

电路原理II

第九章 三相电路

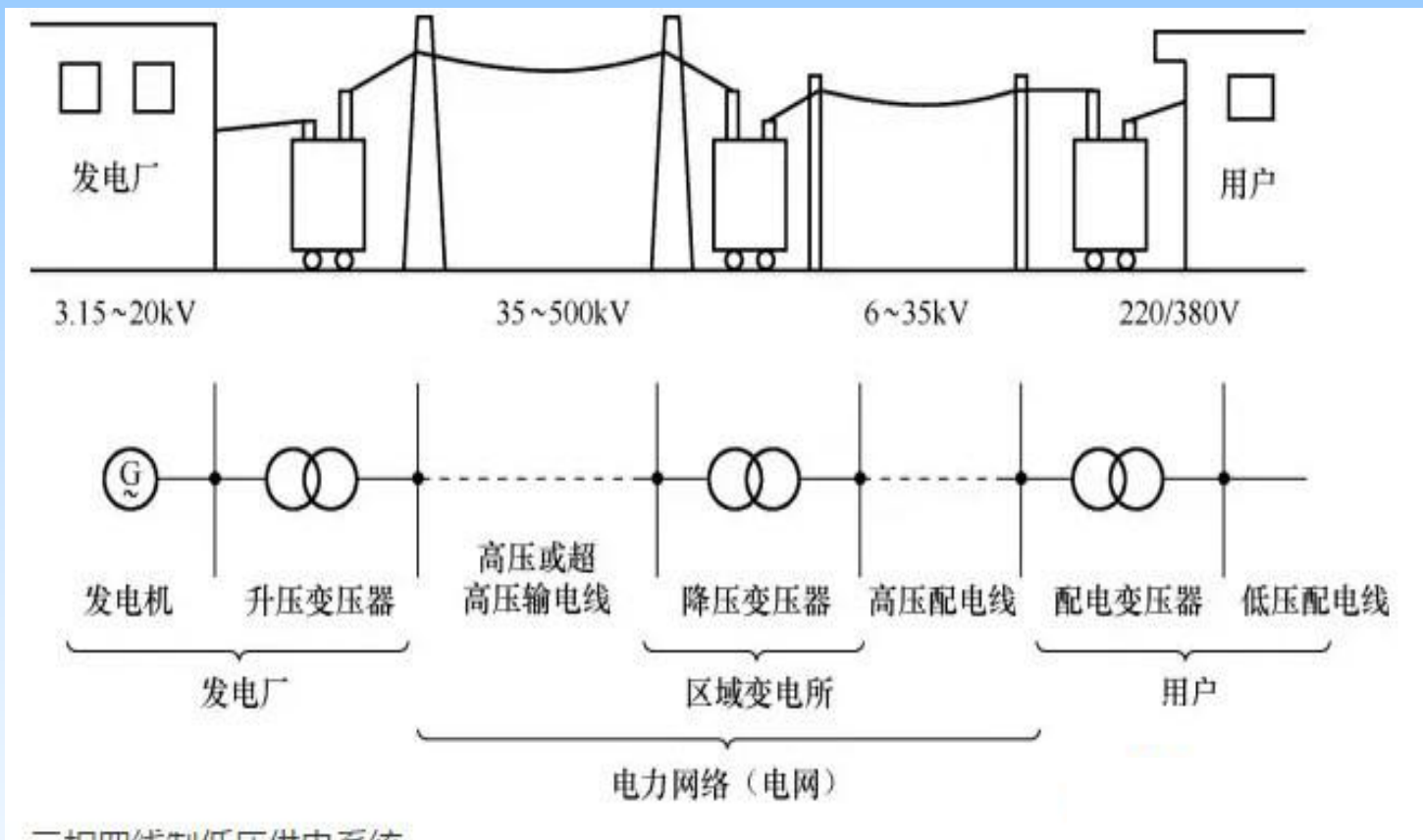
§ 9-1 三相电路

§ 9-2 对称三相电路的计算

§ 9-3 不对称三相电路的概念

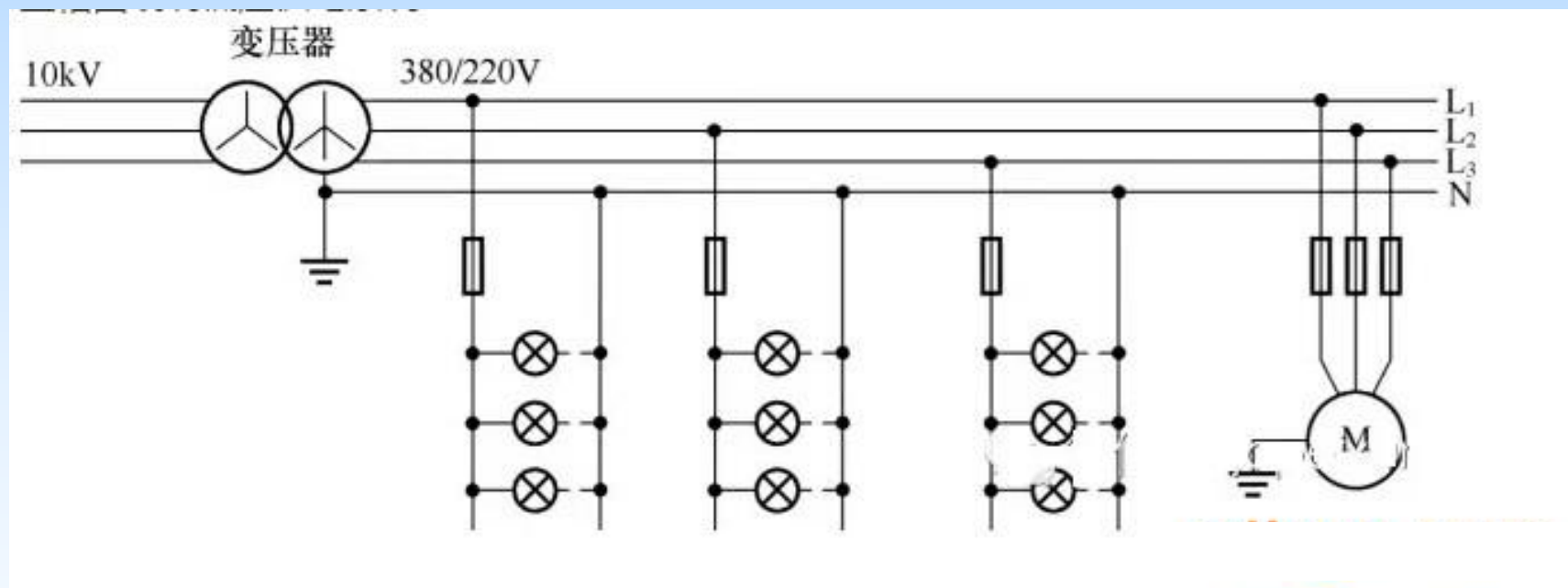
§ 9-4 三相电路的功率

从电厂到电力用户配线图



从我国现在的电力情况来看，送电距离在200~300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；50公里左右采用35千伏；在15公里~20公里时采用10千伏，有的则用6600伏。输电电压在110千伏以上的线路，称为超高压输电线路。在远距离送电时，我国还有500千伏的超高压输电线路。

三相四线制低压供电系统



§ 9-1 三相电路

目前世界上电力系统所采用的供电方式，绝大多数是三相制。日常用电是取自三相制中的一相。

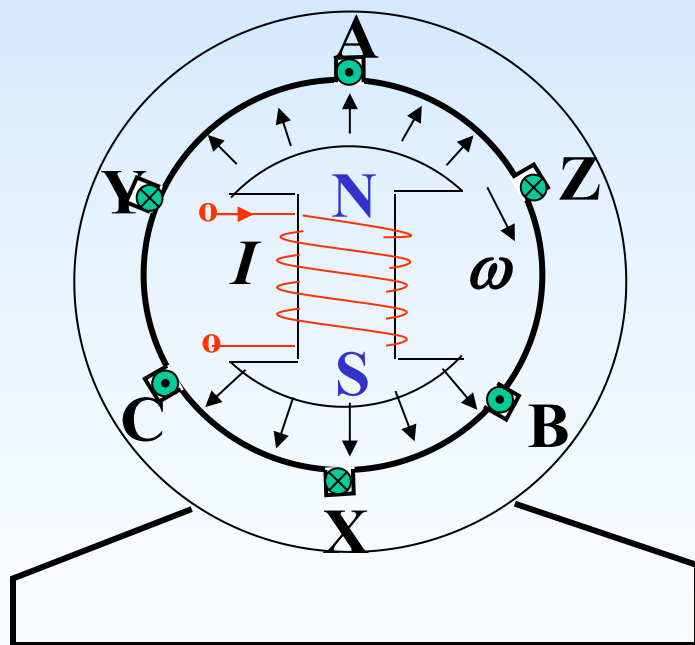
一、三相电源

对称三相电源：三个频率相同、相位互差 120° 的正弦交流电源按一定方式联接而成。

三相制电力系统：由三个频率相同、相位互差 120° 的正弦交流电源供电的系统。

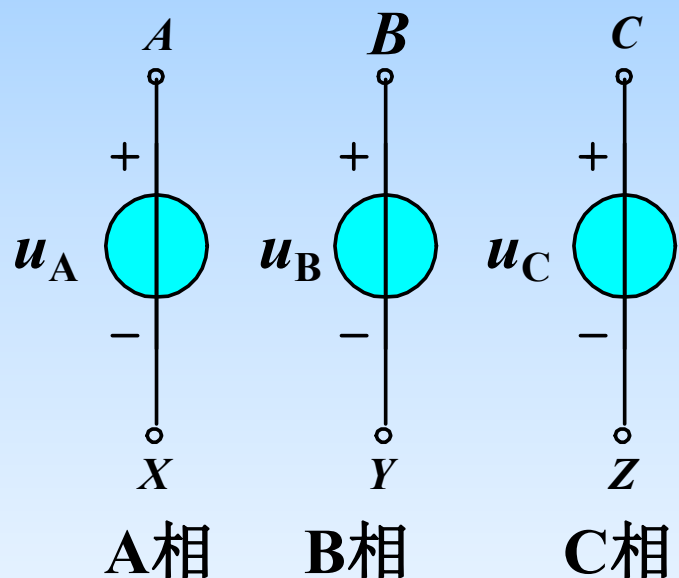
1、对称三相电源的产生

通常由三相同步发电机产生，三相绕组在空间互差 120° ，当转子转动时，在三相绕组中产生感应电压，从而形成对称三相电源。



三相同步发电机示意图

2、瞬时值表达式



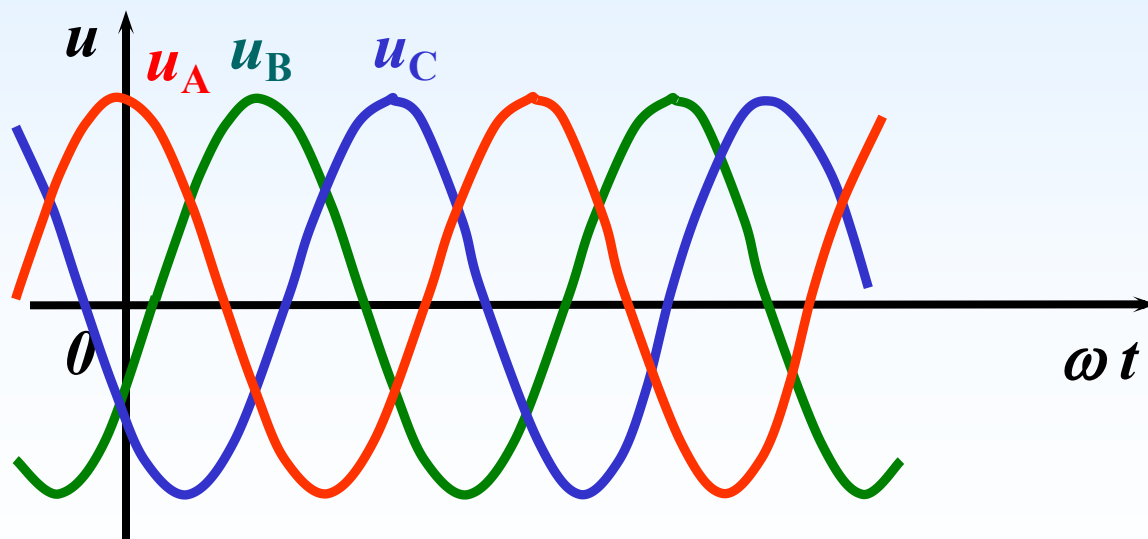
以 u_A 为参考量，它们的瞬时表达式：

$$u_A(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

$$u_B(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_C(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t - 240^\circ) \\ = \sqrt{2}U \cos(\omega t + 120^\circ)$$

3、波形图



4、相量表示

$$\dot{U}_A = U \angle 0$$

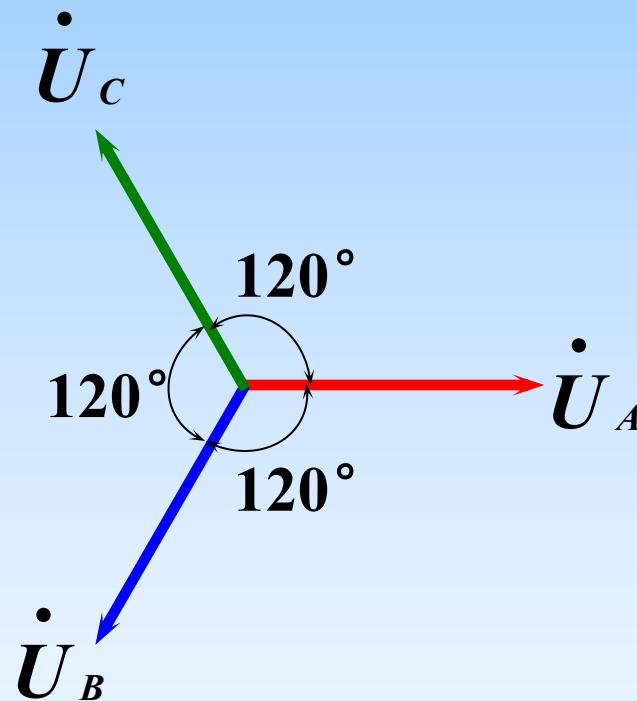
$$\dot{U}_B = U \angle -120 = a^2 \dot{U}_A$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120 = a \dot{U}_A$$

$a = 1 \angle 120$ 单位相量算子。

5、对称三相电源的特点

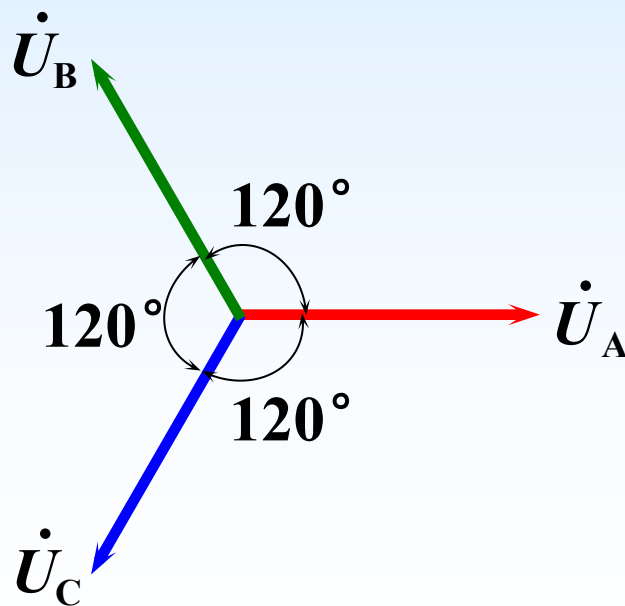
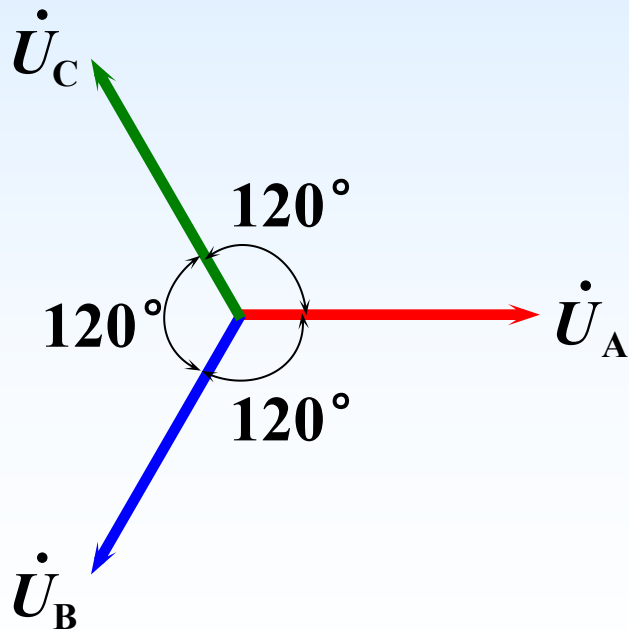
$$\begin{cases} u_A + u_B + u_C = 0 \\ \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \end{cases}$$



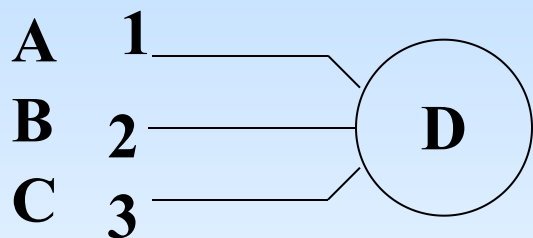
6、对称三相电源的**相序**：三相电源中各相电源经过同一值(如最大值)的先后顺序

正序(顺序)：A—B—C—A

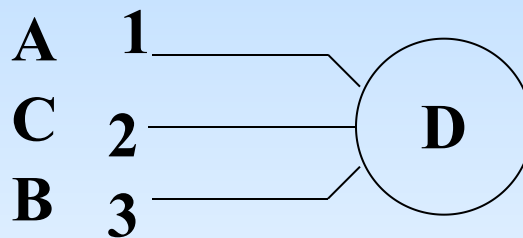
负序(逆序)：A—C—B—A



相序的**实际意义**：对三相电动机，如果相序反了，就会反转。



正转



反转

以后如果不加说明，一般都认为是正相序。

7、三相制的优点

三相制相对于单相制在发电、输电、用电方面有很多优点，主要有：

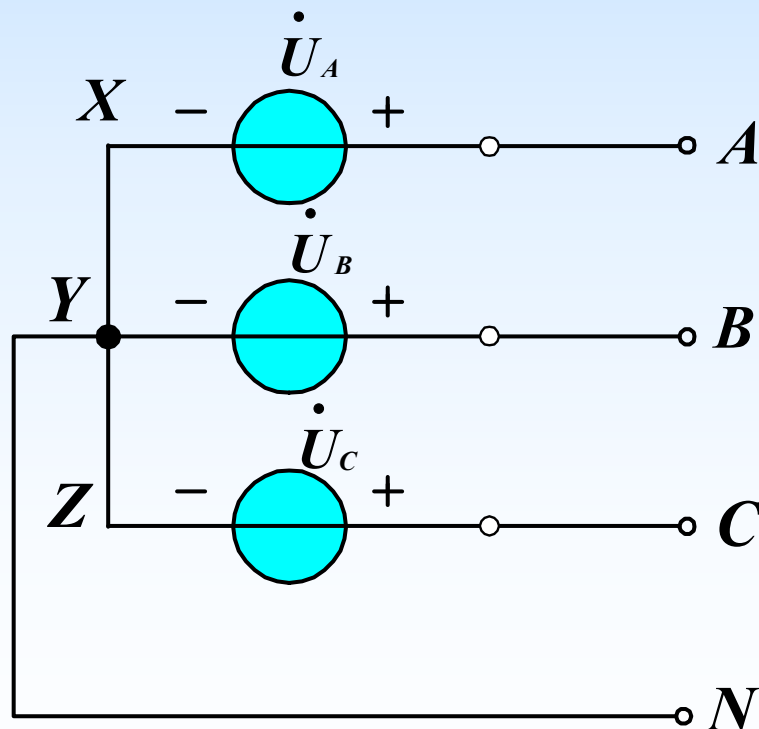
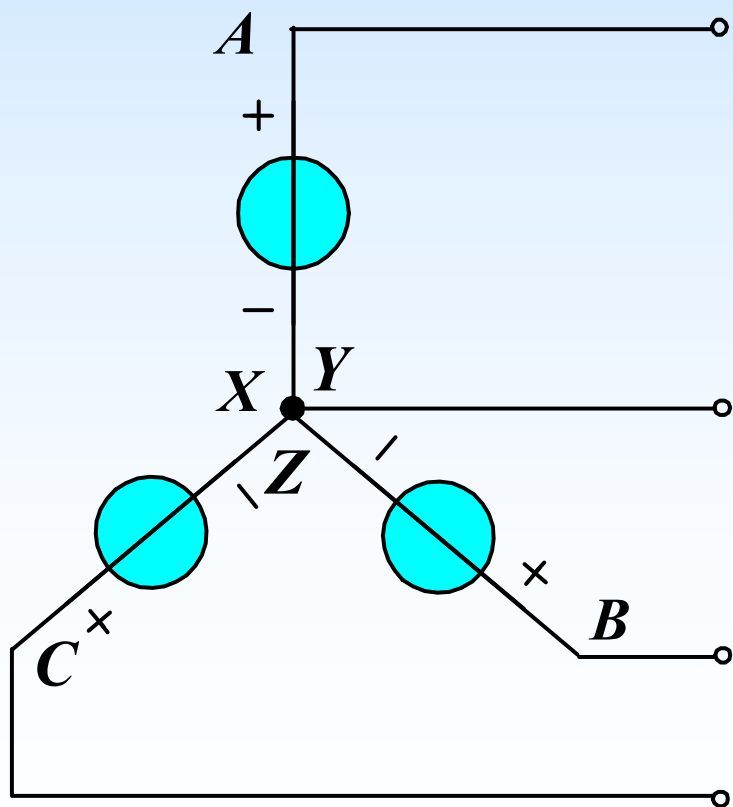
- (1) 三相发电机比单相发电机输出功率高。
- (2) 经济：在相同条件下(输电距离，功率，电压和损失)
三相供电比单相供电省铜。
- (3) 性能好：三相电路的瞬时功率是一个常数，对三相电动机来说，意味着产生转矩均匀，电机振动小。
- (4) 三相制设备(三相异步电动机，三相变压器)简单，易于制造，工作经济、可靠。

由于上述的优点，三相制得到广泛的应用。

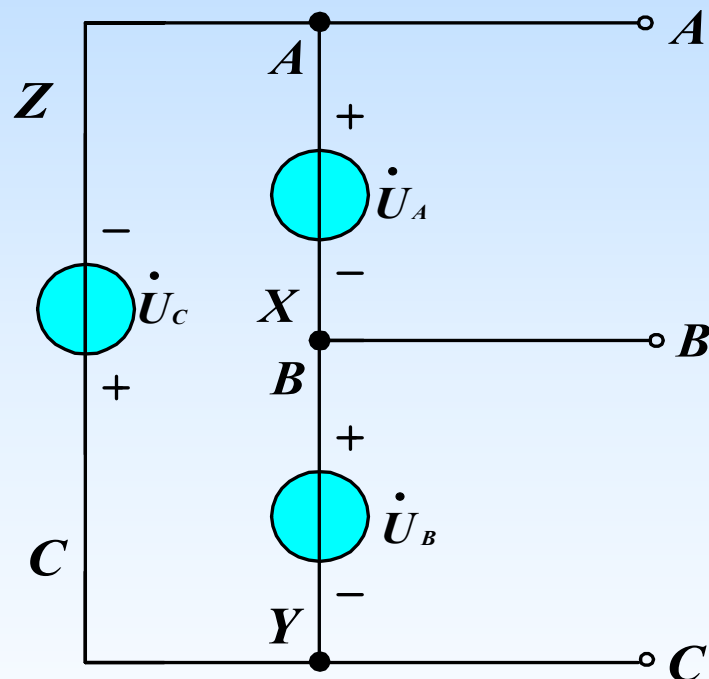
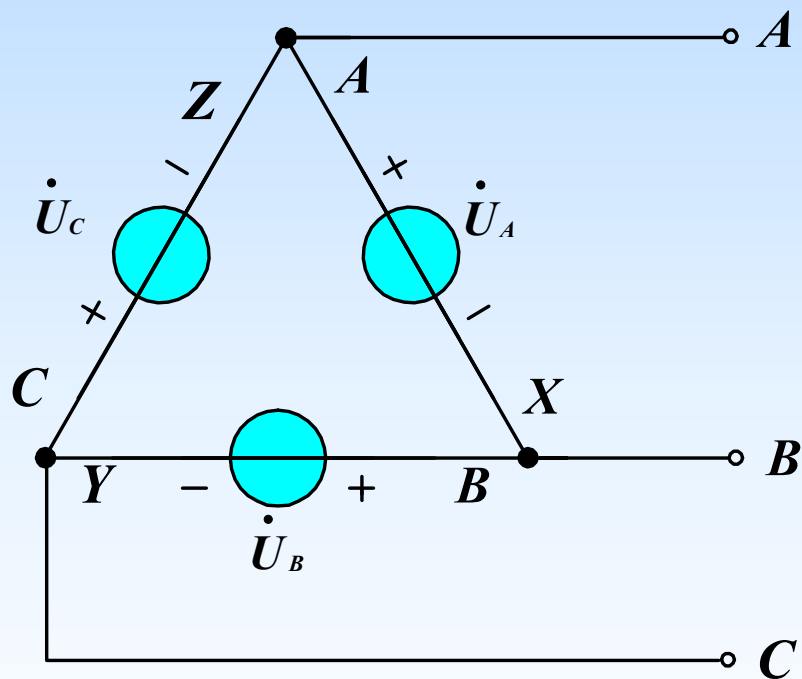
二、对称三相电源的联接方式

1、星形联接和三角形联接

星形联接(Y接): 把三个绕组的末端 X, Y, Z 接在一起, 把始端 A, B, C 引出来。



三角形联接(Δ 接): 三个绕组始末端分别对应相接。

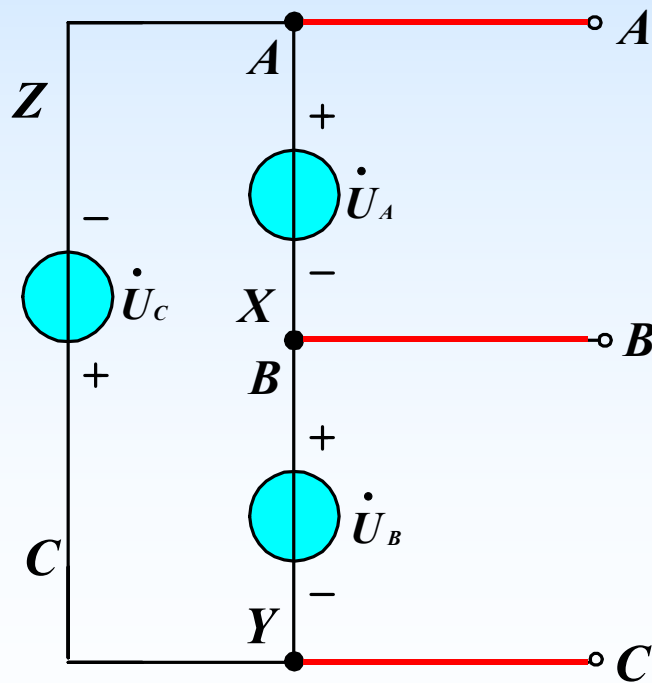
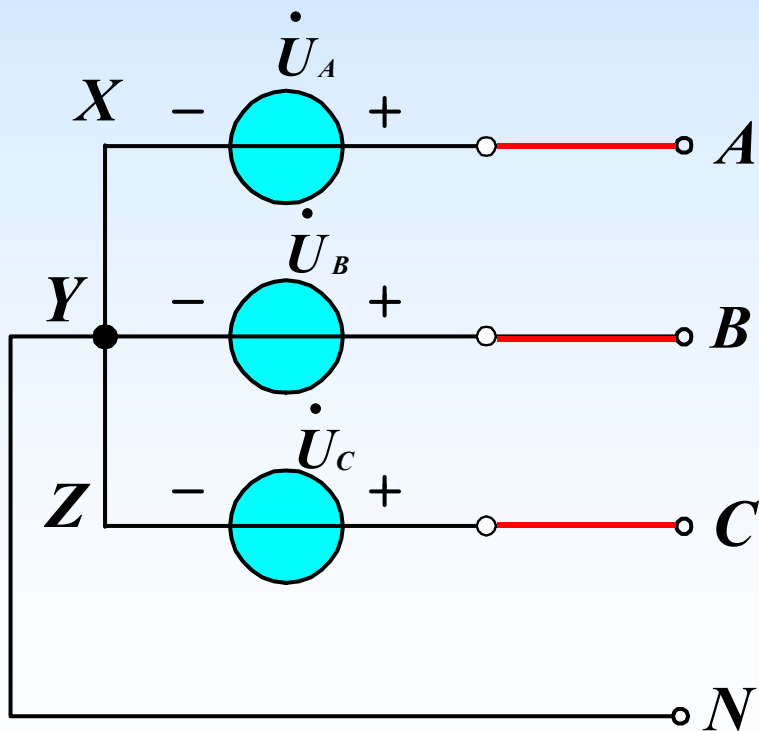


