

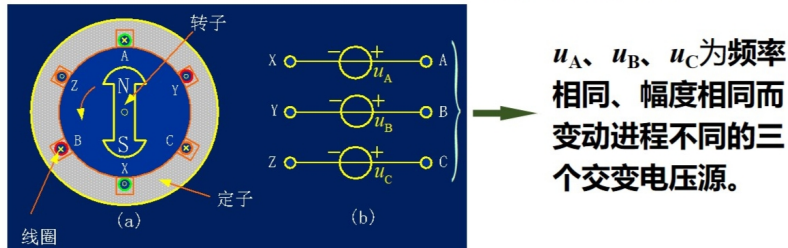
# 第6章 三相电路

- 6.1 对称三相电源

- 1. 对称的三相电压源

- 1) 三相电源的产生

三相电源通常由三个单相交变电压源组成，如图所示。



- 2) 对称三相电源

$u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  频率相同，波形和振幅相等，相位彼此相差  $120^\circ$ ，称为对称三相电压，即

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \cos(\omega t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t) \\ u_B &= U_m \cos(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2}U \cos(\omega t - 120^\circ) \\ u_C &= U_m \cos(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2}U \cos(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

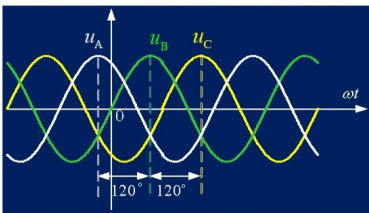
正序(顺序)

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \cos(\omega t) \\ u_B &= U_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ u_C &= U_m \cos(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (6.2a)$$

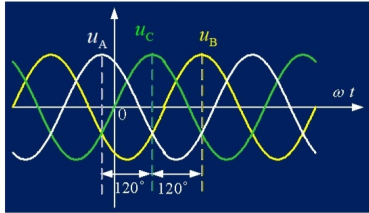
负序(逆序)

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \cos(\omega t) \\ u_B &= U_m \cos(\omega t + 120^\circ) \\ u_C &= U_m \cos(\omega t + 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (6.2b)$$

对称正弦三相电压正序波形图



对称正弦三相电压负序波形图



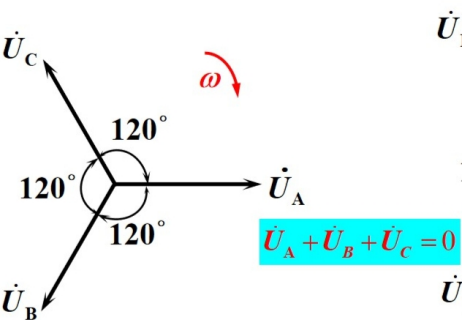
正序相量表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_B &= U \angle -120^\circ \\ \dot{U}_C &= U \angle -240^\circ \end{aligned} \right\} \quad (6.3a)$$

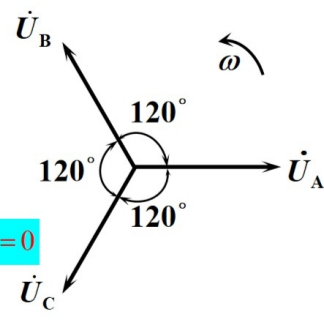
负序相量表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_B &= U \angle 120^\circ \\ \dot{U}_C &= U \angle 240^\circ \end{aligned} \right\} \quad (6.3b)$$

对称三相电压正序相量图

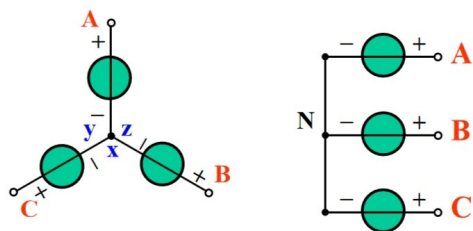


对称三相电压负序相量图



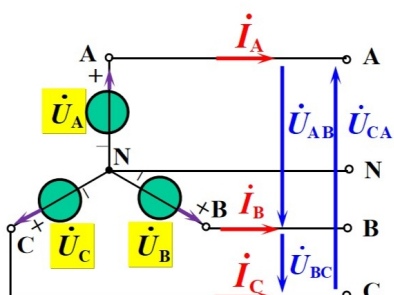
- 2. 三相电源的联接方式

## 1)三相电源的星形联接



### 三相电源的星 (Y) 形联接

名词介绍:



