

Electrotechnics

电工学 (电工技术)

教学课件

# 第5章 三相电路



中国矿业大学 研制



高等教育出版社

高等教育音像出版社

出版

# 第5章 三相电路

5.1 三相电压

5.2 负载星形联结的三相电路

5.3 负载三角形联结的三相电路

5.4 三相功率





## 第5章 三相电路

### 本章要求:

1. 搞清对称三相负载Y和 $\Delta$ 联结时相线电压、相线电流关系;
2. 掌握三相四线制供电系统中单相及三相负载的正确联接方法, 理解中线的作用;
3. 掌握对称三相电路电压、电流及功率的计算。

## 5.1 三相电压

### 1. 三相电压的产生

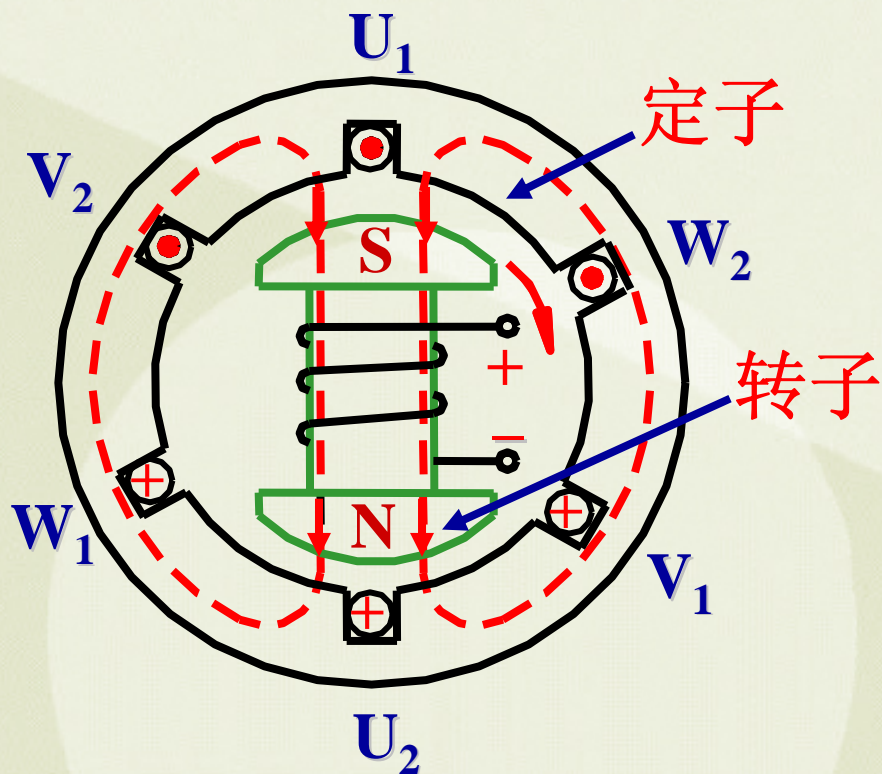


图5.1.1 三相交流发电机示意图

工作原理：动磁生电

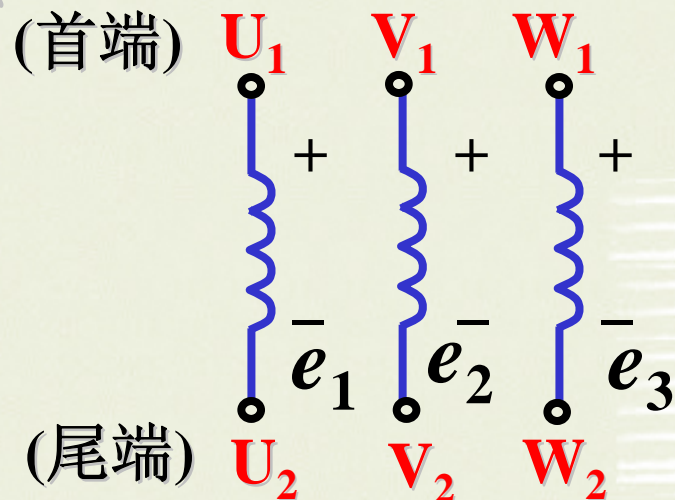


图5.1.2 三相绕组示意图

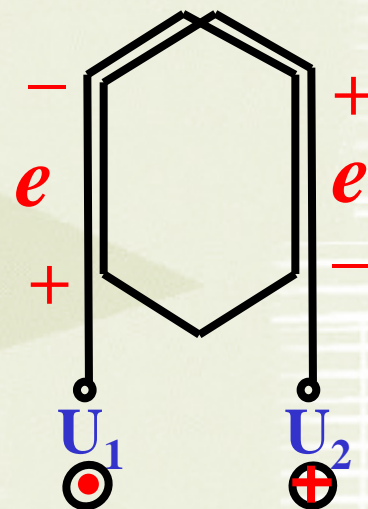


图5.1.3 每相电枢绕组



发电机结构 { 定子 { 铁心 (作为导磁路径)  
三相绕组 { 匝数相同  
空间排列互差120°  
转子: 直流励磁的电磁铁

### 三相电压瞬时表示式

$$u_1 = E_m \sin \omega t$$

$$u_2 = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_3 = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

### 相量表示

$$\dot{U}_1 = U \angle 0^\circ = U$$

$$\dot{U}_2 = U \angle -120^\circ = U \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$\dot{U}_3 = U \angle +120^\circ = U \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

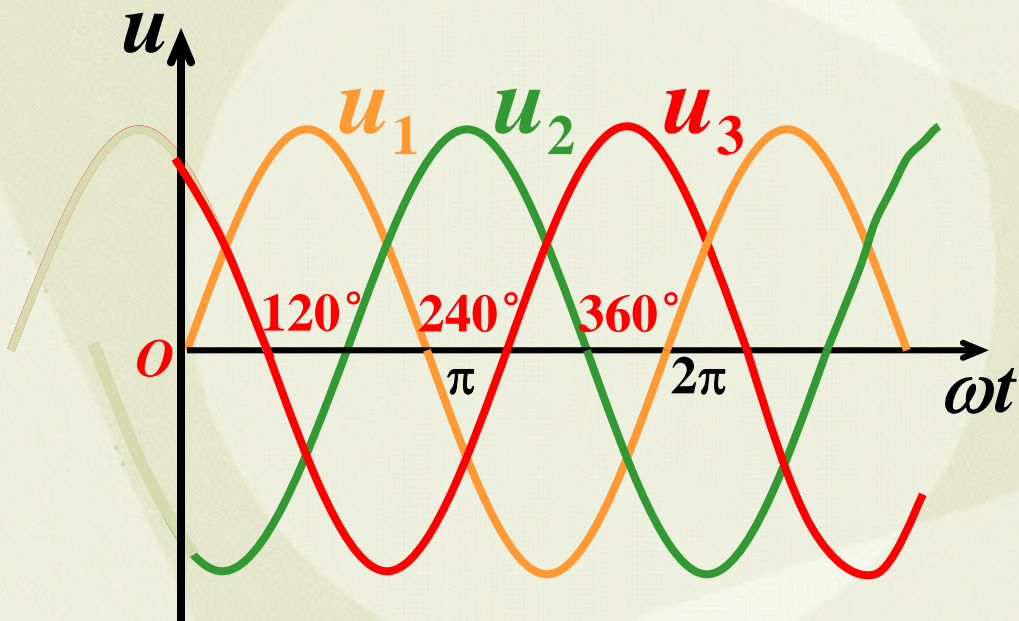
## 三相电压瞬时表示式

$$u_1 = U_m \sin \omega t$$

$$u_2 = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_3 = U_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

## 波形图



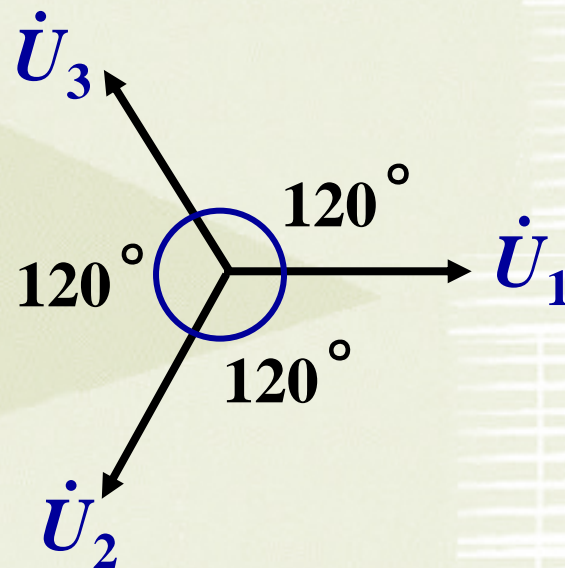
## 相量表示

$$\dot{U}_1 = U \angle 0^\circ = U$$

$$\dot{U}_2 = U \angle -120^\circ$$

$$\dot{U}_3 = U \angle +120^\circ$$

## 相量图







三个正弦交流电动势满足以下特征

最大值相等

频率相同

相位互差 $120^\circ$

称为对称三相电动势

对称三相电动势的瞬时值之和为 0

$$\text{即: } u_1 + u_2 + u_3 = 0$$

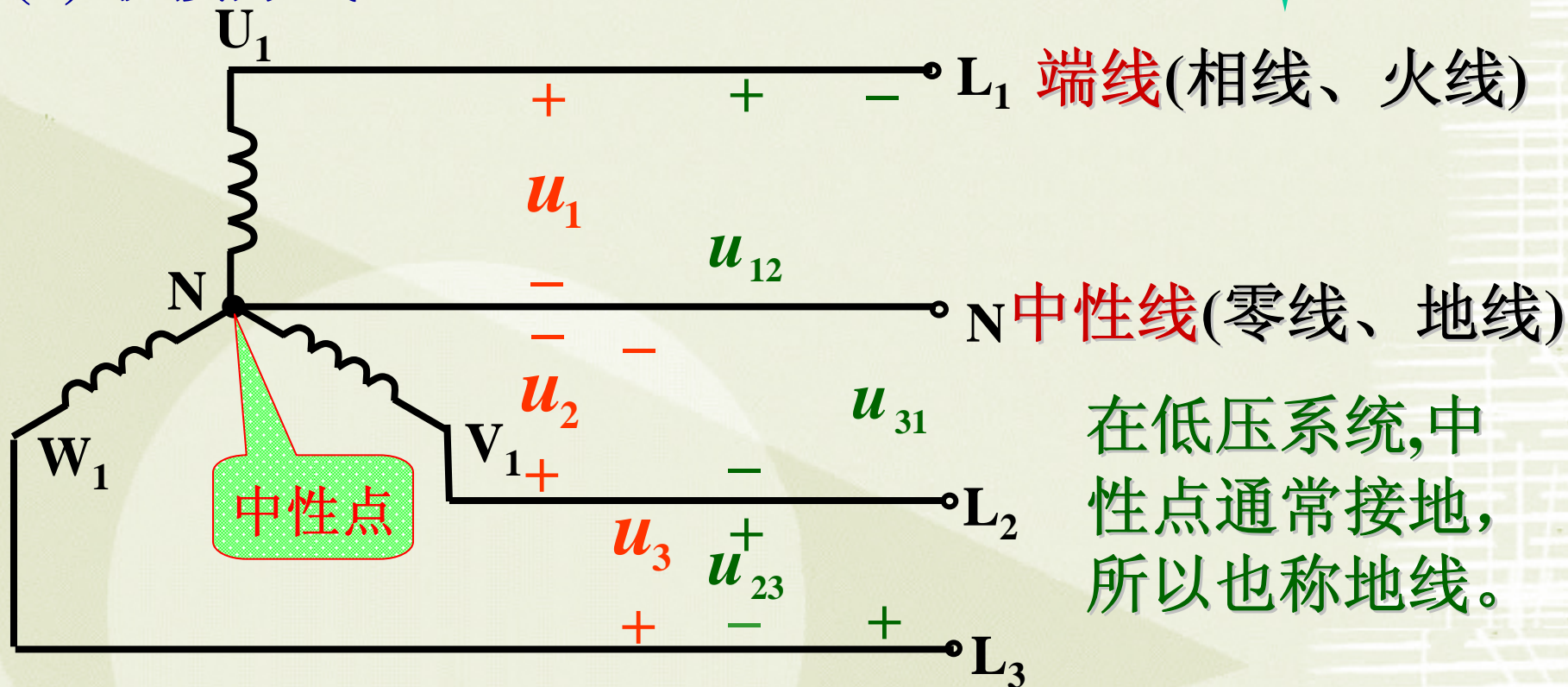
$$\text{或 } \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$$