名词介绍:

① 端线(火线): A, B, C 三端引出线。

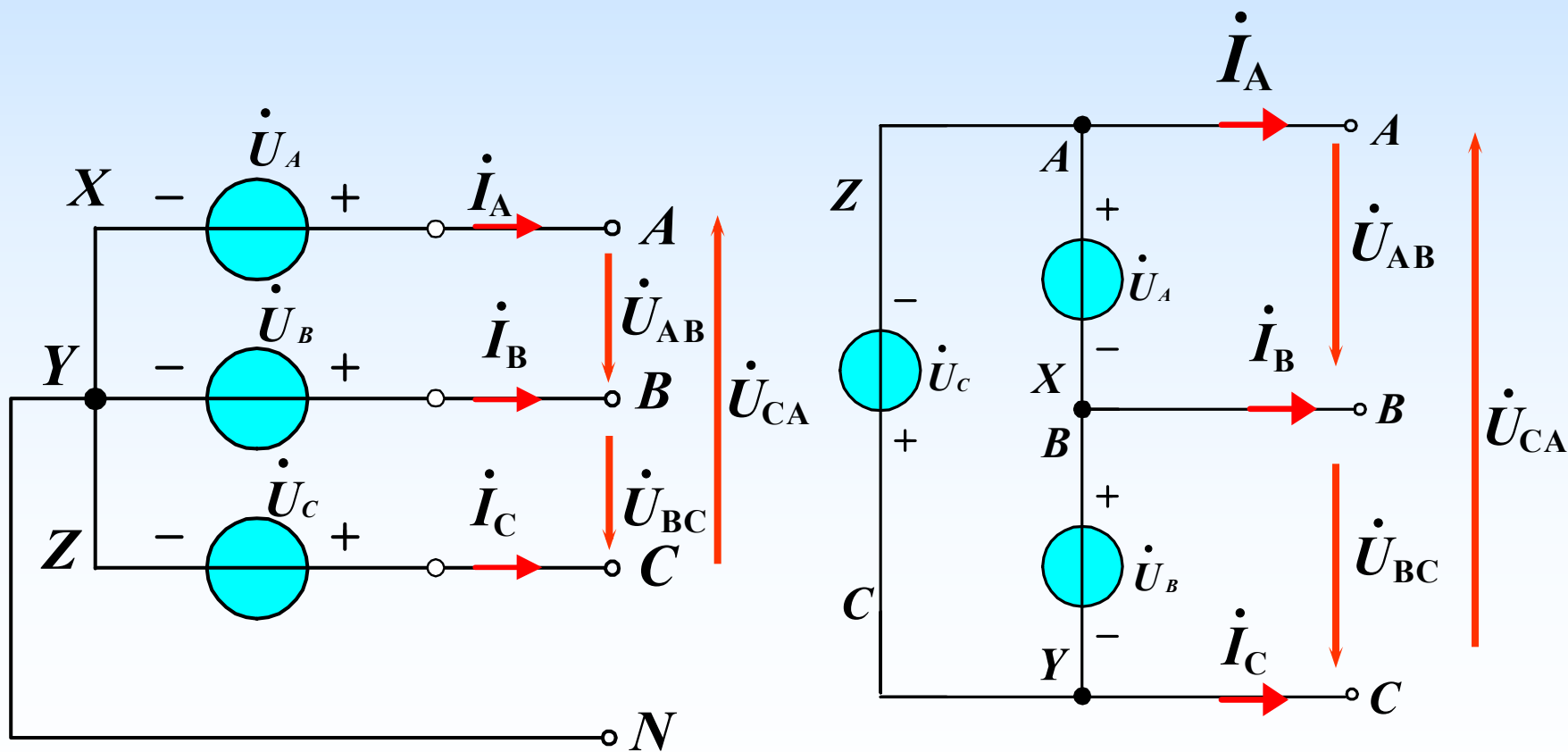
② 中线: 中性点引出线(接地时称地线), Δ 接无中线。

③ 三相三线制与三相四线制。



④ 线电压：端线与端线之间的电压 $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$

⑤ 线电流：流过端线的电流 $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$



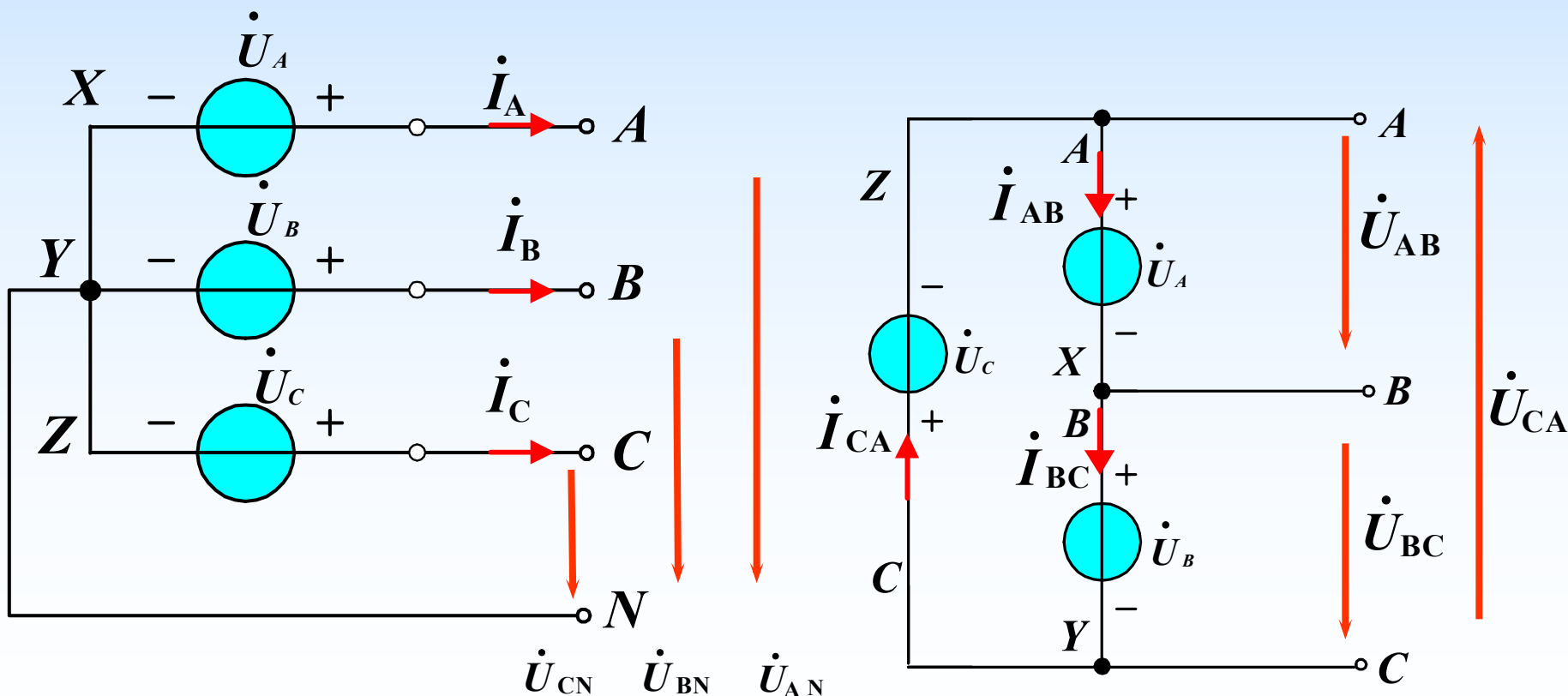
⑥相电压：每相电源(负载)的电压

Y接： $\dot{U}_{AN}, \dot{U}_{BN}, \dot{U}_{CN}$

Δ 接： $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$

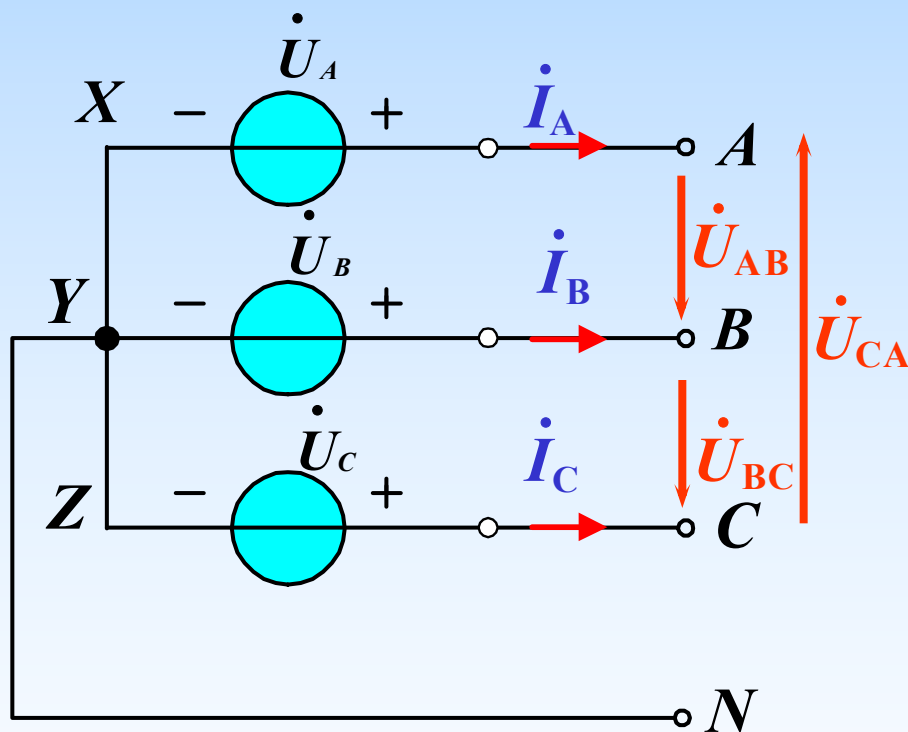
Y接： $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$

⑦相电流：流过每相电源(负载)的电流 Δ 接： $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$



2. 对称三相电源线电压与相电压的关系

(1) Y接



设: $\dot{U}_{AN} = \dot{U}_A = U \angle 0$

$$\dot{U}_{BN} = \dot{U}_B = U \angle -120$$

$$\dot{U}_{CN} = \dot{U}_C = U \angle 120$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN}$$

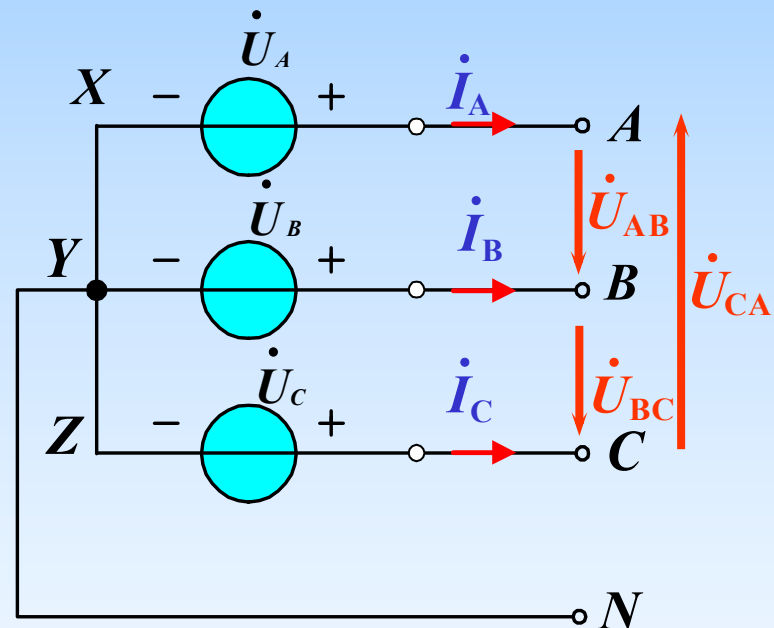
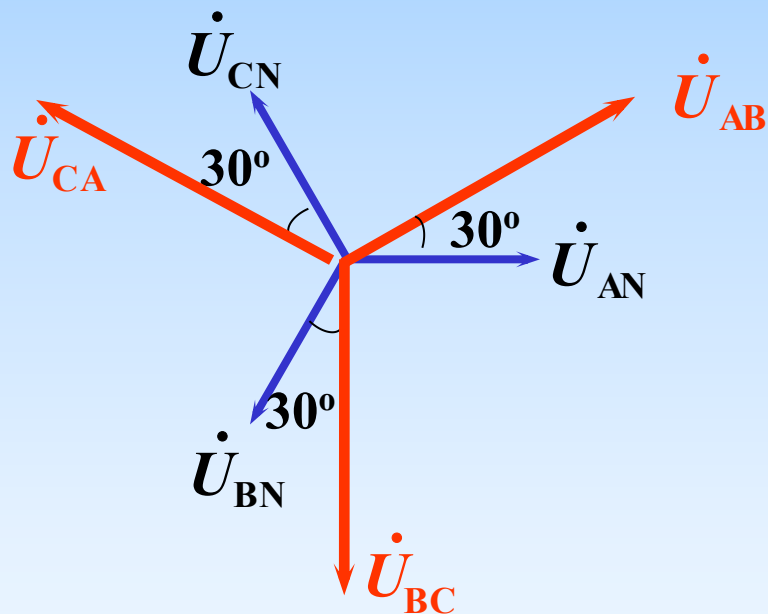
$$= U \angle 0 - U \angle -120$$

$$= \underline{\underline{\sqrt{3}U \angle 30}}$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN} = U \angle -120 - U \angle 120 = \underline{\underline{\sqrt{3}U \angle -90}}$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN} = U \angle 120 - U \angle 0 = \underline{\underline{\sqrt{3}U \angle 150}}$$

利用相量图得到相电压和线电压之间的关系：



一般表示为：

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

线电压对称(大小相等,
相位互差120°)

结论： 对Y接法的对称三相电源

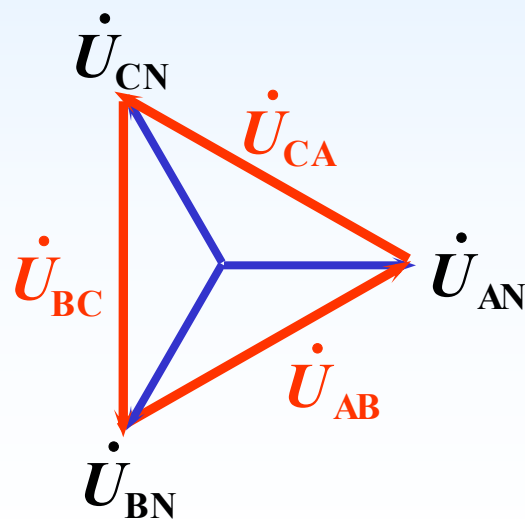
(1) 相电压对称，则线电压也对称。

(2) 线电压大小等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $U_l = \sqrt{3}U_p$ 。

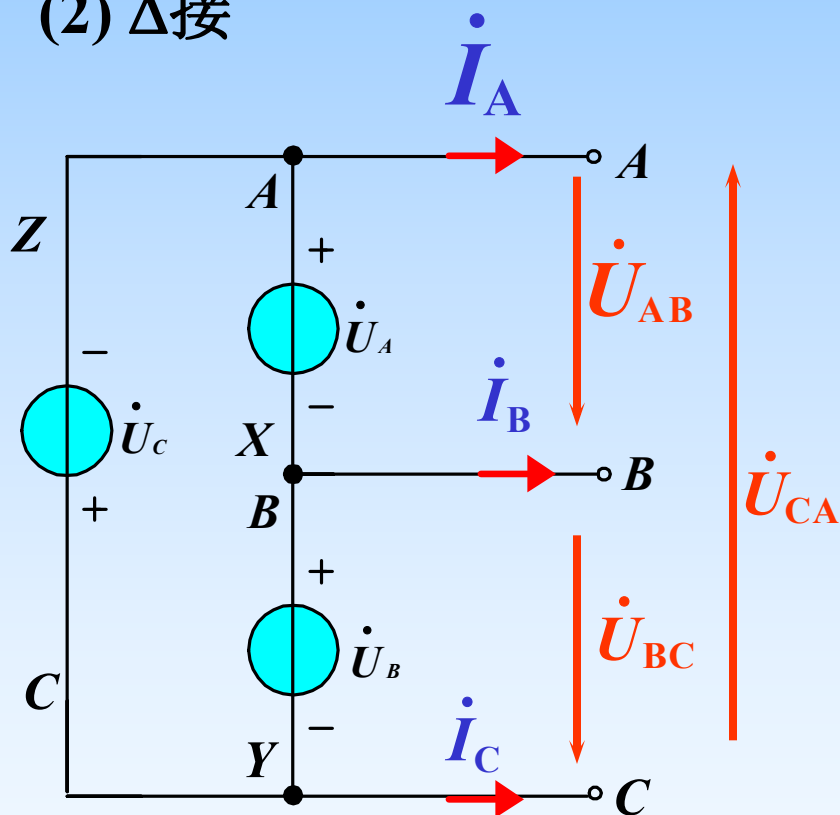
(3) 线电压相位超前对应相电压 30° 。

所谓的“对应”：对应相电压用线电压的第一个下标字母标出。

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{AB} \rightarrow \dot{U}_{AN} \\ \dot{U}_{BC} \rightarrow \dot{U}_{BN} \\ \dot{U}_{CA} \rightarrow \dot{U}_{CN} \end{array} \right.$$



(2) Δ 接



设: $\dot{U}_A = U \angle 0$

$$\dot{U}_B = U \angle -120$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120$$

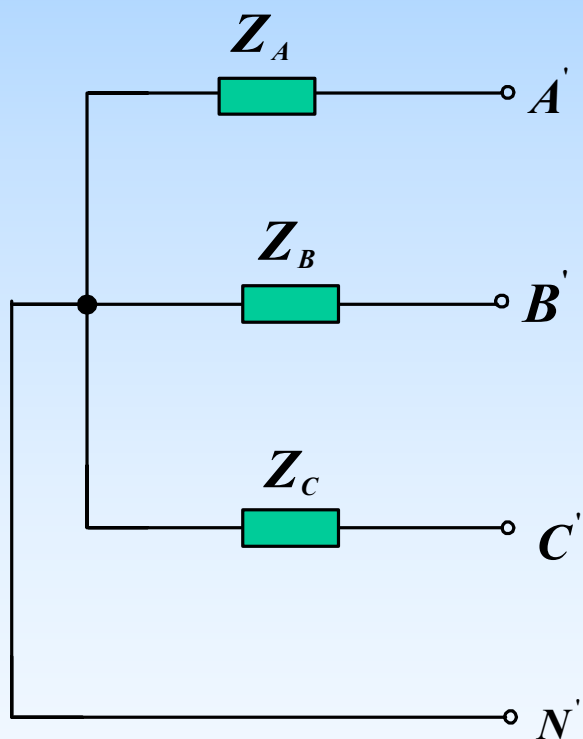
$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A = U \angle 0$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B = U \angle -120$$

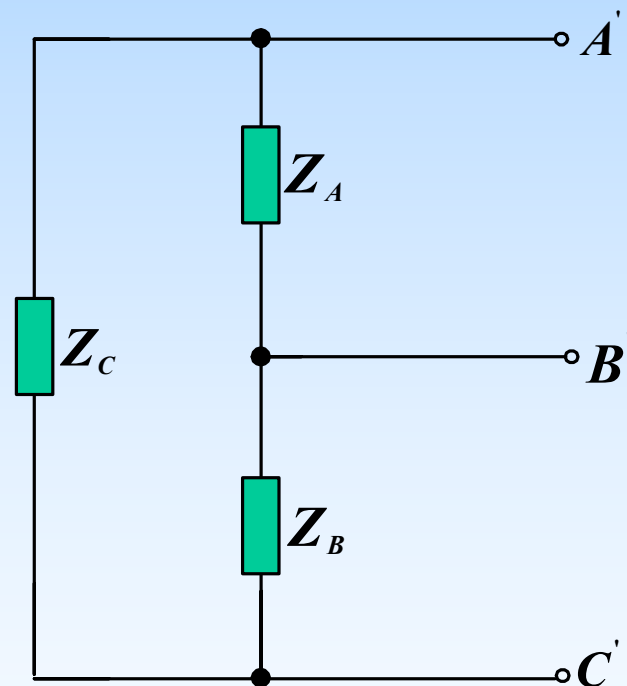
$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C = U \angle 120$$

即线电压等于对应的相电压。

三、三相负载的联接方式



Y连接



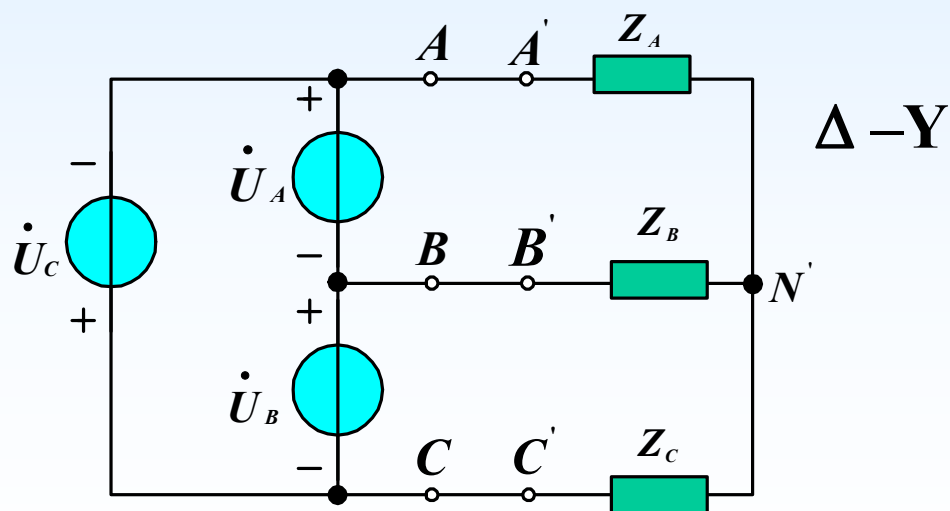
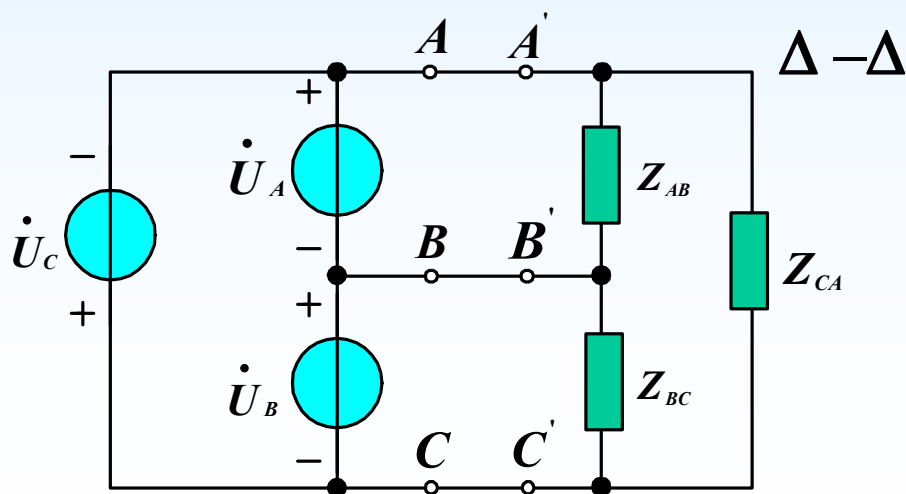
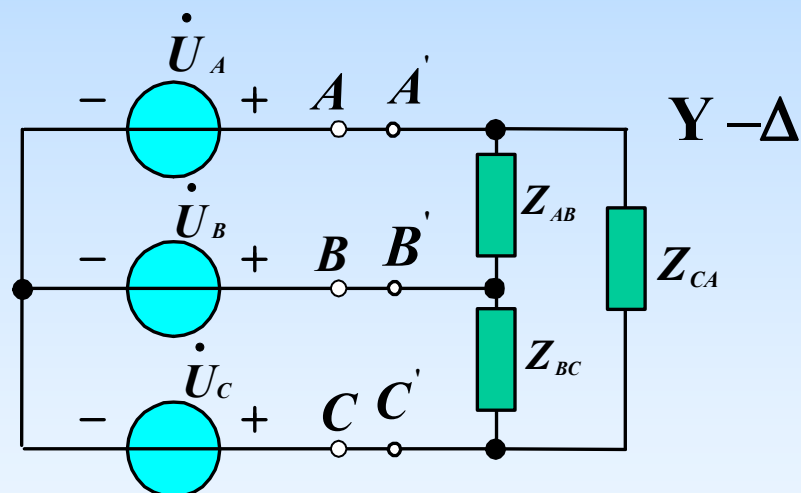
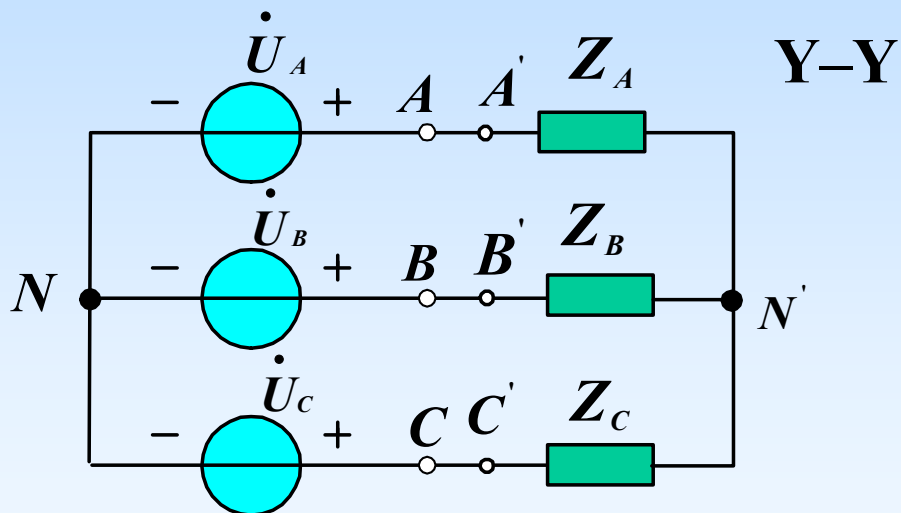
Δ 连接