A、B、C——端线(火线), X、Y、Z交于N——中线(零线)。

端线之间电压——线电压,  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{CA}$

端线中的电流——线电流,  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$

每相电源、负载的电压——相电压, 如  $\dot{U}_{AN}$ ,  $\dot{U}_{BN}$ ,  $\dot{U}_{CN}$

每相电源、负载的电流——相电流,  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$

在Y型联接中, 线电流和相电流是相同的。

相电压与线电压间的关系如下  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN}$

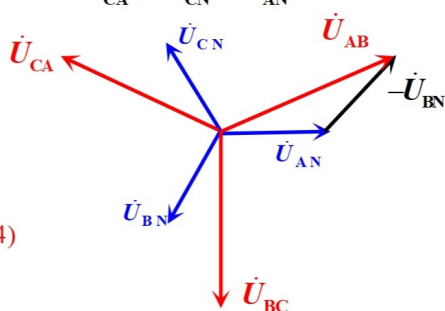
$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN}$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN}$$

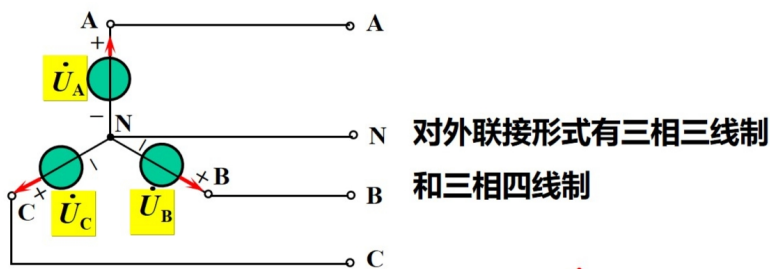
对称电压相量图所示:

图中相量关系

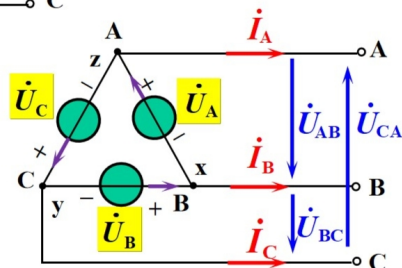
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \sqrt{3}\dot{U}_{AN}\angle 30^\circ \\ \dot{U}_{BC} &= \sqrt{3}\dot{U}_{BN}\angle 30^\circ \\ \dot{U}_{CA} &= \sqrt{3}\dot{U}_{CN}\angle 30^\circ \end{aligned} \right\} (6.4)$$



在对称星形三相电源中, 线电压  $U_l$  等于相电压  $U_p$  的  $\sqrt{3}$  倍  
即  $U_l = \sqrt{3}U_p$ , 在相位上线电压超前于先行相电压  $30^\circ$ ; 线电  
流则等于相电流,  $I_l = I_p$