三相交流电到达正最大值的顺序称为相序。

供电系统三相交流电的相序为  $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$

## 2. 三相电源的星形联结

### (1) 联接方式



在低压系统,中性点通常接地,所以也称地线。

**相电压:** 端线与中性线间 (发电机每相绕组) 的电压

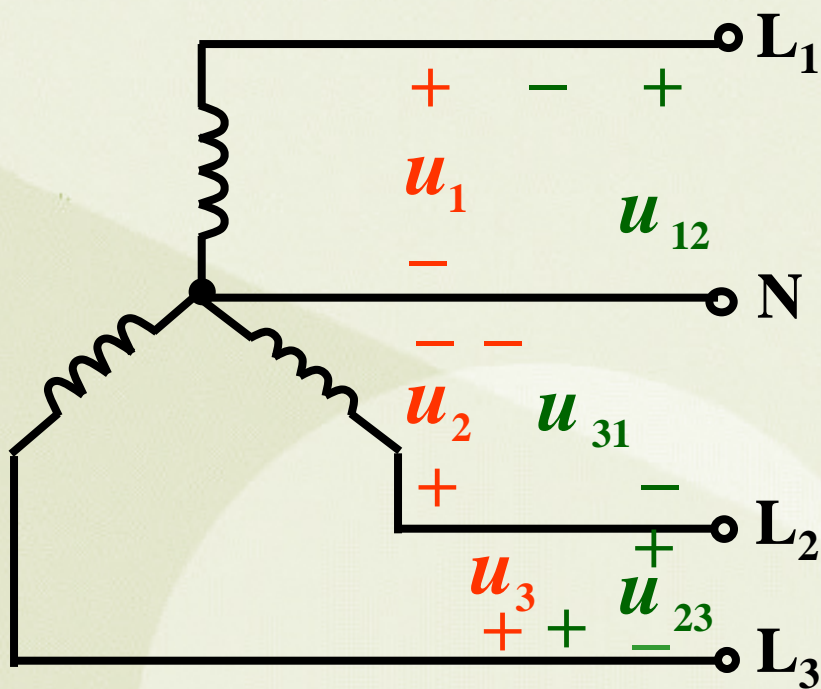
$$\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3 \quad U_p$$

**线电压:** 端线与端线间的电压

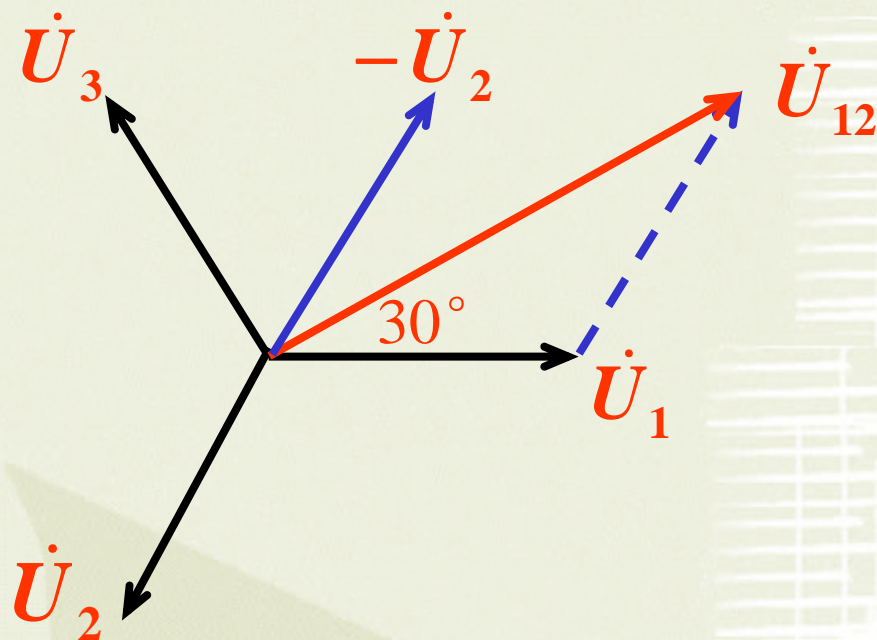
$$\dot{U}_{12}, \dot{U}_{23}, \dot{U}_{31} \quad U_l$$