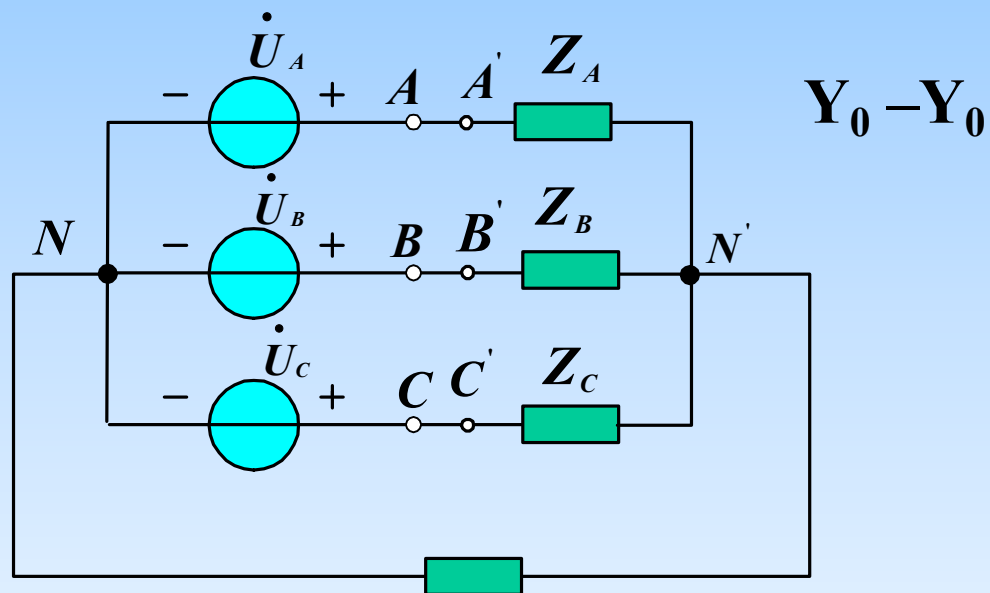
若 $Z_A = Z_B = Z_C$ ，对称三相负载。

若三相负载不相等，不对称三相负载。

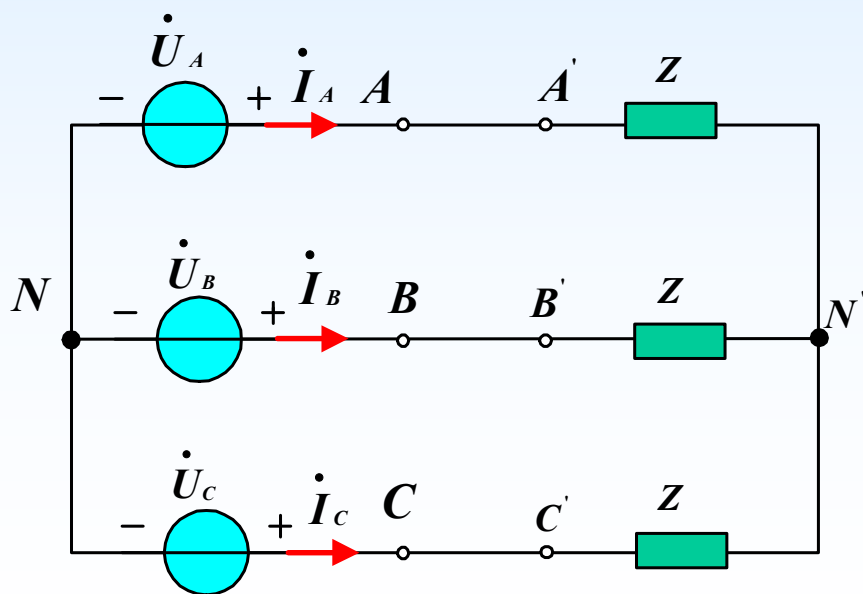
四、 对称三相电路： 由对称三相电源和对称三相负载联接而成。

按电源和负载的不同联接方式可分为Y-Y， Y₀-Y₀， Y-Δ， Δ-Y， Δ-Δ 等。



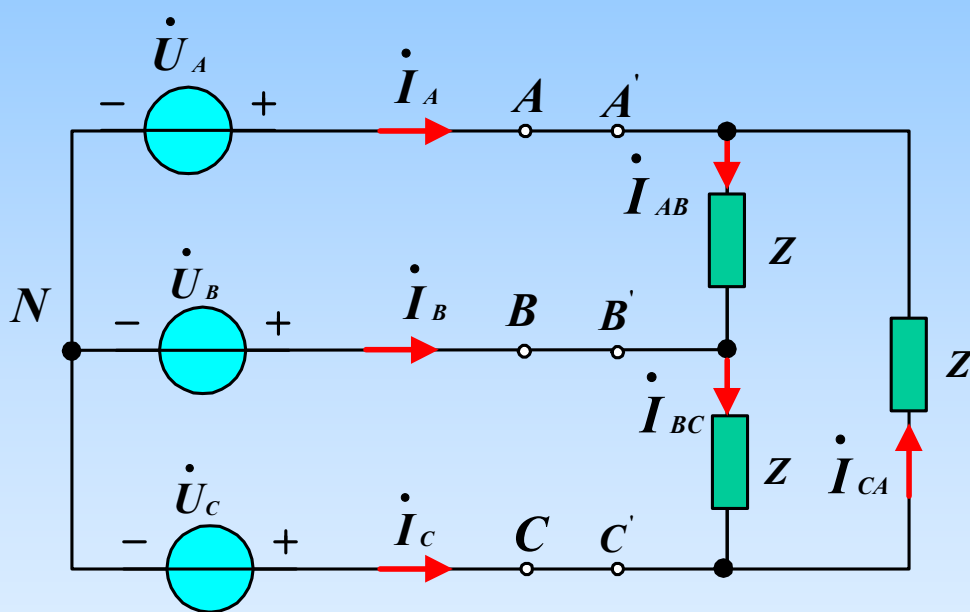


四、线电流与相电流的关系



负载Y连接:

线电流=相电流



负载 Δ 连接:

$$\dot{I}_{AB} = I \angle 0$$

设: $\dot{I}_{BC} = I \angle -120$

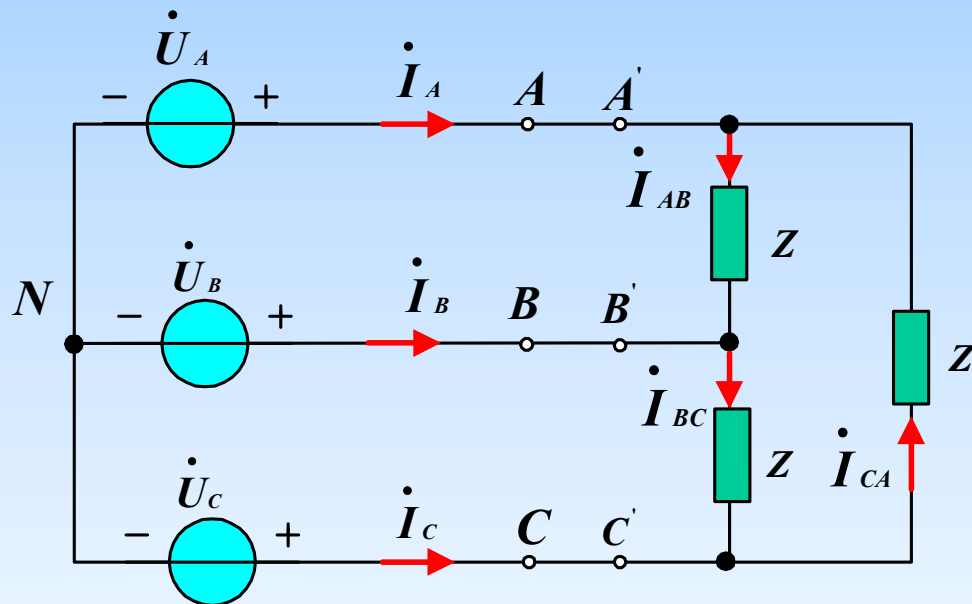
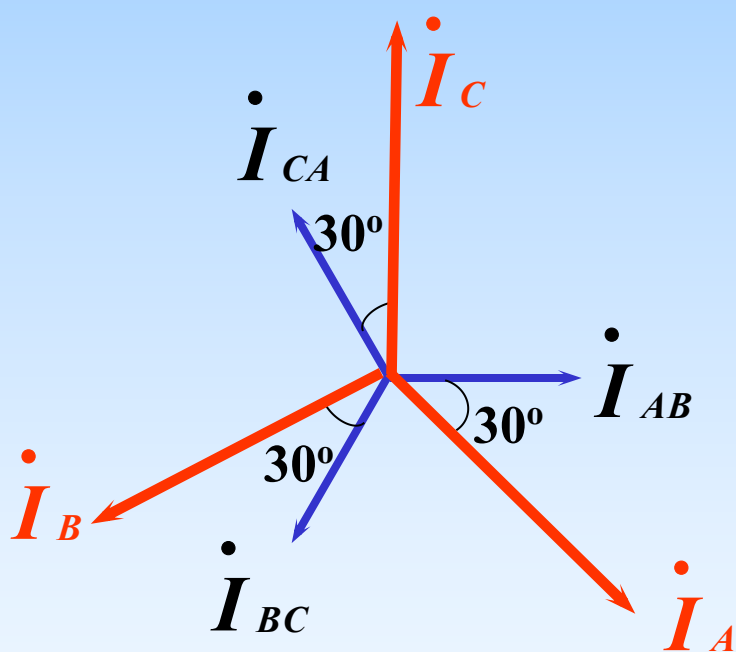
$$\dot{I}_{CA} = I \angle 120$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = I \angle 0 - I \angle 120 = \sqrt{3}I \angle -30 \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = I \angle -120 - I \angle 0 = \sqrt{3}I \angle -150 \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = I \angle 120 - I \angle -120 = \sqrt{3}I \angle 90 \text{ A}$$

利用相量图得到线电流和相电流之间的关系：



$$\dot{I}_A = \sqrt{3}I \angle -30^\circ = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ \quad \text{A}$$

$$\dot{I}_B = \sqrt{3}I \angle -150^\circ = \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ \quad \text{A}$$

$$\dot{I}_C = \sqrt{3}I \angle 90^\circ = \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ \quad \text{A}$$

结论： 对 Δ 接法的对称三相负载

(1) 相电流对称，则线电流也对称。

(2) 线电流大小等于相电流的 $\sqrt{3}$ ， 即 $I_l = \sqrt{3}I$ 。

(3) 线电流相位滞后对应相电流 30° 。

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

$$\dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ \text{ A}$$

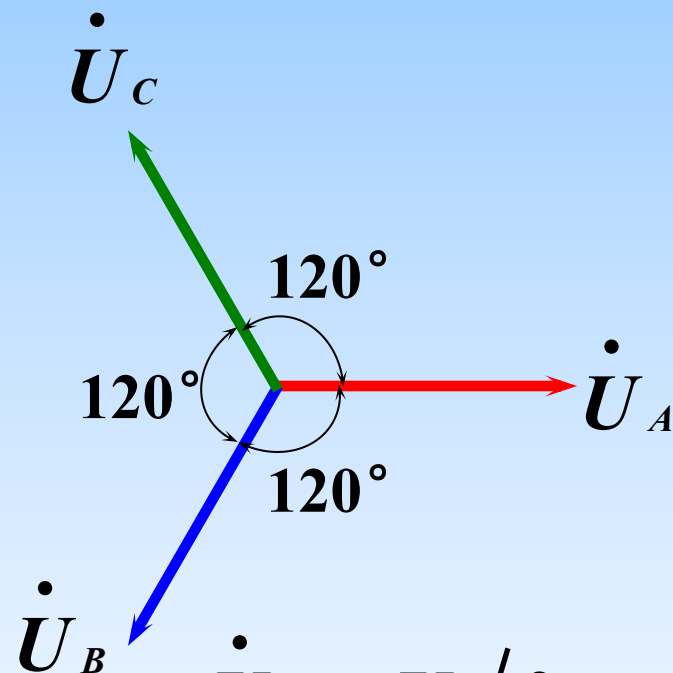
总结:

1、三相对称电源的表达式及相量图:

$$u_A(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

$$u_B(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$\begin{aligned} u_C(t) &= \sqrt{2}U \cos(\omega t - 240^\circ) \\ &= \sqrt{2}U \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}$$



$$\dot{U}_A = U \angle 0$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120$$

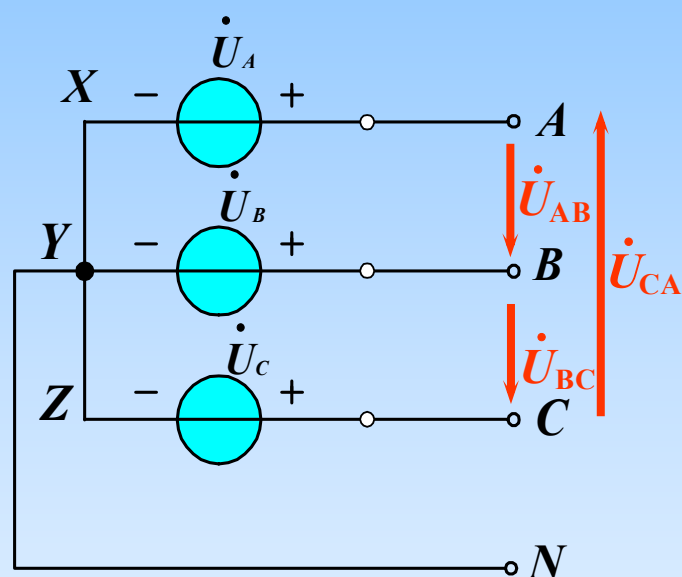
2、三相电源和三相负载的连接:

Y-Y, Y₀-Y₀, Y-Δ, Δ-Y, Δ-Δ。

3、线电压、相电压：

$$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$$

$$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$$



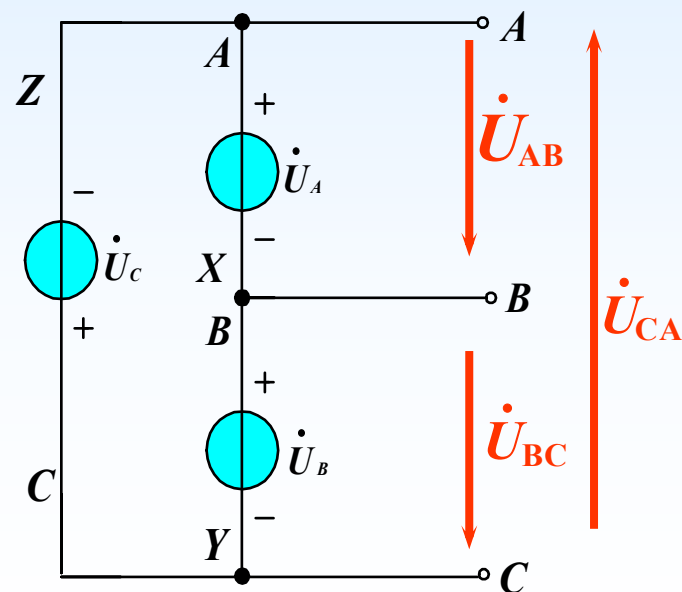
对Y接法的对称三相电源：

线电压大小等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $U_l = \sqrt{3}U_p$ 。

线电压相位超前对应相电压 30° 。

对 Δ 接法的对称三相电源：

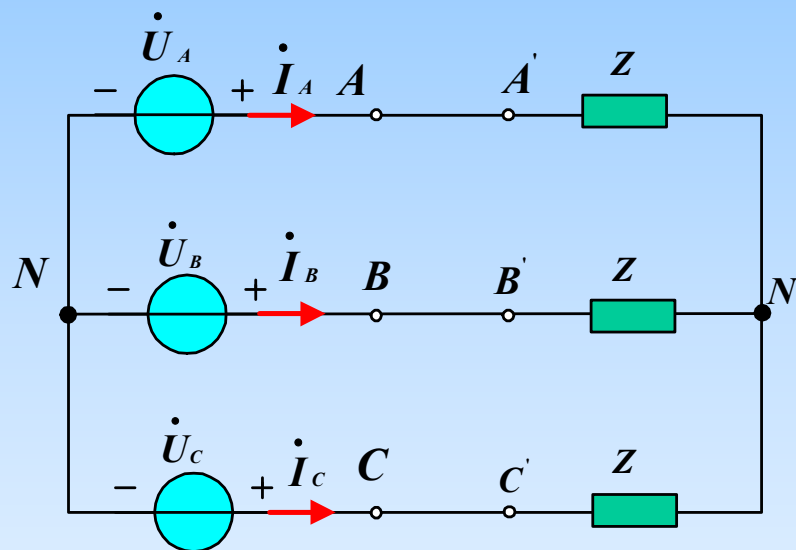
线电压等于对应的相电压。



4、线电流、相电流：

负载Y连接：

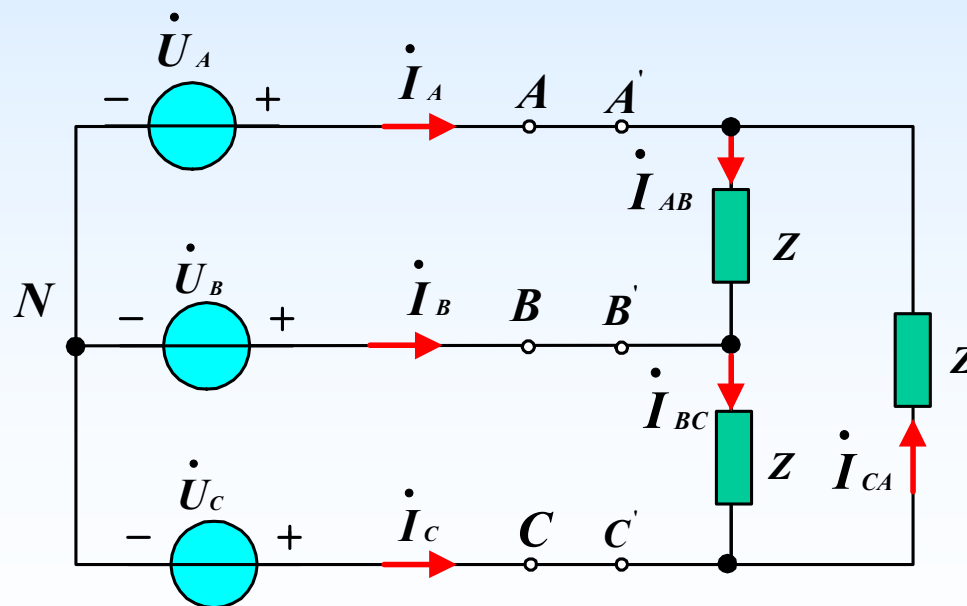
线电流=相电流



负载 Δ 接法：

线电流大小等于相电流的 $\sqrt{3}$ ，即 $I_l = \sqrt{3}I$ 。

线电流相位滞后对应相电流 30° 。

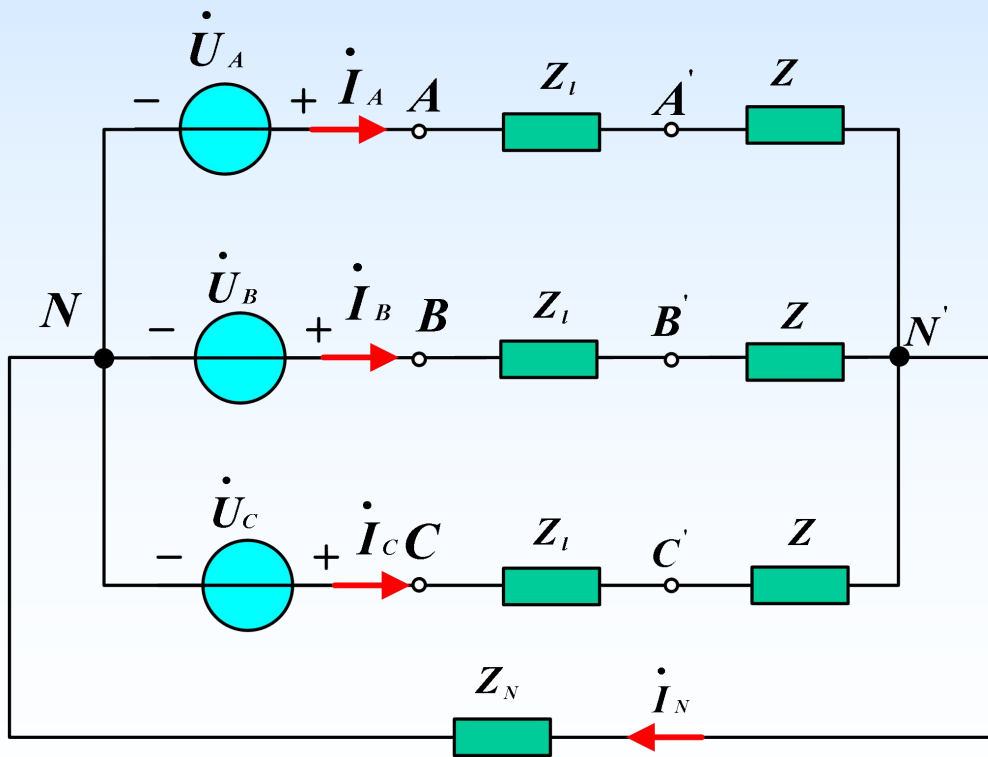


§ 9-2 对称三相电路的计算

一、对称三相电路的计算

对称三相电路的计算方法是一相计算法。

1. $Y_0 - Y_0$ (三相四线制)



Z_l 端线阻抗

Z_N 中线阻抗

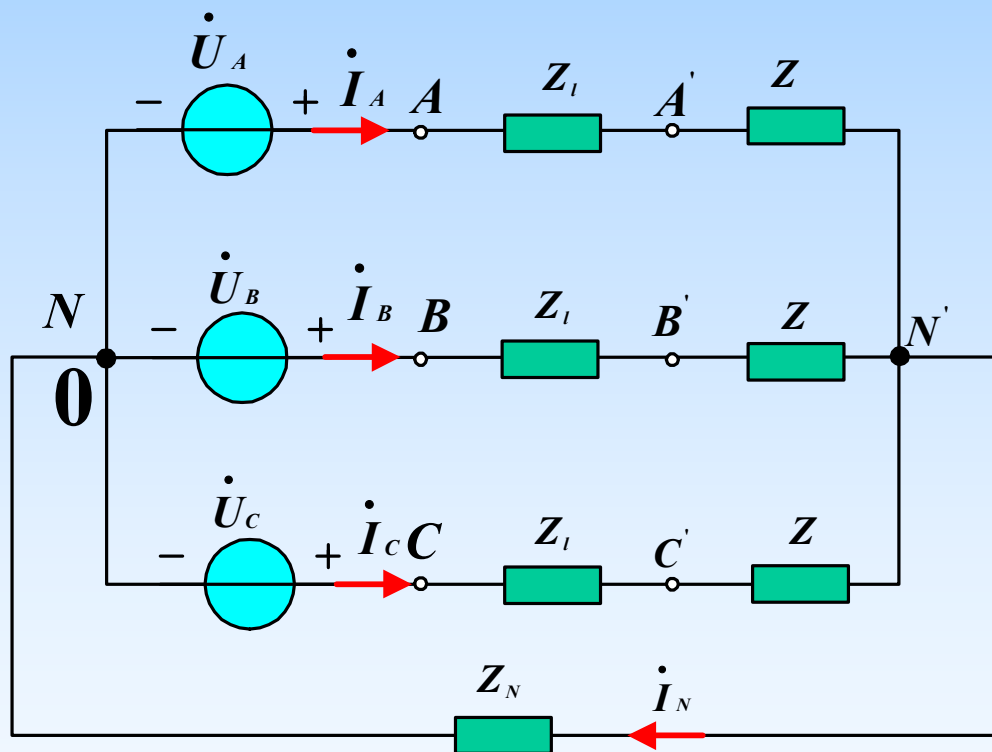
N 、 N' 中性点

$$\dot{U}_A = U \angle 0$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120$$

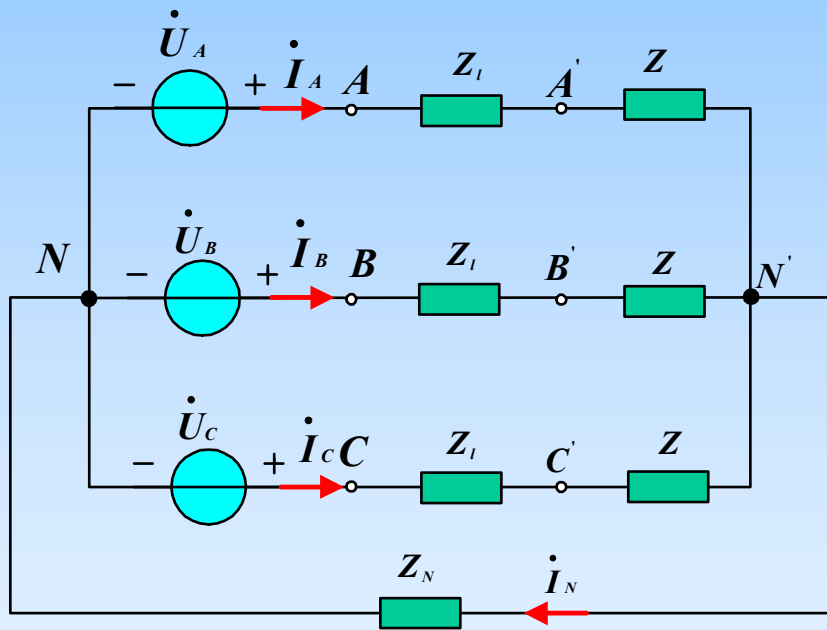
以N点为参考点，对 N' 点列写结点方程：



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

$$\therefore \dot{U}_{N'N} = 0$$

$$\left(\frac{1}{Z + Z_l} + \frac{1}{Z + Z_l} + \frac{1}{Z + Z_l} + \frac{1}{Z_N} \right) \dot{U}_{N'N} = \frac{1}{Z + Z_l} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)$$



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

$$\dot{U}_A = U \angle 0$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120$$

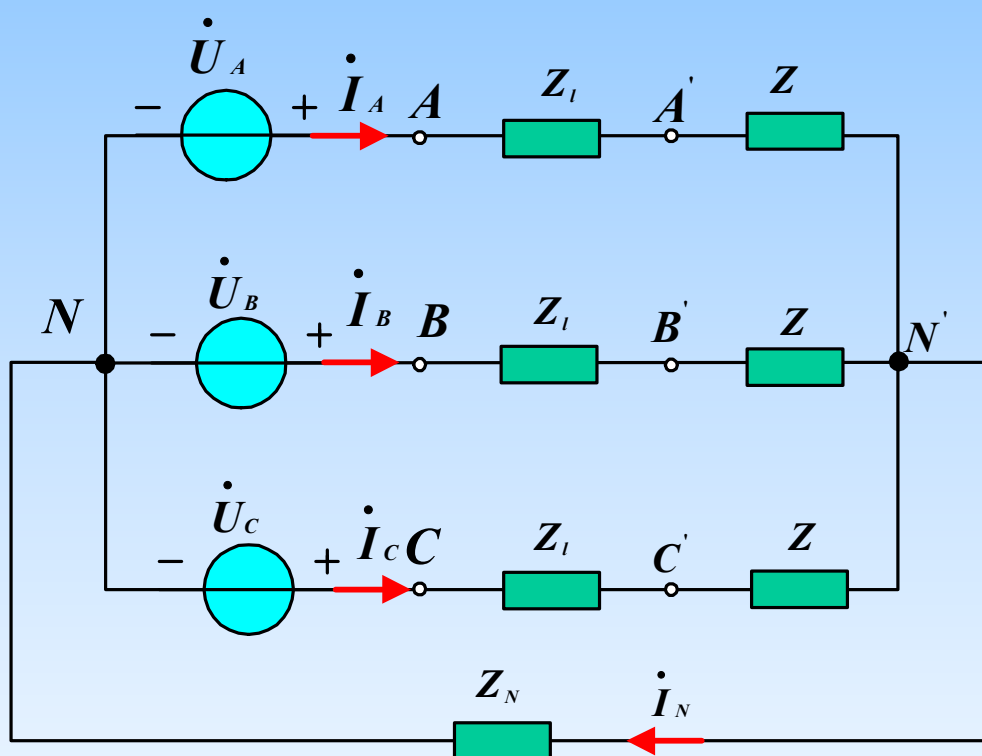
$$\dot{U}_C = U \angle 120$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN'}}{Z + Z_l} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{N'N}}{Z + Z_l} = \frac{\dot{U}_A}{Z + Z_l}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN'}}{Z + Z_l} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{N'N}}{Z + Z_l} = \frac{\dot{U}_B}{Z + Z_l} = \dot{I}_A \angle -120$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN'}}{Z + Z_l} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{N'N}}{Z + Z_l} = \frac{\dot{U}_C}{Z + Z_l} = \dot{I}_A \angle 120$$

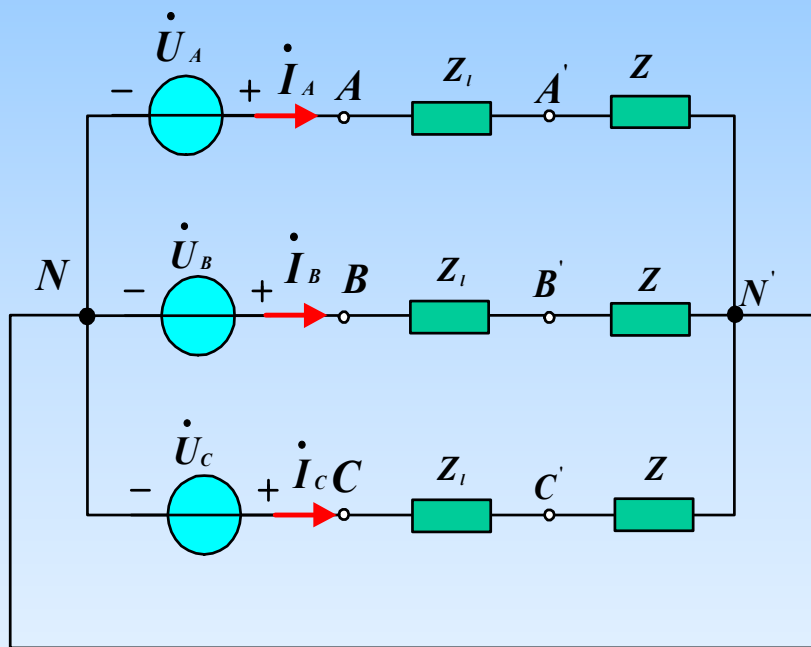
流过每相负载的电流与流过相应端线的线电流相等，且三相电流也是对称的。



中线电流为：

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_A + \dot{I}_A \angle -120^\circ + \dot{I}_A \angle 120^\circ = 0$$