## 2) 三相电源的三角形联接



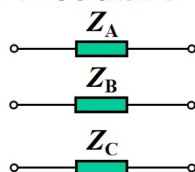
相电压均等于相应线电压，即  $\dot{U}_l = \dot{U}_p$

## 6.2 对称三相电路的计算

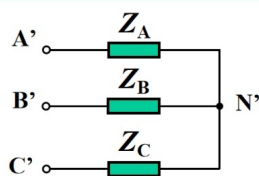
### 1. 对称三相负载

在三相制中，若各相的参数都相同，即三相阻抗的大小和相位均相等， $Z_A = Z_B = Z_C = Z$ ，则称为对称三相负载。

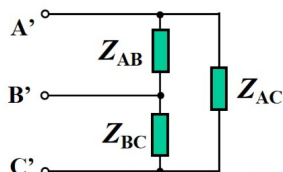
三相负载通常由三个单相负载组成，如下图所示。



### 2. 对称三相负载的联接

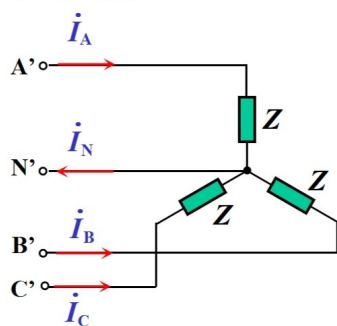


星 (Y) 形联接



三角 (Δ) 形联接

### 1) 星 (Y) 形联接



设

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A'N'} &= U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_{B'N'} &= U \angle -120^\circ \\ \dot{U}_{C'N'} &= U \angle 120^\circ\end{aligned}$$

对Y接法的对称电源讨论得出的结论对Y接法的对称负载一样成立。

$$\dot{U}_{A'B'} = \dot{U}_{A'N'} - \dot{U}_{B'N'} = \sqrt{3} \dot{U}_{A'N'} \angle 30^\circ$$

$$\dot{U}_{B'C'} = \dot{U}_{B'N'} - \dot{U}_{C'N'} = \sqrt{3} \dot{U}_{B'N'} \angle 30^\circ$$

$$\dot{U}_{C'A'} = \dot{U}_{C'N'} - \dot{U}_{A'N'} = \sqrt{3} \dot{U}_{C'N'} \angle 30^\circ$$