## (2) 线电压与相电压的关系



相量图



根据KVL定律

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$$

$$\dot{U}_{23} = \dot{U}_2 - \dot{U}_3$$

$$\dot{U}_{31} = \dot{U}_3 - \dot{U}_1$$

由相量图可得

$$\dot{U}_{12} = \sqrt{3}\dot{U}_1 \angle 30^\circ$$

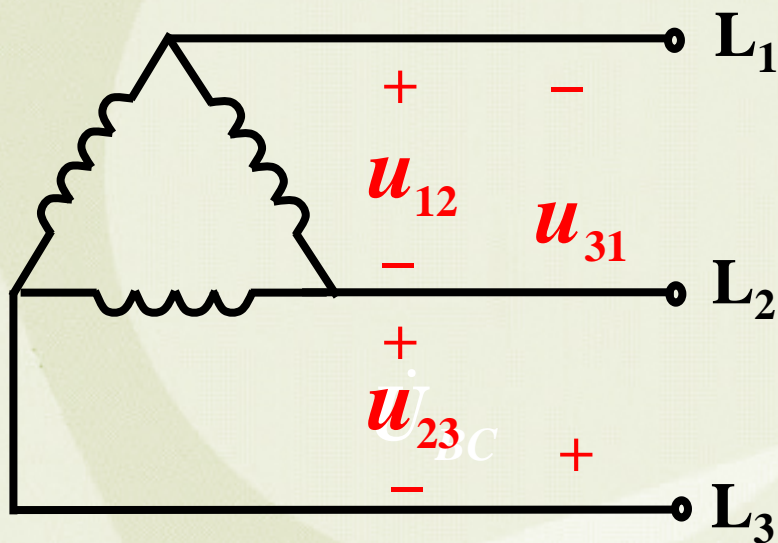
## 同理

$$\dot{U}_{23} = \sqrt{3}\dot{U}_2 \angle 30^\circ$$

$$\dot{U}_{31} = \sqrt{3}\dot{U}_3 \angle 30^\circ$$

结论：电源 Y 形联结时，线电压  $U_l = \sqrt{3}U_p$ ，且超前相应的相电压  $30^\circ$ ，三相线电压也是对称的。

## 3. 三相电源的三角形联结



结论：电源  $\Delta$  形联结时  
线电压  $U_l =$  相电压  $U_p$



## 5.2 负载星形联结的三相电路

### 1. 三相负载

分类

负载

三相负载：需三相电源同时供电  
三相电动机等

单相负载：只需一相电源供电  
照明负载、家用电器

三相负载

对称三相负载： $Z_1=Z_2=Z_3$

如三相电动机

不对称三相负载：不满足  $Z_1=Z_2=Z_3$

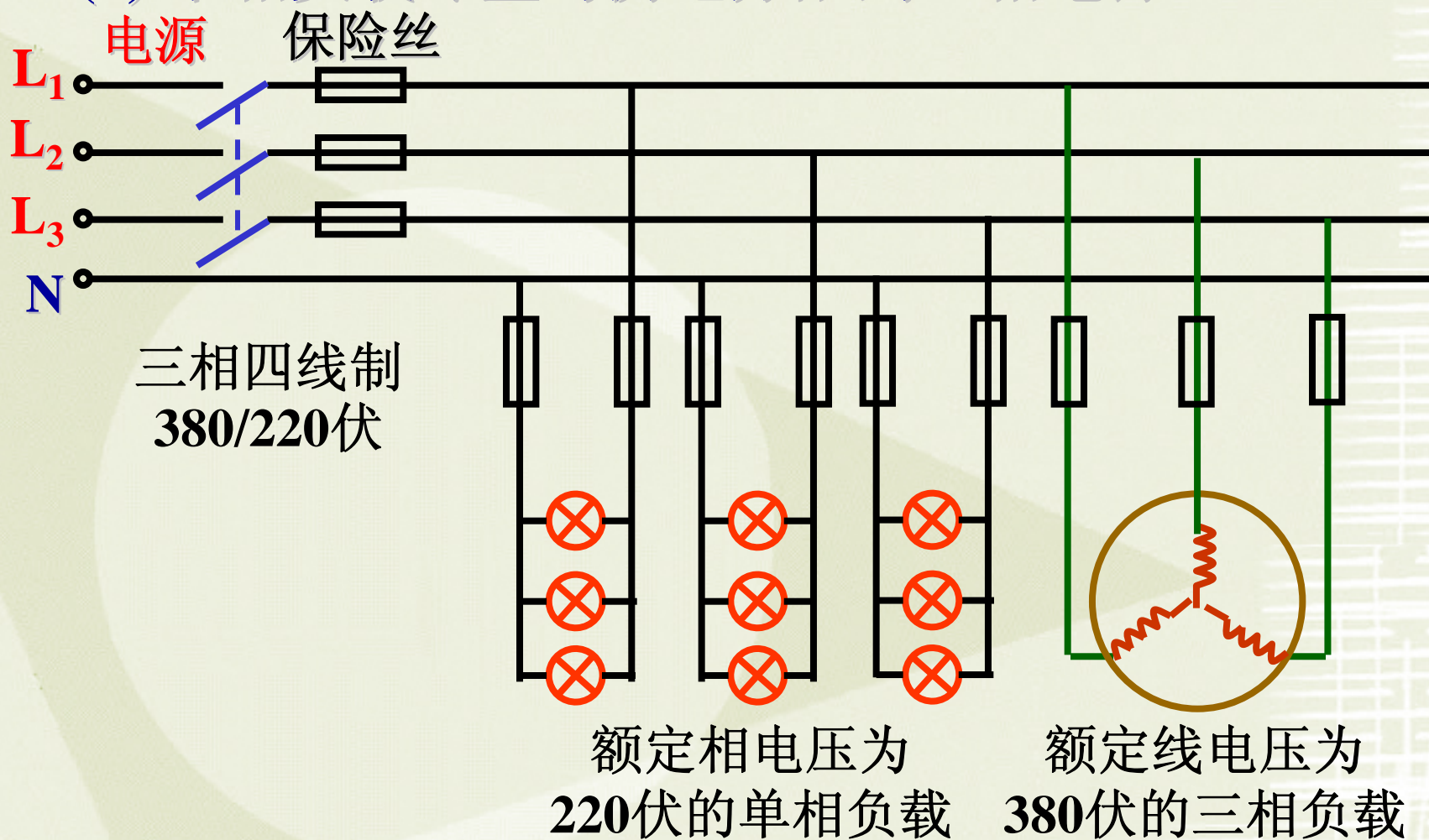
如由单相负载组成的三相负载

### 三相负载的联接

三相负载也有 Y 和  $\Delta$  两种接法，至于采用哪种方法，要根据负载的额定电压和电源电压确定。

## 三相负载连接原则

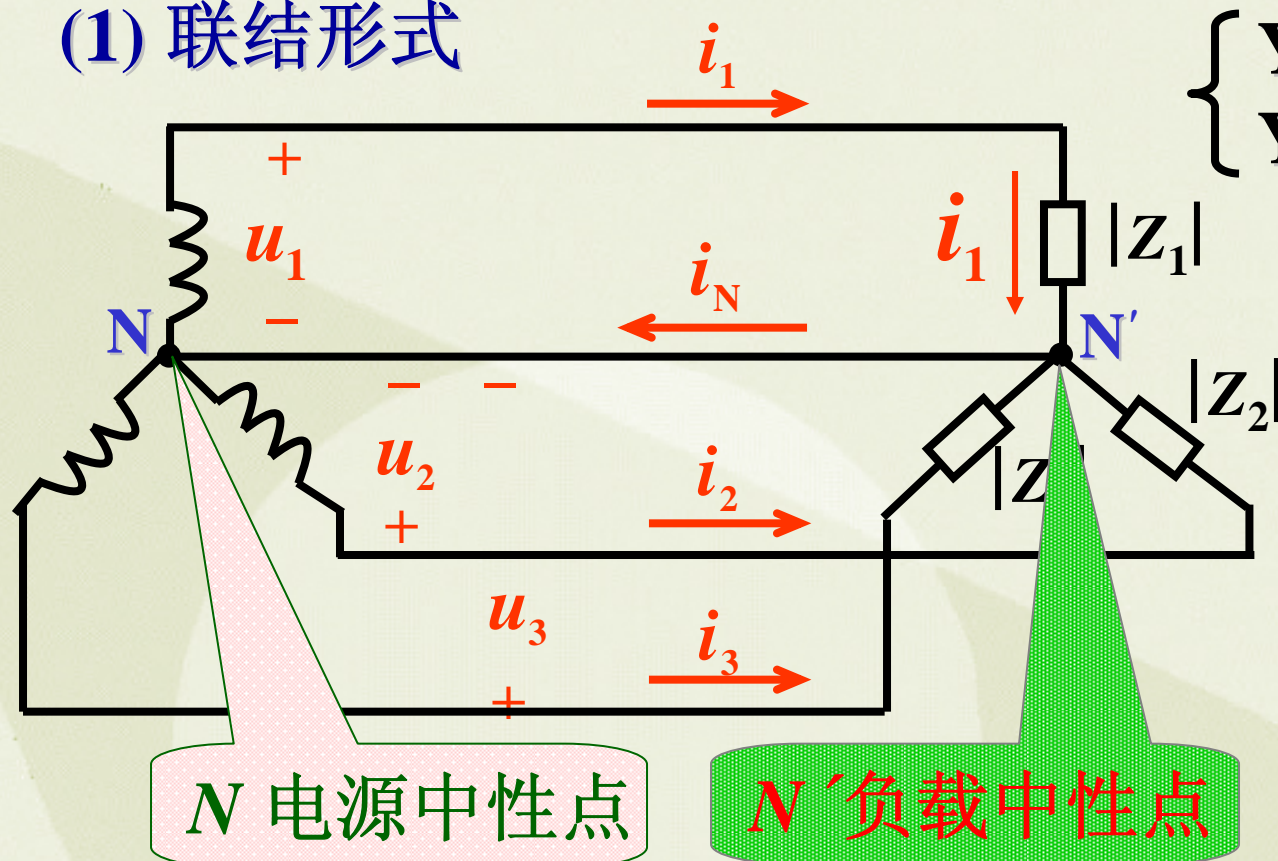
- (1) 电源提供的电压=负载的额定电压；
- (2) 单相负载尽量均衡地分配到三相电源上。





## 2. 负载星形联结的三相电路

### (1) 联结形式



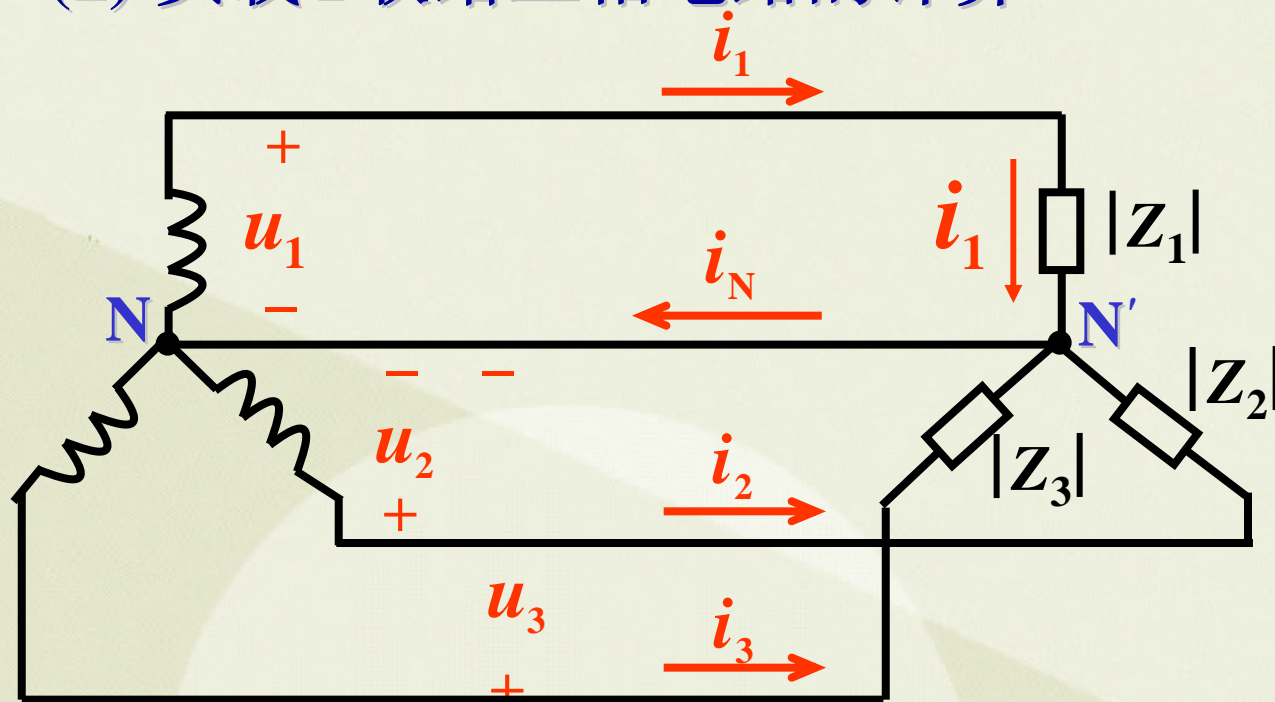
$\left\{ \begin{array}{l} Y: \text{三相三线制} \\ Y_0: \text{三相四线制} \end{array} \right.$

结论：  
负载 Y 联结时，线电流等于相电流。

相电流：流过每相负载的电流

线电流：流过端线的电流  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$

## (2) 负载Y联结三相电路的计算



Y 联结时:

$$U_l = \sqrt{3}U_P$$

$$I_l = I_P$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_3}{Z_3}$$

1) 负载端的线电压 = 电源线电压

2) 负载的相电压 = 电源相电压

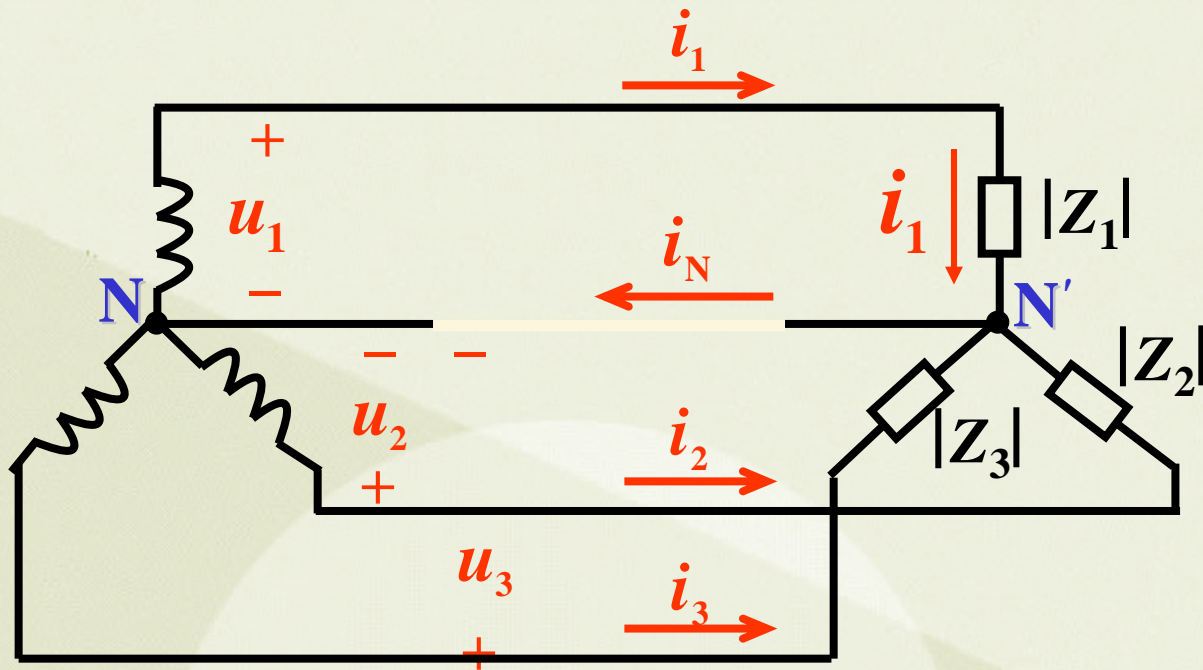
3) 线电流 = 相电流

4) 中线电流  $\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$

负载 Y 联结带中性线时, 可将各相分别看作单相电路计算



### (3) 对称负载Y 联结三相电路的计算



负载对称时，  
只需计算一相电  
流，其它两相电  
流可根据对称性  
直接写出。

如：

$$\dot{I}_1 = 10 \angle 30^\circ \text{ A}$$

可知：

$$\dot{I}_2 = 10 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = 10 \angle +150^\circ \text{ A}$$