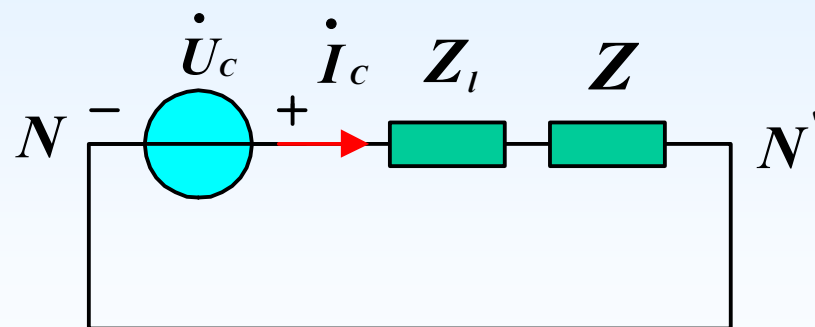
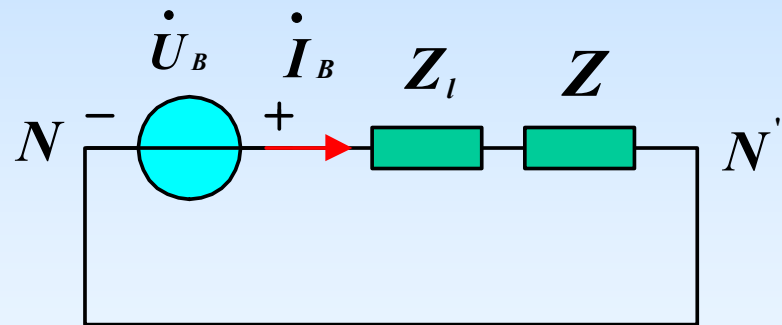
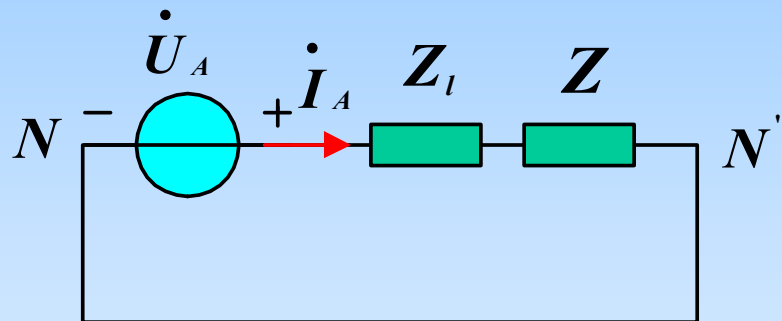
因 N ， N' 两点等电位，可将其短路，且其中电流为零。

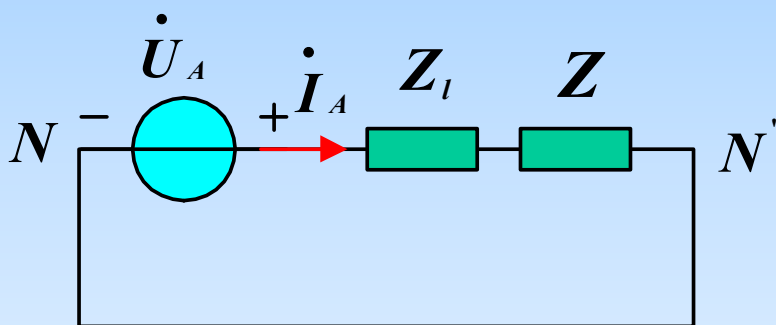


由图可知，各线电流（相电流）独立，彼此无关。

由于三相电源、三相负载对称，所以三相线电流也对称。只要分析计算三相中的任一相，而其它两相的电压、电流就能按对称性可写出。

一相计算电路：





$$\dot{U}_A = U \angle 0$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN'}}{Z + Z_l} = \frac{\dot{U}_A}{Z + Z_l} = \frac{U}{|Z|} \angle -\varphi$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A \angle -120 = a^2 \dot{I}_A$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_A \angle +120 = a \dot{I}_A \quad a = 1 \angle 120 \text{ 单位相量算子。}$$

结论:

① 中线电流为零。

有无中线对电路情况没有影响。没有中线(Y-Y接法, 三相三线制), 可将中线连上。因此, Y-Y电路与 Y_0-Y_0 (有中线)电路计算方法相同。且中线有阻抗时可短路掉。

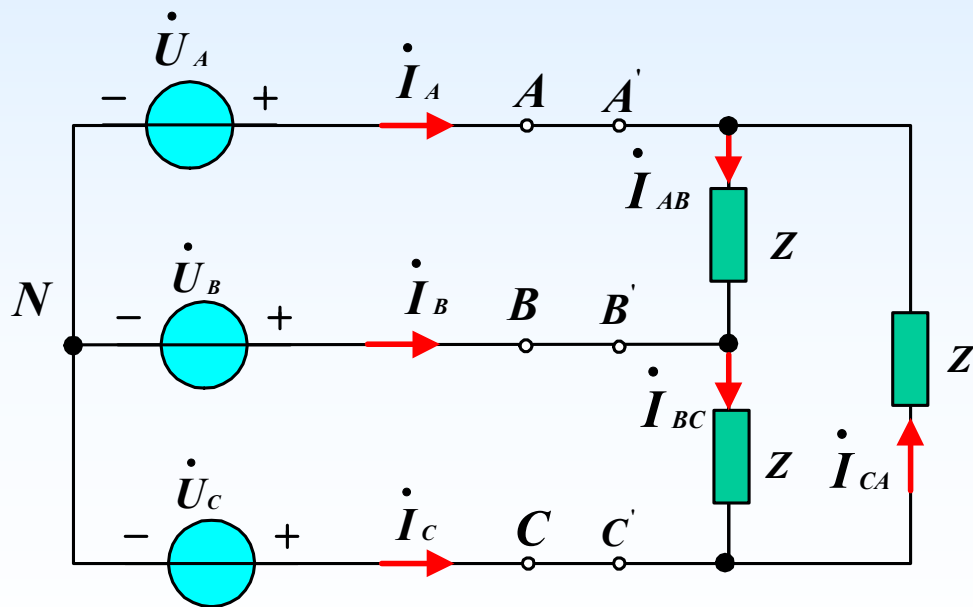
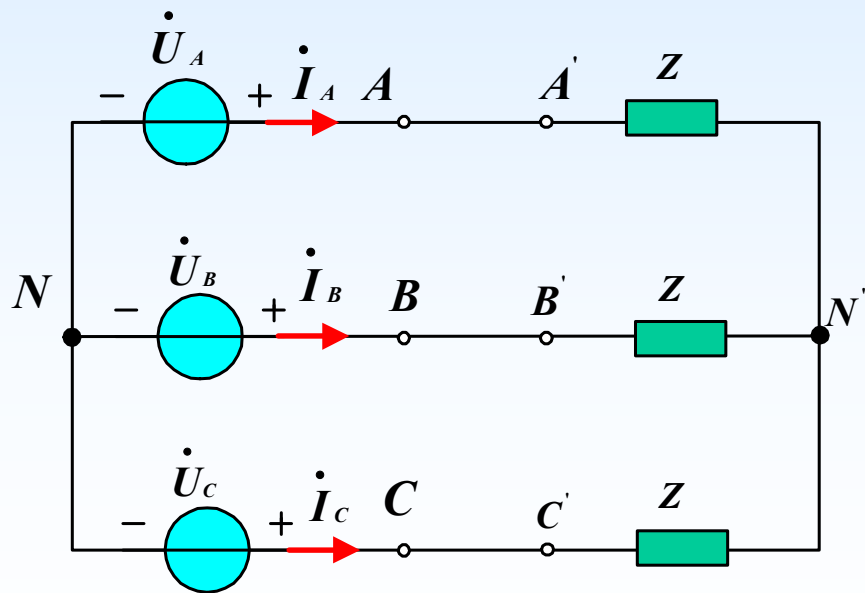
② 对称情况下, 各相电压、电流都是对称的, 只要算出某一相的电压、电流, 则其他两相的电压、电流可直接写出。

归纳:

1. 三相电压、电流均对称。

负载为Y接 { 线电压大小为相电压的 $\sqrt{3}$ ，相位超前 30° 。
线电流与对应的相电流相同。

负载为 Δ 接 { 线电压与对应的相电压相同。
线电流大小为相电流的 $\sqrt{3}$ ，相位滞后 30° 。

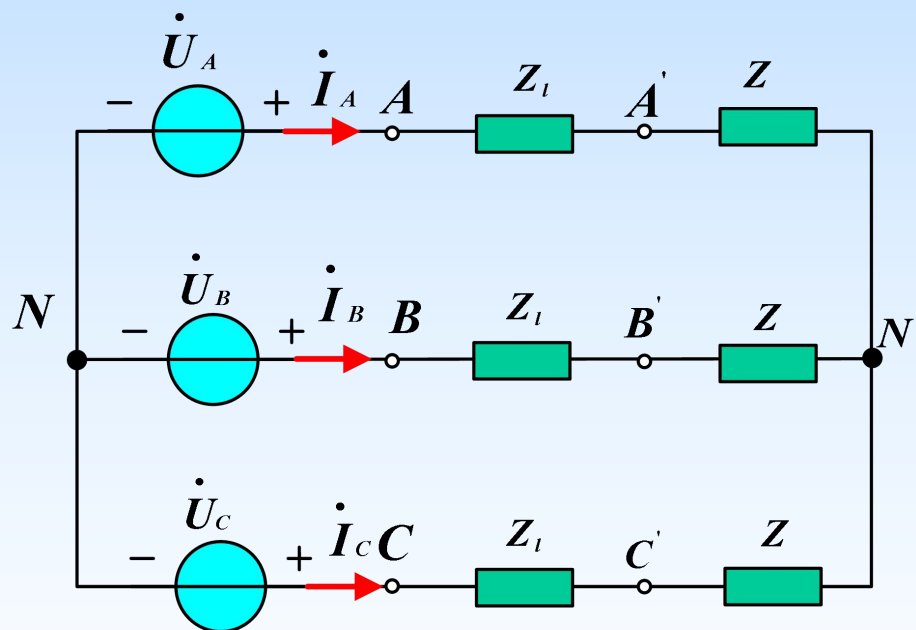


2. 对称三相电路的一般计算方法

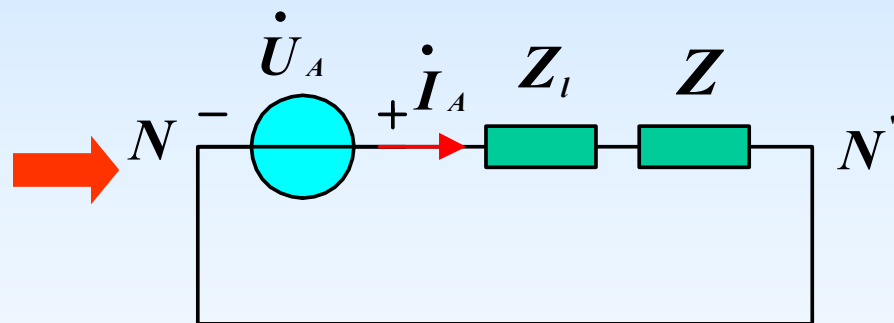
- (1) 将所有三相电源、负载都化为等值Y—Y接电路；
- (2) 连接各负载和电源中点，中线上若有阻抗可不计；
- (3) 画出单相计算电路，求出一相的电压、电流：
一相电路中的电压为Y接时的相电压。
一相电路中的电流为线电流。
- (4) 根据 Δ 、Y接 线量、相量之间的关系，求出原电路的电流电压。
- (5) 由对称性，得出其它两相的电压、电流。

例1. 已知对称三相电源线电压为380V, $Z=6.4+j4.8\Omega$,
 $Z_l=3+j4\Omega$.

求负载Z的相电压、线电压和电流。

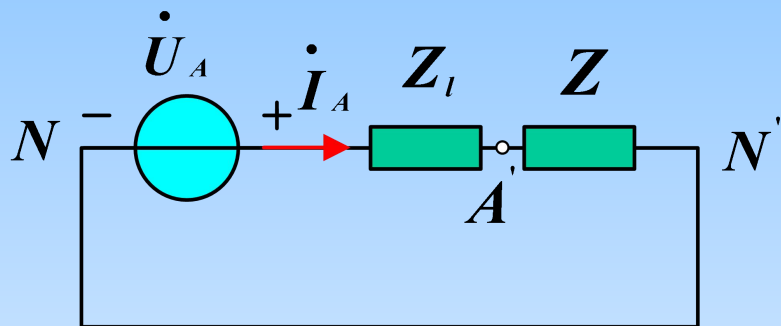


解:



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

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



$$Z = 6.4 + j4.8 \Omega, \quad Z_l = 3 + j4 \Omega$$

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z + Z_l} = \frac{220 \angle -30^\circ}{9.4 + j8.8} = \frac{220 \angle -30^\circ}{12.88 \angle 43.1^\circ} = 17.1 \angle -73.1^\circ \text{ A}$$

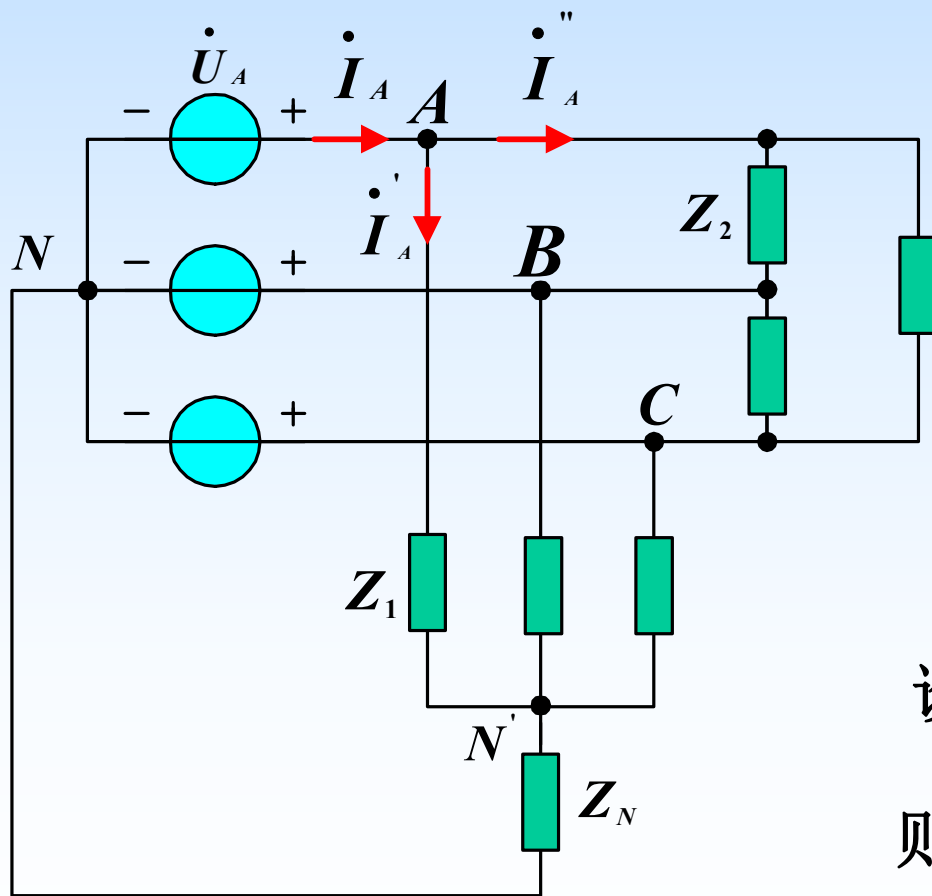
$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'N'} &= \dot{I}_A \cdot Z = 17.1 \angle -73.1^\circ \times 8 \angle 36.9^\circ \\ &= 136.8 \angle -36.2^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'B'} &= \sqrt{3} \dot{U}_{A'N'} \angle 30^\circ \\ &= \sqrt{3} \times 136.8 \angle -6.2^\circ = 236.9 \angle -6.2^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

负载 Z 的相电压136.8V、线电压236.9V和电流17.1A。

例2. 如图对称三相电路，电源线电压为380V， $|Z_1|=10\Omega$ ， $\cos\varphi_1=0.6$ (滞后)， $Z_2=-j50\Omega$ ， $Z_N=1+j2\Omega$ 。

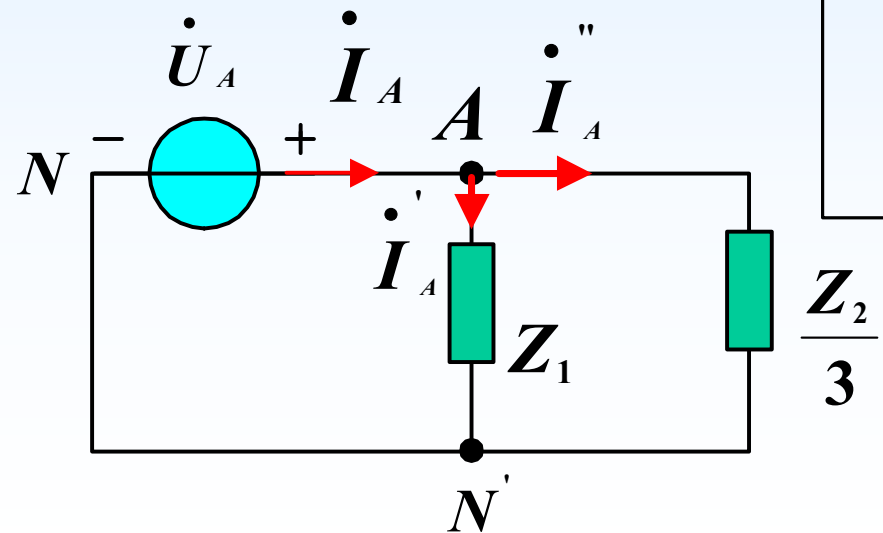
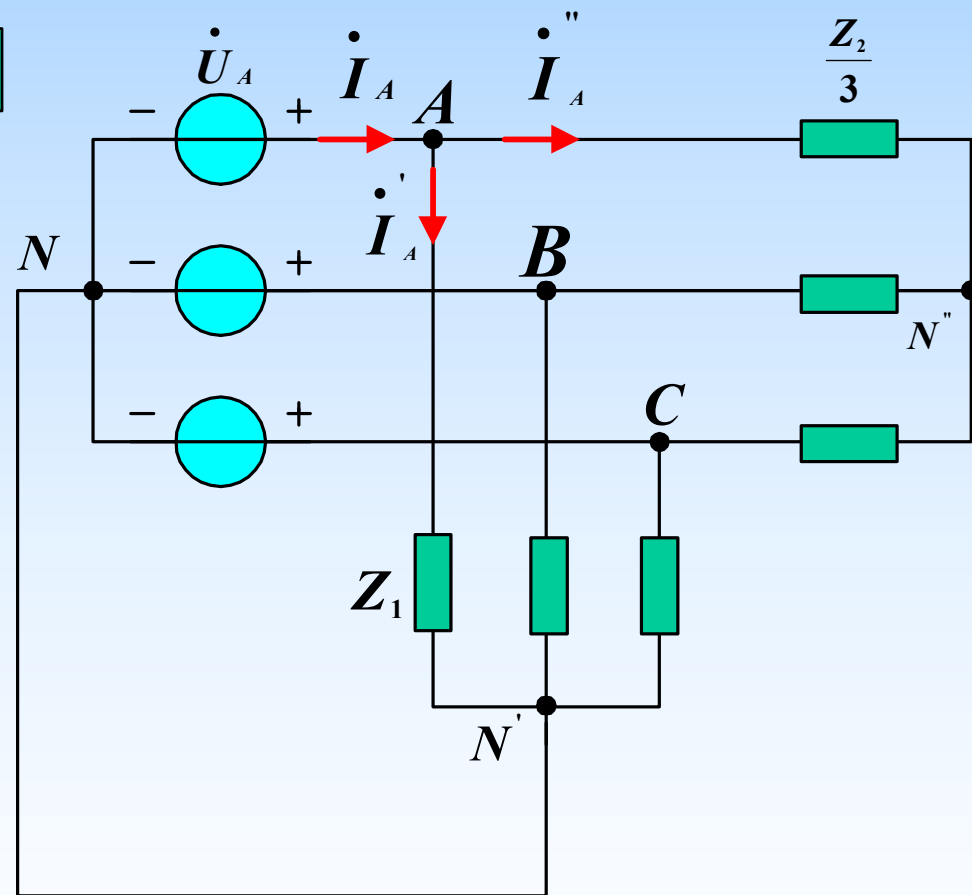
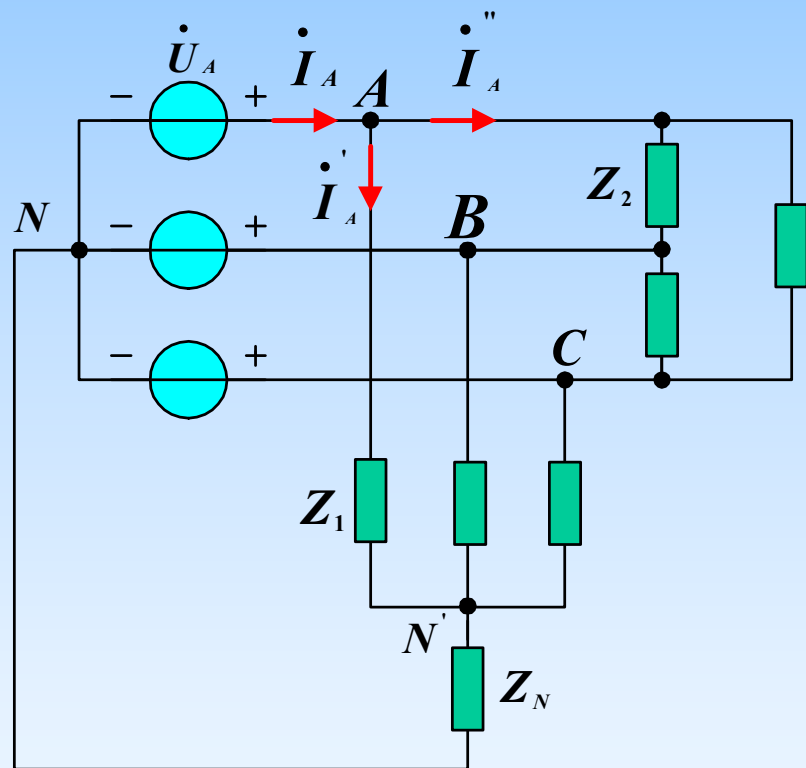
求：线电流、相电流，并定性画出相量图(以A相为例)。



解：

$$\text{设： } \dot{U}_A = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\text{则： } \dot{U}_{AB} = 380 \angle +30^\circ \text{ V}$$



$$Z_1 = 10 \angle \varphi_1 = 6 + j8\Omega$$

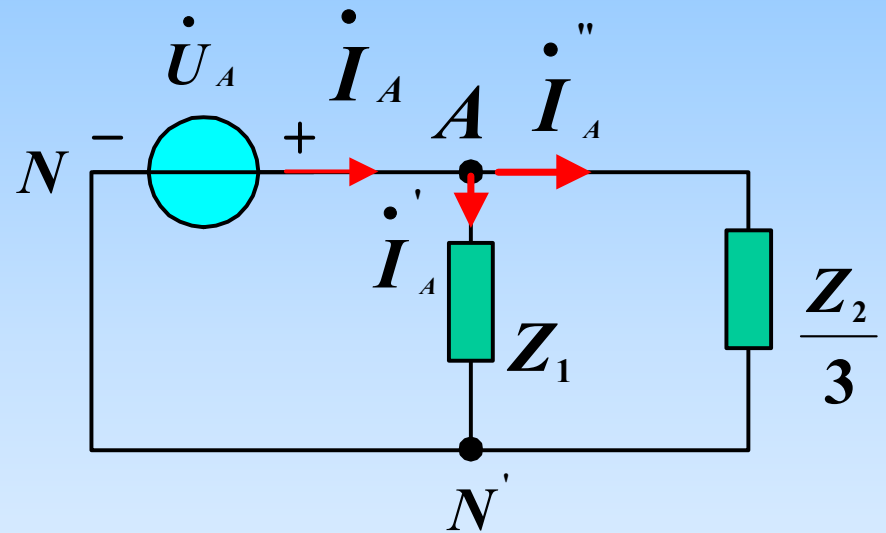
$$\frac{1}{3}Z_2 = -j\frac{50}{3}\Omega$$

$$\dot{I}_A' = \frac{\dot{U}_A}{Z_1} = \frac{220 \angle 0}{10 \angle 53.13}$$

$$= 22 \angle -53.13$$

$$= 13.2 - j17.6\text{A}$$

$$\dot{I}_A'' = \frac{\dot{U}_A}{\frac{1}{3}Z_2} = \frac{220 \angle 0}{-j50/3} = j13.2\text{A}$$



$$|Z_1|=10\Omega, \cos\varphi_1=0.6(\text{滞后}), \\ Z_2=-j50\Omega。$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_A' + \dot{I}_A''$$

$$= 13.9 \angle -18.4 \text{ A}$$

$$\dot{I}_A = 13.9 \angle -18.4^\circ \text{ A}$$

根据对称性，得B、C相的线电流、相电流：

$$\dot{I}_B = 13.9 \angle -138.4^\circ \text{ A}$$

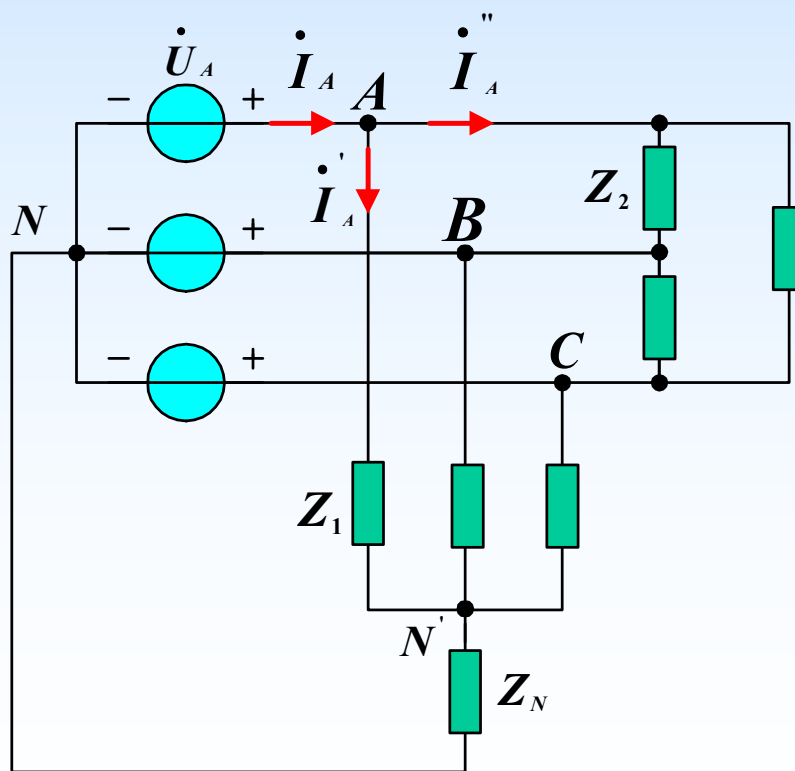
$$\dot{I}_C = 13.9 \angle 101.6^\circ \text{ A}$$

第一组负载的相电流：

$$\dot{I}'_A = 22 \angle -53.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}'_B = 22 \angle -173.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}'_C = 22 \angle 66.9^\circ \text{ A}$$