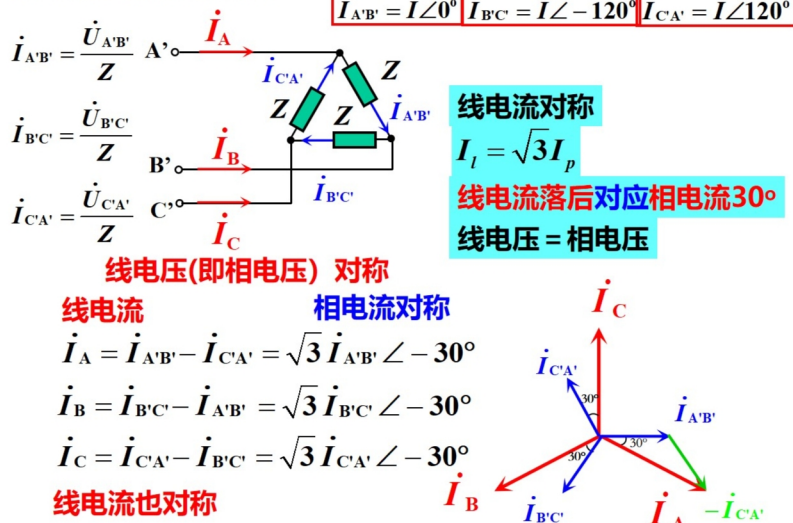
线电流 = 相电流

线电压对称

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

线电压领先对应相电压  $30^\circ$

## 2) 三角 (Δ) 形联接



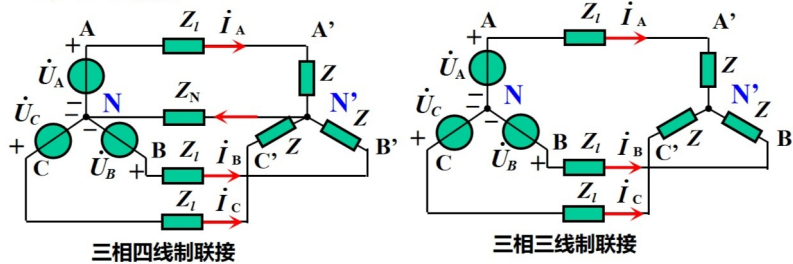
## 3. 对称三相电路

三相供电的电源系统均为对称三相电源，如果负载也是对称的，则这样的电路被称为对称三相电路。

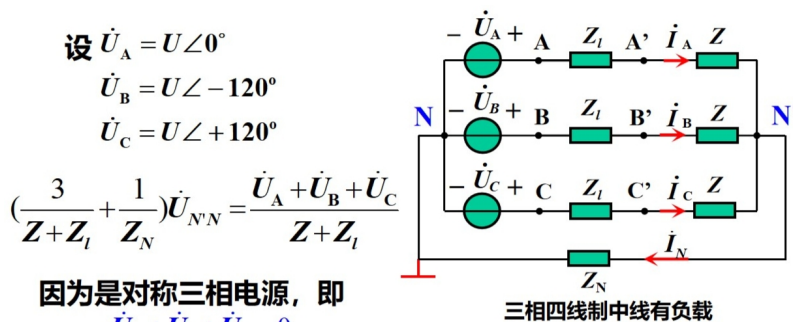
**对称三相电路的联接方式有四种：**

**Y-Y, Δ-Δ, Y-Δ, Δ-Y**

### 1) Y-Y联接



**Y-Y联接中，对于每相负载有  $U_l = \sqrt{3} U_p \angle 30^\circ$ ,  $I_l = I_p$ 。**



因为是对称三相电源，即

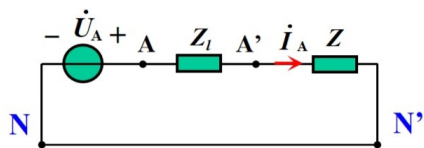
$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$$

所以  $\dot{U}_{N'N} = 0$ 。可见，在对称情况下，两中点  $N'$  和  $N$  等电位。

中线电流也为 0。

两个中点等电位，导致各相的电流和电压仅由该相本身的电源和阻抗决定，各相之间好像彼此互不相关，形成了**各相的独立性**，而且使各组电压或电流均具有对称性。





化归单相电路图

可只抽A相计算单相

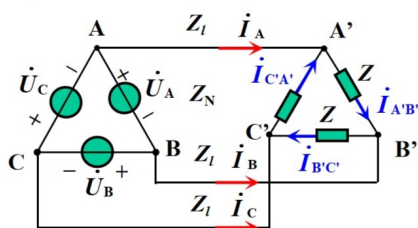
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z + Z_l} \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z + Z_l} \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z + Z_l}$$

$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  对称, 同样可计算中线电流为0。

故中线阻抗的大小甚至中线的有无都是无关紧要的, 不影响计算结果。

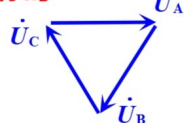
即对Y-Y电路, 有中线 and 没有中线是一样的。若去掉中线, 对称Y-Y电路就变为三相三线制。

## 2) Δ-Δ联接



电源回路电压  $\dot{U} = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C$

电源对称时

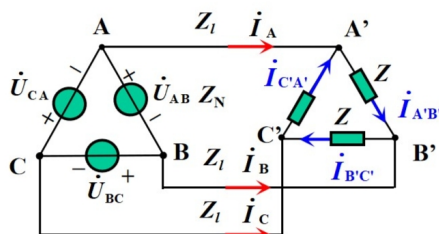


$$\dot{U} = \dot{U}_A (1 + \angle 120^\circ + \angle -120^\circ) = 0$$

三相总电压

$$\dot{U} = \dot{U}_A + \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_C (a^2 + a - 1) = -2\dot{U}_C$$

一般三相电源的内阻抗很小, 在电压  $U$  作用下将产生很大电流, **危险!**



对称角形联接中无论是电源端还是负载端, 其线电压与相电压相等, 即

$$\dot{U}_{A'B'} = \dot{U}_{AB}$$

$$\dot{U}_l = \dot{U}_p$$

$$\dot{I}_{A'B'} = \frac{\dot{U}_{A'B'}}{Z_A} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_A}$$