因为三相电压对称，且  $Z_A = Z_B = Z_C$

所以负载对称时，三相电流也对称。

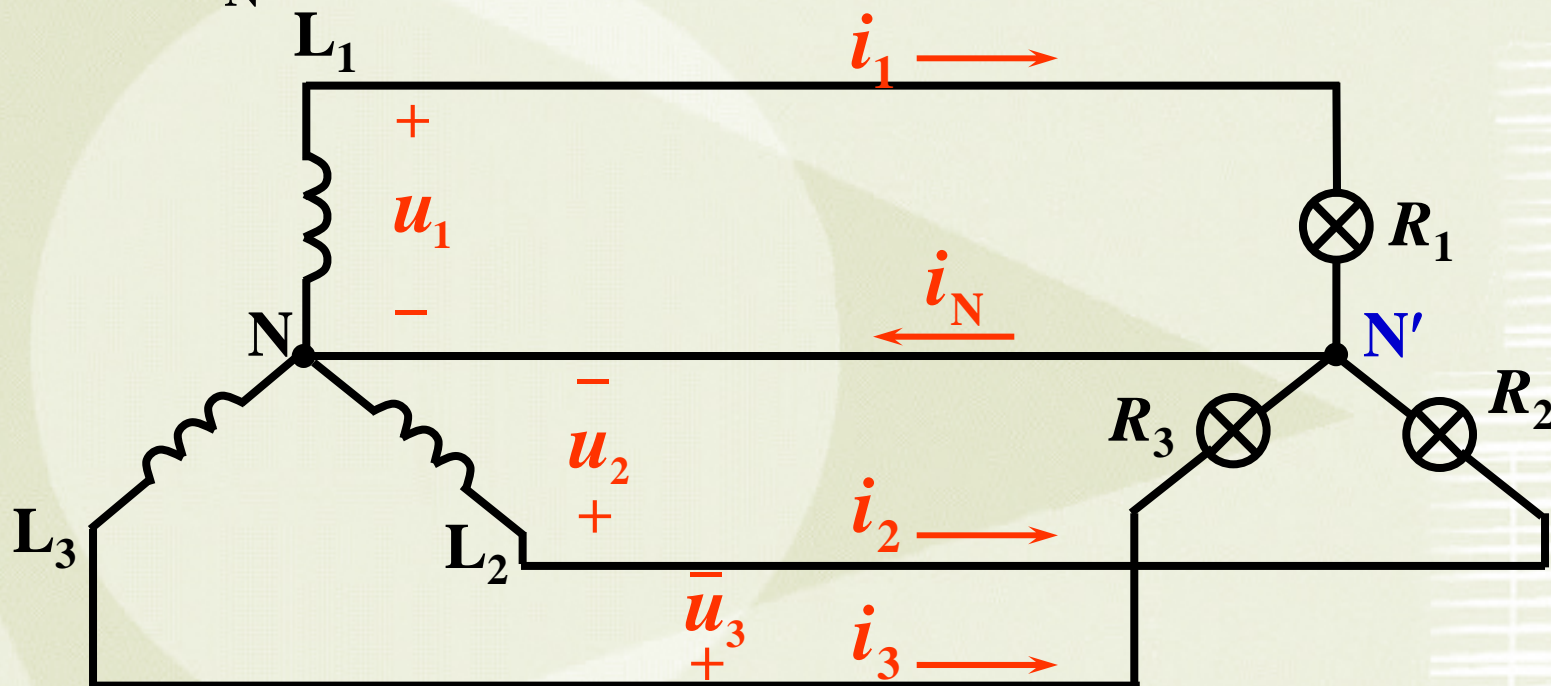
中线电流  $\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$

负载对称时，中性线无电流，  
可省掉中性线。

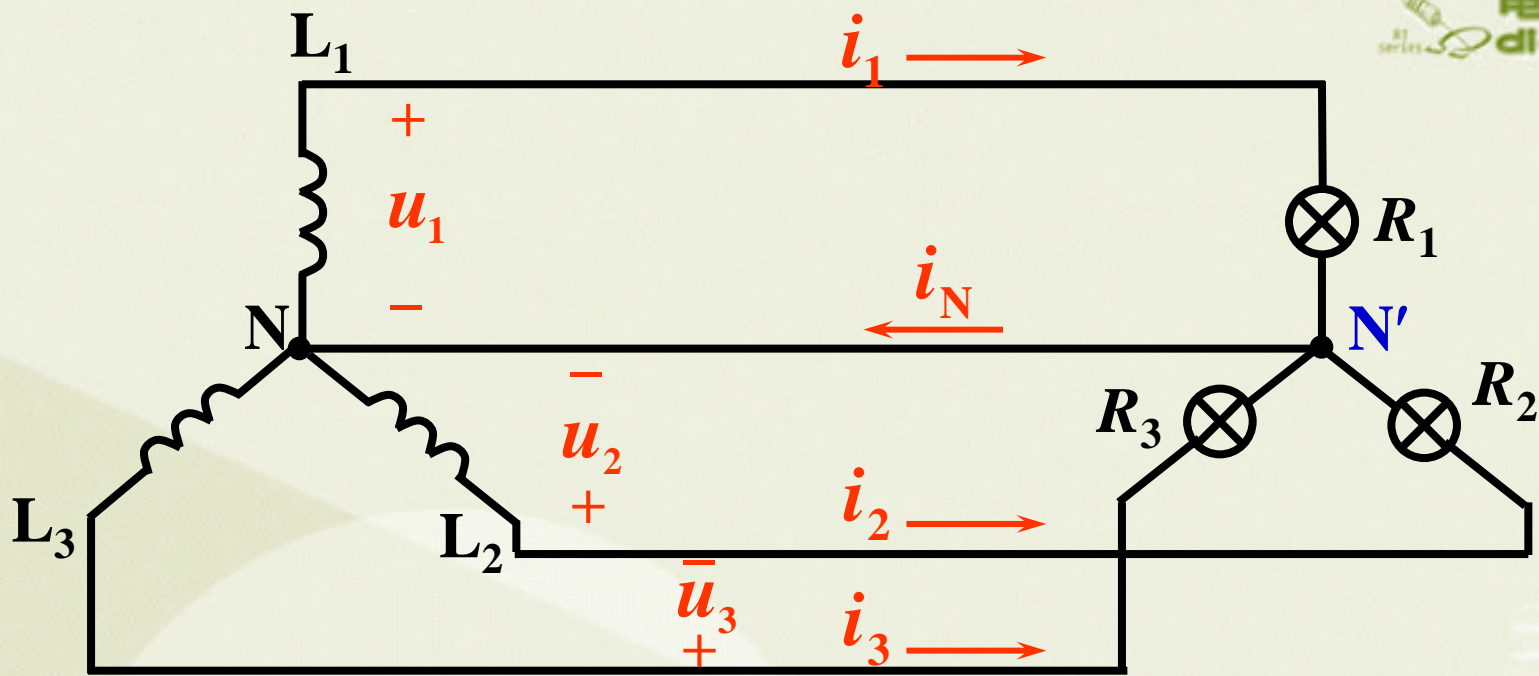
负载对称无中性线时

$$U_l = \sqrt{3} U_P$$

**例1:** 一星形联结的三相电路，电源电压对称。设电源线电压  $u_{12} = 380\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ)\text{V}$ 。负载为电灯组，若  $R_1=R_2=R_3=5\Omega$ ，求线电流及中性线电流  $I_N$ ；若  $R_1=5\Omega$ ， $R_2=10\Omega$ ， $R_3=20\Omega$ ，求线电流及中性线电流  $I_N$ 。







解：已知：  $\dot{U}_{12} = 380\angle 30^\circ \text{ V}$        $\dot{U}_1 = 220\angle 0^\circ \text{ V}$

(1) 线电流  $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1} = \frac{220\angle 0^\circ}{5} \text{ A} = 44\angle 0^\circ \text{ A}$   
三相对称

$$\dot{I}_2 = 44\angle -120^\circ \text{ A} \quad \dot{I}_3 = 44\angle +120^\circ \text{ A}$$

中性线电流  $\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$

(2) 三相负载不对称 ( $R_1=5\Omega$ 、 $R_2=10\Omega$ 、 $R_3=20\Omega$ )

分别计算各线电流

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1} = \frac{220\angle 0^\circ}{5} \text{ A} = 44\angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{R_2} = \frac{220\angle -120^\circ}{10} \text{ A} = 22\angle -120^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_3}{R_3} = \frac{220\angle +120^\circ}{20} \text{ A} = 11\angle +120^\circ \text{ A}$$

中性线电流

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 44\angle 0^\circ \text{ A} + 22\angle -120^\circ \text{ A} + 11\angle +120^\circ \text{ A} \\ &= 29\angle -19^\circ \text{ A} \end{aligned}$$



## 例2：照明系统故障分析

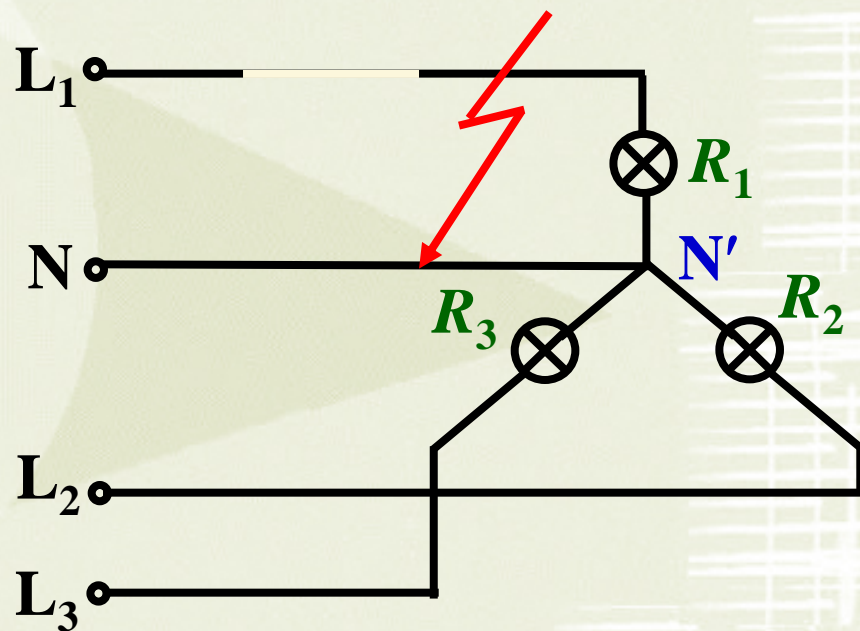
在上例中，试分析下列情况

- (1)  $L_1$ 相短路：中性线未断时，求各相负载电压；  
中性线断开时，求各相负载电压。
- (2)  $L_1$ 相断路：中性线未断时，求各相负载电压；  
中性线断开时，求各相负载电压。