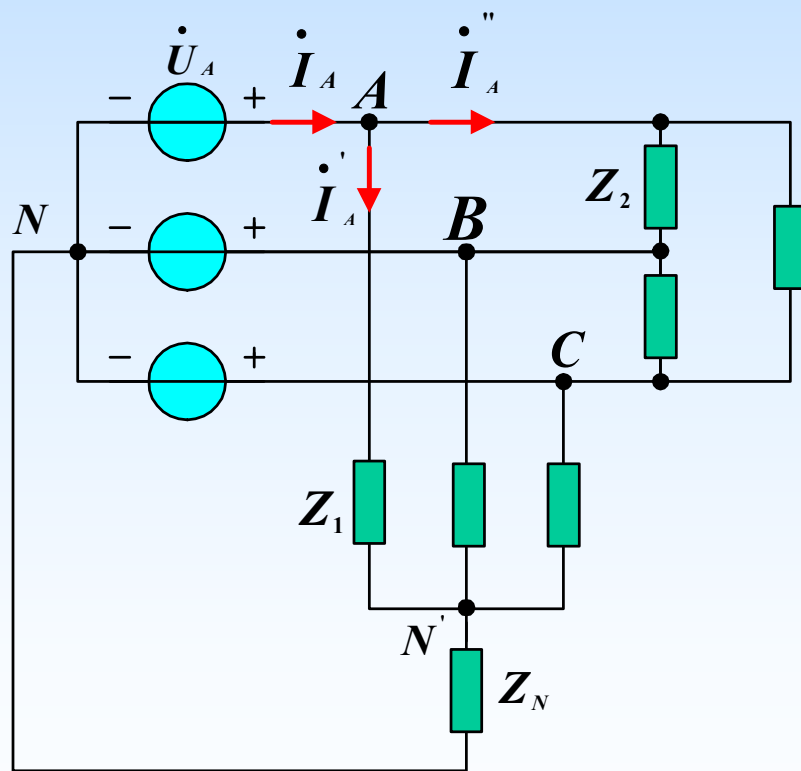
第二组负载的相电流:

$$\dot{I}_A'' = \frac{\dot{U}_A}{\frac{1}{3}Z_2} = j13.2\text{A}$$

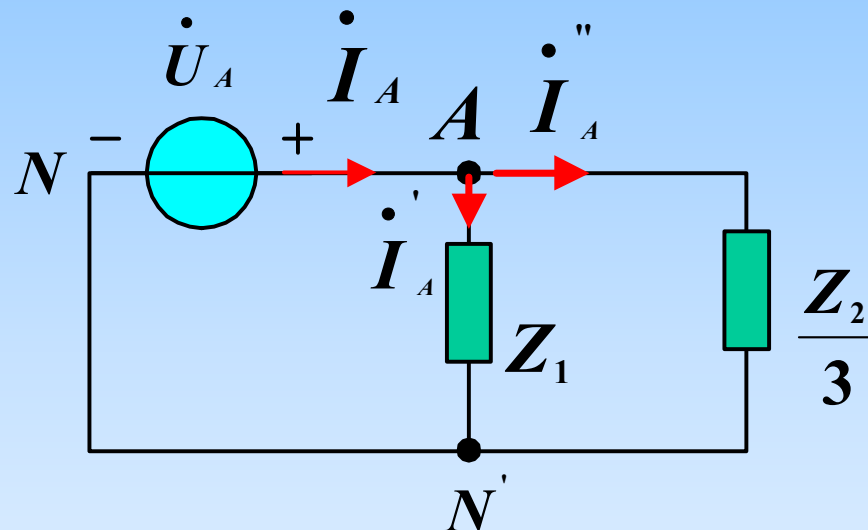
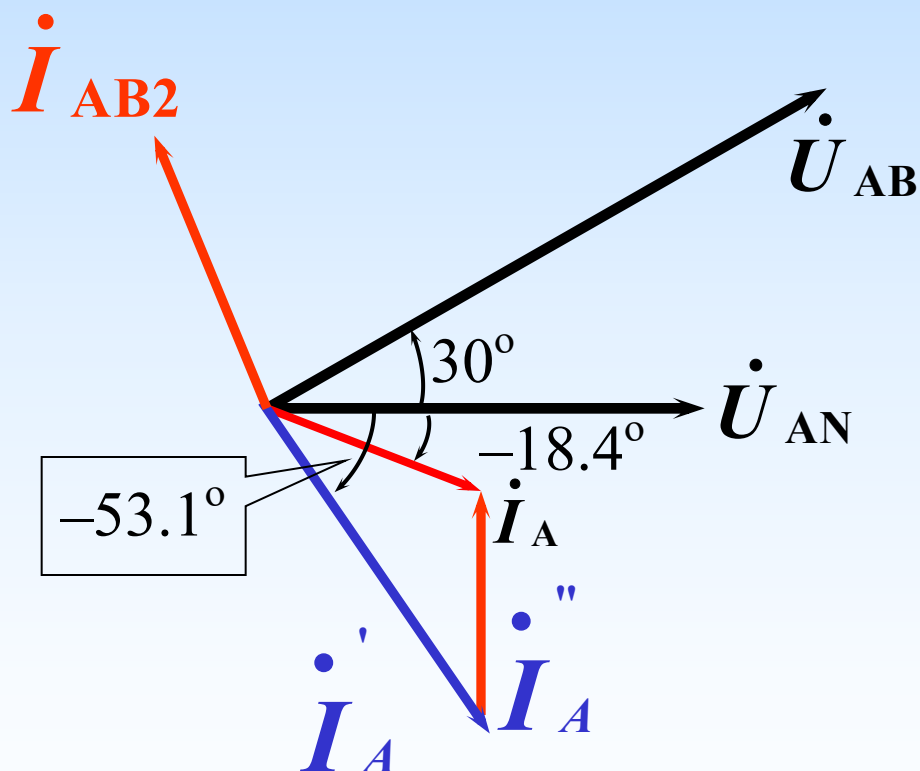
$$\begin{aligned}\dot{I}_{AB2} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_A'' \angle 30^\circ \\ &= 7.62 \angle 120^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{BC2} = 7.62 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{CA2} = 7.62 \angle -120^\circ \text{ A}$$



由此可以画出相量图：



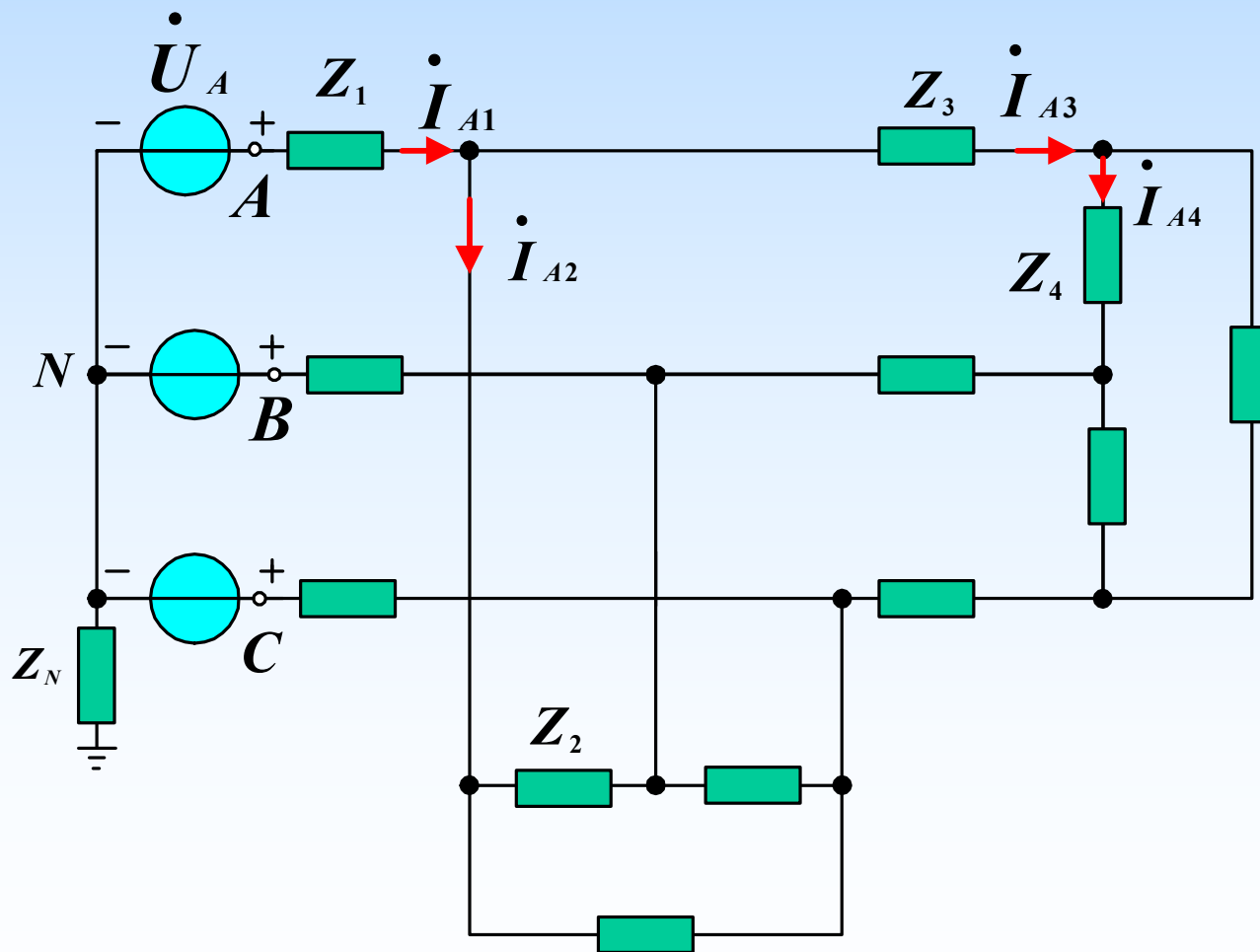
$$\dot{I}_A = 13.9 \angle -18.4^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}'_A = 22 \angle -53.13^\circ \text{ A}$$

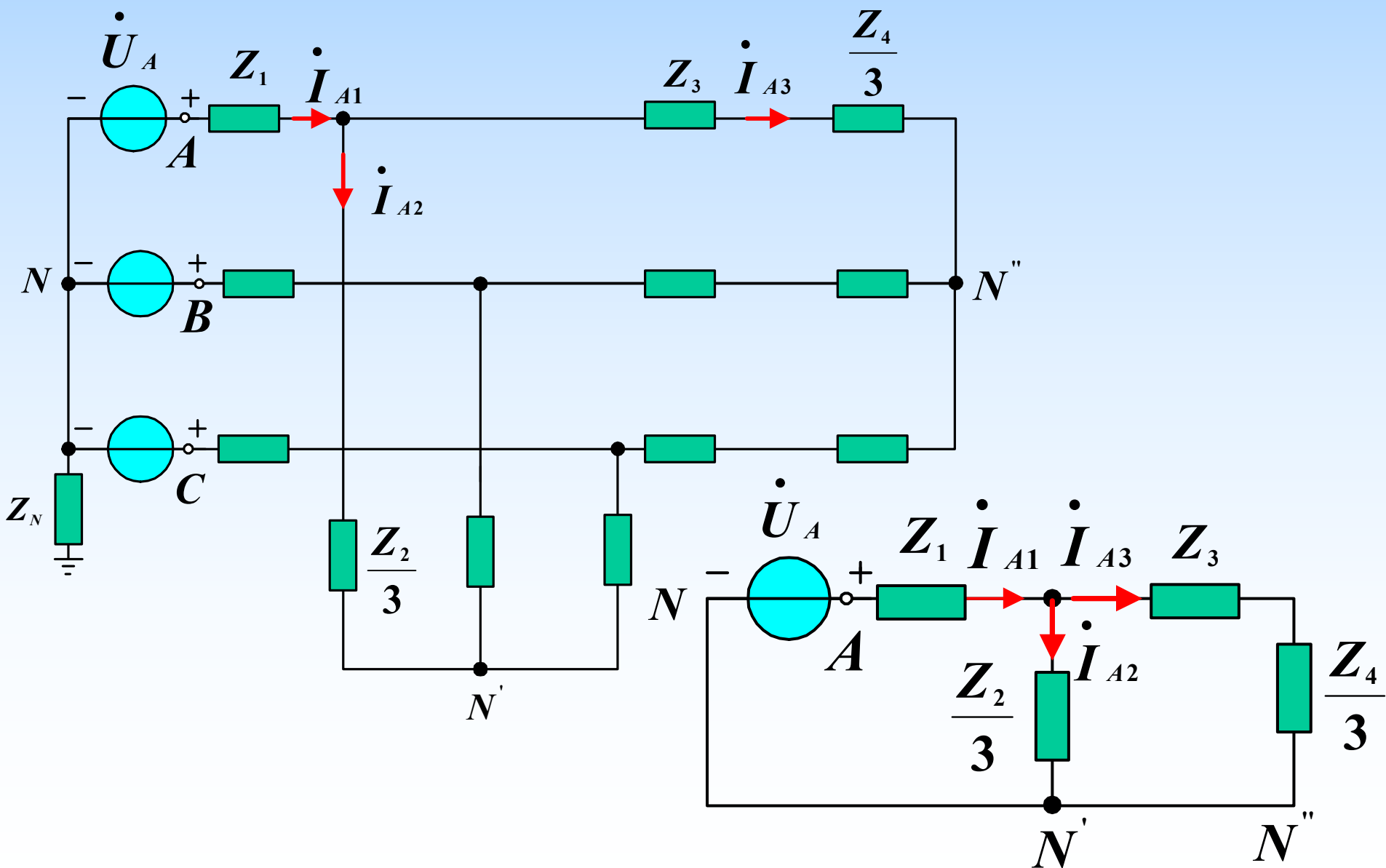
$$\dot{I}''_A = j13.2 \text{ A}$$

例3. 已知 $\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}U \angle 0^\circ \text{ V}$, 各负载如图所示。

求: $\dot{I}_{A1}$, $\dot{I}_{A2}$, $\dot{I}_{A3}$, $\dot{I}_{A4}$ 。



解：首先进行 Δ —Y变换，
然后取A相计算电路：



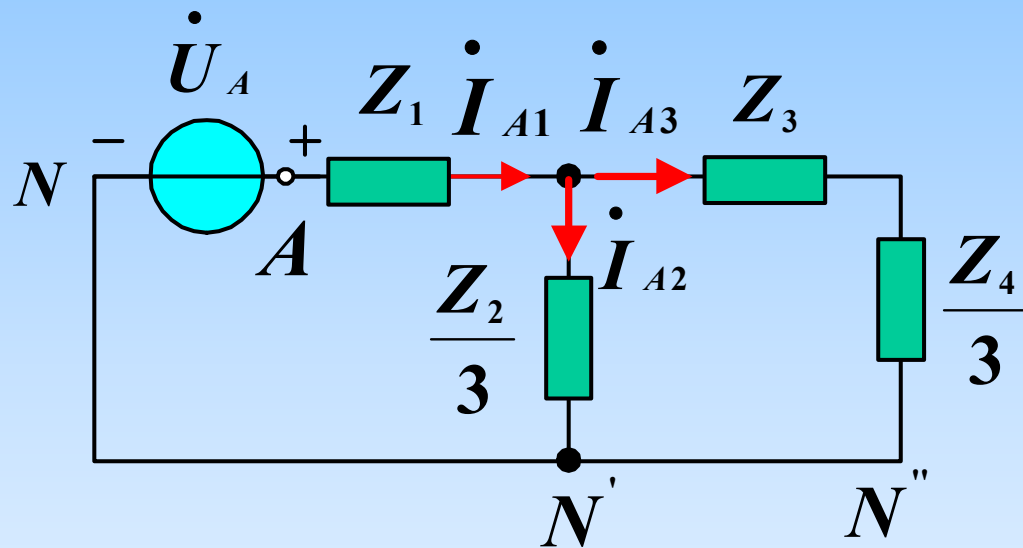
$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}U \angle 0^\circ \text{ V}$$

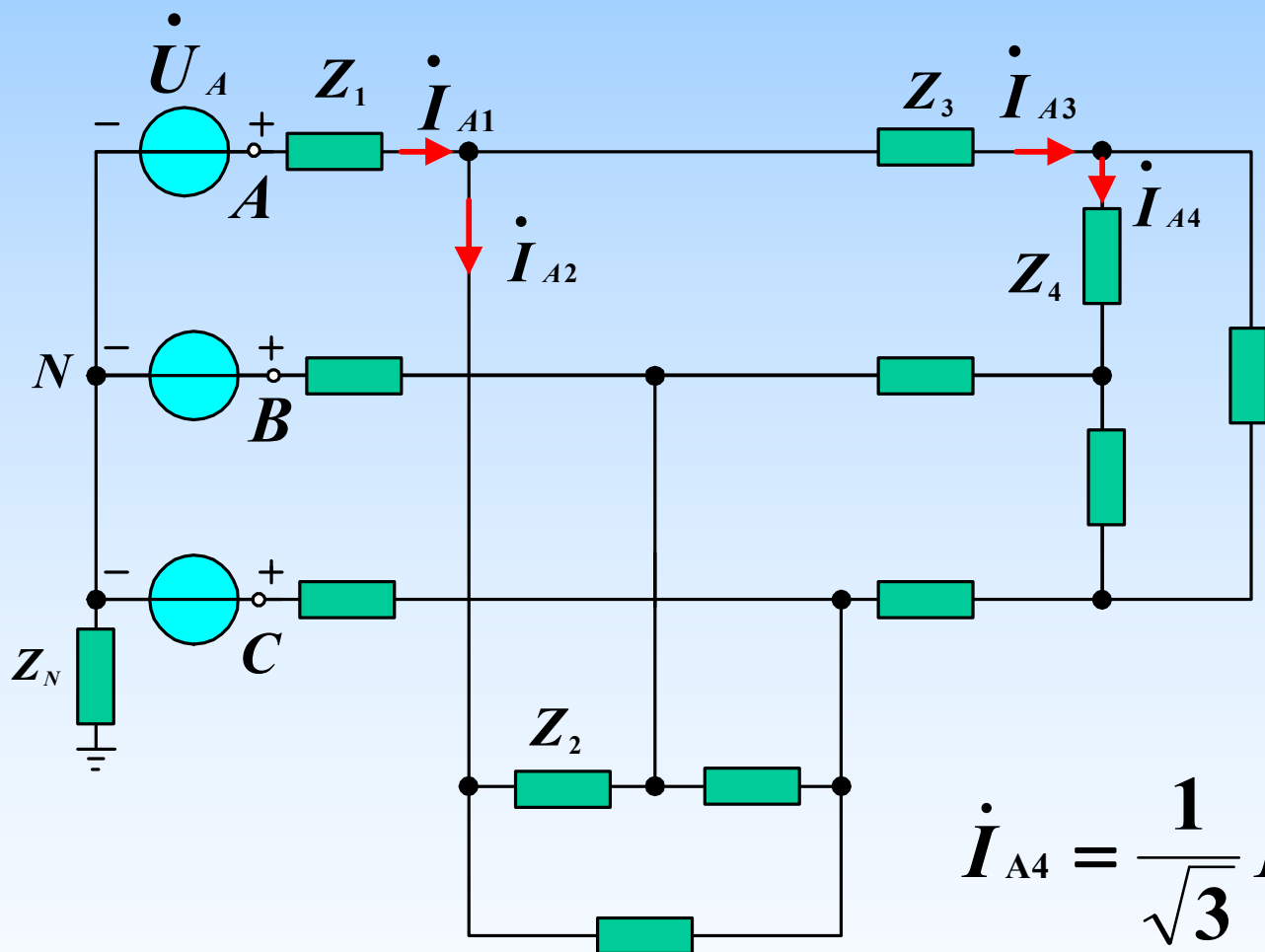
$$\dot{U}_A = U \angle -30^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}_A}{Z_1 + \frac{1}{3}Z_2 // (Z_3 + \frac{1}{3}Z_4)}$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{Z_3 + \frac{1}{3}Z_4}{\frac{1}{3}Z_2 + Z_3 + \frac{1}{3}Z_4} \dot{I}_{A1}$$

$$\dot{I}_{A3} = \frac{\frac{1}{3}Z_2}{\frac{1}{3}Z_2 + Z_3 + \frac{1}{3}Z_4} \dot{I}_{A1}$$





$$\dot{I}_{A4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{A3} \angle 30^\circ$$

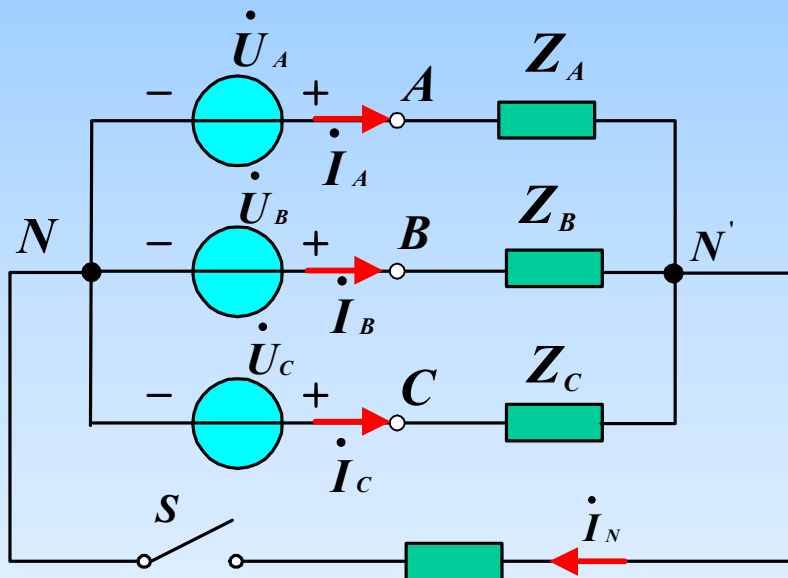
§ 9-3 不对称三相电路的概念

不对称 { 电源不对称。
电路参数(负载)不对称。 情况很多。

讨论对象：电源对称，负载不对称(低压电力网)。

分析方法： { 不能抽单相。
复杂交流电路分析方法。

主要了解：中性点位移。



电源对称，负载不对称

三相负载 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 不相同。

1、S打开，不接中线。

$\dot{U}_{N'N}$ 为:

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

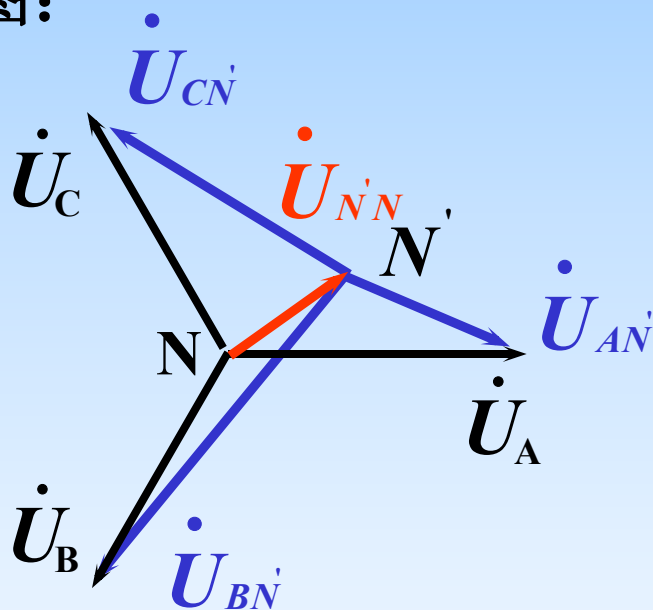
$$\dot{U}_{AN'} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{N'N}$$

负载各相电压:

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

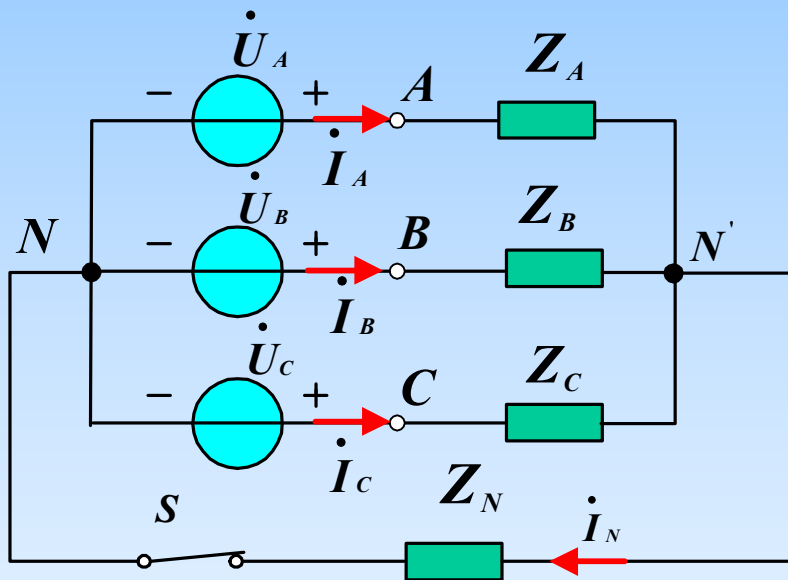
$$\dot{U}_{CN'} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{N'N}$$

相量图：



负载中点与电源中点不重合，这个现象称为中点位移。。

在电源对称情况下，可以根据中点位移的情况来判断负载端不对称的程度。当中点位移较大时，会造成负载相电压严重不对称，可能使负载的工作状态不正常。



2、S合上，接入中线。

若 $Z_N = 0$

则 $U_{N'N} = 0$

尽管电路不对称，但 $U_{N'N} = 0$ ，可使各相保持独立性。

各相工作状态互不影响。

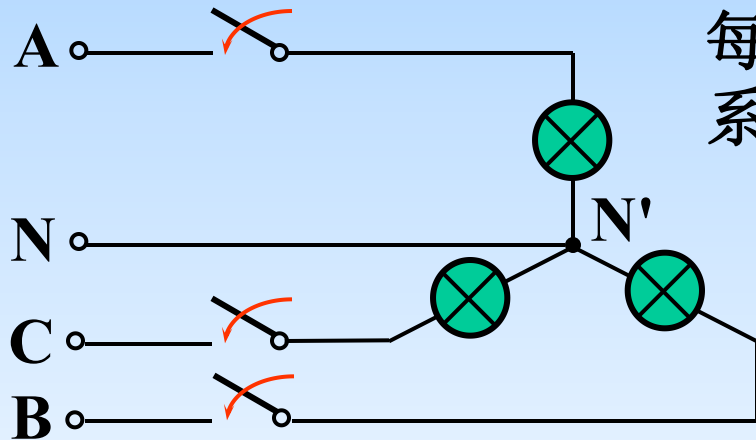
中线存在非常重要。

电力系统中广泛采用三相四线制。

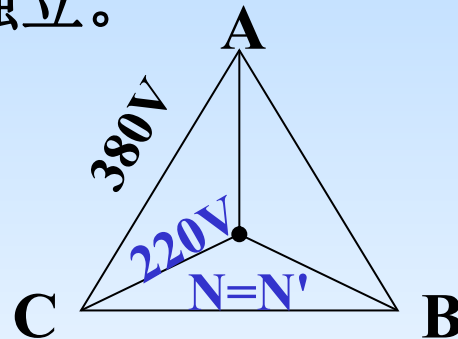
并在中线上不能接开关和熔断器。

例1. 照明电路:

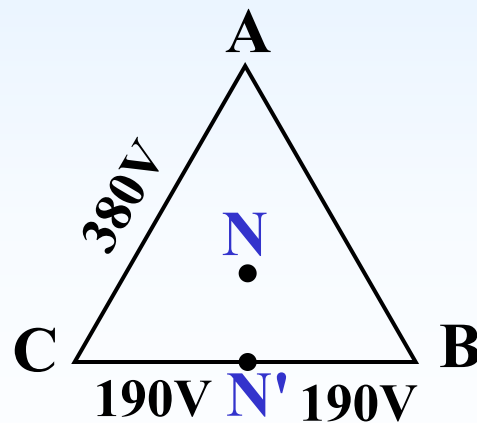
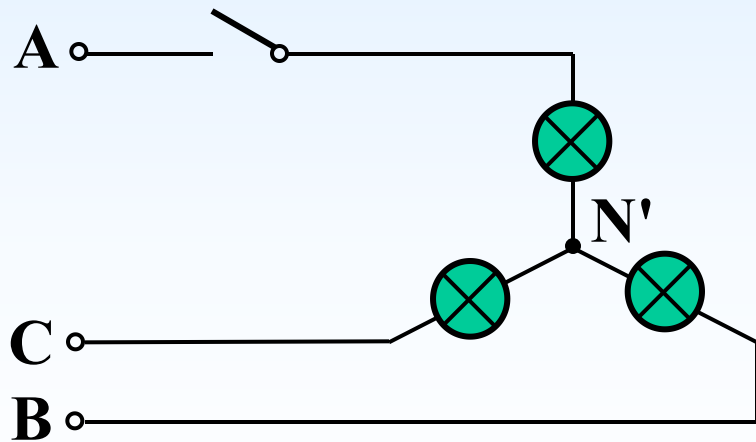
(1) 正常情况下, 三相四线制, 中线阻抗约为零。