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{U}_p}{Z}$$

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{A'B'} \angle -30^\circ$$

$$\dot{I}_l = \sqrt{3} \dot{I}_p \angle -30^\circ$$

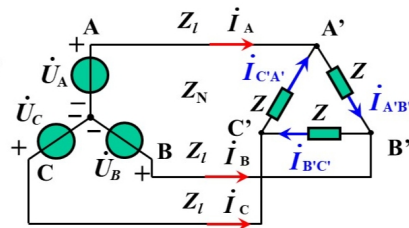
### 3) Y-Δ联接

Y-Δ联接中，对于每相负载有

$$\dot{U}_l = \dot{U}_p$$

$$\dot{U}_{A'B'} = \dot{U}_{AB} = \sqrt{3}\dot{U}_{AN}\angle 30^\circ$$

$$\dot{I}_{A'B'} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_{AN}\angle 30^\circ}{Z}$$

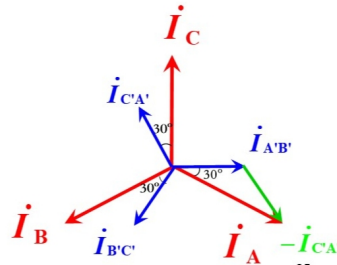


对称时电流向量图如下

$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  为线电流，

$\dot{I}_{A'B'}, \dot{I}_{B'C'}, \dot{I}_{C'A'}$  为负载相电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'} \end{aligned} \right\}$$



### 对称三相电路的一般计算方法

- (1) 将所有三相电源、负载都化为等值Y连接；
- (2) 连接各负载和电源中点，中线上若有阻抗则不计；
- (3) 画出A相计算电路，求出A相的电压、电流；
- (4) 根据Δ接、Y接时线量、相量之间的关系和对称性，求出原电路其他相的电流、电压。

### 6.3 不对称三相电路的概念

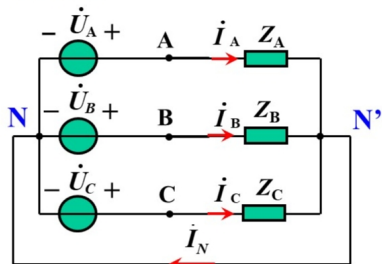
在三相电路中，无论是电源还是负载，只要有一部分不对称，就称为不对称三相电路。

**产生不对称的原因：**

1. 当三相电路中电源电压或负载阻抗或传输线不对称时；
2. 由单相负载造成不对称；
3. 发生断路、短路等故障；
4. 特殊的不对称设备和仪器。

## 不对称星形负载和中性点位移

### 1) 有中线



最常见的是三相四线制系统，电源通常是对称的，**负载不对称**。

各相电流

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN}}{Z_A} \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN}}{Z_B} \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN}}{Z_C} \quad \dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{AN}}{Z_A} + \frac{\dot{U}_{BN}}{Z_B} + \frac{\dot{U}_{CN}}{Z_C} \neq 0$$

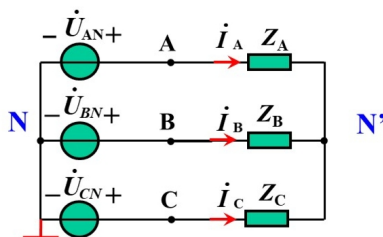
相电流不对称

中线电流也不为零

### 2) 无中线

三相负载  $Z_A$ 、 $Z_B$ 、 $Z_C$  不相同，  
无法分别计算各项。

列节点电压方程



$$\left( \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \right) \dot{U}_{N'N} = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C}$$

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\dot{U}_A/Z_A + \dot{U}_B/Z_B + \dot{U}_C/Z_C}{1/Z_A + 1/Z_B + 1/Z_C} \neq 0$$

负载各相电压：  $\dot{U}_{AN'} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{N'N}$

$$\dot{U}_{BN'} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{N'N}$$

$$\dot{U}_{CN'} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{N'N}$$

相电压不对称

线(相)电流也不对称

对称的电源电压  $\dot{U}_{AN}$ 、 $\dot{U}_{BN}$ 、 $\dot{U}_{CN}$  减去同一  $\dot{U}_{N'N}$ ，使负载电压