解：(1) A相短路

1) 中性线未断

此时  $L_1$  相短路电流很大，将  $L_1$  相熔断丝熔断，而  $L_2$  相和  $L_3$  相未受影响，其相电压仍为 220V，正常工作。



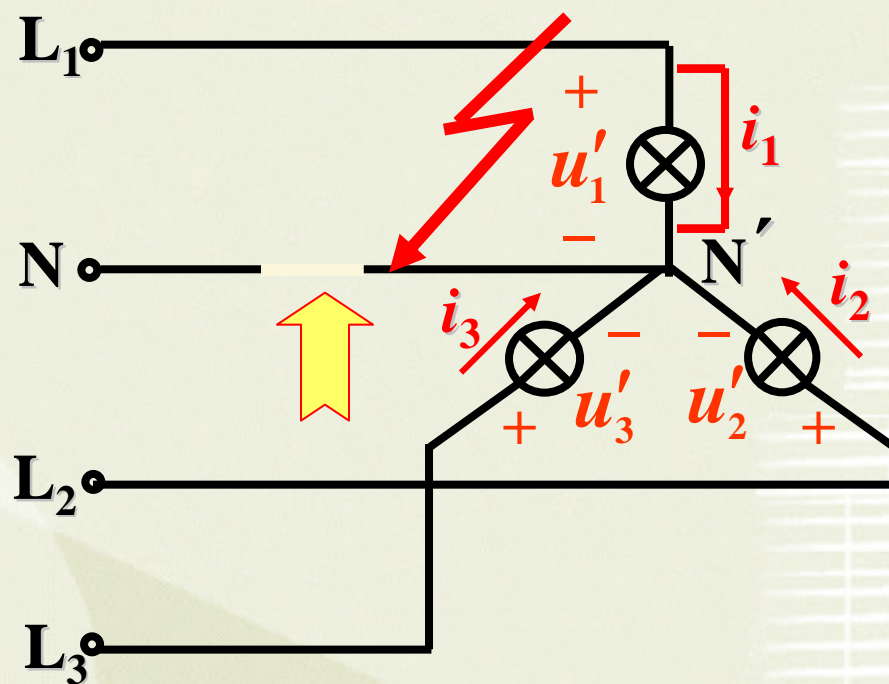
## 2) $L_1$ 相短路, 中性线断开时,

此时负载中性点 $N'$   
即为 $L_1$ , 因此负载各  
相电压为

$$U'_1 = 0, \quad U'_1 = 0$$

$$U'_2 = U'_{12}, \quad U'_2 = 380 \text{ V}$$

$$U'_3 = U'_{31}, \quad U'_3 = 380 \text{ V}$$



此情况下,  $L_2$ 相和 $L_3$ 相的电灯组由于承受电压上所加的电压都超过额定电压(220V), 这是不允许的。



## (2) $L_1$ 相断路

### 1) 中性线未断

$L_2$ 、 $L_3$ 相灯仍承受220V电压，正常工作。

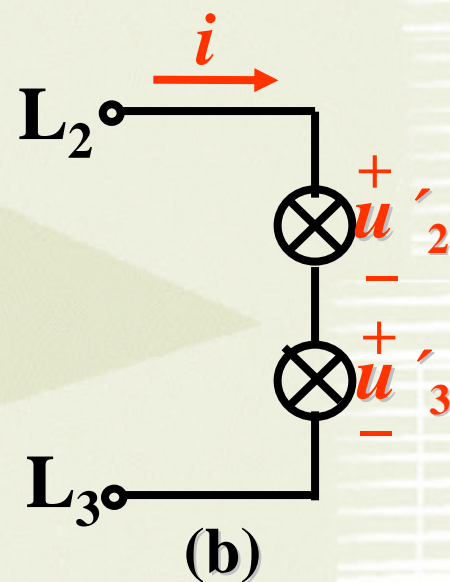
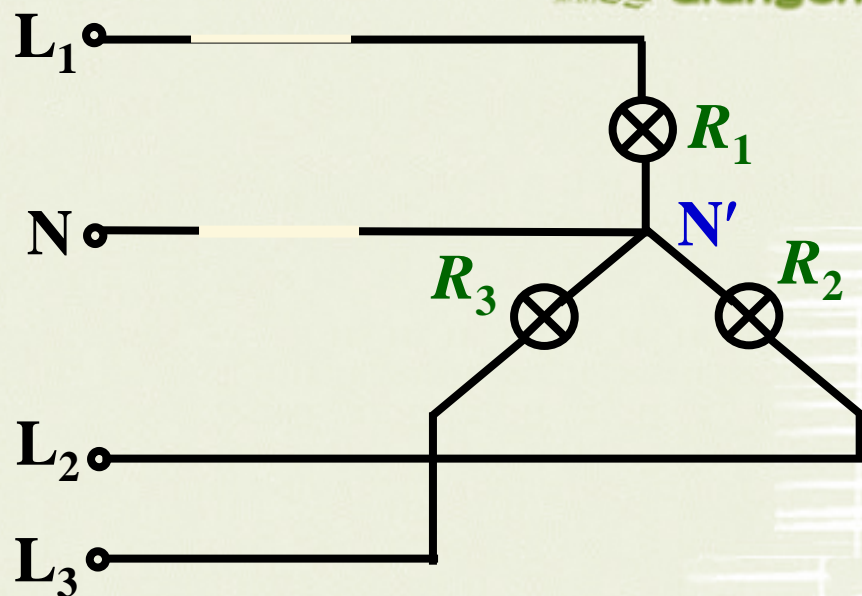
### 2) 中性线断开

变为单相电路，如图(b)所示，由图可求得

$$I = \frac{U_{23}}{R_2 + R_3} = \frac{380}{10 + 20} = 12.7 \text{ A}$$

$$U'_2 = IR_2 = 12.7 \times 10 = 127 \text{ V}$$

$$U'_3 = IR_3 = 12.7 \times 20 = 254 \text{ V}$$



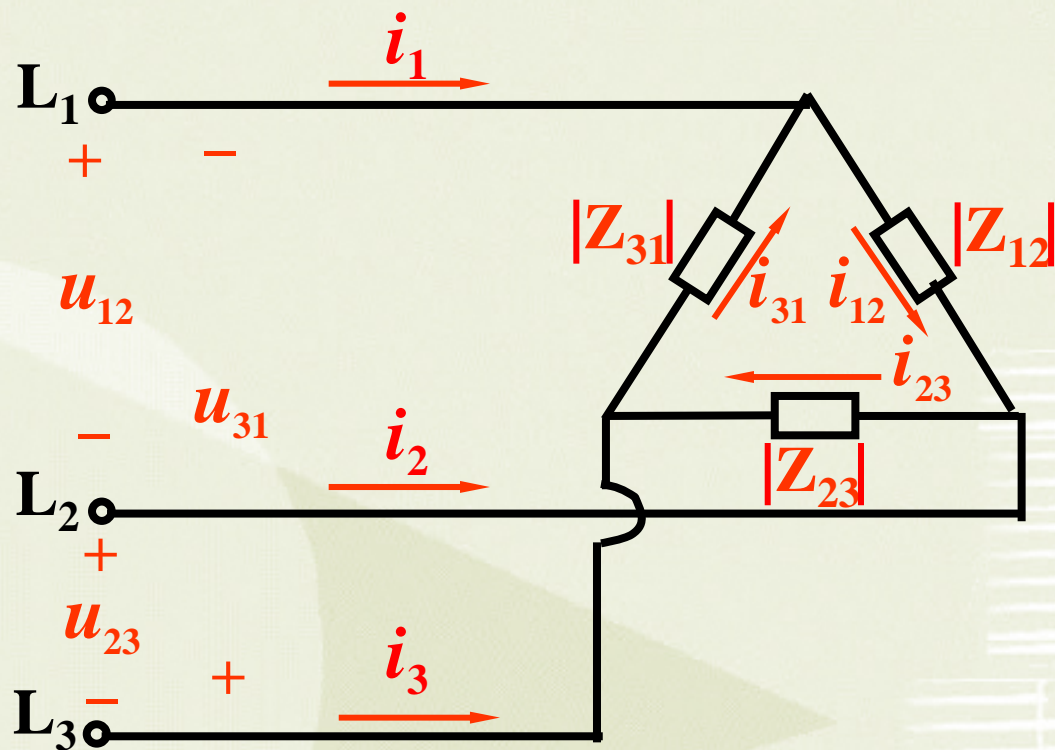
## 结论

- (1) 不对称负载Y联结又未接中性线时，负载相电压不再对称，且负载电阻越大，负载承受的电压越高。
- (2) 中线的的作用：保证星形联结三相不对称负载的相电压对称。
- (3) 照明负载三相不对称，必须采用三相四线制供电方式，且中性线（指干线）内不允许接熔断器或刀闸开关。



## 5.3 负载三角形联结的三相电路

### 1. 联结形式



相电流：流过每相负载的电流  $\dot{I}_{12}$ 、 $\dot{I}_{23}$ 、 $\dot{I}_{31}$

线电流：流过端线的电流  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$

## 2. 分析计算

### (1) 负载相电压=电源线电压

$$\text{即: } U_P = U_l$$

一般电源线电压对称，  
因此不论负载是否对称，  
负载相电压始终对称，即

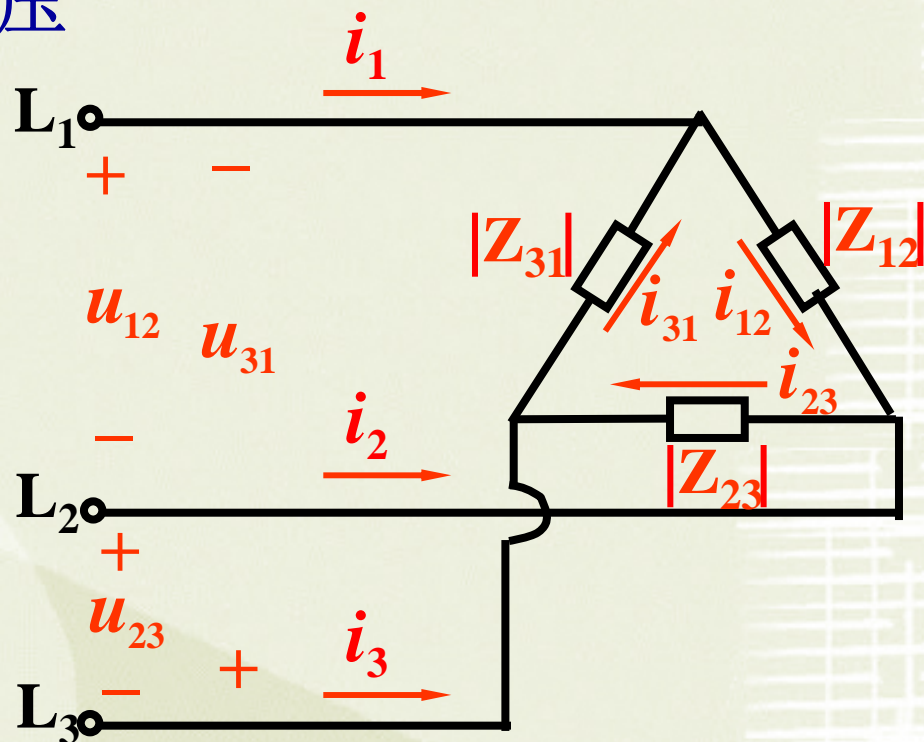
$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_l = U_P$$

### (2) 相电流

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_{12}}$$

$$\dot{I}_{23} = \frac{\dot{U}_{23}}{Z_{23}}$$

$$\dot{I}_{31} = \frac{\dot{U}_{31}}{Z_{31}}$$



相电流:  $\dot{I}_{12}$ 、 $\dot{I}_{23}$ 、 $\dot{I}_{31}$

线电流:  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$

**线电流不等于相电流**



### (3) 线电流

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{12} - \dot{I}_{31}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{23} - \dot{I}_{12}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{31} - \dot{I}_{23}$$

