

## 模块二

## 交流电路

目前,汽车中的发电机几乎都采用三相同步交流发电机,再通过整流将交流电变为直流电供用电设备使用。

要掌握汽车电路的维修及检测方法,必须学习和掌握交流电路的有关知识。本模块主要学习交流电的基本概念及基本理论,这些基本概念和基本理论是后续课程的理论基础。

**学习目标**

- ◎理解交流电、正弦交流电的概念。
- ◎理解正弦交流电的三要素。
- ◎了解交流电路中的参数及相互之间的关系。
- ◎理解正弦交流电的相量表示法。
- ◎掌握单相交流电路的有关规律。
- ◎掌握三相交流电路的有关规律。

**技能目标**

- ◎掌握三相交流电路中负载的星形联结和三角形联结。

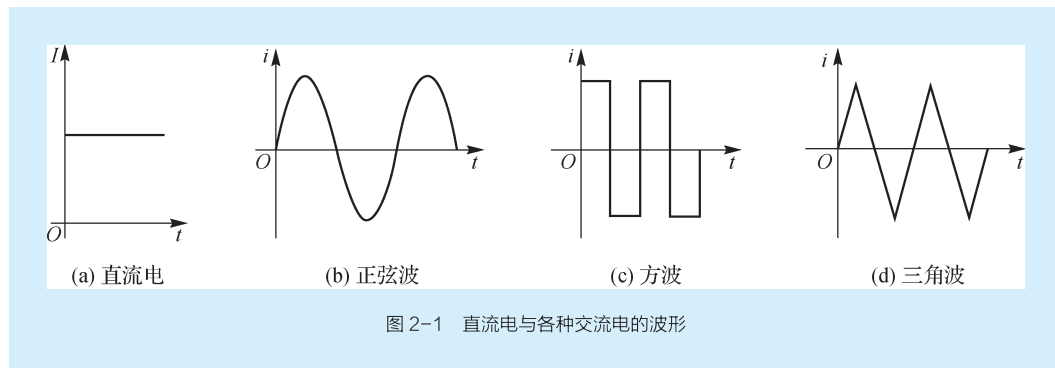
## 学习单元一 交流电的基本知识

在生产和生活实际中,交流电的应用更为广泛。在电网中,由发电厂发出的电是交流电,输电线路上传送的是交流电,各种交流电动机使用的也是交流电,一些需要直流电的场合,也往往是将交流电转换成直流电使用。为什么交流电的应用要比直流电广泛?交流电有什么特点和优点?

## 一、交流电的概念与特点

### 1. 交流电的概念

大小和方向随时间做周期性变化, 并且在一个周期内的平均值为零的电压、电流和电动势统称交流电。图 2-1 (a) 所示为直流电的波形图, 图 2-1 (b)、图 2-1 (c)、图 2-1 (d) 分别为正弦波、方波及三角波交流电的波形图。



从图 2-1 中交流电的波形图可以看出, 交流电随着时间的变化进行周期性的重复。交流电完成一次周期性变化所需要的时间称为交流电的周期。

### 2. 交流电的表示

为了区别交流电和直流电, 直流电的物理量用大写字母表示, 如  $U_s$ 、 $I$ 、 $U$  等; 交流电的物理量用小写字母表示, 如  $e_s$ 、 $i$ 、 $u$  等。交流电动势的图形符号也与直流电动势不同, 如图 2-2 所示。由于交流电的实际方向不断反复变化, 图中标出的电动势  $e_s$ 、电流  $i$  和电压  $u$  的方向为参考方向, 当各参数的实际方向与参考

方向相同时为正值, 反之为负值。

### 3. 交流电的特点

与直流电相比, 交流电的优点主要表现在发电、配电和传递信息方面。

(1) 交流发电机可以很方便地把机械能(如水流能、风能等)、化学能(如石油、天然气等)等其他形式的能转化为电能, 设备设施方面更加经济。

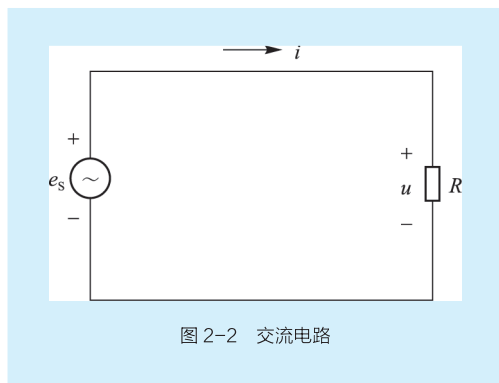
(2) 交流电可以方便地通过变压器升压和降压, 给配送电能带来极大的方便, 且能量损失少。

(3) 用来传递信息(如声音、图像等)的电信号也必须是变化的交流电, 不可能是恒定的直流电。因此, 在实际生产生活中, 交流电的应用更为广泛。

## 二、正弦交流电的三要素

### 1. 最大值和有效值

(1) 最大值。正弦交流电的最大值是指交流电瞬时值所能达到的最大值。在正弦交流电的表达



式中,  $E_m$ 、 $U_m$ 、 $I_m$  分别是正弦交流电动势、正弦交流电压、正弦交流电流的最大值。正弦交流电完成一次周期性变化, 正、负最大值各出现一次。

(2) 有效值。交流电的有效值是根据电流的热效应定义的。把某一交流电与直流电分别通过两个相同的电阻, 如果在相同的时间内产生相同的热量, 则该直流电的电量值就称为对应交流电的有效值。用大写字母  $E$ 、 $U$ 、 $I$  分别表示交流电的电动势、电压、电流的有效值。

交流电压表、交流电流表所测量的数值, 各种交流电气设备铭牌上所标的额定电压和额定电流以及平时所说的交流电的值都是指有效值。以后凡涉及交流电的数值, 只要没有特别说明的都是指有效值。

正弦交流电的有效值和最大值之间满足下列关系:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707E_m$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m$$

我国照明电路的电压是 220 V, 其最大值  $U_m = 220\sqrt{2}(\text{V}) \approx 311(\text{V})$ 。

## 2. 频率、周期和角频率

工程中常用频率或周期来表示正弦交流电变化的快慢。

(1) 频率。交流电在 1 s 内完成周期性变化的次数称为正弦交流电的频率, 用  $f$  表示, 单位是赫兹 (Hz), 简称赫。

(2) 周期。正弦交流电完成 1 次周期性变化所需的时间称为正弦交流电的周期, 用  $T$  表示, 单位是秒 (s)。根据定义可知, 周期和频率互为倒数, 即

$$f = \frac{1}{T}$$

或

$$T = \frac{1}{f}$$

(3) 角频率。角频率也是描述正弦交流电变化快慢的物理量。把交流电每秒钟变化的电角度称为交流电的角频率, 用  $\omega$  表示, 单位是弧度/秒 (rad/s)。

因为交流电完成 1 次周期性变化所对应的电角度为  $2\pi$ , 所用时间为  $T$ , 所以角频率  $\omega$  和周期  $T$  及频率  $f$  的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

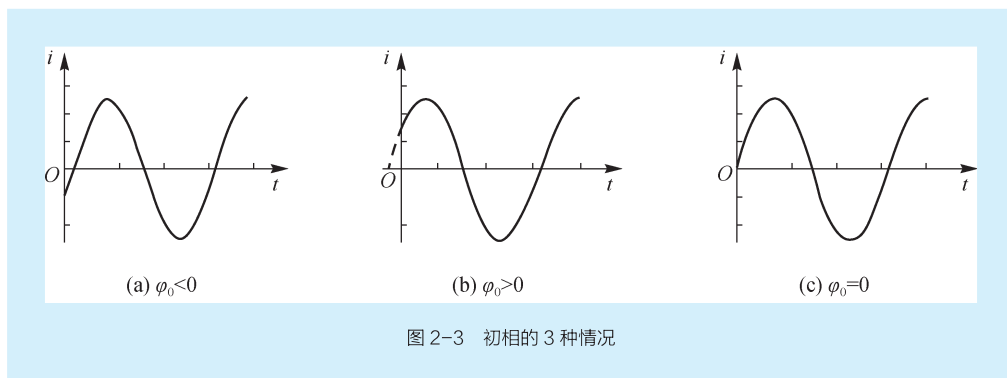
我国采用 50 Hz 作为电力标准频率, 也称工频, 其周期是 0.02 s, 角频率是  $100\pi$  rad/s 或 314 rad/s。

## 3. 相位、初相和相位差

(1) 相位。在正弦交流电的解析式中, 正弦符号后面相当于角度的量  $\varphi = (\omega t + \varphi_0)$  称为交流电

的相位，又称相位角。它是一个随时间变化的量，不仅决定交流电瞬时值的大小和方向，还可以用来比较交流电的变化步调。

(2) 初相。 $t=0$ 时的相位 $\varphi_0$ 称为初相，它反映交流电起始时刻的状态。初相不同，起始值就不同，到达最大值和某一特定值所需的时间就不同。图 2-3 所示为初相 $\varphi_0$ 不同的波形图。



(3) 相位差。两个同频率正弦交流电的相位之差称为它们的相位差，用 $\Delta\varphi$ 表示。设有两个同频率的正弦交流电的表达式为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

它们的相位差为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_u) - (\omega t + \varphi_i) = \varphi_u - \varphi_i$$

上式表明，两个同频率正弦量的相位差等于它们的初相之差。

相位差是描述同频率正弦量相互关系的重要特征量，它表征了两个同频率正弦量变化的步调，即在时间上超前或滞后到达正、负最大值或零值的关系。上述两个正弦量的相位差通常有以下情况：

