

第4章 三相电路

4.1 三相电路的组成

4.2 三相电路的分析

4.3 三相电路的功率计算

【引例】

大家都知道,我们家里、办公室的用电设备所使用的电源都是交流**220V**电源。但是,我们也许不知道电网是怎样送电的?实际的用电设备和电网是如何连接的?如何分析与计算?

学完本章内容就可以回答以上问题。

为了节省发电、送电的成本，目前世界各国主要电能的产生、传输、分配和应用多采用**三相制供电**。日常生活中使用的单相电源是取自三相中的一相。

三相制与单相制比较：

1. 在发电机尺寸相同的情况下，三相发电机比单相发电机容量大、效率高。
2. 输送电能时，三相制的用铜量仅为单相制的**75%**。
3. 三相交流电动机比单相电动机性能好，结构简单，便于维护。

4.1 三相电路的组成

三相电路：

由三相电源、三相负载组成。

4.1.1 三相电源

三相电源的实际装置是三相同步发电机。三相同步发电机由原动机带动而旋转发出对称三相交流电。常用的原动机为汽轮机和水轮机等。

水力发电厂



水轮机转子



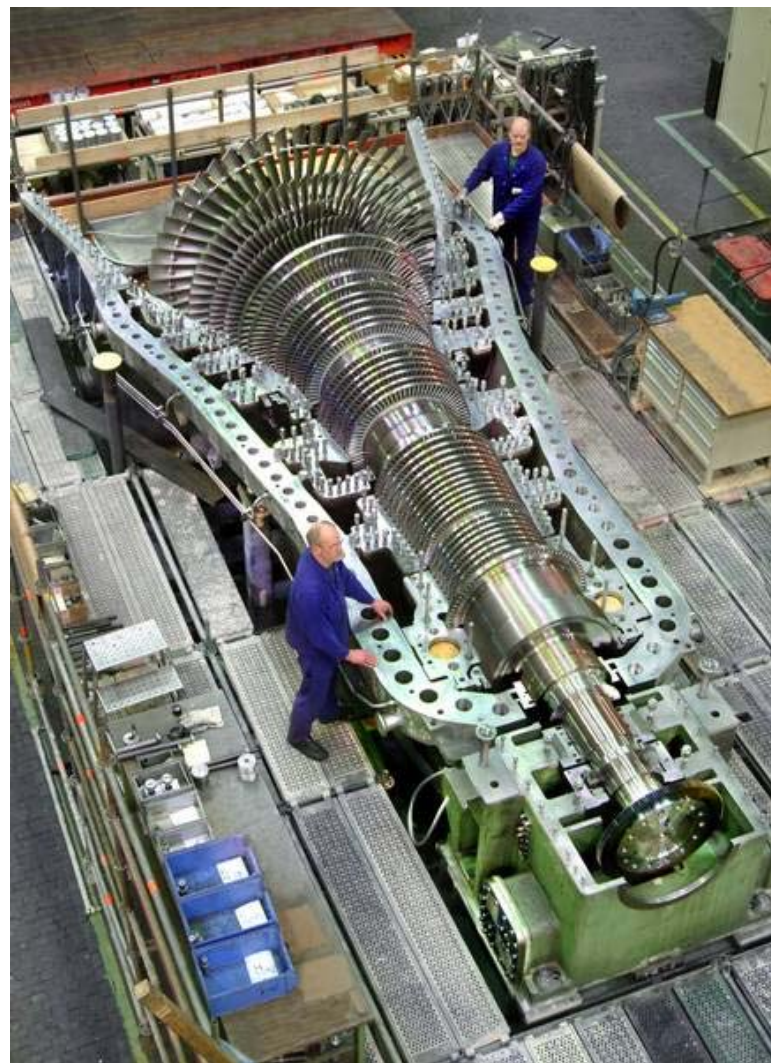
火力发电厂



大亚湾核电站

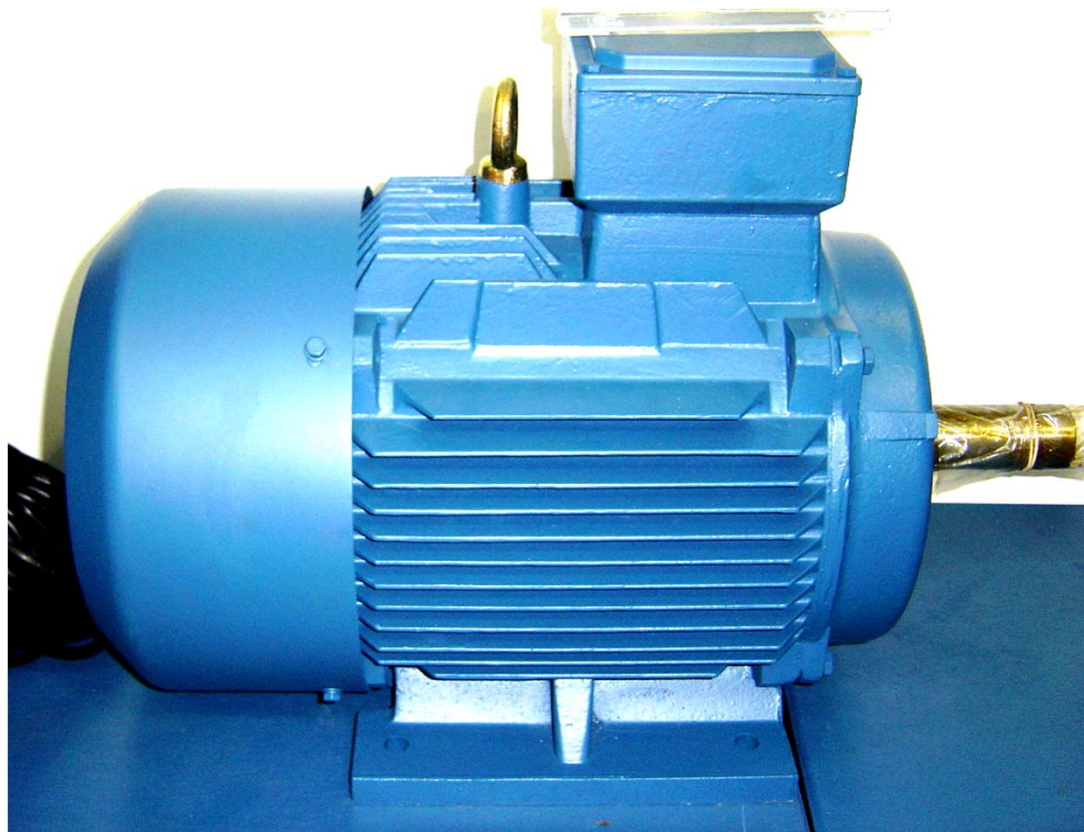


汽轮机



发电机组





发电机

4.1.1 三相电源

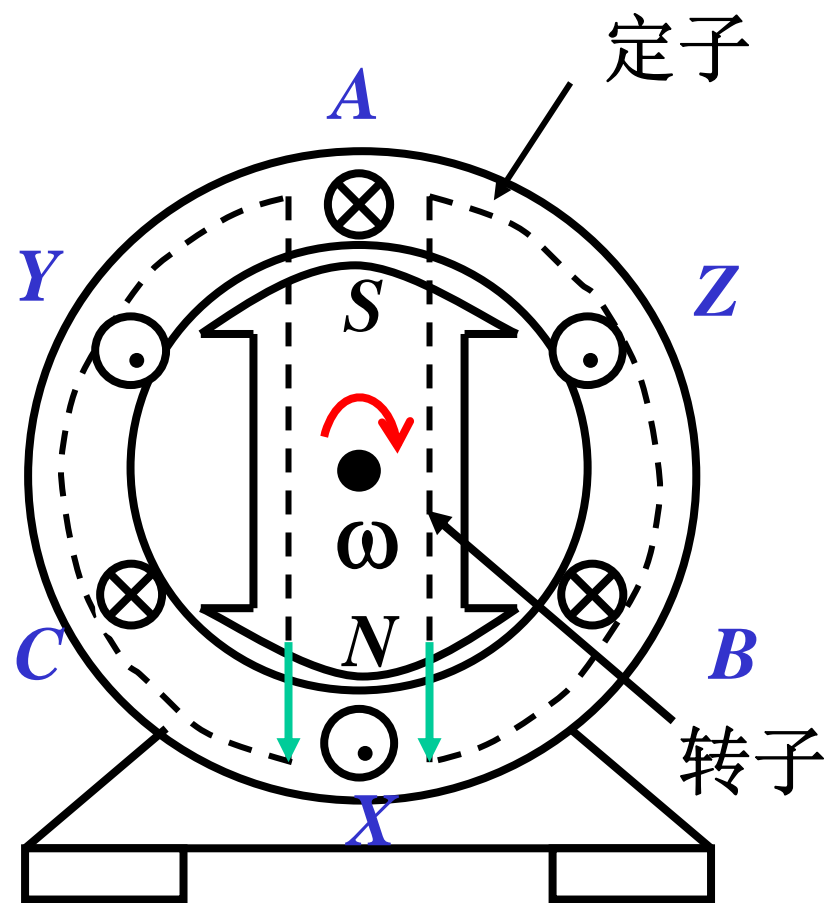
1. 对称三相电压

定子中放三个绕组：

首端 $A \rightarrow X$
 $B \rightarrow Y$ 末端
 $C \rightarrow Z$

三个绕组空间位置
各差 120° 。

转子装有磁极并以
 ω 的速度旋转。三个
定子绕组中便产生三