负载对称时, 相电流对称, 即

$$I_{12} = I_{23} = I_{31} = I_P = \frac{U_P}{|Z|}$$

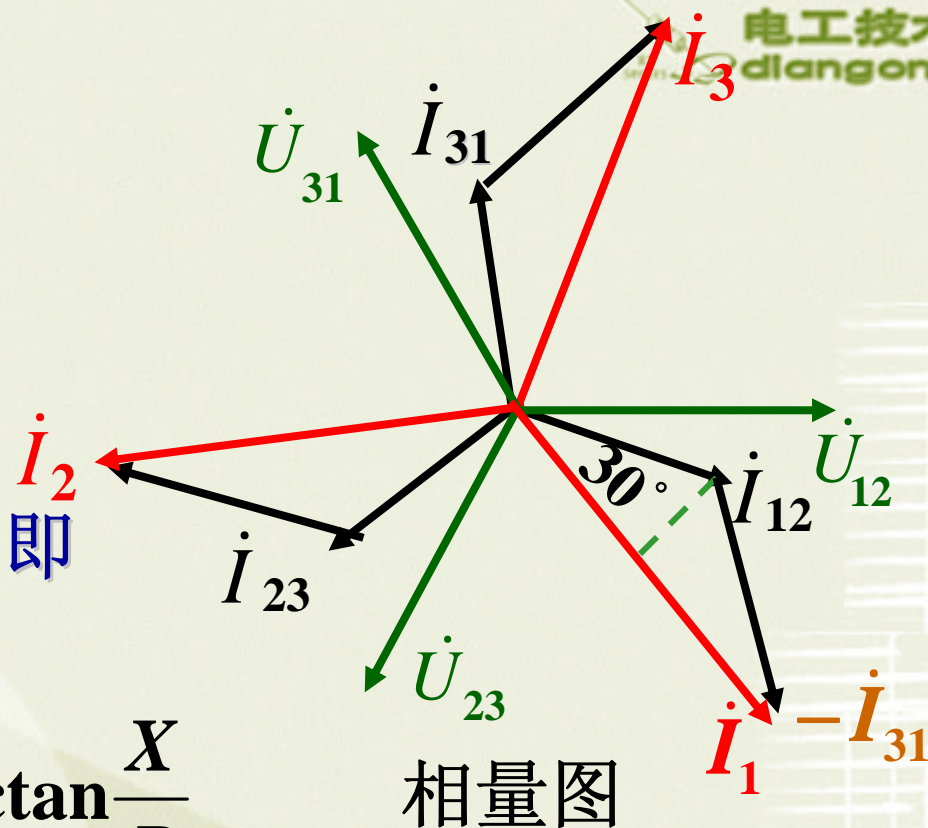
$$\varphi_{12} = \varphi_{23} = \varphi_{31} = \varphi = \arctan \frac{X}{R}$$

为此线电流也对称, 即  $I_1 = I_2 = I_3 = I_l$ 。

由相量图可求得

$$I_l = 2I_P \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_P$$

线电流比相应的相电流滞后  $30^\circ$ 。



结论: 对称负载  $\Delta$  联接时  
线电流  $I_l = \sqrt{3}I_P$  (相电流),  
且落后相应的相电流  $30^\circ$ 。



三相电动机绕组可以联结成星形，也可以联结成三角形，而照明负载一般都联结成星形(具有中性线)。

## 三相负载的联接原则

应使加于每相负载上的电压等于其额定电压，而与电源的联接方式无关。

负载的额定电压 = 电源的线电压

负载的额定电压 =  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  电源线电压

应作  $\Delta$  联结

应作 Y 联结



## 5.4 三相功率

无论负载为 Y 或  $\Delta$  联结，每相有功功率都应为

$$P_p = U_p I_p \cos \varphi_p$$

当负载对称时：  $P = 3U_p I_p \cos \varphi_p$

对称负载 Y 联结时：  $U_p = \frac{1}{\sqrt{3}} U_l, \quad I_p = I_l$

对称负载  $\Delta$  联结时：  $U_p = U_l, \quad I_p = \frac{1}{\sqrt{3}} I_l$

相电压与相  
电流的相位差

所以

$$P = 3U_p I_p \cos \varphi_p = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_p$$

同理

$$Q = 3U_p I_p \sin \varphi_p = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi_p$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_p I_p = \sqrt{3} U_l I_l$$

**例1:** 有一三相电动机, 每相的等效电阻  $R = 29\Omega$ , 等效感抗  $X_L = 21.8\Omega$ , 试求下列两种情况下电动机的相电流、线电流以及从电源输入的功率, 并比较所得的结果:

- (1) 绕组联成星形接于  $U_l = 380\text{ V}$  的三相电源上;
- (2) 绕组联成三角形接于  $U_l = 220\text{ V}$  的三相电源上。

**解:** (1) 
$$I_P = \frac{U_P}{|Z|} = \frac{220}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} \text{ A} = 6.1 \text{ A}$$

$$P = \sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 6.1 \times \frac{29}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} \text{ W}$$

$$= \sqrt{3} \times 380 \times 6.1 \times 0.8 = 3.2 \text{ kW}$$



$$(2) \quad I_P = \frac{U_P}{|Z|} = \frac{220}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} \text{ A} = 6.1 \text{ A}$$

$$I_l = \sqrt{3} I_P = 10.5 \text{ A}$$

$$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi = \sqrt{3} \times 220 \times 10.5 \times 0.8 \text{ W} = 3.2 \text{ k W}$$

比较(1), (2)的结果:

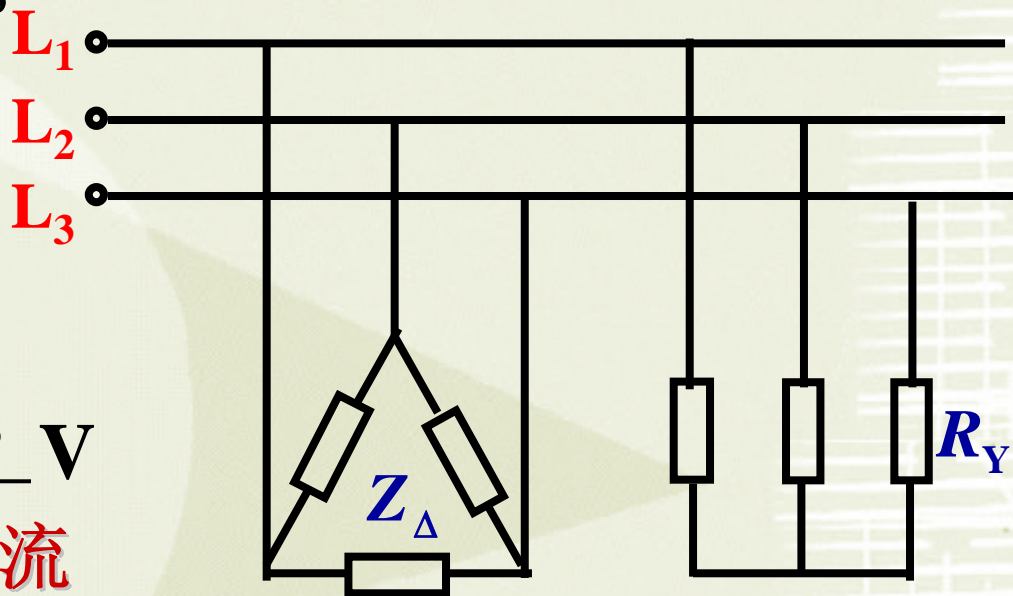
有的电动机有两种额定电压, 如220/380 V。

当电源电压为380 V时, 电动机的绕组应联结成星形;  
当电源电压为220 V时, 电动机的绕组应联结成三角形。

在三角形和星形两种联结法中, 相电压、相电流以及功率都未改变, 仅三角形联结情况下的线电流比星形联结情况下的线电流增大 $\sqrt{3}$ 倍。

**例2:** 线电压 $U_l$ 为380 V的三相电源上，接有两组对称三相电源：一组是三角形联结的电感性负载，每相阻抗  $Z_{\Delta} = 36.3 \angle 37^{\circ} \Omega$  ；另一组是星形联结的电阻性负载，每相电阻 $R = 10\Omega$ ，如图所示。试求：

- (1) 各组负载的相电流；
- (2) 电路线电流；
- (3) 三相有功功率。



**解:** 设  $\dot{U}_{12} = 380 \angle 0^{\circ} \text{ V}$

则  $\dot{U}_1 = 220 \angle -30^{\circ} \text{ V}$

**(1) 各电阻负载的相电流**

由于三相负载对称，所以只需计算一相，其它两相可依据对称性写出。



负载三角形联接时，其相电流为

$$\dot{I}_{12\Delta} = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_{\Delta}} = \frac{380\angle 0^{\circ}}{36.3\angle 37^{\circ}} \text{ A} = 10.47\angle -37^{\circ} \text{ A}$$

负载星形联接时，其线电流为

$$\dot{I}_{1Y} = \frac{\dot{U}_1}{R_Y} = 22\angle -30^{\circ} \text{ A}$$

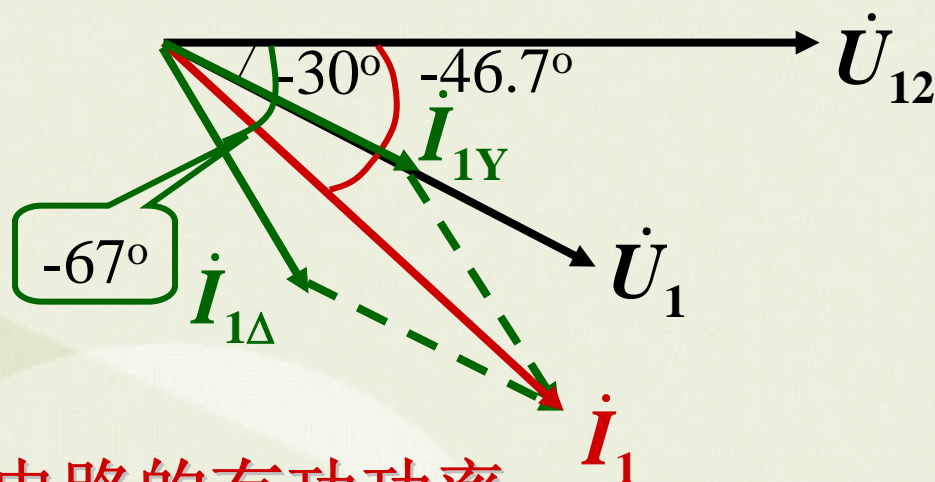
## (2) 电路线电流

$$\dot{I}_{1\Delta} = 10.47\sqrt{3}\angle -37^{\circ} - 30^{\circ} = 18.13\angle -67^{\circ} \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_{1\Delta} + \dot{I}_{1Y} = 18.13\angle -67^{\circ} + 22\angle -30^{\circ} \\ &= 38\angle -46.7^{\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

一相电压与电流的相量图如图所示

一相电压与电流的相量图如图所示



(3) 三相电路的有功功率

$$P = P_Y + P_{\Delta}$$

$$= \sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi_{\Delta} + \sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi_Y$$

$$= \sqrt{3} \times 380 \times 18.13 \times 0.8 \text{ W} + \sqrt{3} \times 380 \times 22 \text{ W}$$

