)$$

也可写成

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (x_2 + x)^2}} \quad (8-7)$$

及

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R^2 + x^2}} \quad (8-8)$$

式中  $R_2, x_2 = \omega L_{\sigma 2}$  和  $R, x$  分别为副绕组和负载的电阻与感抗;  $U_2$  是副绕组的端电压。

感应电动势  $e_2$  的有效值为

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m. \quad (8-9)$$

在变压器空载时,

$$I_2 = 0, \quad E_2 = U_{20},$$

式中  $U_{20}$  是空载时副绕组的端电压。

电动势  $e_1$  和  $e_2$  虽然同时由主磁通产生, 但是它们的性质不同。  $e_1$  对电源讲是一个反电动势, 因此电源电压  $u_1$  中有一个分量  $(-e_1)$  是用来平衡它的; 而  $e_2$  对负载讲是一个电源电动势, 由它产生电流  $i_2$ 。在式(8-2)及(8-5)中,  $u_1$  和  $e_2$  是相对应的, 它们都分

成三个分量以体现出它们的作用。

从(8-4)和(8-9)两式可见, 由于原、副绕组的匝数  $N_1$  和  $N_2$  不相等, 故  $E_1$  和  $E_2$  的大小是不等的, 因而输入电压  $U_1$  (电源电压) 和输出电压  $U_2$  (负载电压) 的大小也是不等的。因此, 只要改变两绕组的匝数比, 就可以得到任意大小的输出电压。

原、副绕组的电压之比可由式(8-4)和(8-9)得出, 即

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k, \quad (8-10)$$

式中  $k$  称为变压器的变比, 也就是原、副绕组的匝数比。

变比在变压器的铭牌上注明, 它表示原、副绕组的额定电压之比, 例如“6000/400伏” ( $k=15$ )。这表示原绕组的额定电压  $U_{1e}=6000$  伏, 副绕组的额定电压  $U_{2e}=400$  伏。所谓副绕组的额定电压是指原绕组加上额定电压时副绕组的空载电压。

例 8-1. 有一 6000/230 伏的降压变压器, 其铁心截面积  $S=150$  厘米<sup>2</sup>, 磁感应强度的最大值  $B_m=12000$  高斯, 电源频率  $f=50$  周/秒。试求原、副绕组的匝数。

解: 根据已知数据可求出主磁通的最大值

$$\Phi_m = SB_m = 150 \times 12000 = 0.018 \times 10^8 \text{ 麦} = 0.018 \text{ 韦。}$$

由式(8-4)可求出原绕组的匝数

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44f\Phi_m} = \frac{6000}{4.44 \times 50 \times 0.018} = 1500.$$

副绕组的匝数则为

$$N_2 = N_1 \times \frac{U_{20}}{U_1} = 1500 \times \frac{230}{6000} = 58.$$

#### 8-4. 变压器中的磁通势平衡

上节中曾经讲过, 变压器有负载时的主磁通是由原、副绕组的磁通势 ( $i_1 N_1 + i_2 N_2$ ) 共同产生的。而在空载时, 主磁通仅是由原绕组的磁通势  $i_0 N_1$  产生的。 $i_0$  是空载时原绕组的电流, 称为空载

电流。

但是, 不論变压器是空載或是有負載, 原繞組阻抗上的电压降总是可以忽略的, 即

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m.$$

可見, 当电源电压  $U_1$  及其頻率  $f$  不变时,  $E_1$  和  $\Phi_m$  也都近于常数。就是說, 铁心中的交变磁通(主磁通)的最大值在变压器空載和有負載时是差不多不变的。因此, 有負載时产生主磁通的原、副繞組的合成磁通势也应该和空載时产生主磁通的原繞組的磁通势差不多相等, 即

$$i_1N_1 + i_2N_2 = i_0N_1. \quad (8-11)$$

如用复数表示, 則为

$$\dot{I}_1N_1 + \dot{I}_2N_2 = \dot{I}_0N_1. \quad (8-12)$$

变压器的空載电流起励磁作用。由于铁心的磁导率高, 这个电流是很小的。它的有效值  $I_0$  在原繞組額定电流  $I_{1e}$  的 10% 以內。因此, 原繞組空載时的磁通势  $I_0N_1$  与有負載时的磁通势  $I_1N_1$  相比, 常可忽略。于是式(8-12)可写成

$$\dot{I}_1N_1 \approx -\dot{I}_2N_2, \quad (8-13)$$

即有負載时原、副繞組的磁通势在相位上差不多相反。就是說, 副繞組的磁通势对原繞組的磁通势有去磁作用。

由式(8-13)也可得出原、副繞組的电流关系, 即

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}. \quad (8-14)$$

上式表明变压器原、副繞組的电流之比近似等于它們的匝数比的倒数。可見, 变压器中电流虽然由負載的大小确定, 但是原、副繞組中电流的比值差不多不变; 因为当負載增大时, 副繞組的电流  $I_2$  和磁通势  $I_2N_2$  随着增大, 而原繞組的电流  $I_1$  和磁通势  $I_1N_1$  也必須相应增大, 以抵偿副繞組的电流和磁通势对原繞組的去磁

作用,从而維持主磁通近于不变。

### 8-5. 变压器的外特性和电压变动率

从式(8-3)和式(8-6)可以看出,当电源电压  $U_1$  不变时,随着副绕组电流  $I_2$  的增加(负载增加),原、副绕组阻抗上的电压降便增加,这将使副绕组的端电压  $U_2$  发生变动<sup>①</sup>。当电源电压  $U_1$  和负载功率因数  $\cos \varphi_2$  为常数时,  $U_2$  和  $I_2$  的变化关系可用所谓外特性曲线  $U_2 = f(I_2)$  来表示,见图 8-6。