每相负载的工作情况没有相互联系, 相对独立。

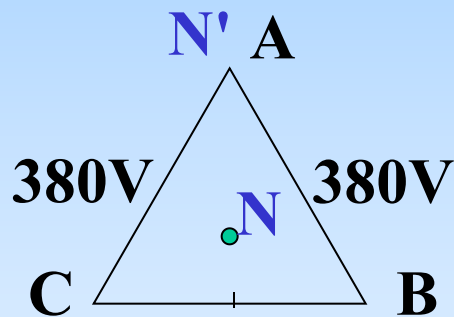
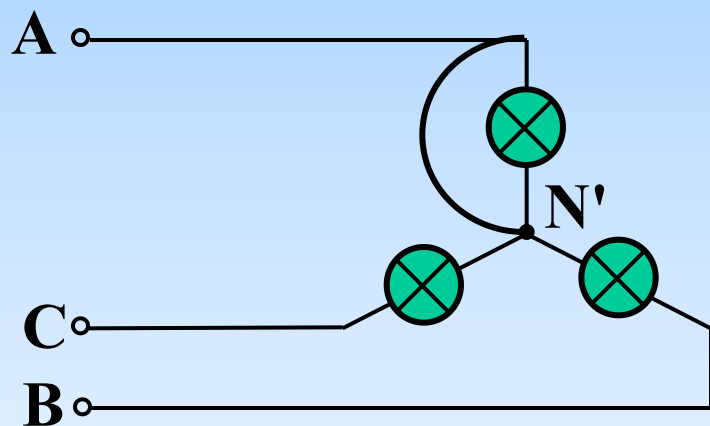


(2) 假设中线断了(三相三线制), A相电灯没有接入电路(三相不对称)



灯泡未在额定电压下工作, 灯光昏暗。

(3) A相短路

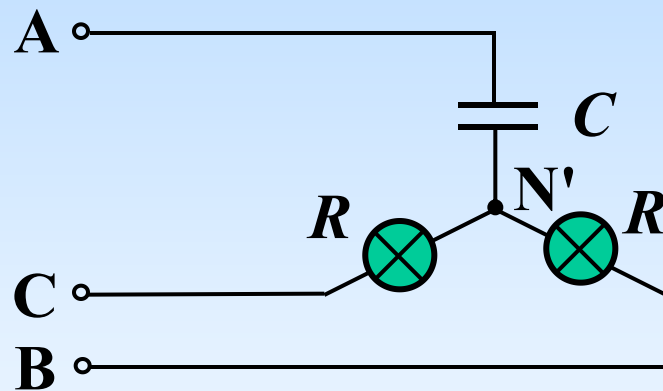
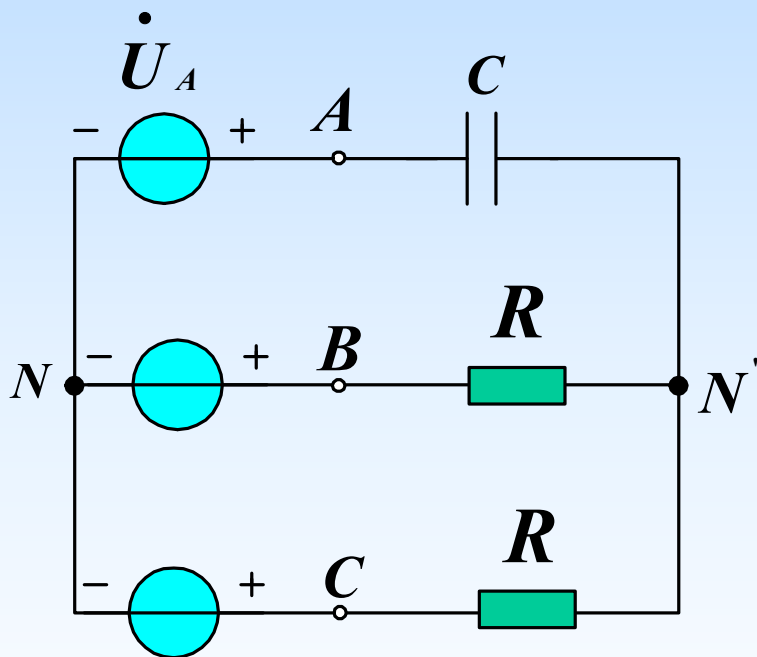


超过灯泡的额定电压，灯泡可能烧坏。

- 结论：** (a) 照明中线不装保险，并且中线较粗。一是减少损耗，二是加强强度(中线一旦断了，负载就不能正常工作)。
- (b) 要消除或减少中点的位移，尽量减少中线阻抗，然而从经济的观点来看，中线不可能做得很粗，应适当调整负载，使其接近对称情况。

例2. 相序图示是一种决定相序的仪器，称相序指示器。已知 $1/(\omega C)=R$ ($=1/G$)，试说明在三相电源对称的情况下，如何根据两个灯泡所承受的电压确定相序。

解：



$$\dot{U}_A = U \angle 0$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120$$

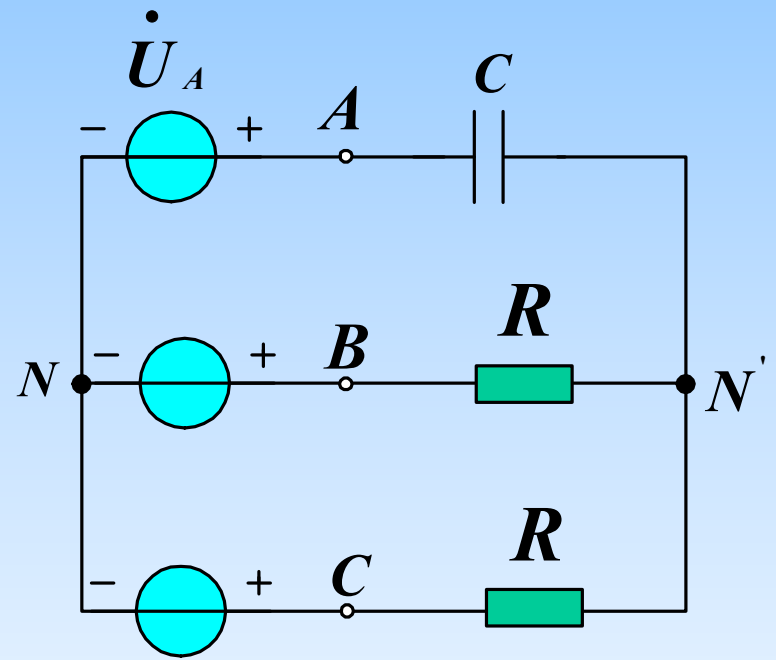
$$\dot{U}_C = U \angle 120$$

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{j\omega C \dot{U}_A + \dot{U}_B / R + \dot{U}_C / R}{j\omega C + 1/R + 1/R}$$

$$= \frac{j\omega C \dot{U}_A + \dot{U}_B G + \dot{U}_C G}{j\omega C + G + G}$$

$$= \frac{j\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C}{2 + j1}$$

$$= \frac{(-1 + j)}{2 + j1} U = 0.632 U \angle 108.4^\circ \text{ V} \quad 1/(\omega C) = R \quad (=1/G)$$

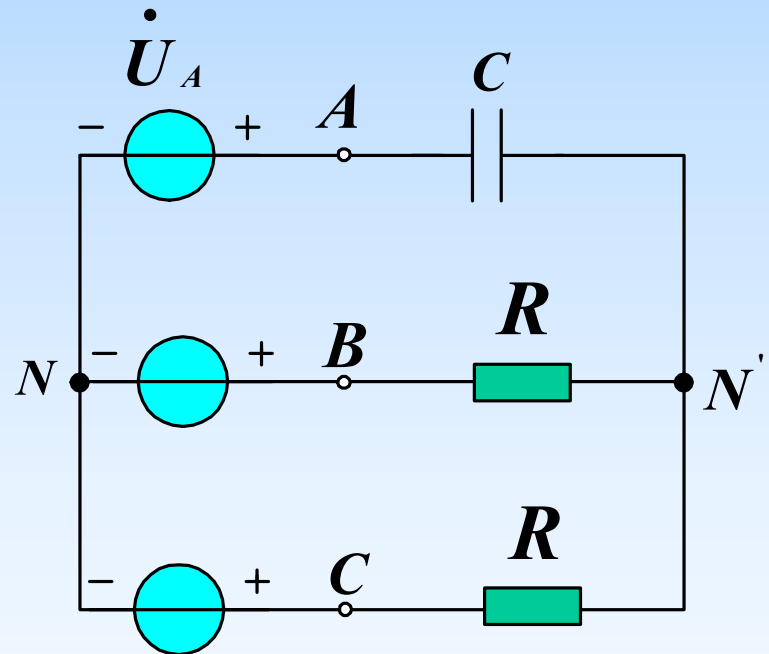


$$\begin{aligned} \dot{U}_{BN'} &= \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{N'N} = U \angle -120^\circ - 0.632 U \angle 108.4^\circ \\ &= 1.5 U \angle -101.5^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{CN'} &= \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{N'N} = U \angle 120^\circ - 0.632U \angle 108.4^\circ \\ &= 0.4U \angle 138.4^\circ \text{ V}\end{aligned}$$

$$U_{BN'} = 1.5U$$

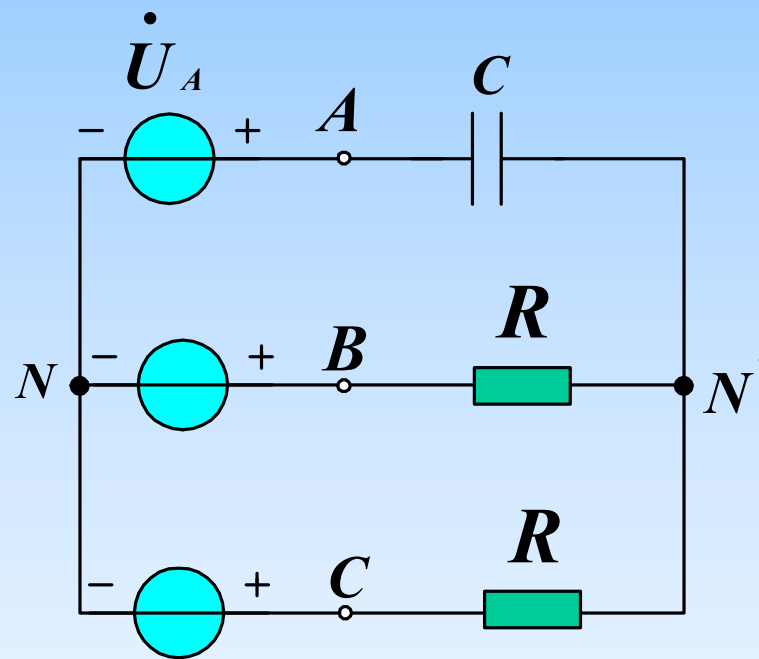
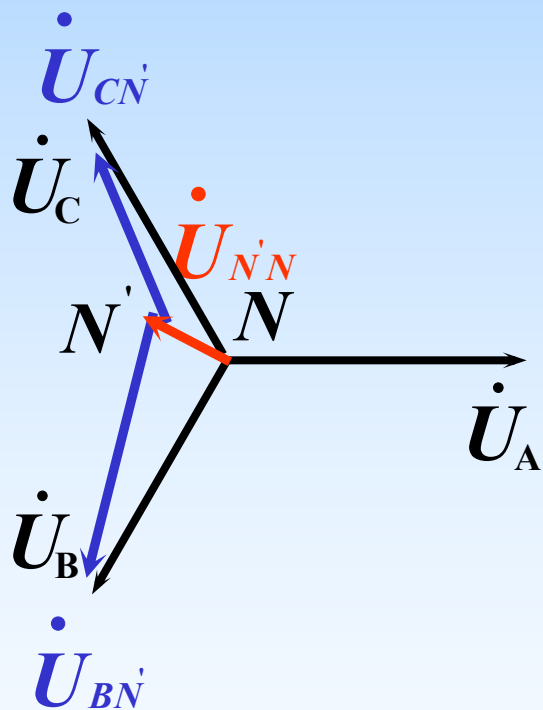
$$U_{CN'} = 0.4U$$



若以接电容一相为A相，则B相电压比C相电压高。

灯泡较亮的为B相，较暗的为C相。据此可测定三相电源的相序。

相量图:



$$\dot{U}_{N'N} = 0.632U \angle 108.4^\circ \text{ V}$$

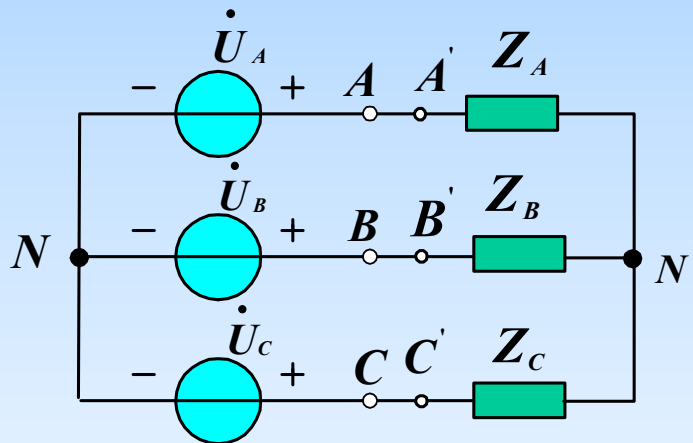
$$\dot{U}_{BN'} = 1.5U \angle -101.5^\circ \text{ V}$$

$$\dot{U}_{CN'} = 0.4U \angle 138.4^\circ \text{ V}$$

§ 9-4 三相电路的功率

1. 对称三相电路的平均功率 P

$$\begin{aligned} P &= P_A + P_B + P_C \\ &= U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B \\ &\quad + U_C I_C \cos \varphi_C \end{aligned}$$



φ_A 、 φ_B 、 φ_C 是每相电压与电流之间的相位差。

对称三相负载 $Z = |Z| \angle \varphi$

对称三相电路的平均功率为： $P = 3U_p I_p \cos \varphi$

U_p 、 I_p 是每一相负载的相电压、相电流的有效值。

负载Y接法的对称三相负载

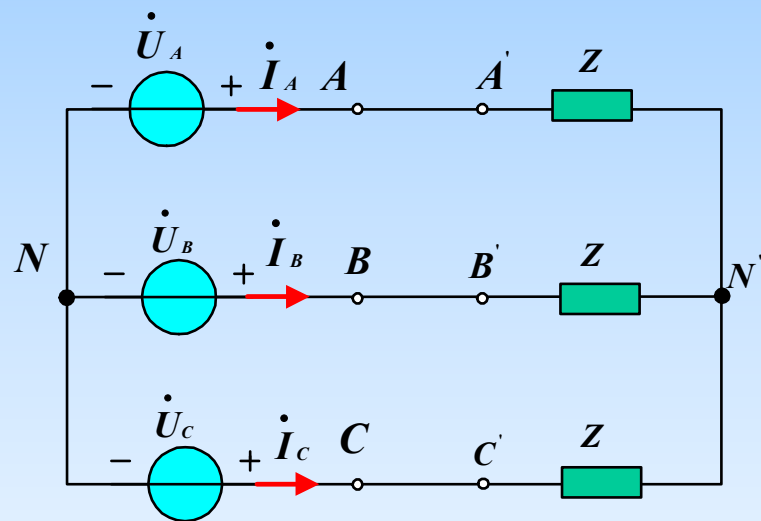
$$U_l = \sqrt{3}U_p, \quad I_l = I_p$$

U_l 、 I_l 是线电压、线电流的有效值。

$$P = 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} U_l I_l \cos \varphi$$

$$= \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$$

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

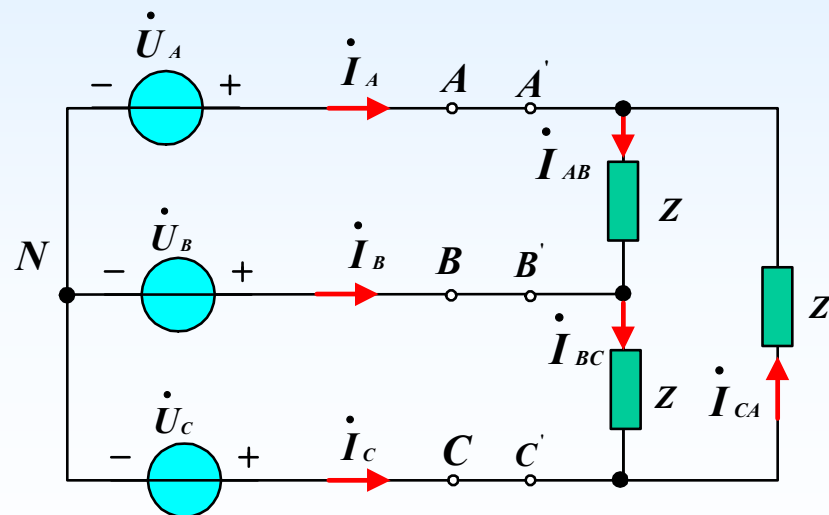


负载Δ接法的对称三相负载

$$U_l = U_p, \quad I_l = \sqrt{3} I_p$$

$$P = 3 U_l \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi$$

$$= \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$$



注意:

(1) φ 为相电压与相电流的相位差角(相阻抗角), 不要误以为是线电压与线电流的相位差。

(2) $\cos\varphi$ 为每相的功率因数, 在对称三相制中即三相功率因数:

$$\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C = \cos\varphi。$$

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

2. 无功功率

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 3Q_p$$

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

3. 视在功率

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

功率因数也可定义为：

$$\cos \varphi = P/S \quad (\text{不对称时 } \varphi \text{ 无意义})$$

一般来讲， P 、 Q 、 S 都是指三相总和。

4. 瞬时功率

$$\text{设} \quad u_A = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

$$i_A = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi)$$

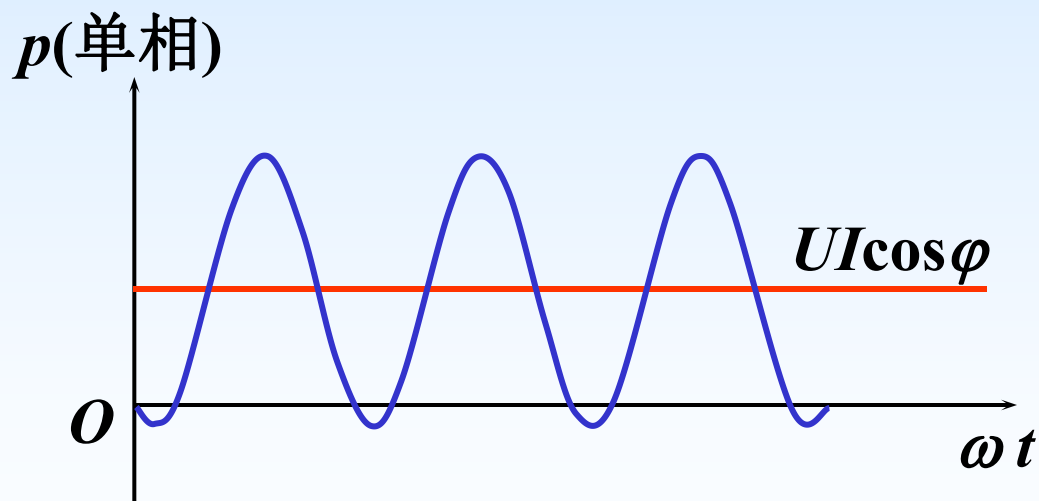
$$\begin{aligned} p_A = u_A i_A &= 2UI \cos \omega t \cos(\omega t - \varphi) \\ &= UI[\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)] \end{aligned}$$

$$p_A = u_A i_A = UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t - \varphi)$$

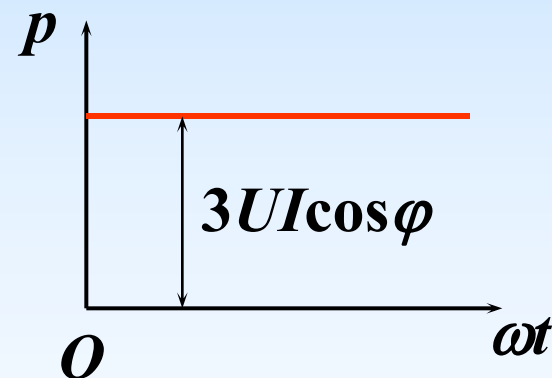
$$p_B = u_B i_B = UI \cos \varphi + UI \cos[(2\omega t - 120^\circ) - \varphi]$$

$$p_C = u_C i_C = UI \cos \varphi + UI \cos[(2\omega t + 120^\circ) - \varphi]$$

$$p = p_A + p_B + p_C = 3UI \cos \varphi$$



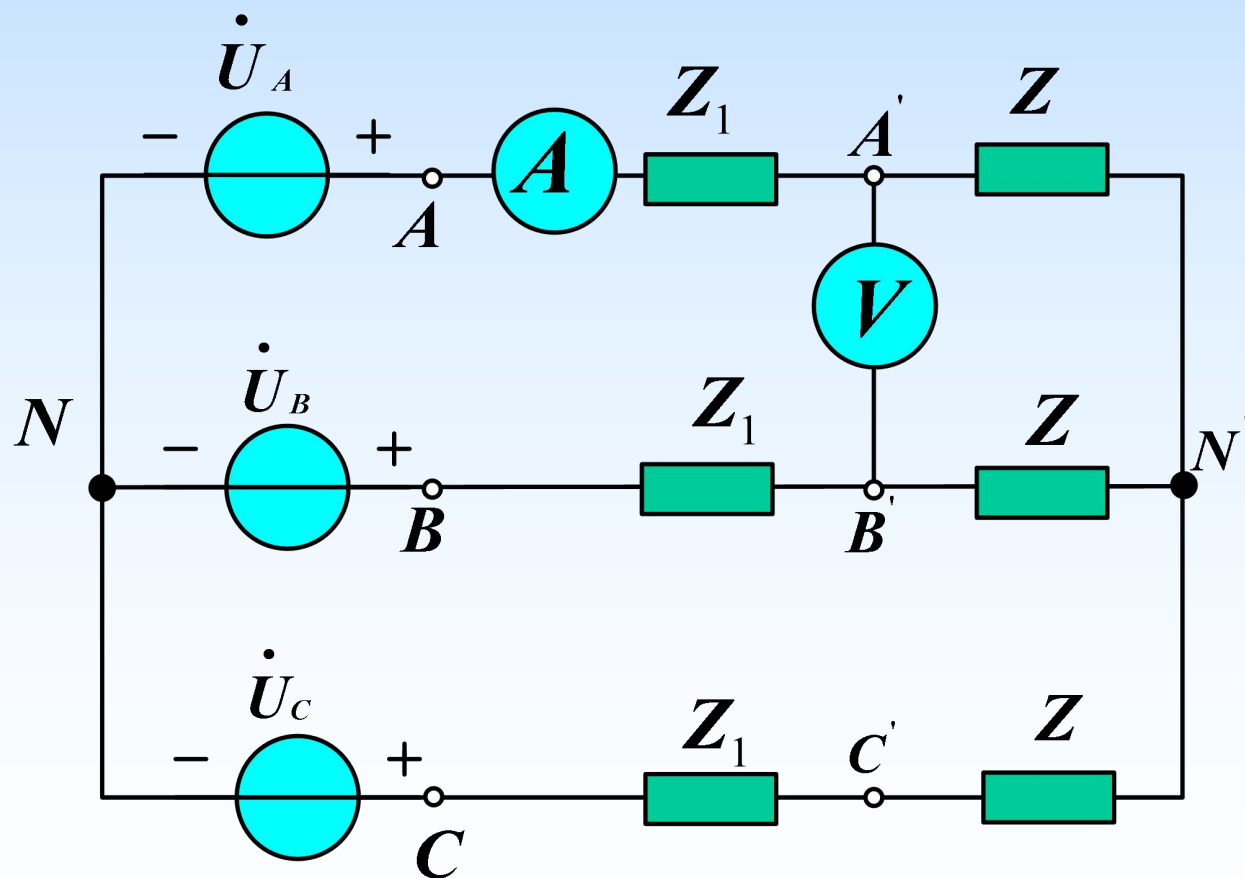
单相：瞬时功率脉动

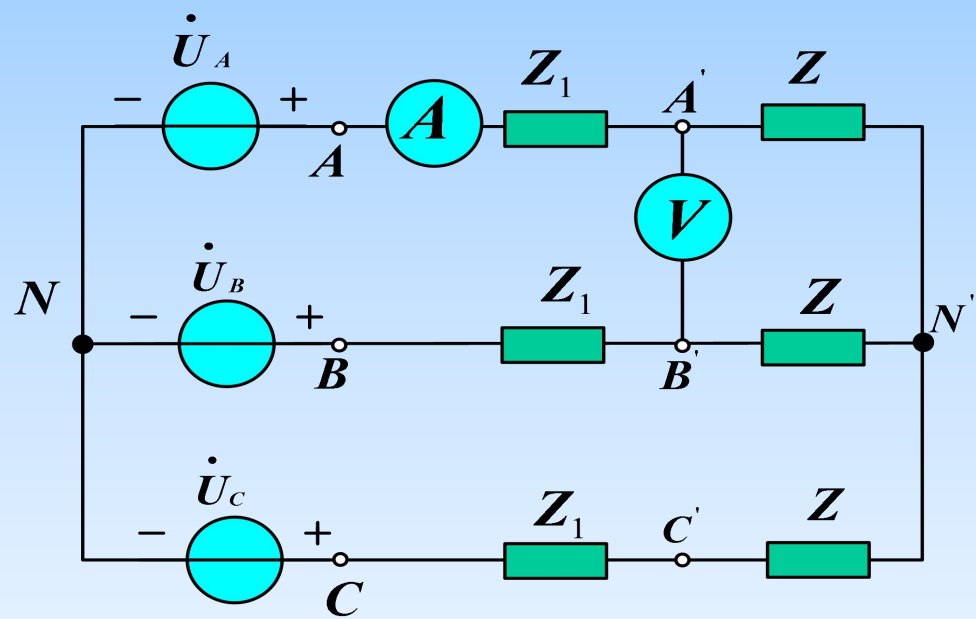


三相：瞬时功率平稳，
转矩 $m \propto p$
可以得到均衡的机械力矩。

习题12-5 电压表的读数为1143.16V,

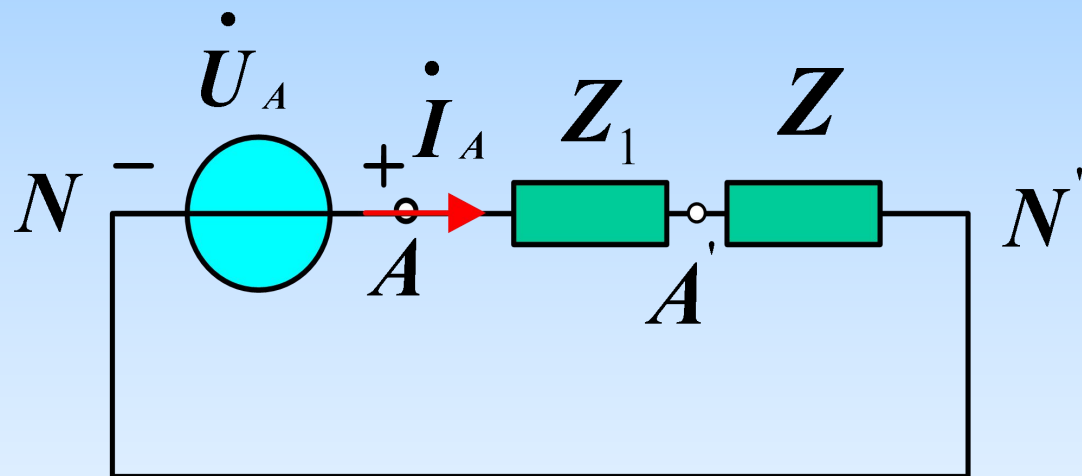
$$\mathbf{Z} = (15 + j15\sqrt{3})\Omega \quad \mathbf{Z}_1 = (1 + j2)\Omega$$