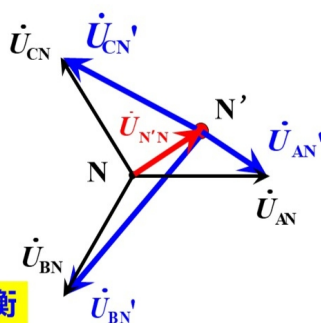
$\dot{U}_{AN'}$ 、 $\dot{U}_{BN'}$ 、 $\dot{U}_{CN'}$  **不对称**。

$$\dot{U}_{N'N} \neq 0$$

$$\dot{U}_{AN'} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{N'N}$$

$$\dot{U}_{BN'} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{N'N}$$

$$\dot{U}_{CN'} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{N'N}$$

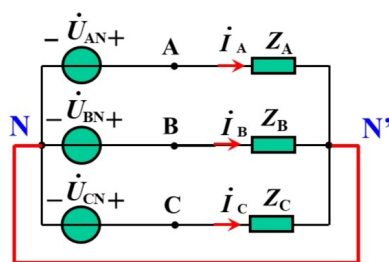


中点位移的结果造成各相负载不均衡

负载相电压不对称的程度与  $\dot{U}_{N'N}$  有关系，使负载中(性)点  $N'$  电位不再等于电源中(性)点  $N$  的电位，称为**中(性)点位移**。

$\dot{U}_{N'N}$  称为中点位移电压。

## 怎样能够降低各相不均衡的相互影响？

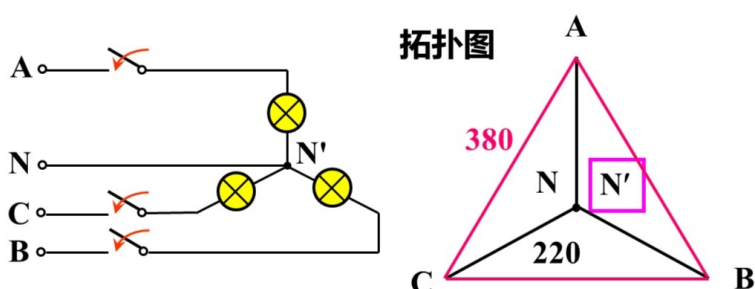


尽管负载阻抗不对称，但各相阻抗却可以得到均衡的电压，使得各相的工作互不影响，这样就克服了上述无中线的缺点。

## 中线的存在非常重要！

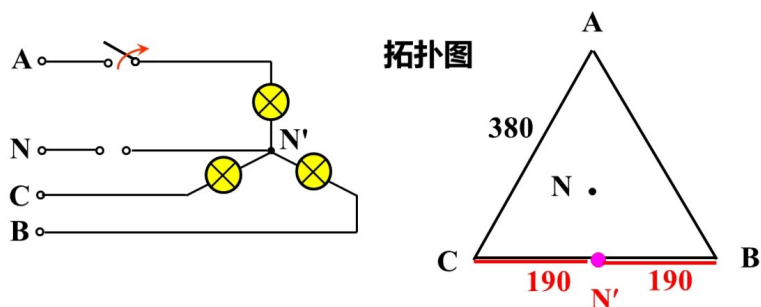
### 例题：照明电路

(1) 正常情况下，三相四线制，中线阻抗为零。



N'在哪里？

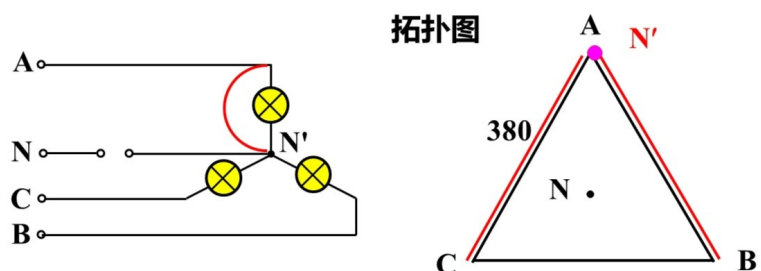
(2) 假设中线断了(三相三线制)，  
A相电灯没有接入电路(三相不对称)