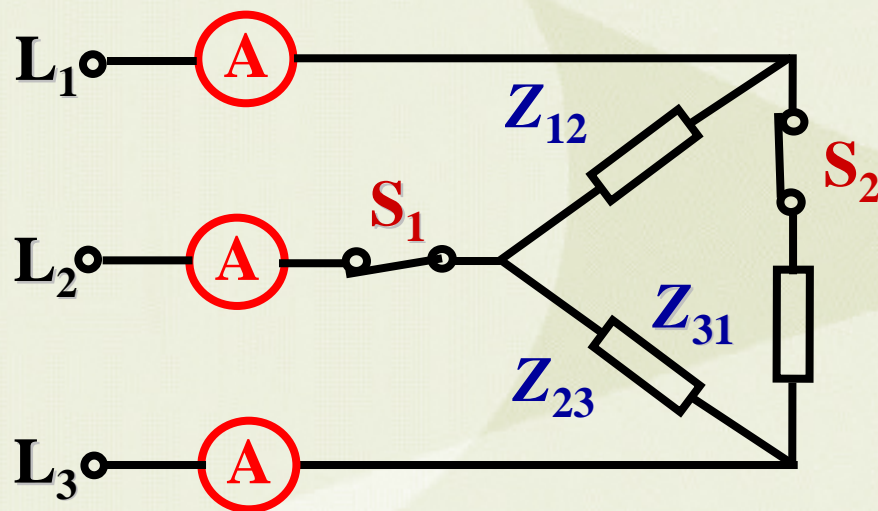
$$= 9546 + 14480$$

$$\approx 2.4 \text{ kW}$$



**例3:** 三相对称负载作三角形联结,  $U_l=220\text{V}$ , 当 $S_1$ 、 $S_2$ 均闭合时, 各电流表读数均为 $17.3\text{A}$ , 三相功率 $P=4.5\text{ kW}$ , 试求:

- 1) 每相负载的电阻和感抗;
- 2)  $S_1$ 合、 $S_2$ 断开时, 各电流表读数和有功功率 $P$ ;
- 3)  $S_1$ 断、 $S_2$ 闭合时, 各电流表读数和有功功率 $P$ 。



**解：**(1) 由已知条件可求得

$$|Z| = \frac{U_P}{I_P} = \frac{220}{17.32 / \sqrt{3}} = 22\Omega$$

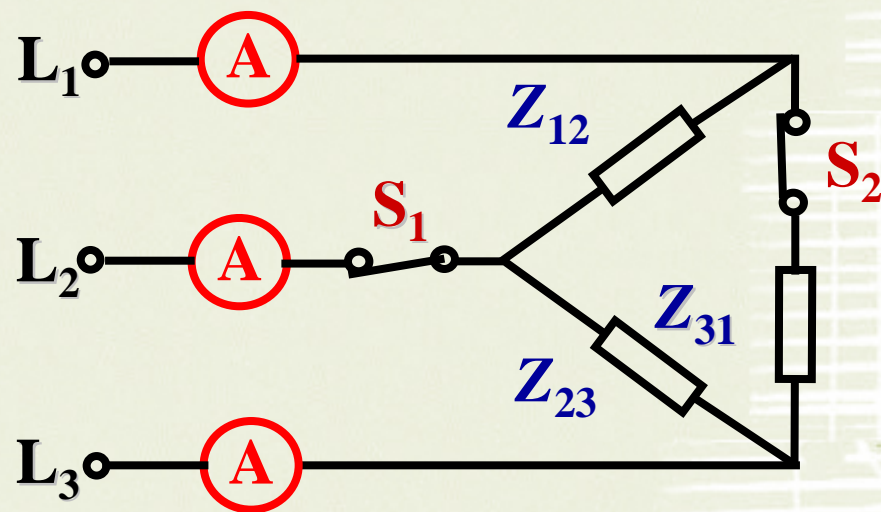
$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_l I_l} = 0.68$$

$$R = |Z| \cos \varphi = 22 \times 0.68 = 15\Omega$$

$$X_L = |Z| \sin \varphi = 22 \times 0.733 = 16.1\Omega$$

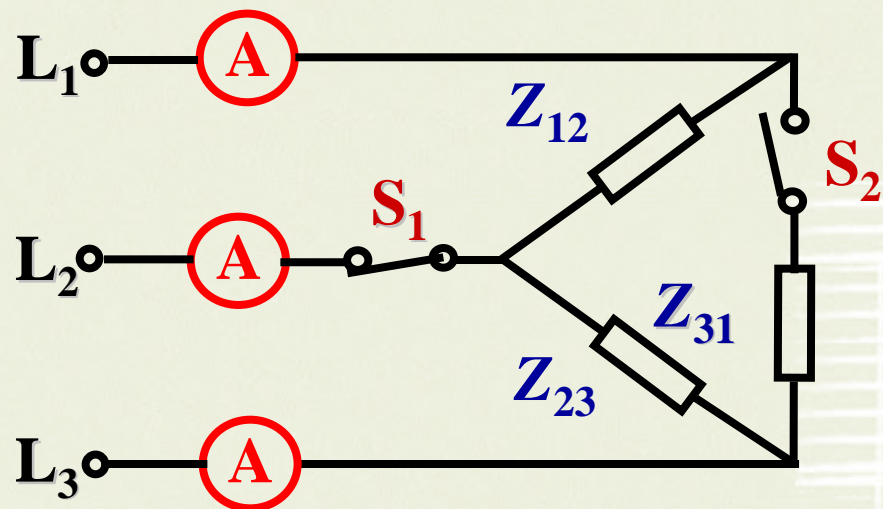
或：  $P = \underline{I^2 R}$

$$P = UI \cos \varphi \quad \underline{tg \varphi = X_L / R}$$





(2)  $S_1$  闭合、 $S_2$  断开时  
 流过电流表  $L_1$ 、 $L_3$   
 的电流变为相电流  $I_P$ ，  
 流过电流表  $L_2$  的电流仍  
 为线电流  $I_l$ 。



$$\therefore I_1 = I_3 = 10\text{A} \quad I_2 = 17.32 \text{ A}$$

因为开关  $S$  均闭合时

每相有功功率  $P = 1.5 \text{ kW}$

当  $S_1$  合、 $S_2$  断时， $Z_{12}$ 、 $Z_{23}$  的相电压和相电流不变，则  $P_{12}$ 、 $P_{23}$  不变。

$$P = P_{12} + P_{23} = 3 \text{ kW}$$

(3)  $S_1$  断开、 $S_2$  闭合时

$$I_2 = 0\text{A}$$

$I_1$  仍为相电流  $I_P$ ,

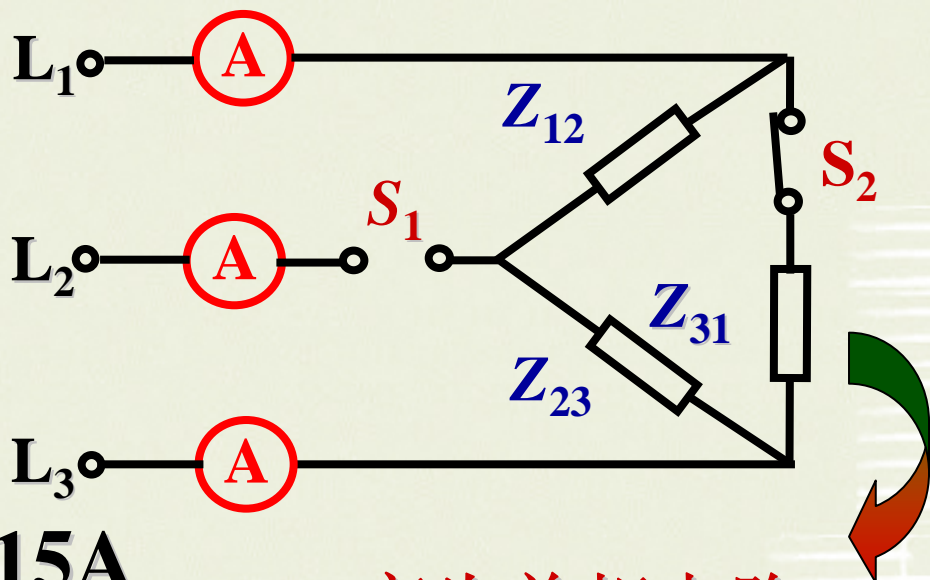
$I_2$  变为  $1/2 I_P$ 。

$$\therefore I_1 = I_3 = 10\text{ A} + 5\text{ A} = 15\text{A}$$

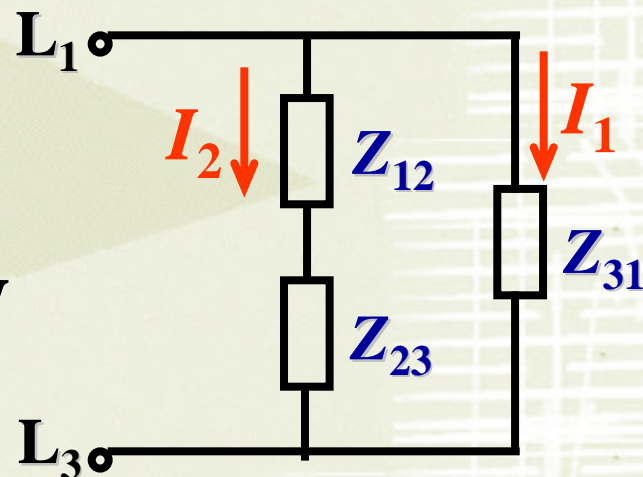
$\therefore I_2$  变为  $1/2 I_P$ , 所以  $L_1L_2$ 、

$L_2L_3$  相的功率变为原来的  $1/4$ 。

$$\begin{aligned} P &= 1/4 P_{12} + 1/4 P_{23} + P_{31} \\ &= 0.375\text{ W} + 0.375\text{ W} + 1.5\text{ W} \\ &= 2.25\text{ kW} \end{aligned}$$