- ①  $\Delta\varphi=0$ ，即  $u$  与  $i$  同相位。
- ②  $\Delta\varphi>0$ ，即  $u$  超前  $i$  角度  $\Delta\varphi$ 。
- ③  $\Delta\varphi=180^\circ$ ，即  $u$  与  $i$  反相。
- ④  $\Delta\varphi<0$ ，即  $u$  滞后  $i$  角度  $\Delta\varphi$ 。

因为任何一个正弦交流电的最大值、角频率和初相确定后，就可以写出它的解析式，从而计算出这个正弦交流电在任意时刻的瞬时值，所以最大值、角频率和初相被称为正弦交流电的三要素。

**【例 2-1】** 已知正弦交流电动势的表达式为  $e_1=311\sin(314t+\pi/3)$  V。

- (1) 求  $E_m$ 、 $\omega$ 、 $T$ 、 $f$ 、相位 ( $\omega t+\varphi_e$ )、初相  $\varphi_e$ 。
- (2) 画出该电动势的波形图。
- (3) 计算  $t_1=0.01$  s 和  $t_2=0.02$  s 时的瞬时值。
- (4) 若有另一电动势  $e_2=311\sin(314t+\pi/6)$  V，求  $e_1$  和  $e_2$  的相位差。

**解：**(1) 由解析式可知最大值  $E_m=311$  V，角频率  $\omega=314$  rad/s，周期  $T=2\pi/\omega=2\pi/314\approx 0.02$  s，



频率  $f=1/T=1/0.02=50$  Hz, 相位  $\varphi=(\omega t+\varphi_e)=(314t+\pi/3)$  rad, 初相  $\varphi_e=\pi/3$  (rad)。

(2) 正弦交流电动势  $e_1$  的波形图如图 2-4 所示。

(3)  $t_1=0.01$  s 时的瞬时值  $e_1=311\sin(314\times 0.01+\pi/3)=-269$  (V),  $t_2=0.02$  s 时的瞬时值  $e_2=311\sin(314\times 0.02+\pi/3)=269$  (V)。

(4) 相位差  $\Delta\varphi=\varphi_{e1}-\varphi_{e2}=\pi/3-\pi/6=\pi/6$  (rad)。

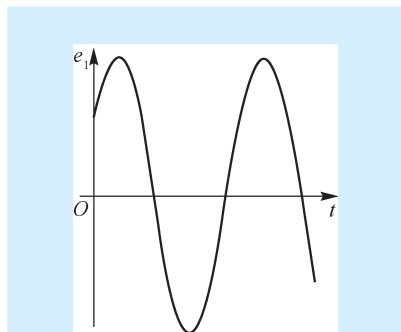


图 2-4 正弦交流电动势  $e_1$  的波形图

### 三、正弦交流电的表示方法

#### 1. 解析式法

解析式法就是用三角函数式表示正弦交流电与时间的变化关系的方法。正弦交流电动势、正弦交流电压、正弦交流电流的常用解析式形式如下:

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

#### 2. 波形图法

波形图法是先根据解析式计算出数据,再根据数据在平面直角坐标系中画出曲线表示交流电的方法,如图 2-5 (a) 所示。

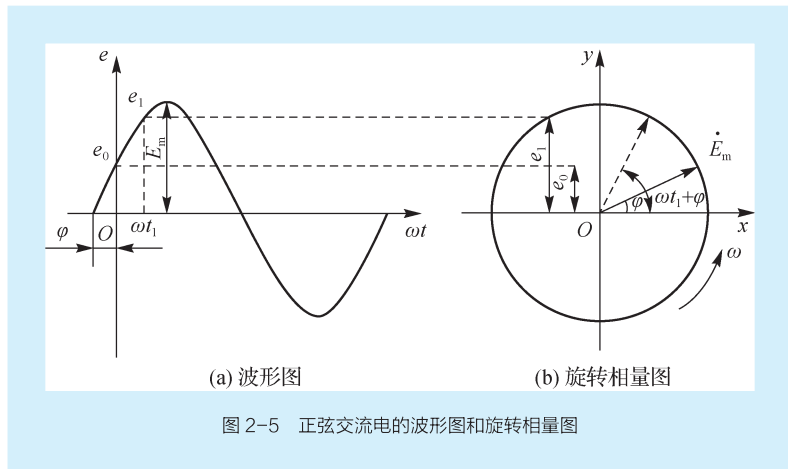


图 2-5 正弦交流电的波形图和旋转相量图

#### 3. 相量表示法

##### 1) 旋转相量表示法

旋转相量表示法是在平面直角坐标系中用一个通过原点的、以逆时针方向旋转的相量来表示正弦交流电的方法。在直角坐标系中,从原点作一个矢量,其长度与正弦电流的最大值成正比,矢量与横轴正方向的夹角等于初相  $\varphi_0$ 。矢量以正弦量的角频率  $\omega$  沿逆时针匀速转动,则在任意时刻  $t$ ,旋转相量在纵轴上的投影就等于正弦交流电的瞬时值。显然,旋转相量既能体现出正弦量的三要素,它在纵轴上的投影又能表示正弦量的瞬时值。所以,旋转相量能间接完整地表示一个正弦量。图 2-5 (b) 所示为正弦交流电动势的旋转相量图。

## 2) 相量图表示法

由于在交流电路的分析计算中,主要讨论同频率正弦交流电的有效值和它们的相位关系,所以相量图一般采用有效值相量图(简称相量图)。相量的长短表示有效值的大小,相量与横轴正方向的夹角等于初相 $\varphi_0$ ,相量旋转的角速度不再标出。有效值相量常用 $\dot{E}$ 、 $\dot{U}$ 、 $\dot{i}$ 表示。例如,3个同频率的正弦量分别为

$$e = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + \pi/3) \text{ V}$$

$$u = 110\sqrt{2} \sin(\omega t + \pi/6) \text{ V}$$

$$i = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - \pi/6) \text{ A}$$

它们的相量图如图 2-6 所示。

用有效值相量图表示正弦量后,烦琐的正弦量的三角函数加、减运算可转化为简便、直观的矢量的几何运算。

**【例 2-2】** 已知  $u_1=20\sin(314t+\pi/6) \text{ V}$ ,  $u_2=15\sin(314t - \pi/3) \text{ V}$ 。

(1) 画出  $u_1$ 、 $u_2$  的有效值相量图。

(2) 求  $u=u_1+u_2$  的瞬时表达式。

**解:** (1)  $u_1$ 、 $u_2$  的有效值相量图如图 2-7 所示。

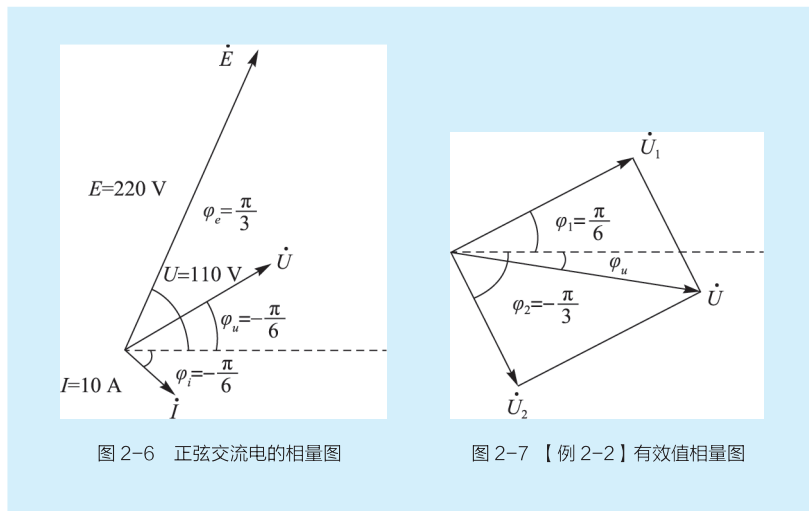


图 2-6 正弦交流电的相量图

图 2-7 【例 2-2】有效值相量图

(2) 应用平行四边形法则作出总相量  $\dot{U}$ , 如图 2-7 所示, 由图可知:

$$U_m = \sqrt{U_{1m}^2 + U_{2m}^2} = \sqrt{20^2 + 15^2} = 25(\text{V})$$

$$\varphi' = \arctan \frac{U_2}{U_1} = \arctan \frac{15}{20} \approx 0.64(\text{rad})$$

$$\varphi_u = \frac{\pi}{6} - \varphi' = \frac{\pi}{6} - 0.205\pi \approx -0.12(\text{rad})$$

所以

$$u=25\sin(314t - 0.12) \text{ V}$$

## 学习单元二 单相交流电路

由正弦交流电源供电的电路称为正弦交流电路。交流电路按电源中交变电动势的个数分为单相交流电路和三相交流电路。单相交流电路只有一个交变电动势，三相交流电路有三个交变电动势。本学习单元从理想的单一参数元件（纯电阻、纯电感和纯电容）电路入手，研究单一元件电路中电压和电流的大小关系和相位关系以及电路的功率。