- 求： 1 图中电流表的读数及线电压 U_{AB} 。
- 2 三相负载吸收的功率。

1 图中电流表的读数及线电压 U_{AB} 。



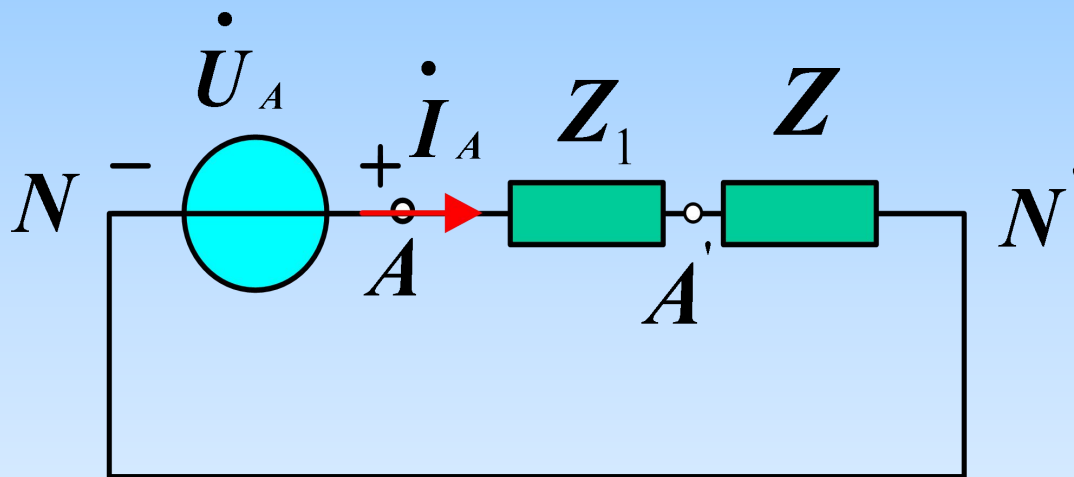
设：

$$\dot{U}_{A'N'} = 660 \angle 0^\circ \text{ V}$$

则：

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{A'N'}}{Z} = \frac{1143.16 / \sqrt{3} \angle 0^\circ}{15 + j15\sqrt{3}}$$

$$= 22 \angle -60^\circ \text{ V}$$



$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{AN'} &= \dot{I}_A (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}) \\
 &= 22 \angle -60^\circ (15 + j15\sqrt{3} + 1 + j2) \\
 &= 709.11 \angle 0.237^\circ \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3} \dot{U}_{AN'} \angle 30^\circ = 1228.2 \angle 30.237^\circ \text{ V}$$

2 三相负载吸收的功率。 $\mathbf{Z} = (15 + j15\sqrt{3})\Omega$

$$\dot{U}_{A'N'} = 660\angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_A = 22\angle -60^\circ \text{ A}$$

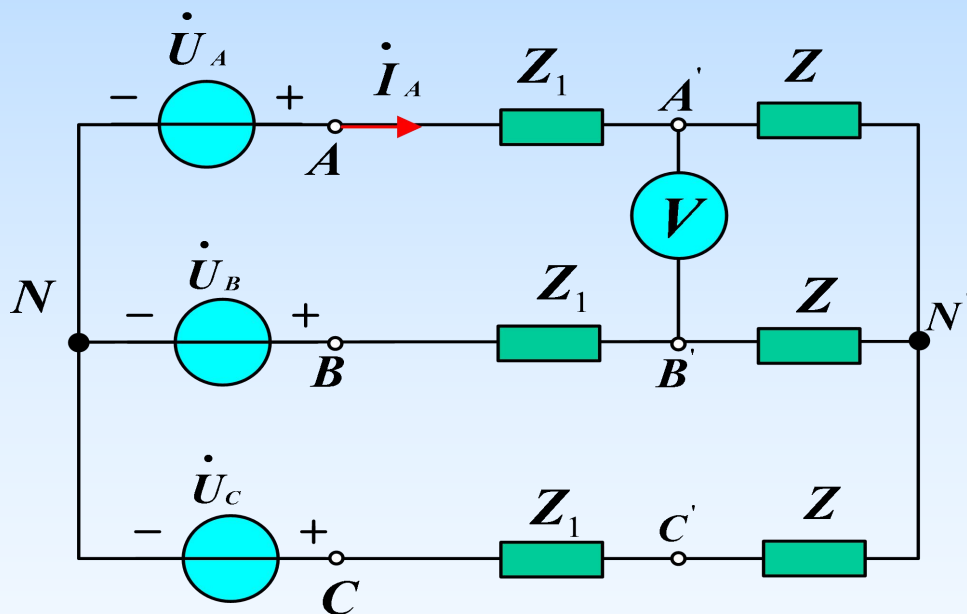
$$P = 3U_P I_P \cos\varphi$$

$$= 3 \times 660 \times 22 \times \cos(0^\circ - (-60^\circ))$$

$$= 21780 \text{ W}$$

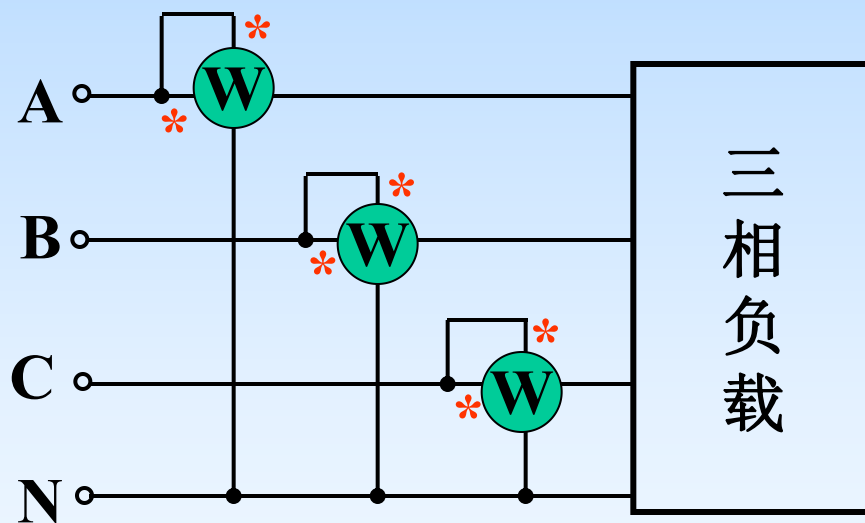
$$P = 3RI_A^2 = 3 \times 15 \times 22^2$$

$$= 21780 \text{ W}$$



5. 三相功率的测量

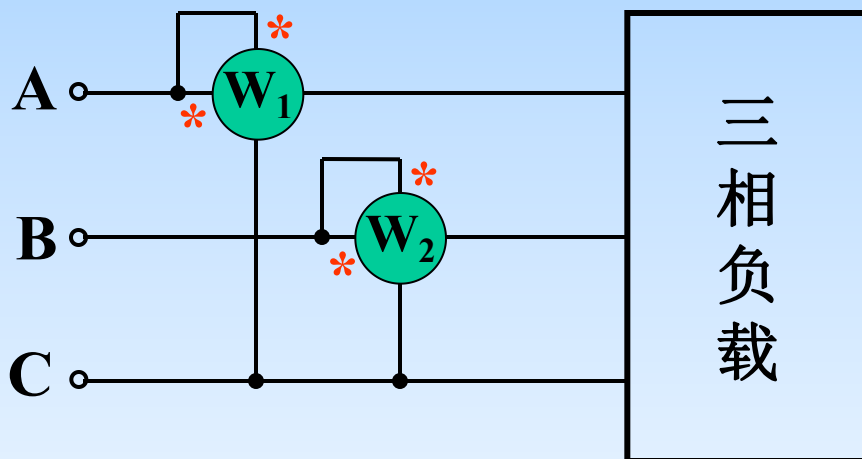
(1) 三表法：三相四线制（不论负载是否对称）。



$$P = P_A + P_B + P_C$$

若负载对称，则需一块表，读数乘以 3。

(2) 二表法：三相三线制（不论负载是否对称）。



这种量测线路的接法是将两个功率表的电流线圈接到任意两相中，而将其电压线圈的公共点接到另一相没有功率表的线上。

若 W_1 的读数为 P_1 ， W_2 的读数为 P_2 ，则 $P=P_1+P_2$ 即为三相总功率。

证明： (设负载为Y接)

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (\text{KCL})$$

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

$$p = u_{AN} i_A + u_{BN} i_B + u_{CN} i_C$$

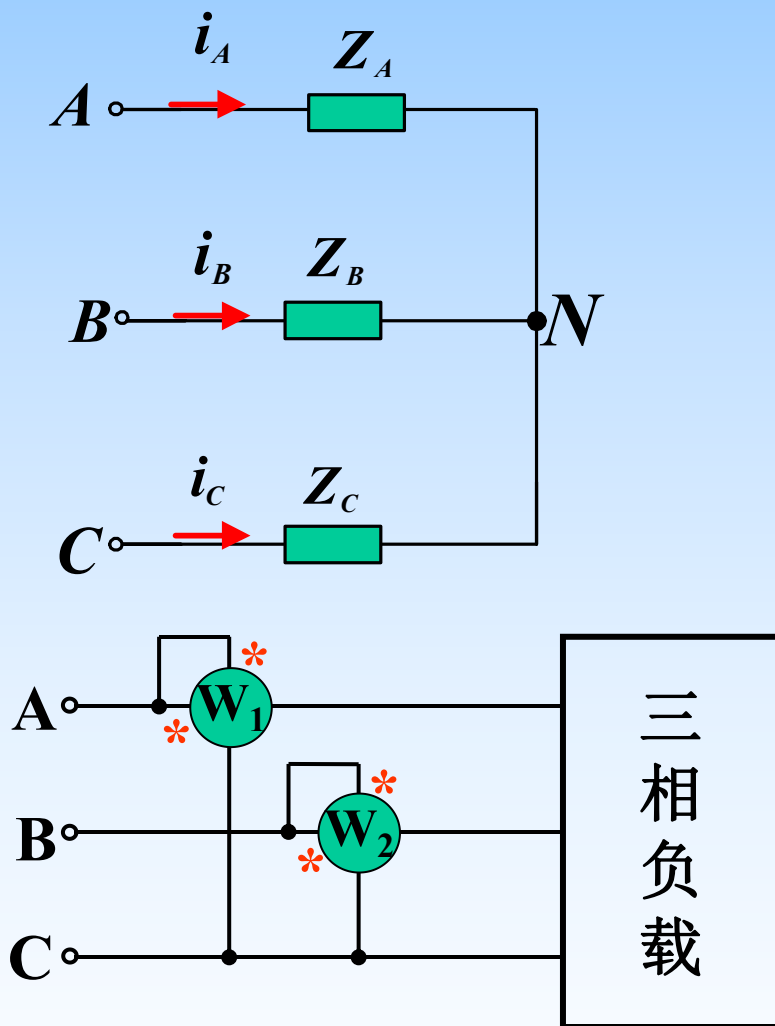
$$= u_{AN} i_A + u_{BN} i_B - u_{CN} (i_A + i_B)$$

$$= (u_{AN} - u_{CN}) i_A + (u_{BN} - u_{CN}) i_B$$

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

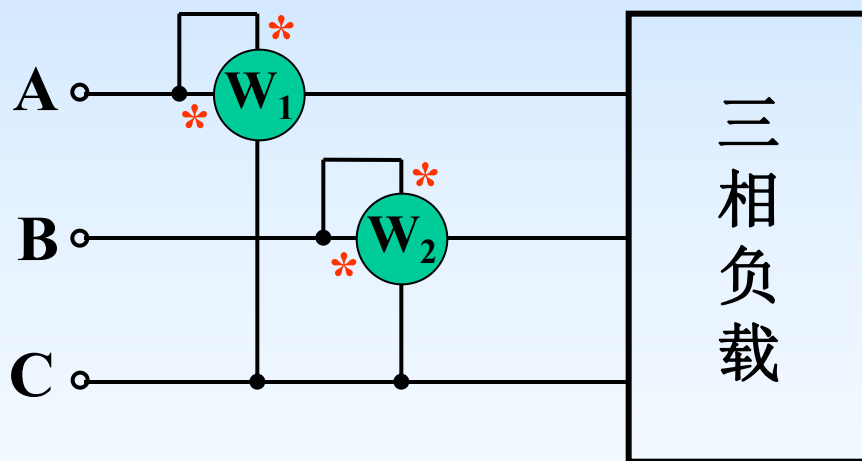
$$P = U_{AC} I_A \cos \varphi_1 + U_{BC} I_B \cos \varphi_2$$

φ_1 : u_{AC} 与 i_A 的相位差, φ_2 : u_{BC} 与 i_B 的相位差。



两块表的接法正好满足了这个式子的要求，所以两个功率表的读数的代数和就是三相总功率。

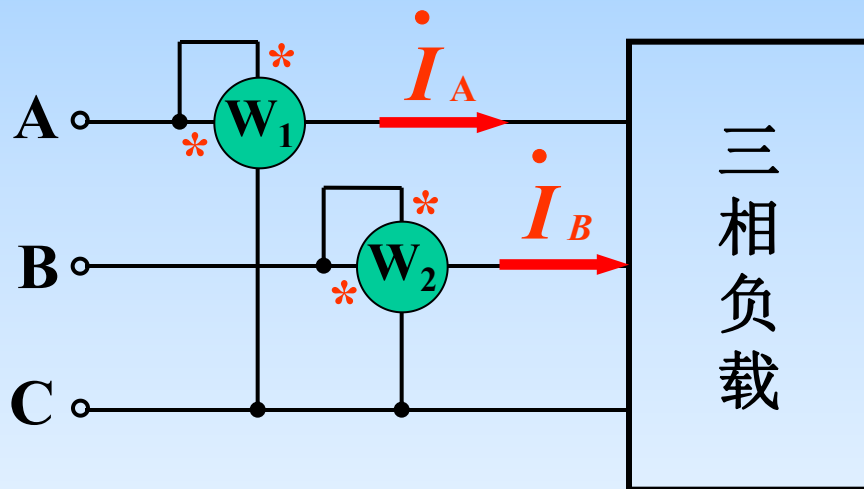
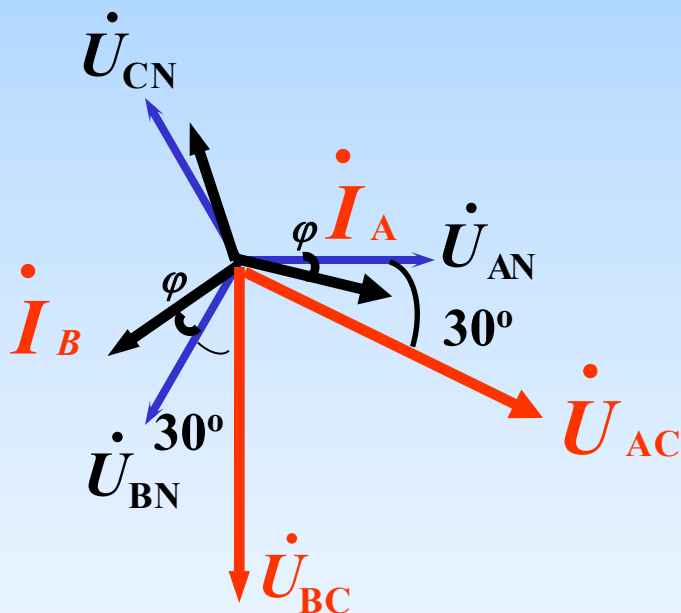
最后表达式仅与线电压有关，所以也适用 Δ 接。



$$P=U_{AC}I_A\cos\varphi_1 + U_{BC}I_B\cos\varphi_2$$

讨论：（对称三相电路）

$$P = U_{AC} I_A \cos \varphi_1 + U_{BC} I_B \cos \varphi_2$$



$$P_1 = U_{AC} I_A \cos \varphi_1 = U_{AC} I_A \cos(30^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_{BC} I_B \cos \varphi_2 = U_{BC} I_B \cos(30^\circ + \varphi)$$

φ_1 : u_{AC} 与 i_A 的相位差, φ_2 : u_{BC} 与 i_B 的相位差。

1、电阻负载：

$$\varphi = 0^\circ \quad \varphi_1 = \varphi_2 = 30^\circ \quad P_1 = P_2$$

两块功率表的读数相同。

$$P_1 = U_{AC} I_A \cos(30^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_{BC} I_B \cos(30^\circ + \varphi)$$

2、负载功率因数大于0.5： $\cos \varphi > 0.5$ $\varphi < 60^\circ$

两块功率表的读数为正（正偏）。

3、负载功率因数等于0.5： $\cos \varphi = 0.5$ $\varphi = 60^\circ$

有一块功率表的读数为零。

4、负载功率因数小于0.5： $\cos \varphi < 0.5$ $\varphi > 60^\circ$

有一块功率表的指针反偏。

将反偏功率表的电流线圈两个端钮对换，使功率表的读数为正，但总的功率等于二只功率表示值之差。

注意：

1. 只有在 $i_A+i_B+i_C=0$ 这个条件下，才能用二表法(即Y接， Δ 接)。不能用于不对称三相四线制。
2. 两块表读数的代数和为三相总功率，每块表的单独读数无意义。
3. 接正确极性接线时，二表中可能有一个表的读数为负，此时功率表指针反转，将其电流线圈极性反接后，指针指向正数，但此时读数应记为负值。
4. 两表法测三相功率的接线方式有三种，注意功率表的同名端。

例：

某台电动机的功率为2.5KW，功率因数 $\cos\varphi=0.866$ (滞后)，线电压 $U_l=380V$ ，求两块功率表的读数。

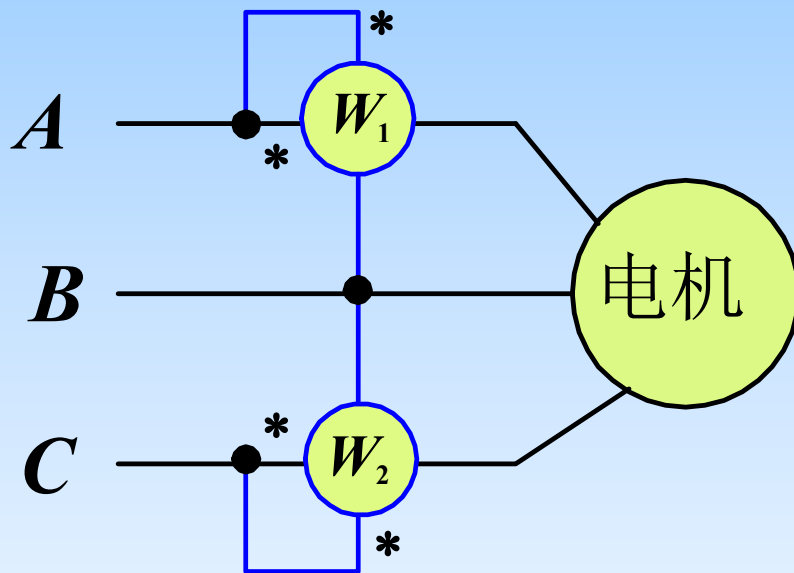
解： $P_1 = U_{AB} I_A \cos\varphi_1$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos\varphi_2$$

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

$$\therefore I_l = \frac{P}{\sqrt{3} U_l \cos\varphi} = \frac{2500}{\sqrt{3} 380 \times 0.866} = 4.386 A$$

$$\cos\varphi = 0.866 \quad \varphi = 30$$



$$P_1 = U_{AB} I_A \cos \varphi_1$$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos \varphi_2$$

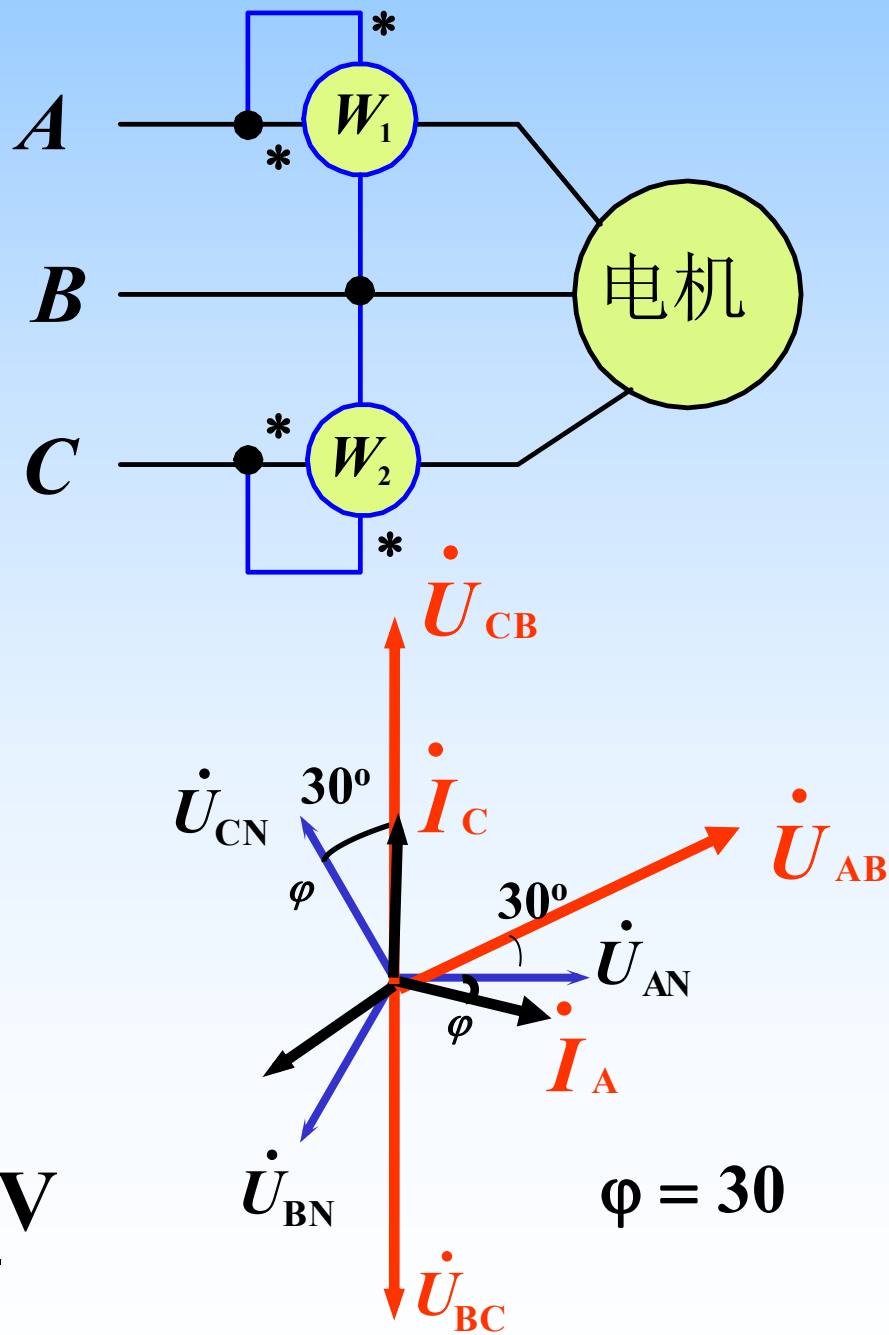
设: $\dot{U}_A = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$

则: $\dot{I}_A = 4.386 \angle -30^\circ \text{ A}$

$$\dot{U}_{AB} = 380 \angle +30^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_C = 4.386 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$\dot{U}_{CB} = -\dot{U}_{BC} = 380 \angle 90^\circ \text{ V}$$



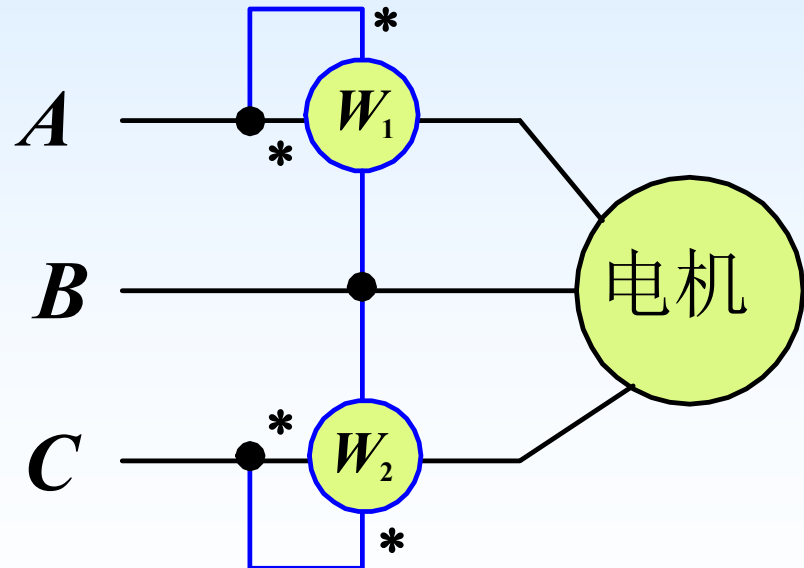
$$P_1 = U_{AB} I_A \cos \varphi_1 = 380 \times 4.386 \cos(30^\circ + 30^\circ)$$

$$= 833.3W$$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos \varphi_2 = 380 \times 4.386 \cos(90^\circ - 90^\circ)$$

$$= 1666.7W$$

则 $P = P_1 + P_2 = 2500W$



例: $U_l = 380\text{V}$, $Z = 30 + \text{j}40\Omega$, 电动机 $P = 1700\text{W}$, $\cos\varphi = 0.8$ (滞后)。

求: (1) 线电流和电源发出总功率;

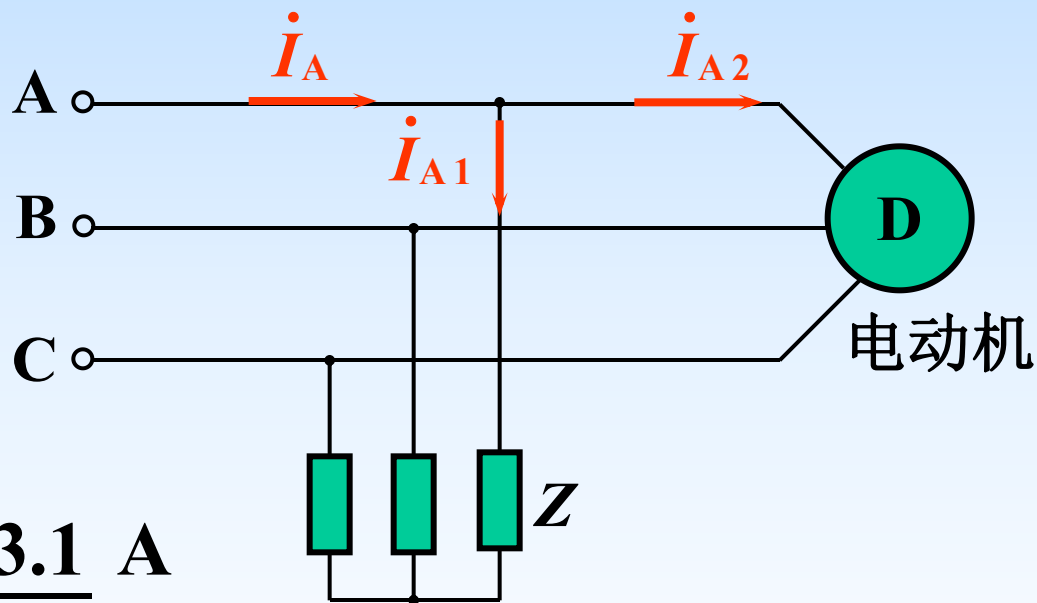
(2) 用两表法测电动机负载的功率, 画接线图, 求两表读数。

解:

$$(1) \quad \dot{U}_{AN} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}_{AN}}{Z}$$

$$= \frac{220 \angle 0^\circ}{30 + \text{j}40} = 4.41 \angle -53.1^\circ \text{ A}$$



电动机负载: $P = \sqrt{3}U_l I_{A2} \cos\varphi = 1700\text{ W}$

$$I_{A2} = \frac{P}{\sqrt{3}U_l \cos \varphi} = \frac{1700}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.8} = 3.23 \text{ A}$$