灯泡未在额定电压下工作，灯光昏暗。

N'在哪里？

(3) 中线断了且A相短路



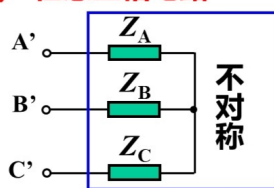
灯泡电压超过额定工作电压，烧坏了。

N'在哪里？



## 1. 三相电路的功率

### 1) 任意三相电路



视在功率  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

功率因数  $\cos \varphi' = \frac{P}{S}$  (无实际意义)

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  为各相电压与电流相位差

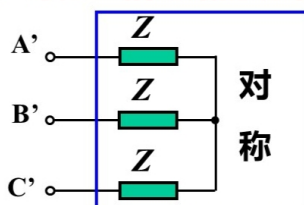
根据功率守恒总平均功率等于各相平均功率之和

$$P = P_A + P_B + P_C = U_{pA} I_{pA} \cos \varphi_A + U_{pB} I_{pB} \cos \varphi_B + U_{pC} I_{pC} \cos \varphi_C$$

同理，三相电路的总无功功率

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_{pA} I_{pA} \sin \varphi_A + U_{pB} I_{pB} \sin \varphi_B + U_{pC} I_{pC} \sin \varphi_C$$

### 2) 对称三相电路的功率



$$U_A = U_B = U_C = U_P$$

$$I_A = I_B = I_C = I_P$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$$

平均功率  $P = 3U_P I_P \cos \varphi$

对称三相电路的电压、电流用线电压、线电流表示

$$\left. \begin{array}{l} U_l = \sqrt{3}U_P, I_l = I_P \\ U_l = U_P, I_l = \sqrt{3}I_P \end{array} \right\} \rightarrow P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi$$

线电压、线电流

功率因数

同理，对称三相电路无功功率：  $Q = \sqrt{3}U_l I_l \sin \varphi$

对称三相电路视在功率：  $S = \sqrt{3}U_l I_l$

### 3) 对称三相电路的瞬时功率

三相电路总瞬时功率

$$p_A = u_{pA} i_{pA}$$

$$P = P_A + P_B + P_C$$

$$p_A = U_P I_P \cos \varphi + U_P I_P \cos(2\omega t - \varphi)$$

$$= \sqrt{2}U_P \cos \omega t \cdot \sqrt{2}I_P \cos(\omega t - \varphi)$$

$$= U_P I_P \cos \varphi + U_P I_P \cos(2\omega t - \varphi)$$

$$p_B = U_P I_P \cos \varphi + U_P I_P \cos(2\omega t - \varphi - 240^\circ)$$

$$p_C = U_P I_P \cos \varphi + U_P I_P \cos(2\omega t - \varphi + 240^\circ)$$

对称三相电路总瞬时功率为常量，等于平均功率，即

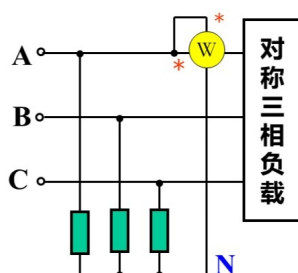
$$p = P = 3U_P I_P \cos \varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi$$

即对称三相电路不论功率因数为何值，电源与负载之间不存在能量交换（尽管  $Q \neq 0$ ）。 $p = \text{常数}$  → 称为瞬时功率平衡（或称平衡制），在对称三相正弦电路中瞬时功率等于常量，这种性质称为瞬时功率平衡。三相制是一种平衡制。这是三相制的优点之一。