## 一、纯电阻电路

由纯电阻元件（平时所用的白炽灯、电炉、电烙铁等可以理想地看作纯电阻元件）和交流电源组成的电路称为纯电阻电路，图 2-8 所示就是一个纯电阻电路。

假设加在电阻  $R$  两端的电压为

$$u_R = U_{Rm} \sin(\omega t + \varphi_u)$$

根据部分电路欧姆定律，通过电阻的电流为

$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{U_{Rm} \sin(\omega t + \varphi_u)}{R} = \frac{U_{Rm}}{R} \sin(\omega t + \varphi_u) = I_{Rm} \sin(\omega t + \varphi_i)$$

## 1. 电压和电流的关系

## 1) 最大值关系

最大值关系为

$$I_{Rm} = \frac{U_{Rm}}{R}$$

## 2) 有效值关系

将上式两边同除以  $\sqrt{2}$ ，则得到电压和电流的有效值关系为

$$I_R = \frac{U_R}{R}$$

上式称为纯电阻电路中的欧姆定律，它与直流电路中欧姆定律形式相同。所不同的是，纯电阻电路中的电压和电流是指交流电压、电流的有效值。

## 3) 相位关系

由电压和电流的瞬时表达式还可看出，在纯电阻电路中，电压和电流同相位，即

$$\varphi_u = \varphi_i$$

## 4) 相量关系

用相量表示，则电压和电流的相量关系为

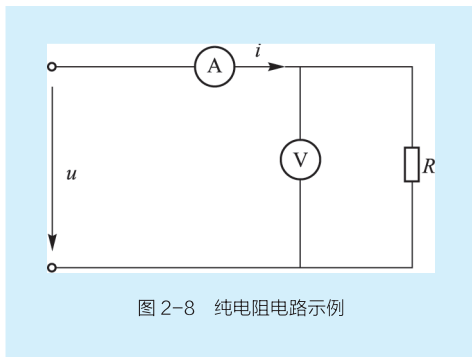


图 2-8 纯电阻电路示例

$$\dot{U}_R = R\dot{I}_R$$

上式是纯电阻电路中欧姆定律的相量表达式。根据上述结论，可作出纯电阻电路中电流和电压的波形图与相量图，如图 2-9 所示。

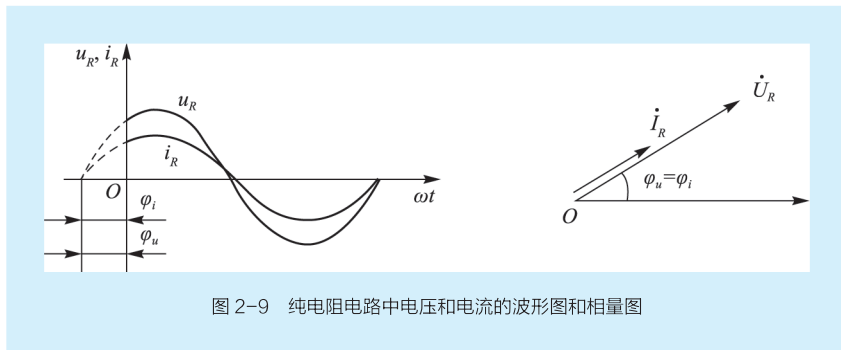


图 2-9 纯电阻电路中电压和电流的波形图和相量图

## 2. 功率

### 1) 瞬时功率

由功率的定义式可知，电压瞬时值  $u_R$  和电流瞬时值  $i_R$  的乘积为瞬时功率，用  $p$  表示，即

$$p = u_R i_R = U_{Rm} I_{Rm} \sin^2(\omega t + \varphi_u)$$

纯电阻电路瞬时功率变化曲线如图 2-10 所示。

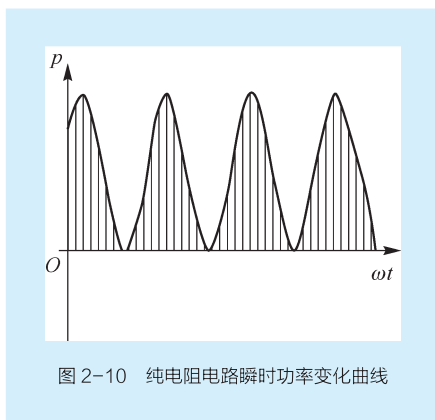


图 2-10 纯电阻电路瞬时功率变化曲线

由于纯电阻电路中电压和电流同相，所以始终有  $p \geq 0$ ，表明电阻总是向电源取用功率，即电阻元件是一种耗能元件。

### 2) 平均功率

由于瞬时功率随时间做周期性变化，测量和计算都不方便，所以在实际应用中常用平均功率来表示电阻所消耗的功率。瞬时功率在一个周期内的平均值称为平均功率，也称有功功率，用字母  $P$  表示，单位为瓦特（W）。我们平时所说的负载消耗的功率，如 40 W 日光灯、100 W 电烙铁、2 kW 电炉等都是指平均功率。平均功率等于瞬时功率最大值的一半，即

$$P = \frac{1}{2} U_{Rm} I_{Rm} = \frac{U_{Rm}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{Rm}}{\sqrt{2}} = U_R I_R = I_R^2 R = \frac{U_R^2}{R}$$

可见,平均功率不随时间变化,这与直流电路中电阻元件的功率表达式相同,但上式中的  $U_R$ 、 $I_R$  分别为正弦交流电压、电流的有效值。

**【例 2-3】** 一只标有“220 V, 2 000 W”的电炉接在电源电压为  $u=311\sin(314t+\pi/6)$  V 的电路中。

- (1) 求该电炉的电阻。
- (2) 求该电炉中通过的电流,写出其瞬时表达式。

解:

$$U_R = \frac{U_{Rm}}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} \approx 220(\text{V})$$

$$R = \frac{U_R^2}{P} = \frac{220^2}{2\,000} = 24.2(\Omega)$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{220}{24.2} \approx 9.1(\text{A})$$

又因为电压和电流同相,所以电流的瞬时表达式为  $i=9.1\sqrt{2}\sin(314t+\pi/6)$  A。

通过以上分析可得出纯电阻电路有以下特点:

(1) 在纯电阻电路中,电压与电流同频率、同相位,电压与电流的瞬时值、最大值、有效值都遵循欧姆定律。

(2) 电阻对直流电和交流电的阻碍作用相同。电阻是耗能元件,直流电和交流电通过电阻时,电流都要做功,把电能转化为热能。

(3) 纯电阻电路的平均功率等于电流的有效值和电阻两端电压有效值的乘积。

## 二、纯电感电路

由交流电源和纯电感元件组成的电路称为纯电感电路。它是一个理想电路的模型,实际的电感线圈都用导线绕制而成,总有一定的电阻。但当其电阻很小,影响可忽略不计时,可近似看作纯电感元件。

### 1. 电压和电流的关系

在图 2-11 所示的纯电感电路中,用手摇发电机或超低频交流信号发生器作为电源给纯电感电路通低频交流电时,可以看到,电压表和电流表的指针摆动的步调是不同的。如果交流电的频率低于 6 Hz,当交流电压表的指针到达右边最大值时,电流表的指针指向中间零值;当电压表的指针由右边最大值回到中间零值时,电流表指针由中间零值移到右边最大值;当电压表指针由中间零值移到左边最大值时,电流表指针又由右边最大值回到中间零值,如此循环。可见,在纯电感电路中,电压与电流不同相,电压超前电流  $90^\circ$ 。实验还证明,在纯电感电路中,电压和电流成正比。

(1) 有效值关系。有效值关系为

$$U_L = X_L I_L$$

或

$$I_L = \frac{U_L}{X_L}$$

上式称为纯电感电路的欧姆定律表达式。把它和电阻元件的欧姆定律表达式相比较，可以看出  $X_L$  相当于电阻  $R$ ，表示电感对交流电的阻碍作用，称为感抗，单位也是欧姆（ $\Omega$ ）。

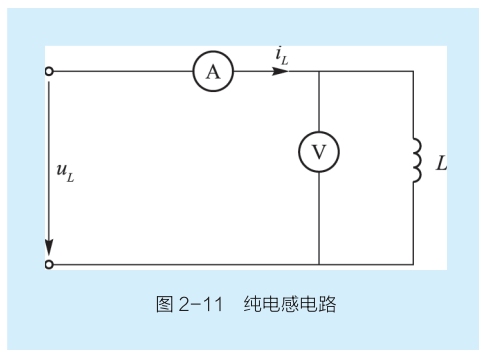


图 2-11 纯电感电路

(2) 最大值关系。

将上式变形可得

$$U_{Lm} = X_L I_{Lm}$$

或

$$I_{Lm} = \frac{U_{Lm}}{X_L}$$

上式说明，在纯电感电路中，电压与电流的最大值之间也遵从欧姆定律。

(3) 相位关系。相位关系为

$$\varphi_u = \varphi_i + \frac{\pi}{2}$$

要特别注意的是，在纯电感电路中，由于电压和电流的相位不同，所以电压和电流的瞬时值之间不遵从欧姆定律。电压和电流的相量图如图 2-12 (a) 所示。

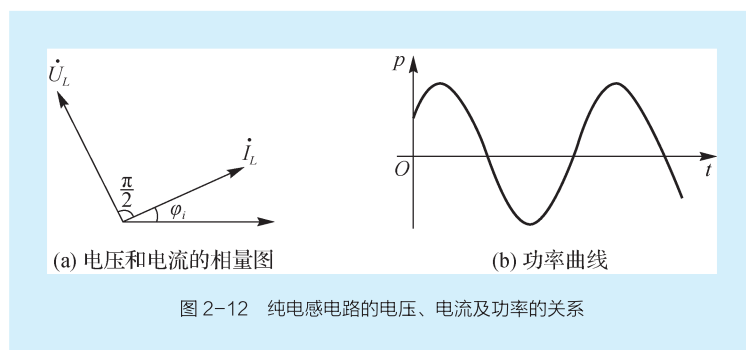


图 2-12 纯电感电路的电压、电流及功率的关系

## 2. 感抗

在图 2-11 所示的电路中，如果保持电源频率和输出电压不变，将铁心插入空心线圈，使电感  $L$  增大，可以看到电流表读数减小，这表明当电感  $L$  增大时，感抗  $X_L$  也增大。若保持电源输出电压和线圈电感不变，改变电源的频率大小，观察电流表的变化，可以看到，当频率增大时，电流表的读数减小，说明感抗增大；当电源频率减小时，电流表读数增大，说明感抗减小。