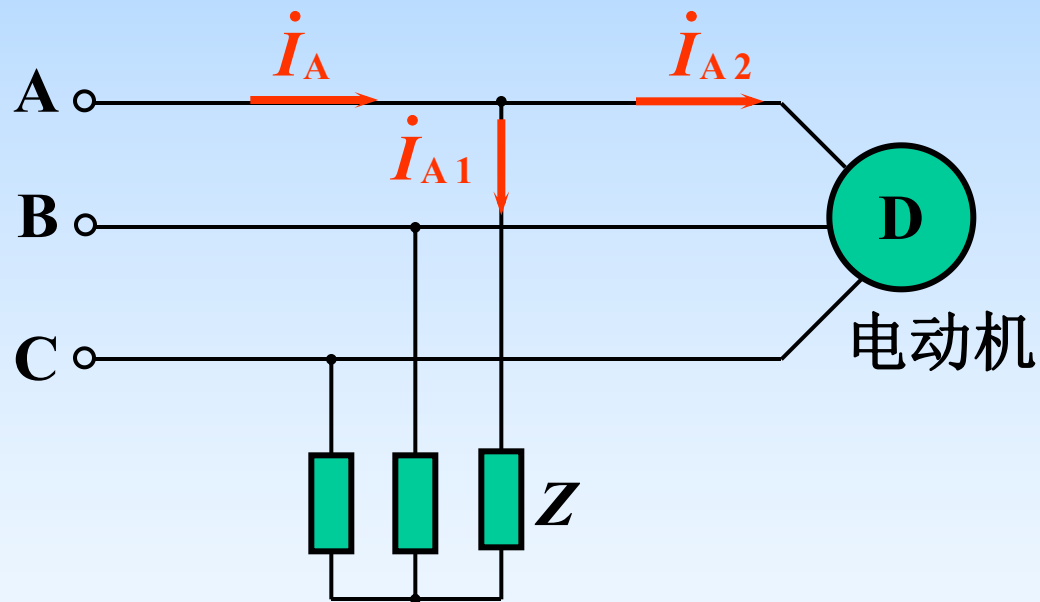
$$\cos \varphi = 0.8, \quad \varphi = 36.9$$

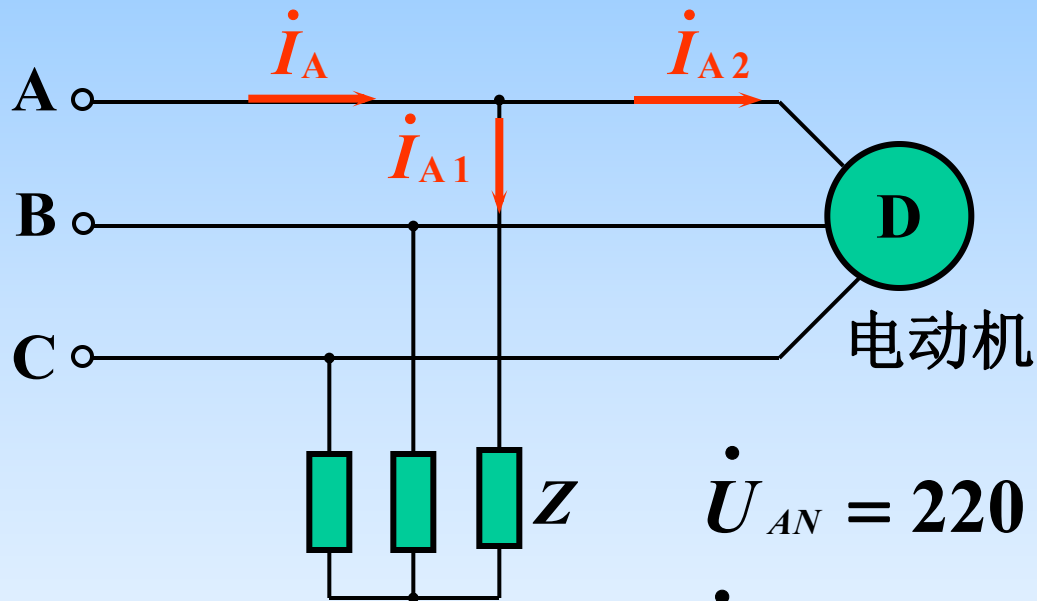
$$\dot{I}_{A2} = 3.23 \angle -36.9 \text{ A}$$

总电流:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}$$

$$= 4.41 \angle -53.1 + 3.23 \angle -36.9 = 7.56 \angle -46.2 \text{ A}$$





$$\dot{U}_{AN} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_A = 7.56 \angle -46.2^\circ \text{ A}$$

$$P_{\text{总}} = 3U_A I_A \cos \varphi_{\text{总}}$$

$$= 3 \times 220 \times 7.56 \times \cos 46.2^\circ = 3.45 \text{ kW}$$

$$P_Z = 3 \times I_{A1}^2 \times R_1$$

$$Z = 30 + j40 \Omega$$

$$= 3 \times 4.41^2 \times 30 = 1.74 \text{ kW}$$

(2) 两表的读数如图。

$$\dot{U}_{AB} = 380 \angle 30^\circ \text{ V}$$

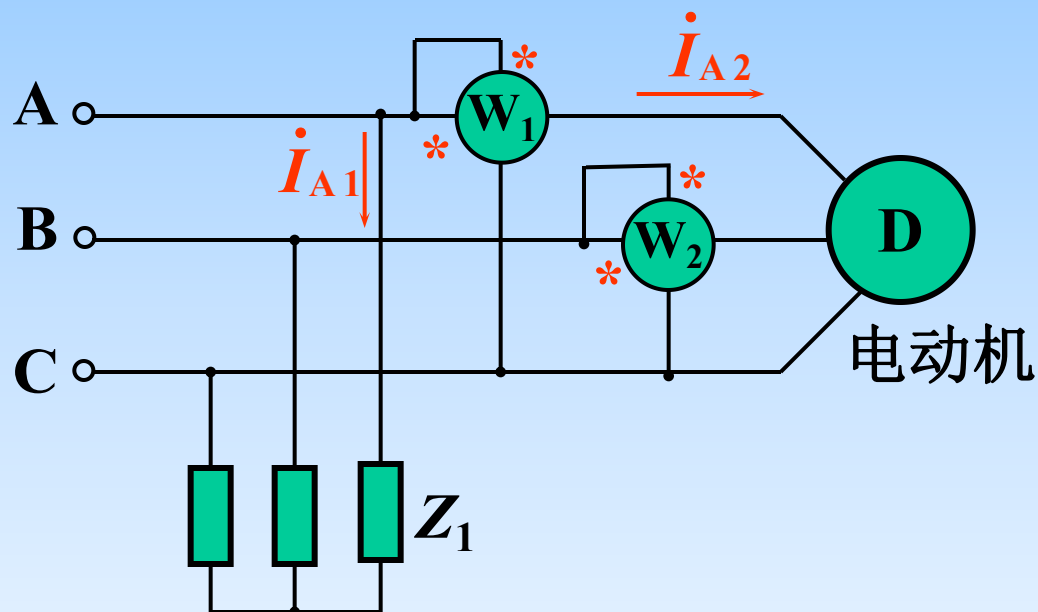
$$\dot{I}_{A2} = 3.23 \angle -36.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{U}_{AC} = -\dot{U}_{CA}$$

$$= -380 \angle 150^\circ = 380 \angle -30^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_{B2} = 3.23 \angle -156.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{U}_{BC} = 380 \angle -90^\circ \text{ V}$$



$$P_1 = U_{AC} I_{A2} \cos \varphi_1$$

$$P_2 = U_{BC} I_{B2} \cos \varphi_2$$

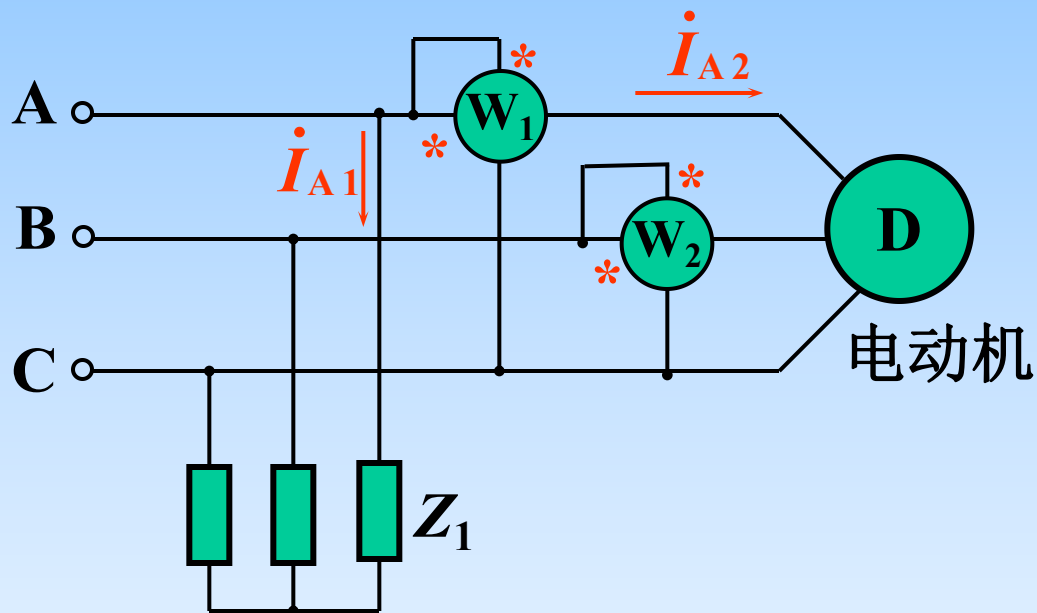


表 W_1 的读数 P_1 :

$$P_1 = U_{AC} I_{A2} \cos \varphi_1$$

$$= 380 \times 3.23 \cos(-30^\circ + 36.9^\circ) = 1218.8W$$

表 W_2 的读数 P_2 :

$$P_2 = U_{BC} I_{B2} \cos \varphi_2$$

$$= 380 \times 3.23 \cos(-90^\circ + 156.9^\circ) = 481.6W$$

重点:

1. 对称三相电路的平均功率 P

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

$$= \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$$

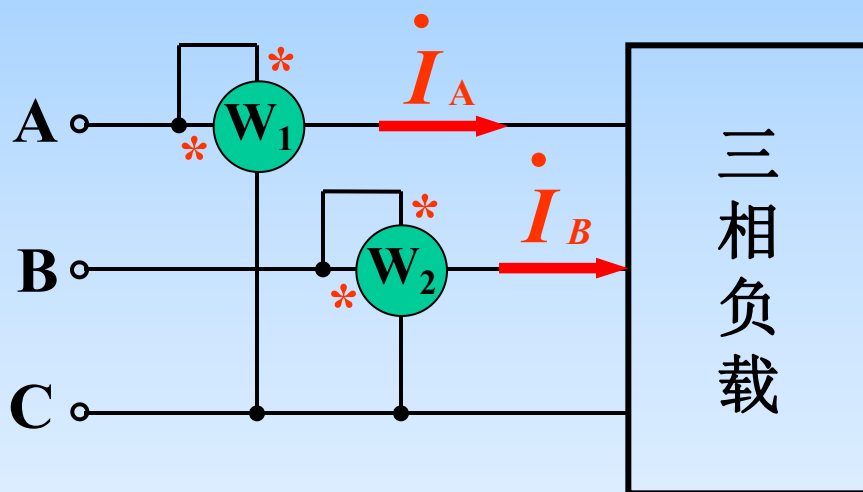
U_p 、 I_p 是每一相负载的相电压、相电流的有效值。

U_l 、 I_l 是线电压、线电流的有效值。

φ 为相电压与相电流的相位差角(相阻抗角), $\cos \varphi$ 为每相的功率因数。

2. 二表法: 三相三线制。又称二瓦计法。

$$P = U_{AC} I_A \cos \varphi_1 + U_{BC} I_B \cos \varphi_2$$

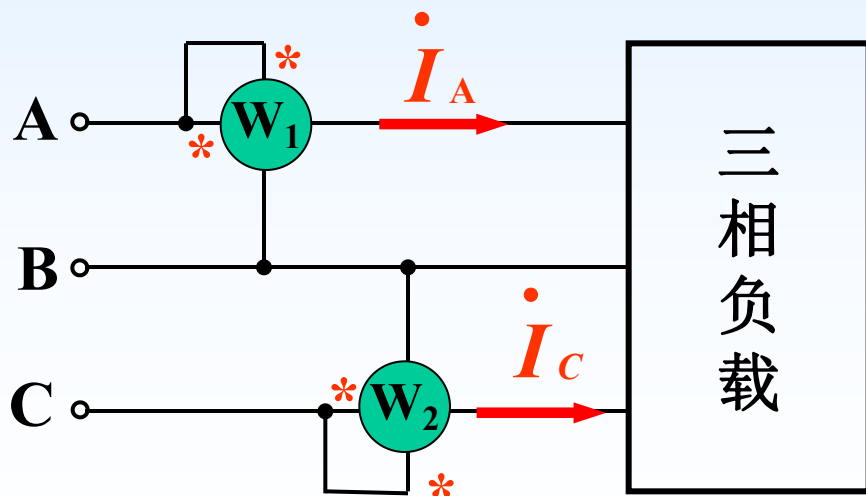


对称三相电路

$$P_1 = U_{AC} I_A \cos(30^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = U_{BC} I_B \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$P = U_{AB} I_A \cos \varphi_1 + U_{CB} I_C \cos \varphi_2$$



对称三相电路

$$P_1 = U_{AB} I_A \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi)$$

思考题:

1、某三相四线制供电电路中，相电压为220V，则线电压为（ ）。

a. 220V。

b. 311V。

c. 380V。

d. 190V。

2、三相对称交流电路的瞬时功率为（ ）。

a. 一个随时间变化的量。

b. 一个常数，其值恰好等于有功功率。

c. 0W。

d. 不确定。

3、三相四线制电路，已知

$$I_A = 10 \angle 20^\circ \text{ A}$$

$$I_B = 10 \angle -100^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 10 \angle 140^\circ \text{ A}$$

则中线电流为（ ）。

a. 10A。

b. 0A。

c. 30A。

d. $10\sqrt{3} \text{ A}$

4、一台三相电动机,每相绕组的额定电压为220V,对称三相电源的线电压为380V,则三相绕组应采用()。

(a) 星型联结,不接中线。

(b) 星型联结,接中线。

(c) 前两种均可。

(d) 三角形联结。

6、某三相电源绕组接成三相四线制，已知

$$\dot{U}_{ab} = 400 \angle 15^\circ \text{ V}$$

当 $t=10\text{s}$ 时，三个线电压之和为（ ）。

(a) 400。

(b) 0。

(c) $400 / \sqrt{3}$ 。

(d) $400\sqrt{3}$ 。

7、电路如图所示，对称三相电路线，已知

$$\dot{U}_{AC} = 173.2 \angle -30^\circ \text{ V} \quad \dot{I}_B = 2 \angle -150^\circ \text{ V}$$

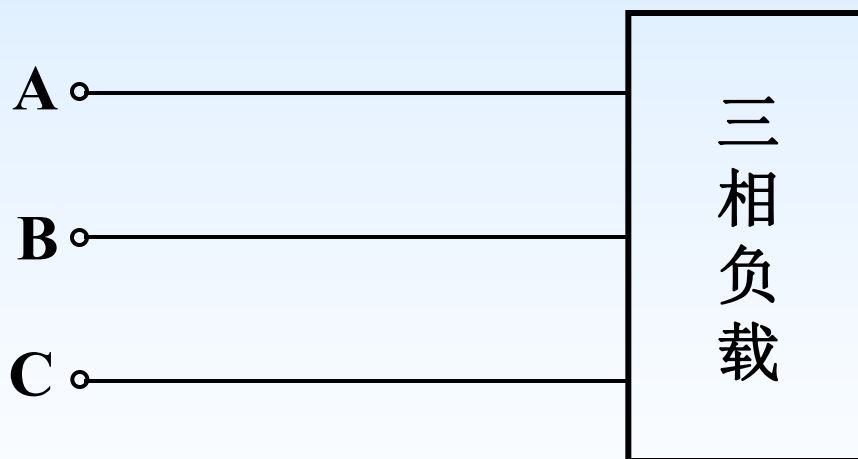
则该电路的三相功率P等于（ ）。

(a) 0W。

(b) 300W 。

(c) 433W 。

(d) 520W 。



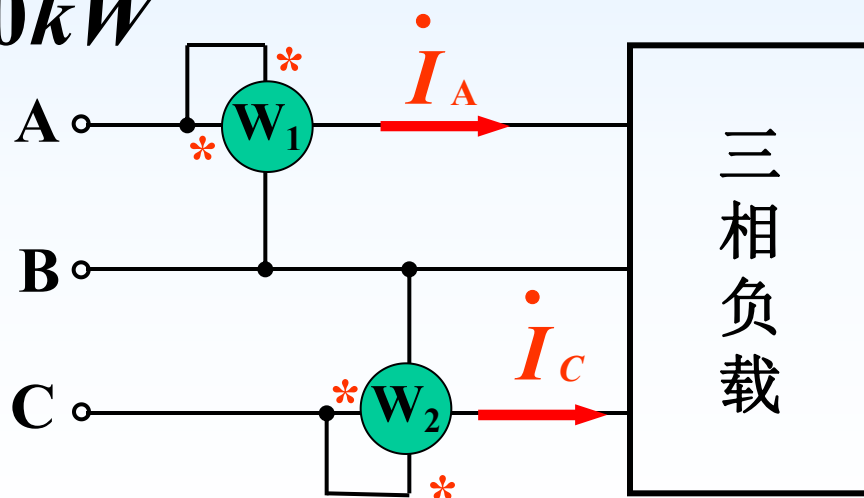
8、电路如图所示，对称三相电路，三相负载消耗的功率为 2.4kW ，负载功率因数 $\cos\varphi = 0.5$ (滞后)
则图中两块功率表的读数为 ()。

(a) $W_1 = 0\text{W}$, $W_2 = 2.4\text{kW}$

(b) $W_1 = 2.4\text{kW}$, $W_2 = 0\text{kW}$

(c) $W_1 = 2.4\text{kW}$, $W_2 = 0\text{kW}$

(d) $W_1 = W_2 = 1.2\text{kW}$



填空题

1、若正序对称三相电源电压为

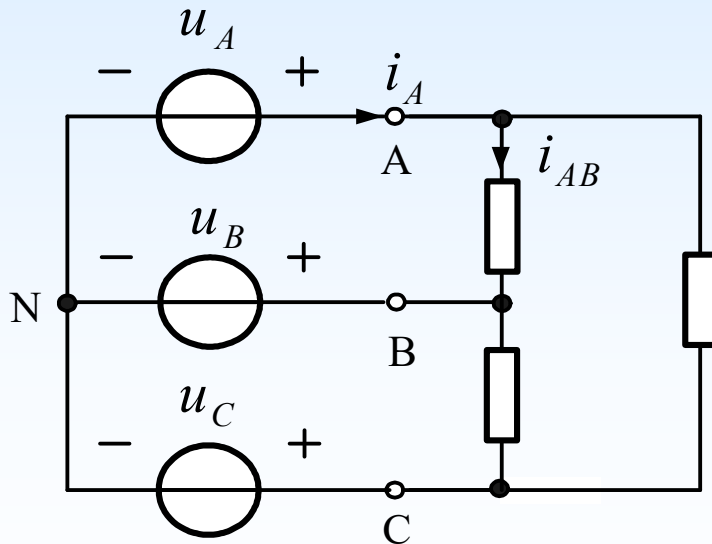
$$u_A = 100 \cos(314t + 90^\circ) V$$

则 u_{BC} 为 () 。

2、电路如图所示，已知线电流

$$\dot{I}_A = 10 \angle 60^\circ \text{ A}$$

则相电流 I_{BC} 为 ()。



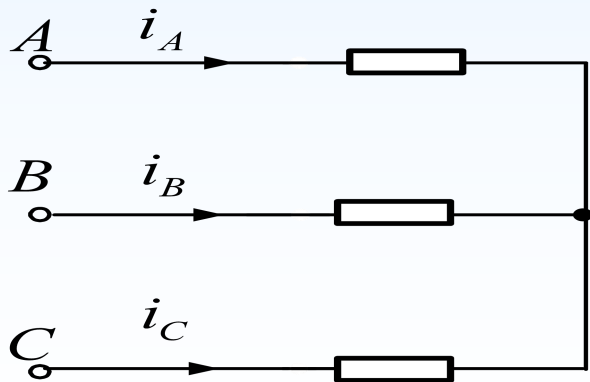
3、已知电源线电压为380V，负载星形连接，阻抗 $Z = (80 - j60) \Omega$ ，则三相电路的总功率为（ ）。

4、电路如图所示，已知某对称三相电

路线电压为 $U_{AC} = 380\angle -30^\circ \text{ V}$

线电流 $I_B = 10\angle -150^\circ \text{ A}$

则该电路的三相功率为（ ）。

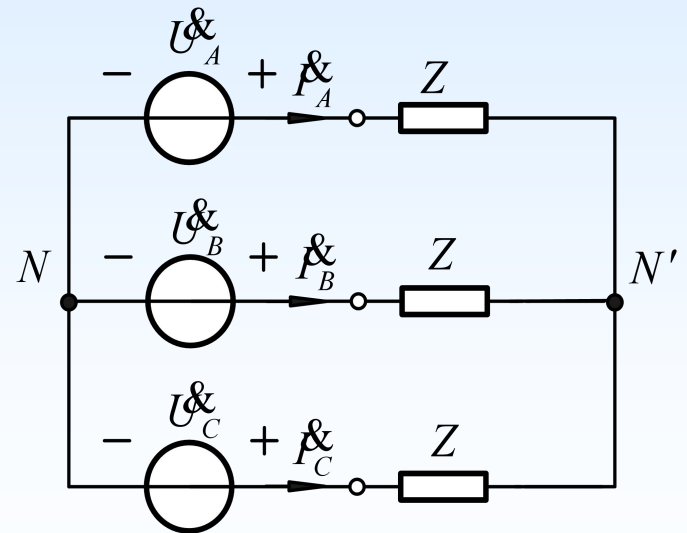


3. 计算题

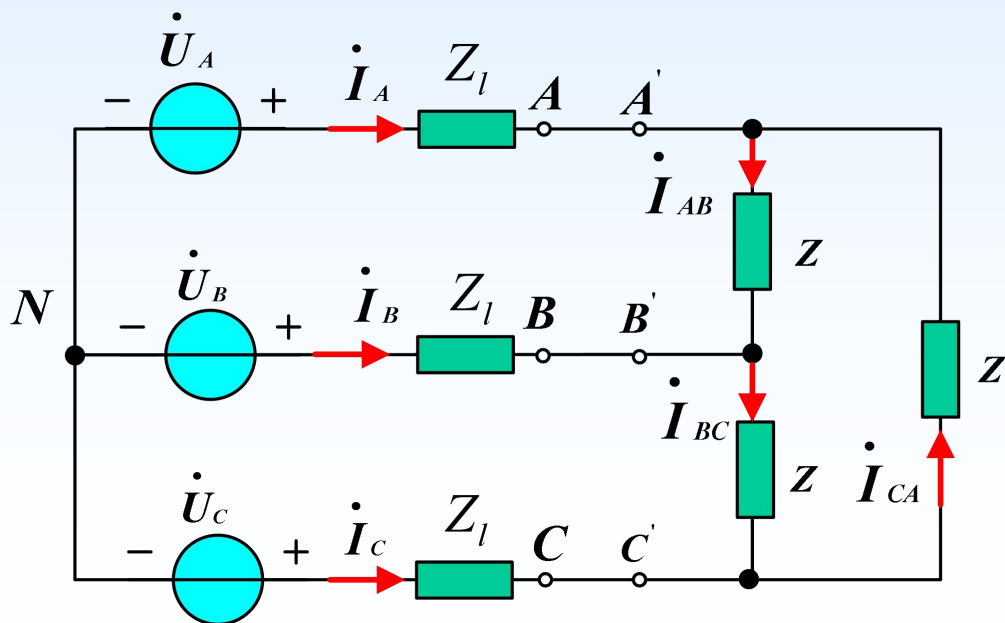
1、对称三相电路如图所示，电源线电压为380V，

$$Z = (10 + j10)\Omega$$

求负载中各电流相量。

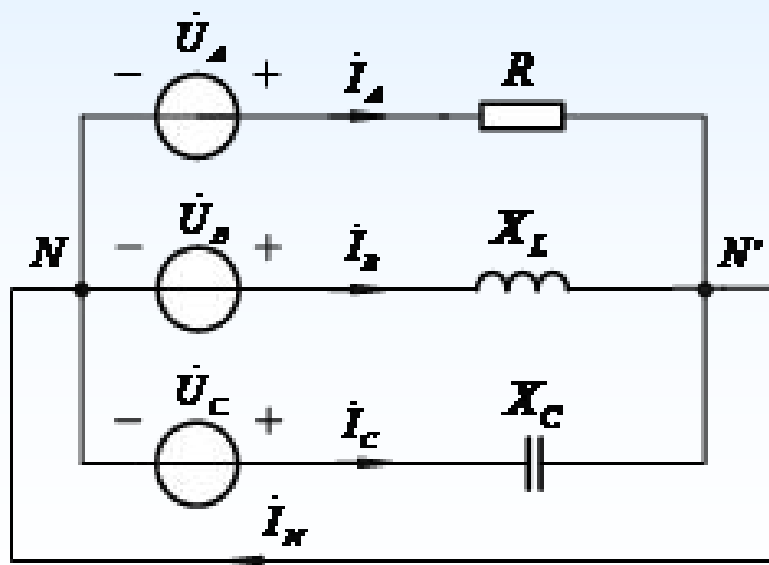


2、电路如图，已知对称三相电路电源
线电压380V，三角形负载阻抗
 $Z=90+j300\Omega$ ，端线阻抗 $Z_l=70\Omega$ ，求负载
线电流和负载的相电压。



3、电路如图所示，电源对称，相电压为220V，负载不对称，已知 $R=10\Omega$ ， $X_L=10\Omega$ ， $X_C=10\Omega$ ，

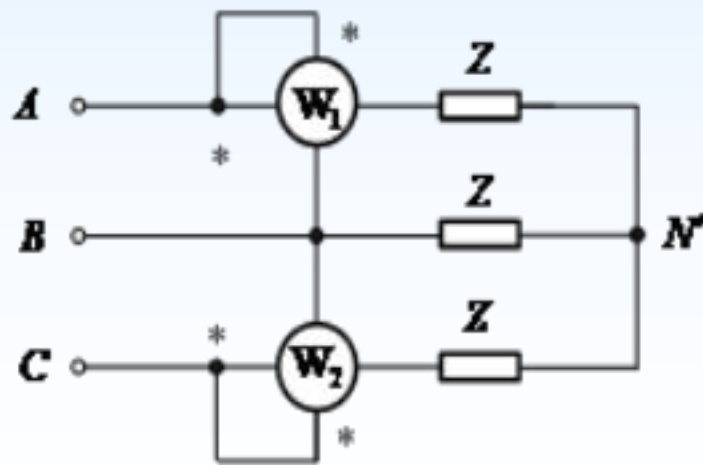
求各相负载的相电流和中线电流。

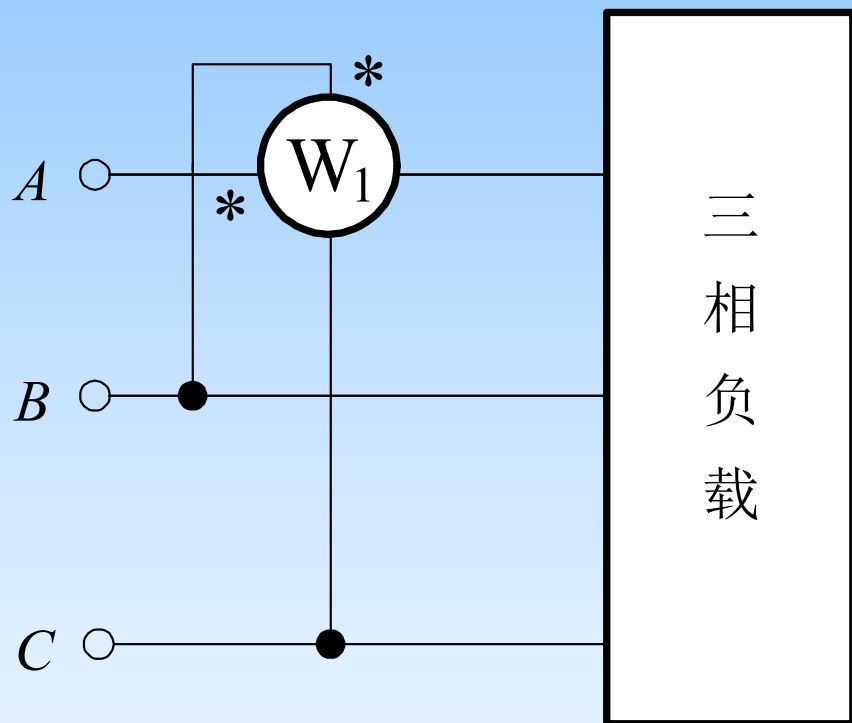


4、图对称三相电路中， $U_{AB} = 220V$

$$Z = (20 + j20)\Omega$$

若用二表法测量三相总的功率，求二块功率表的读数及三相总的有功功率。





对于三相三线制供电的三相对称负载，可用一瓦特计法测得三相负载的总无功功率 Q ，测试原理线路如图所示。