对于电阻性和电感性负载而言,电压  $U_2$  随电流  $I_2$  的增加而下降。它的下降程度随负载的功率因数而异,功率因数愈低,下降愈甚。

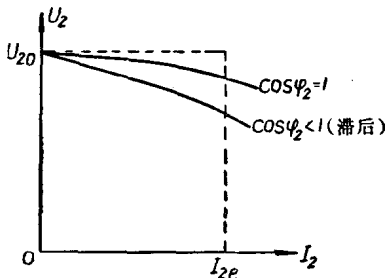


图 8-6. 变压器的外特性曲线。

通常希望电压  $U_2$  的变动愈小愈好<sup>②</sup>。从空载到额定负载,副绕组电压的变动程度用电压变动率  $\Delta u$  表示,即

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (8-15)$$

在一般电力变压器中,由于其电阻和漏磁感抗均甚小,电压变动率是不大的,约为 5% 左右。

### 8-6. 三相变压器

要变换三相电压可以用三只同样的单相变压器,把它们的高压绕组和低压绕组分别联成星形或三角形。在图 8-7 中是 Y/ $\Delta$

① 负载发生变动时,主磁通  $\Phi_m$  和由它所产生的电动势  $E_1$  及  $E_2$  只是基本上不变,实际上也是有点变动的。

② 但如系电焊变压器,则应有迅速下降的外特性,见 8-10 节。

联接。各相高压绕组的始端和末端分别用  $A, B, C$  和  $X, Y, Z$  表示, 低压绕组则用  $a, b, c$  和  $x, y, z$  表示。

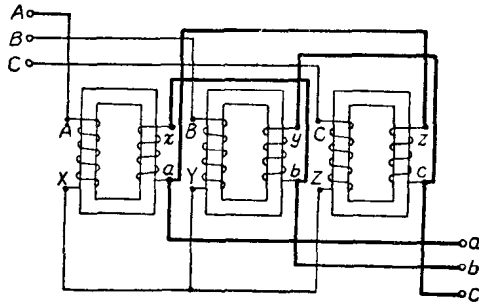


图 8-7. 单相变压器的三相联接。

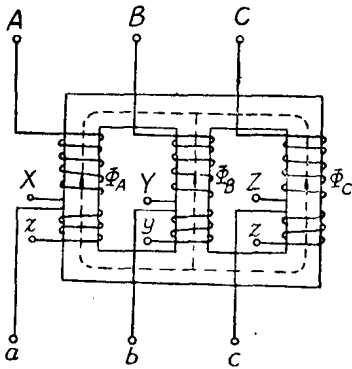


图 8-8. 三相变压器。

大容量的电力变压器通常由三只相同的单相变压器联成, 而在中、小容量的情况下, 变换三相电压通常用三相变压器, 其结构如图 8-8 所示。每相的高、低压绕组分别放置在三个铁心柱上。每相的作用原理完全和前述的单相变压器一样。

三相变压器绕组通常的联接方式如图 8-9a 和 b 所示。Y/Y<sub>0</sub> 联接常用于具有电力和照明的混合负载的情况。高压绕组的线电压在 35 千伏以下; 低压绕组带有中线, 以便得到两种电压。电动机用线电压(例如 380 伏), 而电灯则用相电压(例如 220 伏)。在 Y/ $\Delta$  联接的情况下, 高压绕组联成星形, 低压绕组联成三角形; 这种联接方式既用来升压, 也可用来降压。

变压器的高压绕组通常都联接成星形; 因为这时每相绕组上



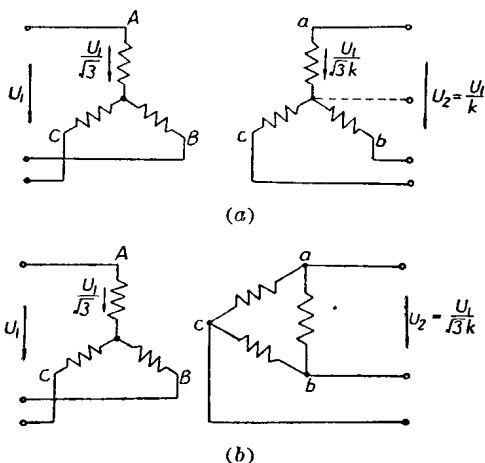


图 8-9. 三相变压器的联接法举例:

(a) Y/Y<sub>0</sub> 联接; (b) Y/Δ 联接。

的电压只是线电压的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ , 铁心截面(用铁量)可以减小, 并可降低对绝缘的要求。变压器的低压绕组在很多场合下联接成三角形; 因为这时每相绕组中的电流只是线电流的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ , 导线截面(用铜量)可以减小。

### 8-7. 变压器的功率与效率

变压器的尺寸主要决定于它的额定电流  $I_e$  和额定电压  $U_e$ , 因为前者决定了导线的截面和绕组的尺寸, 后者与铁心中的磁通近于成正比(见式 8-4), 因而决定了铁心的尺寸。因此, 变压器的额定容量(标在铭牌上)是以额定视在功率  $S_e$  来表示的。单相和三相变压器的额定容量分别为

$$S_e = U_{2e} I_{2e} \approx U_{1e} I_{1e}; \quad (8-16)$$

$$S_e = \sqrt{3} U_{2e} I_{2e} \approx \sqrt{3} U_{1e} I_{1e}. \quad (8-17)$$

三相变压器铭牌上所标的电压、电流值都是指线电压和线电流的