以上实验说明,感抗  $X_L$  的大小与线圈电感  $L$  和交流电的频率  $f$  有关,它们之间的关系式为

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

式中,  $\omega$  为交流电的角频率, rad/s;  $L$  为线圈电感, H;  $f$  为交流电频率, Hz;  $X_L$  为感抗,  $\Omega$ 。

由上式可知:对于直流电,  $f=0$ ,  $X_L=0$ , 即电感对于直流电相当于短路;对于低频交流电,由于  $f$  值小,感抗  $X_L$  就小;对于高频交流电,由于  $f$  很大,感抗  $X_L$  就很大。所以,电感线圈在电路中具有“通直流,阻交流;通低频,阻高频”的特性。

### 3. 功率

#### (1) 瞬时功率。

假设电流瞬时值为

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \varphi_i)$$

则电压瞬时值为

$$u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \varphi_i + 90^\circ)$$

所以纯电感电路的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= u_L i_L = U_{Lm} I_{Lm} \sin(\omega t + \varphi_i + 90^\circ) \sin(\omega t + \varphi_i) \\ &= U_{Lm} I_{Lm} \cos(\omega t + \varphi_i) \sin(\omega t + \varphi_i) \\ &= U_L I_L \sin[2(\omega t + \varphi_i)] \end{aligned}$$

由上式可知,纯电感电路的瞬时功率是随时间按正弦规律变化的,其波形图如图 2-12(b) 所示。从图中可以看出,功率曲线一半为正,一半为负,它与时间轴所包围的面积为零。这说明纯电感电路的平均功率为零,其物理意义是纯电感元件在交流电路中不消耗功率,只进行能量的交换,所以电感元件是一种储能元件。

(2) 无功功率。为反映电感元件与电源之间能量交换的规模,把瞬时功率的最大值称为无功功率,用  $Q_L$  表示,其单位是乏(var),即

$$Q_L = U_L I_L = I_L^2 X_L = \frac{U_L^2}{X_L}$$

无功功率中“无功”是相对于“有功”而言的,其含义是“交换”而不是“消耗”,其实质是表征储能元件在电路中能量交换的规模。

通过以上讨论可看出纯电感电路具有以下特点:

- ① 电压和电流同频率而不同相位,电压超前电流  $\pi/2$ 。
- ② 电压与电流的最大值和有效值之间遵从欧姆定律,但瞬时值由于相位不同,所以不遵从欧姆定律。
- ③ 纯电感电路的有功功率为零,即电感是储能元件,不消耗功率。
- ④ 纯电感电路的无功功率等于电感两端电压有效值和电流有效值的乘积。

**【例 2-4】** 一个电阻可以忽略的线圈  $L=0.35$  H, 接到  $u_L=220 \sqrt{2} \sin(100\pi t + \pi/6)$  V 的交流电源上,试求线圈的感抗、电流的有效值、电路的有功功率和无功功率。

解：由电压的瞬时表达式可知：

$$U_L = \frac{U_{Lm}}{\sqrt{2}} = 220 \text{ V}, \omega = 100\pi \text{ rad/s}, \varphi_u = \frac{\pi}{6} \text{ rad}$$

感抗为

$$X_L = \omega L = 314 \times 0.35 \approx 110(\Omega)$$

电流的有效值为

$$I_L = \frac{U_L}{X_L} = \frac{220}{110} = 2(\text{A})$$

电路的有功功率为

$$P=0$$

电路的无功功率为

$$Q_L = U_L I_L = 220 \times 2 = 440(\text{var})$$

**【例 2-5】** 一个线圈接到频率为 50 Hz、电压为 220 V 的交流电源上，通过线圈的电流为 22 A，试求线圈的电感。如果电源电压仍为 220 V，而频率变为 500 Hz，求通过线圈的电流和无功功率。

解：当电源频率  $f=50$  Hz 时，电路的感抗为

$$X_L = \frac{U_L}{I_L} = \frac{220}{22} = 10(\Omega)$$

因为

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

所以

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{10}{2 \times 3.14 \times 50} \approx 0.0318(\text{H})$$

当电源频率  $f=500$  Hz 时，电路的感抗为

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 500 \times 0.0318 \approx 100(\Omega)$$

线圈的电流为

$$I_L = \frac{U_L}{X_L} = \frac{220}{100} = 2.2(\text{A})$$

无功功率为

$$Q_L = U_L I_L = 220 \times 2.2 = 484(\text{var})$$

### 三、纯电容电路

由交流电源和纯电容元件组成的电路称为纯电容电路，如图 2-13 所示。

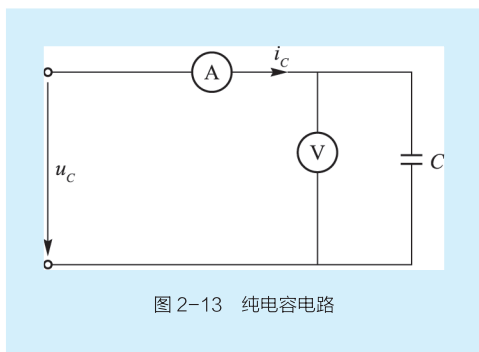


图 2-13 纯电容电路

### 1. 电压与电流的关系

若在纯电容元件的两端加上一个正弦电压  $u_c = U_{cm} \sin(\omega t + \varphi_u)$ ，用双踪示波器观察电压和电流的波形可发现：在纯电容电路中，电压滞后电流  $\pi/2$ ，正好和纯电感电路情况相反。连续改变电压的大小，记下几组电压和电流的值，可发现电压和电流成正比。

(1) 有效值关系。有效值关系为

$$\begin{cases} U_c = \frac{I_c}{\omega C} = X_c I_c \\ I_c = \frac{U_c}{X_c} \end{cases}$$

上式称为纯电容电路的欧姆定律表达式。

(2) 最大值关系。在上式的两端同乘以  $\sqrt{2}$ ，得

$$\begin{cases} U_{cm} = I_{cm} X_c \\ I_{cm} = \frac{U_{cm}}{X_c} \end{cases}$$

(3) 相位关系。相位关系为

$$\varphi_u = \varphi_i - \pi/2$$

在纯电容电路中，由于电压和电流的相位不同，所以电压和电流的瞬时值之间也不遵从欧姆定律。电压和电流的相量图如图 2-14 (a) 所示。

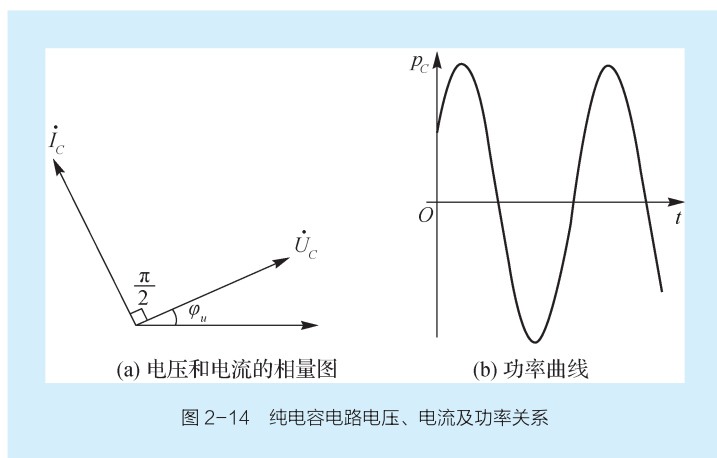


图 2-14 纯电容电路电压、电流及功率关系

## 2. 容抗

如果在图 2-13 所示的电路中,先保持电源频率和电压不变,换用不同的电容器做实验,可以看到,电容越大,电流表读数越大,即容抗越小。然后保持电源电压和电容不变,改变交流电频率,可以看到,交流电频率越高,电流表读数越大,即容抗越小。

以上实验说明,容抗  $X_C$  的大小与电容器的电容  $C$  和交流电的频率  $f$  有关,它们之间的关系式为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

式中,  $\omega$  为交流电的角频率, rad/s;  $C$  为电容器电容, F;  $f$  为交流电频率, Hz;  $X_C$  为容抗,  $\Omega$ 。

由上式可知,对于直流电,  $f=0$ ,  $X_C=\infty$ ,即对于直流电,电容相当于开路;当电容器的电容一定时,对于低频交流电( $f$ 值小),容抗  $X_C$  就大;而对于高频交流电( $f$ 值大),容抗  $X_C$  就很小。所以电容器在电路中具有“通交流,隔直流;通高频,阻低频”的特性。例如,若在电子线路的电流中既含有直流成分,又含有交流成分,如只需将交流成分输送到下一级,只要在这两级之间串联一个隔直流电容器即可;若在线路的交流电中既含低频成分,又含高频成分,如只需将低频成分输送到下一级时,只要在输出端并联一个高频旁路电容器即可达到目的。