## 2. 三相电路功率的测量

## 1) 对称三相电路功率的测量

在某些情况下，星形联接的负载中性点不易引出，或负载为三角形联接，此时必须制造一个人工中性点，也就是用三个相等的适当电阻连成星形并引出其中性点。

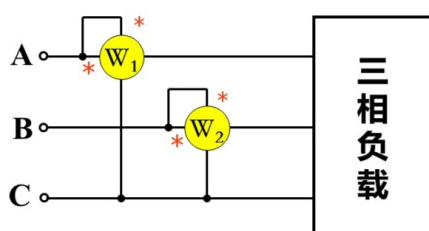


测量对称三相电路的功率时，只需用一个功率表测量其一相功率然后乘以3。

一表法

## 2) 任意三相三线制功率的测量

如果是三相三线制怎么办？



若  $W_1$  的读数为  $P_1$ ， $W_2$  的读数为  $P_2$ ，则  $P_{\text{总}} = P_1 + P_2$  即为三相总功率。

二表法

证明：(设负载为Y接)

$$P_{\text{总}} = u_{AN'} i_A + u_{BN'} i_B + u_{CN'} i_C$$

$$i_C = -(i_A + i_B)$$

$$P_{\text{总}} = (u_{AN'} - u_{CN'}) i_A + (u_{BN'} - u_{CN'}) i_B$$

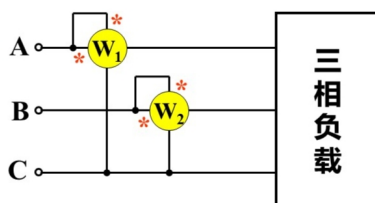
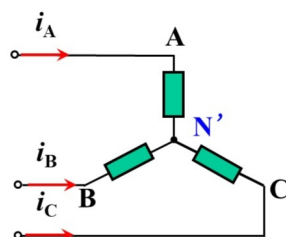
$$= u_{AC} i_A + u_{BC} i_B$$

$$P_{\text{总}} = U_{AC} I_A \cos \varphi_1 + U_{BC} I_B \cos \varphi_2$$

$$= P_1 + P_2$$

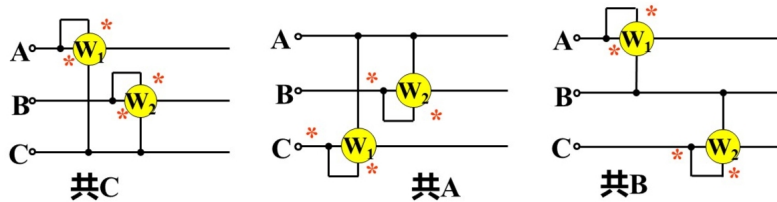
$\varphi_1$  :  $u_{AC}$  领先  $i_A$  的相位角，

$\varphi_2$  :  $u_{BC}$  领先  $i_B$  的相位角。



注意:

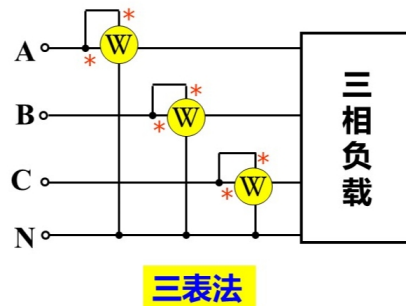
1. 只有在  $i_A + i_B + i_C = 0$  这个条件下, 才能用二表法。二表法不能用于不对称三相四线制, 但对称三相四线制可用。
2. 两块表读数的代数和为三相总功率, 单块表的单独读数无意义。
3. 按正确极性接线时, 二表中可能有一个表的读数为负。
4. 两表法测三相功率的接线方式有三种, 注意功率表的同极性端。



### 3) 三相四线制功率的测量

在对称或不对称三相四线制中要应用三个功率表, 即三功率表法, 才能测量功率。

$$P_{\text{总}} = P_A + P_B + P_C$$



### 总结

- 相线关系是重中之重
  - ✓ 线值是对应相值的  $\sqrt{3}$  倍
  - ✓ 线电压领先对应相电压30度
  - ✓ 线电流落后对应相电流30度
- 对称三相抽单(A)相
- 不对称三相电路节点法
- 三表法和两表法均可适用于不对称三相电路