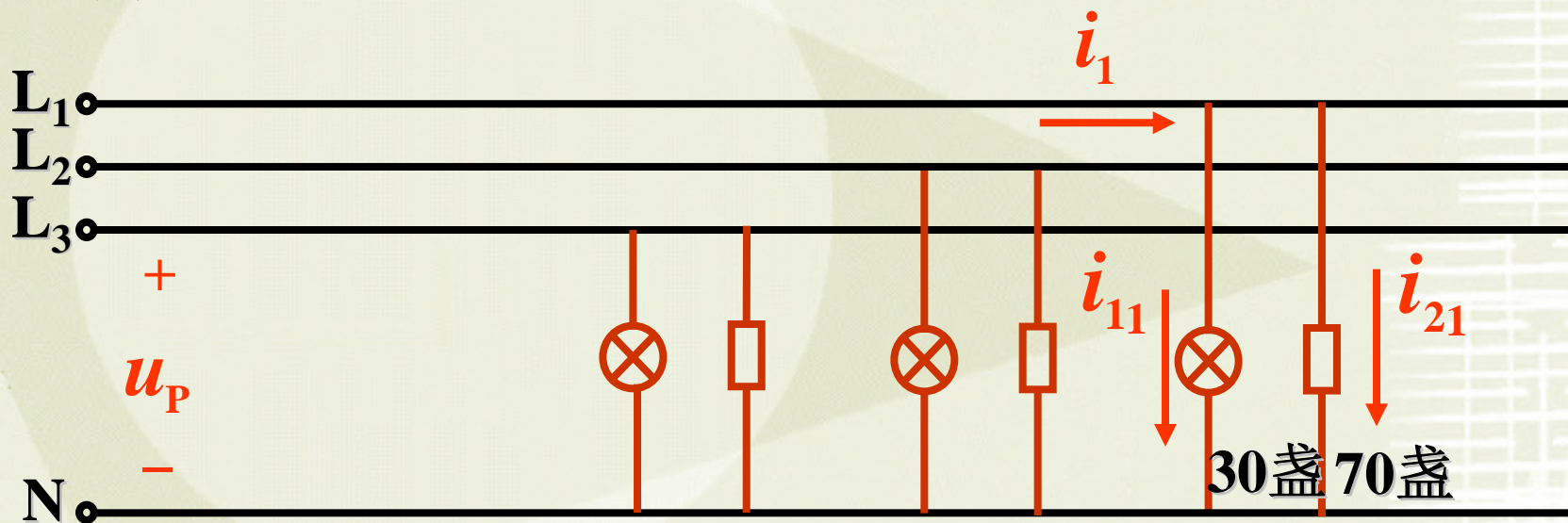
变为单相电路



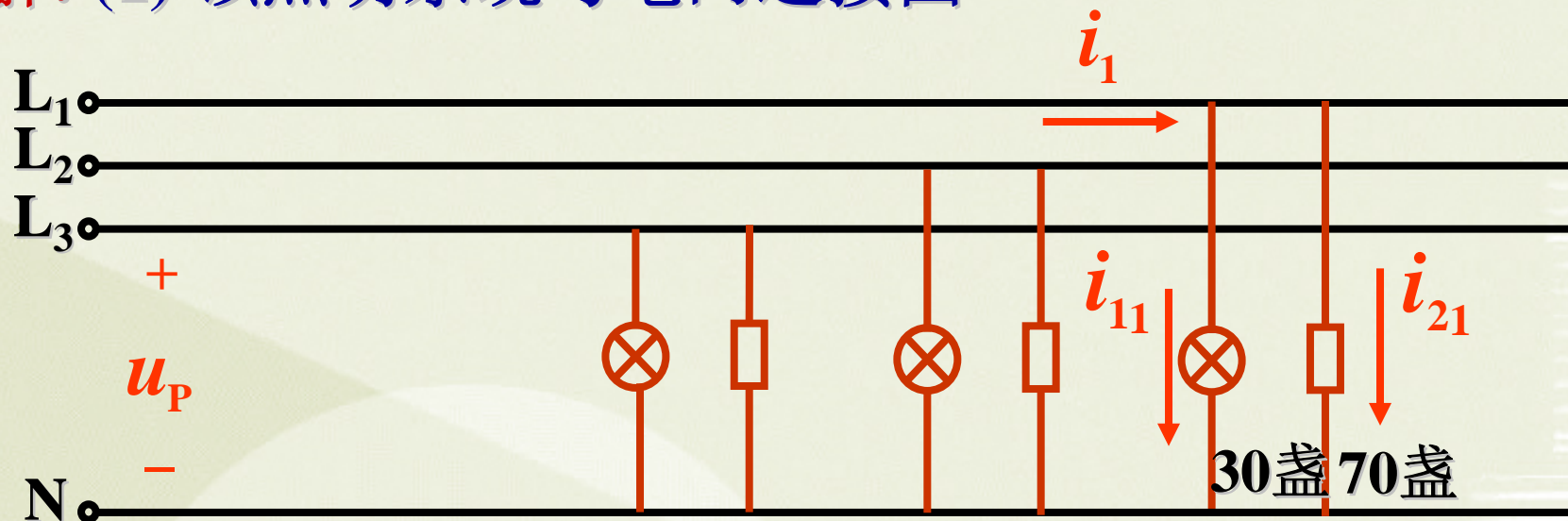


**例4:** 某大楼为日光灯和白炽灯混合照明，需装40瓦 日光灯210盏( $\cos\varphi_1=0.5$ )，60瓦白炽灯90盏( $\cos\varphi_2=1$ )，它们的额定电压都是220V，由380V/220V的电网供电。试分配其负载并指出应如何接入电网。这种情况下，线路电流为多少？

**解:** (1) 该照明系统与电网连接图



解: (1) 该照明系统与电网连接图



(2) 计算线电流 设  $\dot{U}=220 \angle 0^\circ \text{ V}$

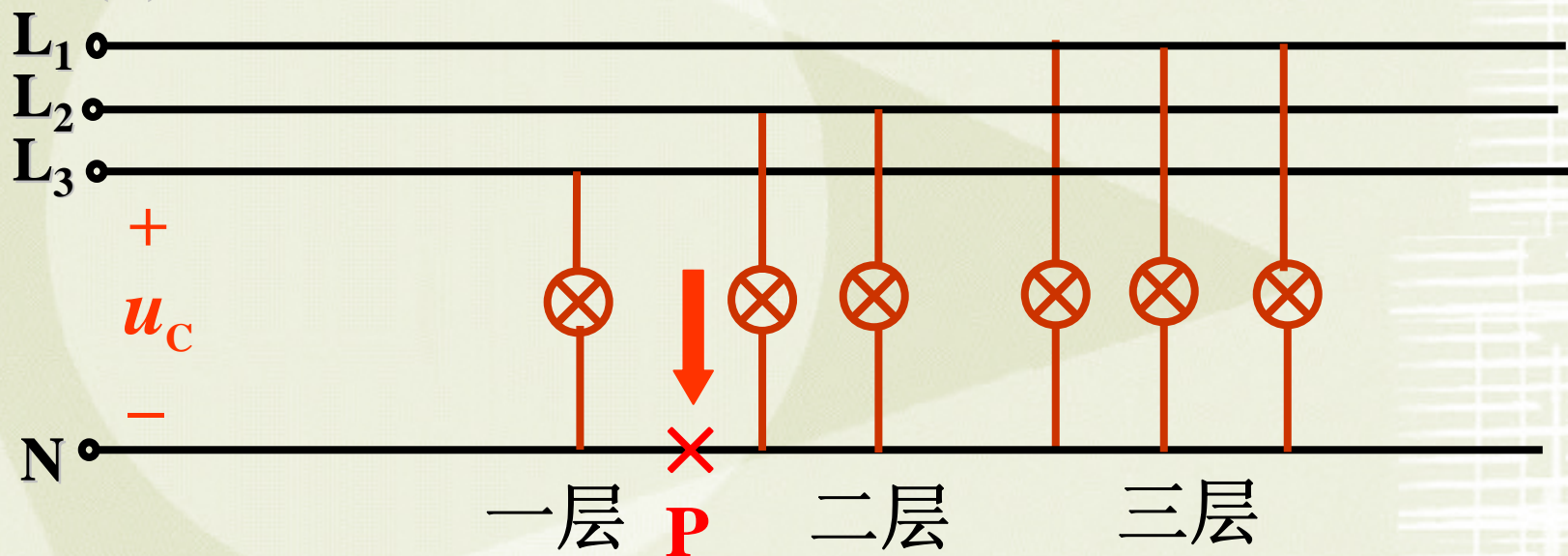
$$\begin{aligned} \dot{I}_{11} &= 30 \times \frac{60}{220 \times 1} \angle 0^\circ \text{ A} & \dot{I}_{21} &= 70 \times \frac{40}{220 \times 0.5} \angle -60^\circ \text{ A} \\ &= 8.1818 \angle 0^\circ \text{ A} & &= 25.46 \angle -60^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\therefore \dot{I}_1 = \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} = 30.4 \angle -46.5^\circ \text{ A}$$

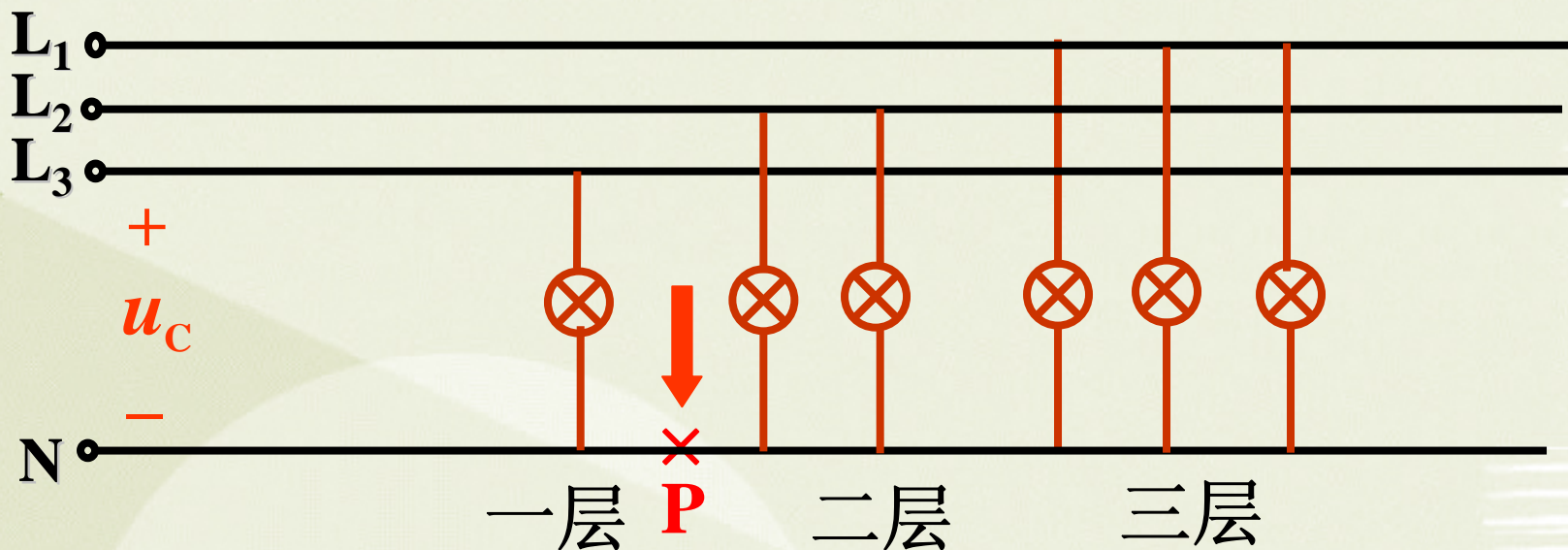


**例5:** 某大楼电灯发生故障，第二层楼和第三层楼所有电灯都突然暗下来，而第一层楼电灯亮度不变，试问这是什么原因？这楼的电灯是如何联接的？同时发现，第三层楼的电灯比第二层楼的电灯还暗些，这又是什么原因？

**解: (1) 本系统供电线路图**



## 解：(1)本系统供电线路图



(2) 当 $P$ 处断开时，二、三层楼的灯串联接380V 电压，所以亮度变暗，但一层楼的灯仍承受220V电压亮度不变。

(3) 因为三楼灯多于二楼灯即  $R_3 < R_2$ ，所以三楼灯比二楼灯暗。