## 3. 功率

(1) 瞬时功率。纯电容电路的功率与纯电感电路的功率规律相似,其瞬时功率为

$$\begin{aligned} P_C &= u_C i_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_u) I_{Cm} \sin\left(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{2}\right) \\ &= U_C I_C \sin[2(\omega t + \varphi_u)] \end{aligned}$$

由上式可知,纯电容电路的瞬时功率  $P_C$  随时间变化按正弦规律变化,最大值为  $U_C I_C$ 。与纯电感电路相同,纯电容电路的功率曲线一半为正,一半为负,表示纯电容电路的平均功率为零,即  $P_C=0$ ,如图 2-14(b) 所示,这表明纯电容电路在交流电路中不消耗功率。这是因为当电容器端电压增大时,电容器从电源吸收了电能并把它转化为电场能储存在电容器两极板之间,使电容器储存的电场能增大。当电容器端电压降低时,这时瞬时功率为负值,表明电容器将储存的电场能释放出来返还给电源,电容器储存的电场能减小。由于电容器和电源之间进行的是可逆的能量相互转换,所以并不消耗功率。

(2) 无功功率。电容元件瞬时功率的最大值称为无功功率,用  $Q_C$  表示,即

$$Q_C = U_C I_C = I_C^2 X_C = \frac{U_C^2}{X_C}$$

通过以上讨论可看出纯电容电路具有以下特点:

- ① 电压和电流同频率而不同相位,电流超前电压  $\pi/2$ 。
- ② 电压与电流的最大值和有效值之间遵从欧姆定律,但瞬时值由于相位不同,所以不遵从欧姆定律。
- ③ 纯电容电路的有功功率为零,即电容器是储能元件,不消耗功率。
- ④ 纯电容电路的无功功率等于电容端电压有效值和电流有效值的乘积。

【例 2-6】把  $C=40\ \mu\text{F}$  的电容器接到  $u_c = 220\sqrt{2}\sin(100\pi t - \pi/3)\text{V}$  的电源上。

(1) 求电容的容抗、电流的有效值、电流的瞬时值、电路的有功功率和无功功率。

(2) 画出电压和电流的相量图。

解：由  $u_c = 220\sqrt{2}\sin(100\pi t - \pi/3)\text{V}$  可知

$$U_C = 220\text{ V}, \omega = 100\pi\text{ rad/s}, \varphi_u = -\frac{\pi}{3}\text{ rad}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{100\pi \times 40 \times 10^{-6}} \approx 80(\Omega)$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{80} = 2.75(\text{A})$$

$$\varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{6}(\text{rad})$$

则电流的瞬时值为

$$i = 2.75\sqrt{2}\sin(100\pi t + \pi/6)\text{ A}$$

电路的有功功率为

$$P=0$$

无功功率为

$$Q_C = U_C I_C = 220 \times 2.75 = 605(\text{var})$$

电压和电流的相量图如图 2-15 所示。

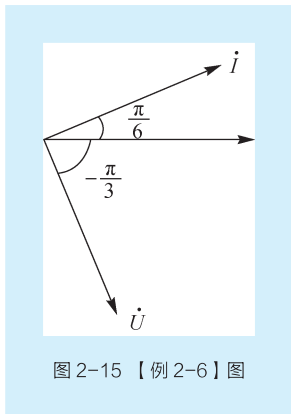


图 2-15 【例 2-6】图

#### 四、RL 串联电路

前面已经学习了最简单的交流电路——单一参数的交流电路中电流与电压之间的关系，而实际电路多为含有两个或多个参数的复杂电路，当不同性质的元件串联在交流电路中时，是否还服从直流电路中的有关定律？下面将利用所学知识来分析电阻、电感串联的交流电路（RL 串联电路）的规律。

## 1. RL 串联电路的特性

### 1) RL 串联电路中的电压关系

由于纯电阻电路中电压与电流同相，纯电感电路中电压超前电流  $\pi/2$  相位，而串联电路中的电流处处相等，因此，RL 串联电路中各电压间的相位是不同的，总电流与总电压的相位也不同。

若电路中的电流为正弦交流电，即

$$i = I_m \sin \omega t$$

则电阻两端的电压为

$$U_L = U_{Rm} \sin \omega t$$

电感两端的电压为

$$u_L = U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

电路中的总电压为

$$u = u_R + u_L$$

总电压的有效值可用相量表示为

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L$$

根据上式作出总电压的相量图，如图 2-16 (a) 所示。从总电压的相量图中可以看出，RL 串联电路中电压与电流有如下相位关系：总电压  $\dot{U}$  的相位总是超前总电流  $i$  一个  $\varphi$  角。

图 2-16 (b) 所示为 RL 串联电路中各电压之间的相量图，从图中可以看出， $\dot{U}$ 、 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_L$  构成直角三角形，称为电压三角形，电压间的关系为

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

式中， $U$  为电路中总电压的有效值，V； $U_R$  为电阻两端电压的有效值，V； $U_L$  为电感两端电压的有效值，V。

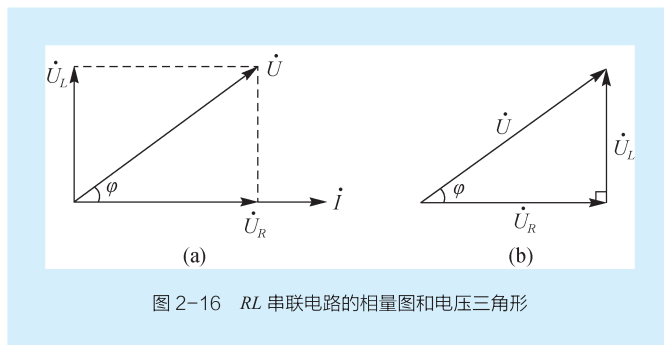


图 2-16 RL 串联电路的相量图和电压三角形

从电压三角形中可得出总电压与各部分电压之间的关系为

$$\begin{cases} U_R = U \cos \varphi \\ U_L = U \sin \varphi \end{cases}$$



其中,  $\varphi$  为总电压超前电流的相位, 由电压三角形可以得出  $\varphi = \arctan(U_L/U_R)$ 。

### 2) $RL$ 串联电路的阻抗

在  $RL$  串联电路中, 电阻两端的电压  $U_R=RI$ , 电感两端的电压  $U_L=X_L I$ , 根据  $RL$  串联电路电压间的关系可得

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I)^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2}$$

上式可整理为

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{Z}$$

式中,  $U$  为电路中总电压的有效值,  $V$ ;  $I$  为电路中总电流的有效值,  $A$ ;  $Z$  为电路中的阻抗,  $\Omega$ , 且  $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ 。

$Z$  表示  $RL$  串联电路对交流电的总的阻碍作用。阻抗  $Z$  的大小取决于电路中的电阻  $R$  及  $X_L$  的大小, 因  $X_L$  的大小取决于  $L$  及交流电的频率, 因此, 阻抗的大小决定于电路中的参数  $R$ 、 $L$  及电源频率。

将图 2-16(b) 所示电压三角形的三边同时除以电流  $I$ , 可得到阻抗  $Z$ 、感抗  $X_L$ 、电阻  $R$  组成的三角形, 该三角形称为阻抗三角形, 如图 2-17 所示。阻抗三角形和电压三角形是相似三角形, 阻抗三角形中  $Z$  与  $R$  的夹角和电压三角形中总电压与电阻两端电压的夹角相等,  $\varphi$  称为阻抗角, 即电路中电压与电流的相位差。

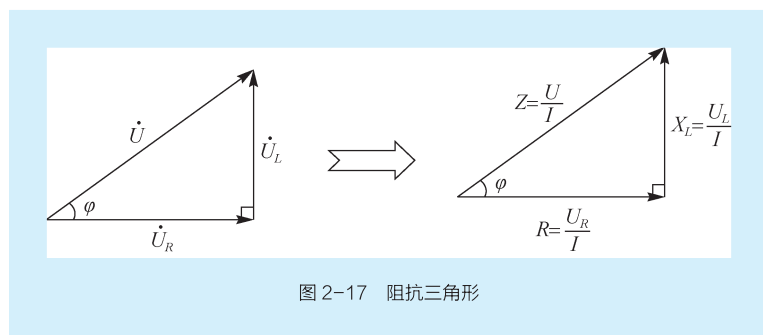


图 2-17 阻抗三角形

### 3) $RL$ 串联电路的功率

将图 2-16 (b) 所示电压三角形的三边同时乘以电流  $I$ , 可得到  $RL$  串联电路的功率三角形, 如图 2-18 所示, 功率三角形和电压三角形也是相似三角形。

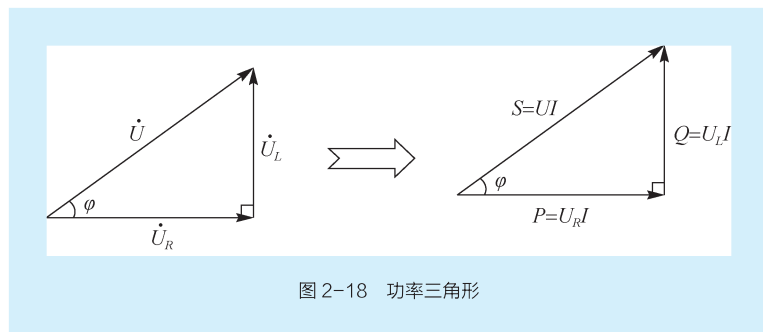


图 2-18 功率三角形

从功率三角形中可以看出,  $RL$  串联电路的功率分为  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  三种。其中,  $P$  为有功功率, 是指电路中电阻消耗的功率。有功功率等于电阻两端的电压  $U_R$  与电路中电流  $I$  的乘积。

$$P = U_R I = RI^2 = \frac{U_R^2}{R}$$

$Q$  为无功功率, 是电路中电感与电源之间交换的能量, 电感无功功率等于电感两端的电压  $U_L$  与电路中电流  $I$  的乘积。

$$Q = U_L I = X_L I^2 = \frac{U_L^2}{X_L}$$

$S$  为视在功率, 等于电路中总电压  $U$  与电流  $I$  的乘积, 单位为伏安 ( $V \cdot A$ )。

$$S = UI$$

视在功率具有实际意义。例如, 交流电源的额定视在功率等于额定电压与额定电流的乘积, 即  $S_N = U_N I_N$ , 代表电源的容量; 电气设备的额定视在功率等于其额定电压与额定电流的乘积, 称为电气设备的容量。

从功率三角形还可得出有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和视在功率  $S$  之间的关系如下:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi$$

从上述各式可以看出, 在  $RL$  串联电路中, 有功功率的大小不仅取决于电压  $U$  与电流  $I$ , 还受到阻抗角的余弦 ( $\cos \varphi$ ) 影响。当电源供给同样大小的电压和电流时,  $\cos \varphi$  越大, 有功功率越大,  $\cos \varphi$  越小, 有功功率也越小; 同样, 无功功率的大小取决于电压  $U$ 、电流  $I$  及阻抗角的正弦  $\sin \varphi$ 。

## 2. 功率因数

### 1) 功率因数的引入

在  $RL$  串联电路中, 既有耗能元件 (电阻), 又有储能元件 (电感), 因此电源既要提供有功功率  $P$ , 又要提供无功功率  $Q$ , 电源提供的视在功率  $S > P$ 。为了表示电源或供电设备容量的利用率, 引入了功率因数这个物理量。功率因数是指有功功率  $P$  与视在功率  $S$  的比值, 用  $\lambda$  表示, 即

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi$$

分析上式可知, 当视在功率一定时, 电路的功率因数越大, 用电设备取用的有功功率就越大, 供电设备容量的利用率也越高。从前面学习的知识可知, 功率因数的大小是由电器的主要参数  $R$  和  $L$  决定的。

### 2) 提高功率因数的意义

交流电路中功率因数的高低是供电系统的一个重要指标。对于非电阻性负载电路, 供电设备输出的视在功率  $S$  中, 一部分为有功功率  $P$ , 另一部分为无功功率  $Q$ 。电路的功率因数越小, 电路中的有功功率越小, 而无功功率就越大, 无功功率越大即电路中能量互换的规模越大, 因能量互换而损耗的能量也越多。例如, 我们日常使用的电磁镇流式日光灯, 其功率因数  $\cos \varphi = 0.5$  (感性), 若不提高线路的功率因数, 其与电源间的无功互换规模可达 50%。因此, 为提高供电设备容量的利用率,

必须提高电路中主要负载的功率因数。

此外,功率因数低,还会增加发电机绕组、变压器及线路中的功率损耗。当负载电压和有功功率一定时,电路中的电流  $I=P/U_R=P/U\cos\varphi$ ,即电路中的电流与功率因数成反比。功率因数越低,电路中的电流越大,线路中的电压就越大,线路的功率损耗也就越大。此外,电能消耗在线路上使得负载两端的电压降低,会影响负载的正常工作。因此,应尽量提高主要负载的功率因数。

### 3) 提高功率因数的方法

电力系统中的大多数负载都是感性负载,如电动机、变压器等。所有感性负载在建立磁场的过程中都存在无功功率,变压器工作时,需要无功功率,电动机工作时,也需要无功功率。一般来说,在具有感性负载的电路中,功率因数都比较低。为了使这些设备的容量得到充分利用,必须减小无功功率,提高功率因数。

功率因数  $\lambda=P/S=\cos\varphi$ ,要提高  $\cos\varphi$ ,就要减小阻抗角  $\varphi$ 。提高功率因数最常用的方法是在负载两端并联电容器,可以减小阻抗角,进而达到提高功率因数的目的。

图 2-19 (a) 所示为日光灯电路,该电路是典型的感性负载电路。并联电容之前,电路中的电流滞后电压  $\varphi_L$ ,  $\varphi_L=\arctan(X_L/R)$ 。当在感性负载(日光灯)两端并联电容器后,电容支路的电流超前电压  $\pi/2$ ,图 2-19 (b) 所示为总电流与电压的相量图。从相量图可以看出,总电流与电压间的夹角减小了,即  $\varphi<\varphi_L$ ,达到了提高功率因数的目的。

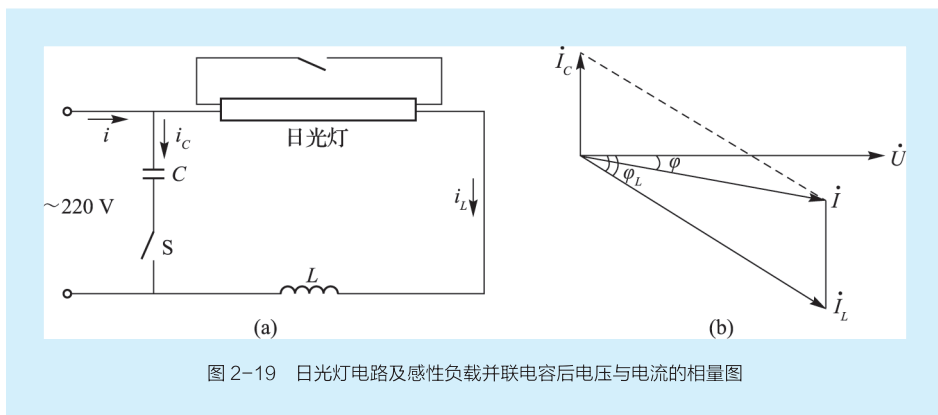


图 2-19 日光灯电路及感性负载并联电容后电压与电流的相量图

电路的功率因数也不是越高越好,若使功率因数接近 1,则需要的成本会随之增加,经济效果并不显著,因此,在具体的电路中,功率因数一般为 0.95 左右比较适宜。

## 学习单元三 三相交流电路

在生产生活实际中,常会听说三相交流电或三相电路。我们把由三相电源供电的电路称为三相交流电路,简称三相电路。单相交流电路是从 1 个电源出发,用 2 根线进行传输的,而三相交流电路是从 3 个电源出发(电压相等、相位不同的 3 个单相电源),用 3 根线进行电能传送。那么三相交

流电路中的3个电源如何连接？3个电源的电能不能如何传给负载？电路中的电压与电流有什么规律呢？本学习单元就来讨论这些内容。

## 一、三相交流电源

### 1. 三相交流电的产生

三相交流电是由三相交流发电机产生的，图 2-20 (a) 所示为三相交流发电机的工作原理。若在磁场中移动导体，使导体切割磁感线，则导体中就会产生感应电动势（后面将介绍此内容）。从图 2-20 (a) 中可以看到，3 个线圈相互错开  $120^\circ$ ，若按顺时针方向转动磁铁，在线圈  $aa'$  中就会产生感应电动势，线圈  $bb'$  中产生大小相同的电动势，但其相位较  $aa'$  滞后  $120^\circ$ ，同理线圈  $cc'$  也会产生大小相同的电动势，但其相位较  $bb'$  滞后  $120^\circ$ 。图 2-20 (b) 所示为按照磁铁的转动角画出的 3 个线圈中产生的感应电动势的波形图。

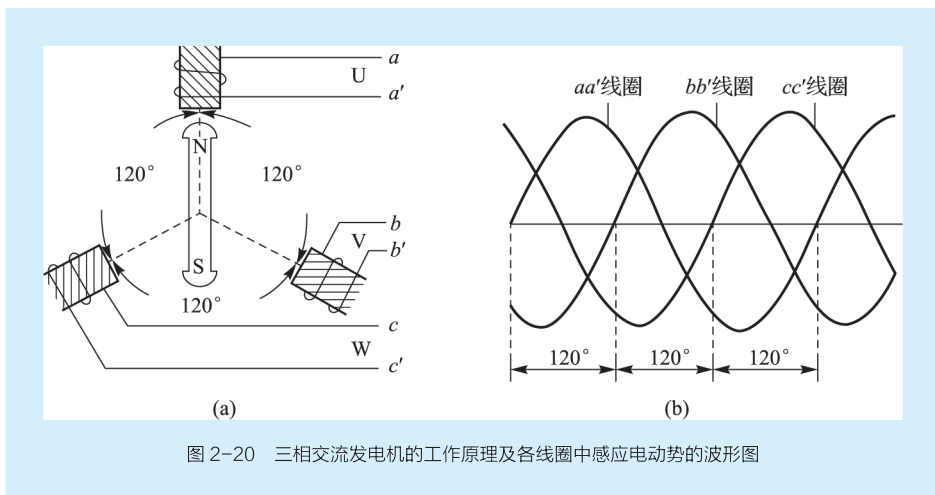


图 2-20 三相交流发电机的工作原理及各线圈中感应电动势的波形图

从图 2-20 中可以看出，3 个线圈  $aa'$ 、 $bb'$ 、 $cc'$  中产生的感应电动势依次到达最大值，把感应电动势依次到达最大值的顺序称为相序，分别用 U、V、W 表示。一般来说，习惯将三相交流电中相序 U—V—W 称为正序。在电工技术及电力工程中，把图 2-20 (b) 所示的电压称为三相交流电压。

### 2. 三相电源的星形联结

如图 2-21 所示，星形联结（Y 联结）就是把发电机的 3 个绕组 AX、BY、CZ 的首端 A、B、C 作为输出端，末端 X、Y、Z 连接在一起的方式。这 3 个末端的连接点称为中点（或零点），用符号 N 表示。首端 A、B、C 的引出线与负载连接，这 3 根导线称为相线（也称火线）。只有 3 根相线供电的方式称为三相三线制供电方式；若从中点引出导线，作为另一个输出端，该导线称为中性线，也称为零线（或地线），采用 3 根相线与中性线一起的供电方式称为三相四线制供电方式。

如图 2-21 所示，各相线与中性线之间的电压称为相电压。3 个相电压的有效值分别用  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  表示，统称  $U_P$ 。三相电压与三相对称电动势一样，是幅值相等、频率相同、相位互差  $120^\circ$  的三相对称电压。相线与相线之间的电压称为线电压。3 个线电压的有效值分别用  $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$  表示，统称  $U_L$ 。

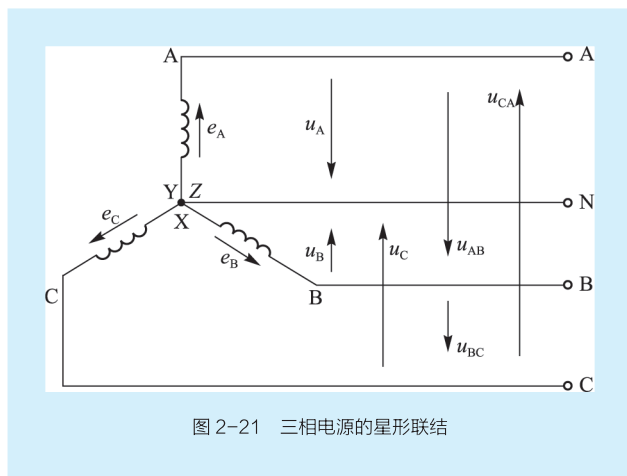


图 2-21 三相电源的星形联结

根据基尔霍夫电压定律, 可得  $u_{AB}=u_A - u_B, u_{BC}=u_B - u_C, u_{CA}=u_C - u_A$ 。将以上各式写成相量形式, 有  $\dot{U}_{AB}=\dot{U}_A - \dot{U}_B, \dot{U}_{BC}=\dot{U}_B - \dot{U}_C, \dot{U}_{CA}=\dot{U}_C - \dot{U}_A$ 。以此作出各相的相电压和线电压有效值的相量图, 如图 2-22 所示。

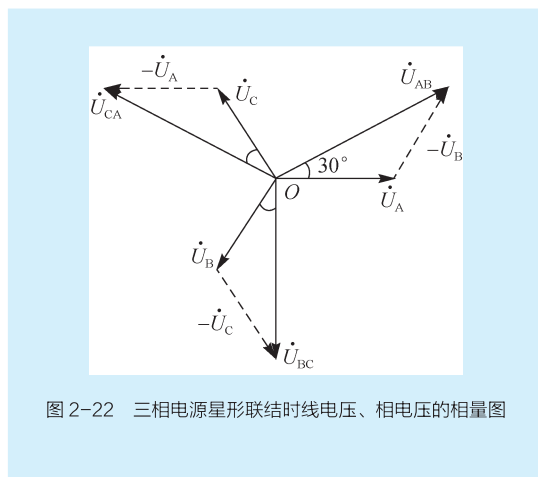


图 2-22 三相电源星形联结时线电压、相电压的相量图

由相量图可得出以下结论:

- (1) 3 个线电压是幅值相等、频率相同、相位互差  $120^\circ$  的三相对称电压。
- (2) 线电压超前于对应的相电压  $30^\circ$ 。
- (3) 线电压的数值是相电压数值的  $\sqrt{3}$  倍, 即  $U_L = \sqrt{3}U_p$ 。

若电力系统的供电电压为 380/220 V, 则说明供电方式为三相四线制, 其中线电压为 380 V, 相电压为 220 V。通常情况下所说的电力系统电压指的是线电压。

三相电源的 3 个绕组的首、尾依次相连, 接成一个闭合三角形, 这种接法称为三角形联结 ( $\Delta$  联结)。三相发电机的绕组极少采用三角形联结, 此处不进行更多介绍。

## 二、三相负载的联结

三相电路中的三相负载可分为对称三相负载和不对称三相负载。各相负载的大小和性质完全相



视频  
三相负载的  
联结

同，即 3 个单相负载的阻抗及幅角相等时，称为对称三相负载，如三相电动机、三相变压器等。各相负载不相同的称为不对称三相负载，如三相照明电路中的负载。

在三相电路中，负载有星形（Y）和三角形（Δ）两种联结方式。

## 1. 三相负载的星形（Y）联结

### 1) 连接方法

图 2-23 所示为三相负载的星形联结。从图中可以看出，星形联结方式中各相负载的末端连在一起接到三相电源的中性线上，各相负载的首端分别接到三相交流电源的 3 根相线上。

### 2) 电路特点

负载星形联结时，每相负载两端的电压称为负载的相电压。流过每一相负载的电流称为相电流，用符号  $I_P$  表示；流过每条相线的电流称为线电流，用符号  $I_L$  表示。

从图 2-23 可以看出，负载做星形连接并具有中性线时，三相交流电路中的每一相都是一个单相交流电路。由于每一相负载都串联在相线上，相线和负载通过的电流相同，所以各相电流等于各线电流，即  $I_L = I_P$ 。

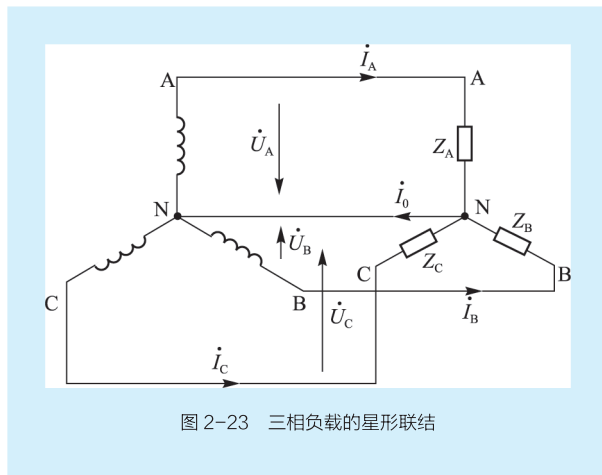


图 2-23 三相负载的星形联结

(1) 三相对称负载。当三相负载对称时，如果三相电源对称，三相负载电压也是对称的，且线电压超前相电压  $30^\circ$ ， $U_L = \sqrt{3}U_P$ ；三相负载电流也是对称的，各相电流相位互差  $120^\circ$ ，电流的有效值相等，即

$$I_A = I_B = I_C = I_P = \frac{U_P}{Z}$$

图 2-24 所示为三相对称负载星形联结的相电压和相电流的相量图。从图中可以看出  $i_A + i_B + i_C = 0$ 。若负载连接中性线，则有  $i_N = i_A + i_B + i_C = 0$ 。可见，三相负载对称时，中性线上没有电流流过，因此，负载与电源间不需要连接中性线，可省略中性线。

(2) 三相不对称负载。三相负载不对称时，如果三相电源对称，则三相负载的线电压是对称的。若三相负载不连接中性线，则三相负载的相电压是不对称的，可能出现某相负载的相电压高于电源相电压，而其他相负载的相电压低于电源相电压的现象。当三相负载严重不对称时，某些相的负载可能因电压过低而无法正常工作，而其他相负载可能因电压过高而损坏，因此中性线不可省略。



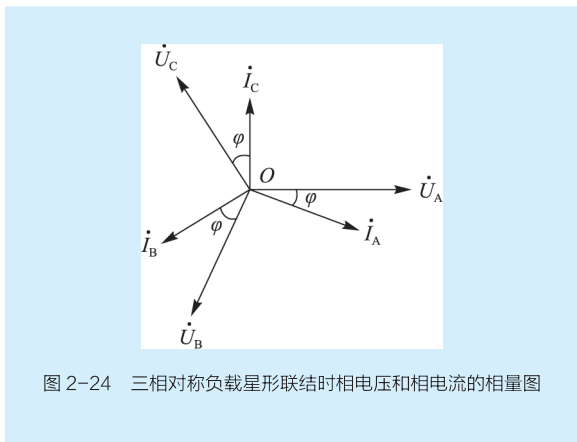


图 2-24 三相对称负载星形联结时相电压和相电流的相量图

如果三相负载连接中性线，则三相负载的相电压恒等于电源的相电压，即三相负载的相电压是对称的。但此时三相负载电流是不对称的，所以中性线上有电流流过。

从以上分析可知，当三相负载不对称时，为使各相负载的相电压相等，应连接中性线。中性线的作用就是保证各相负载的相电压相等且等于电源的相电压，使各相负载都能正常工作。为了确保中性线的作用，工程上规定，中性线上不允许安装保险丝或开关，以防止断路时引起负载不能正常工作。

### 2. 三相负载的三角形联结

三相负载进行三角形联结时，就是将三相负载首、尾相连，形成一个闭合回路，三相负载之间的 3 个连接点分别接到三相电源的端线上，具体连接如图 2-25 所示。从图中可以看出，负载上的相电压与线电压相等，且等于电源的线电压，即  $U_L = U_p$ 。

如果三相电源对称，则三相负载的线电压和相电压都是对称的。但是，负载的线电流与相电流不相等。各相负载的相电流分别为  $i_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_A}$ ,  $i_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_B}$ ,  $i_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_C}$ 。如果三相负载对称，则三相负载的相电流也是对称的。根据基尔霍夫电流定律，可得各相负载的线电流为  $\dot{I}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA}$ ,  $\dot{I}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB}$ ,  $\dot{I}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC}$ 。以此可作出三相负载对称时线电流和相电流的相量图，如图 2-26 所示。

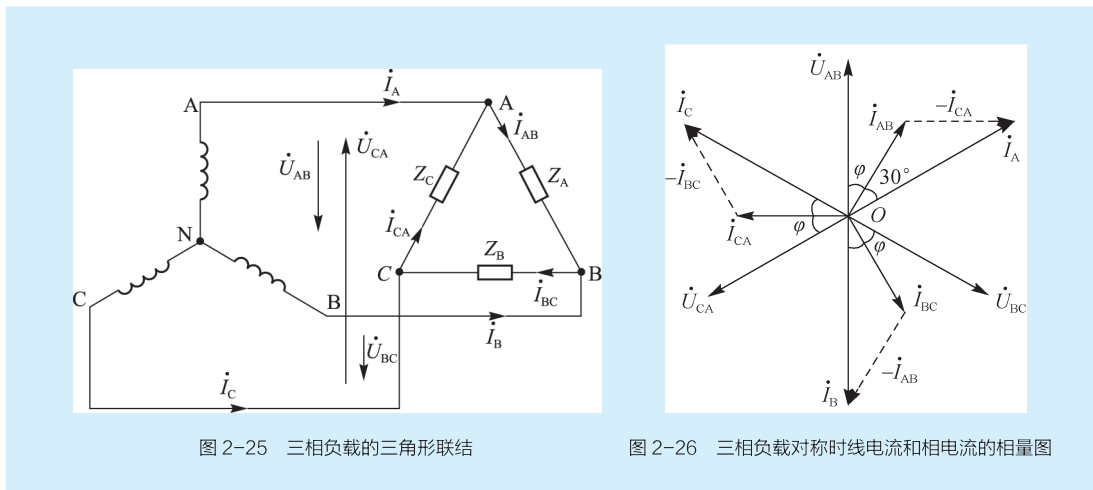


图 2-25 三相负载的三角形联结

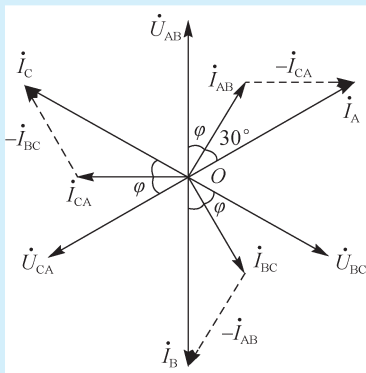


图 2-26 三相负载对称时线电流和相电流的相量图

分析相电流及线电流的相量图，可得出以下结论。

- (1) 3 个线电流是幅值相等、频率相同、相位互差  $120^\circ$  的三相对称电流。
- (2) 线电流的相位滞后对应的相电流  $30^\circ$ ，即  $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$  的相位分别比  $\dot{I}_{AB}$ 、 $\dot{I}_{BC}$ 、 $\dot{I}_{CA}$  滞后  $30^\circ$ 。
- (3) 线电流的数值是对应的相电流的  $\sqrt{3}$  倍，即  $I_L = \sqrt{3}I_p$ 。

### 三、三相电功率

三相电路中各相负载的电功率计算与单相电路中负载电功率的计算方法相同。

三相电路中的总有功功率等于各相负载有功功率之和，即

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

式中的电压和电流为各相负载的相电压与相电流，功率因数角为相电压与对应相电流的相位差。当三相负载对称时，各相负载的有功功率相等，有

$$P = 3U_p I_p \cos \varphi$$

式中， $\varphi$  为每相负载的功率因数角。同理，当三相负载对称时，总的无功功率  $Q$  和视在功率  $S$  分别为

$$Q = 3U_p I_p \sin \varphi$$

$$S = 3U_p I_p$$

在三相交流电路中，测量线电压和线电流比测量相电压和相电流相对容易，三相负载的铭牌上标明的电压和电流值也是线电压与线电流的数值，因此，用线电压和线电流的数值计算负载的电功率比较方便。当三相负载星形联结时， $U_L = \sqrt{3}U_p$ ， $I_L = I_p$ ；当三相负载三角形联结时， $U_L = U_p$ ， $I_L = \sqrt{3}I_p$ 。由此可得三相功率与线电压和线电流的关系如下：

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3}U_L I_L$$

## 【实训】日光灯电路

### 一、实验目的

- (1) 了解日光灯电路的组成。
- (2) 掌握日光灯电路的工作原理和接线方法。

### 二、实验仪器与设备

- (1) 单相交流电源（220 V）。
- (2) 交流电压表。

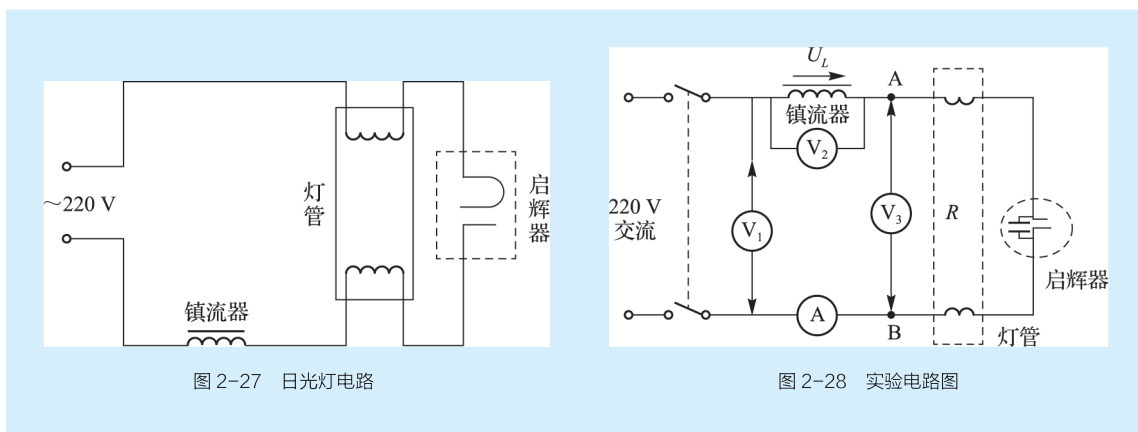
- (3) 交流电流表。
- (4) 日光灯一套(镇流器 220 V/20 W、启辉器、日光灯管 20 W)。

### 三、日光灯电路原理

如图 2-27 所示,日光灯电路由灯管、镇流器和启辉器三部分组成。当接通 220 V 交流电源时,电源电压通过镇流器施加于启辉器的两个电极上,使极间气体导电,可动电极(双金属片)与固定电极接触。由于两个电极接触不再产生热量,双金属片冷却复原使电路突然断开,此时镇流器产生较高的自感电动势经回路施加于灯管两端而使灯管迅速起燃,电流经镇流器、灯管而流通。灯管起燃后,两端电压较低,启辉器不工作,日光灯正常工作。

### 四、实验步骤

- (1) 先切断实验台的总供电电源开关,按照图 2-28 连接电路。



- (2) 实验电路接线完成后,经过实验指导教师检查无误方可接通电源。
- (3) 使用交流电压表测量电路端电压  $U_1$ 、镇流器两端电压  $U_2$ 、日光灯灯管电压  $U_3$ ,用交流电流表测量电路的电流  $I$ ,并将测量值填入表 2-1。

表 2-1 日光灯电路的测量

项目	$U_1/V$	$U_2/V$	$U_3/V$	$I/A$
测量值				

### 五、实验思考题

- (1) 在日常生活中,当日光灯上缺少启辉器时,人们常用一根导线将启辉器的两端短接一下,然后迅速断开,使日光灯点亮,或用一只启辉器去点亮多只同类型的日光灯,这是为什么?
- (2) 从实验测量数据中是否可以得到  $U_1=U_2+U_3$ ? 如果等式不成立,为什么?

## 练习与思考

1. 已知某电路电流的瞬时表达式为  $i=14.14\sin(314t+\pi/6)\text{A}$ ，求：该电流的最大值、有效值；周期、频率；初相角。当  $t=0$  和  $t=0.1\text{s}$  时电流是多少？画出波形图。
2. 在三相交流电路中，各负载分别为  $R_A=5\ \Omega$ ， $R_B=10\ \Omega$ ， $R_C=15\ \Omega$ ，各相电压为  $120\text{V}$ ，求流过三相四线制星形联结电路的各线电流。
3. 三相交流电与单相交流电有什么区别？
4. 相电压和线电压有什么区别？
5. 简述三相交流电的产生。