个感应电压。



三相发电机

三相感应电压为

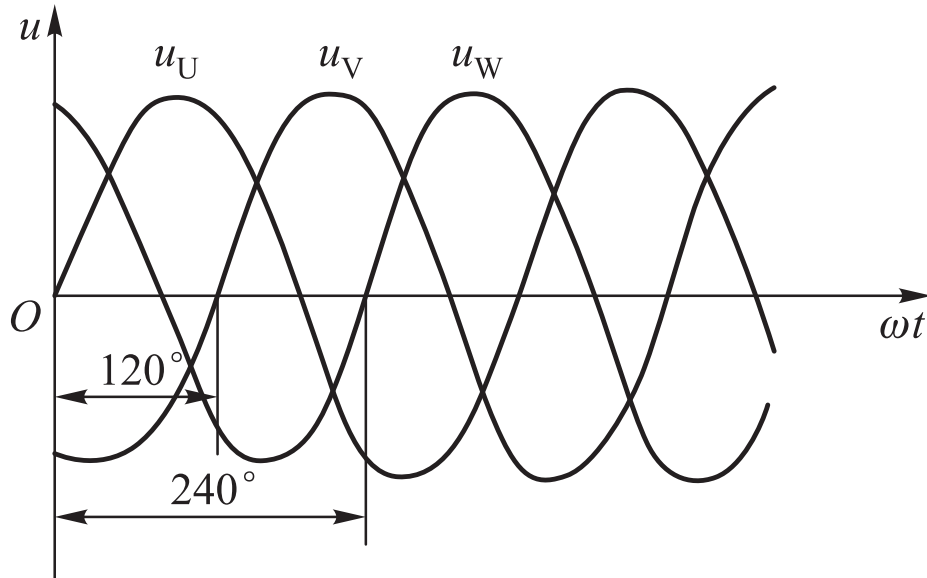
$$u_u = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

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

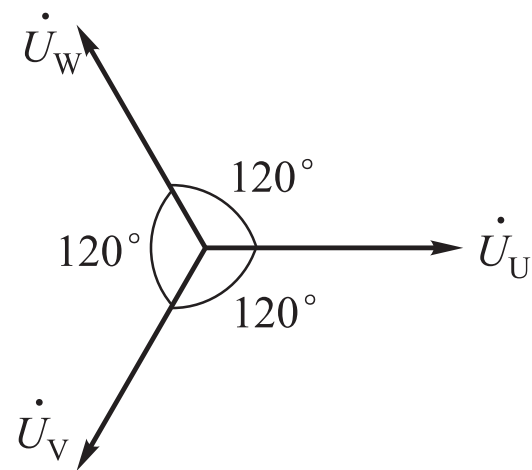
$$u_w = \sqrt{2}U \sin(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + 120^\circ)$$

对称三相电压

特点：大小相等，频率相同，相位互差120°。



(a) 波形图



(b) 相量图

对称三相电压有效值的相量式为

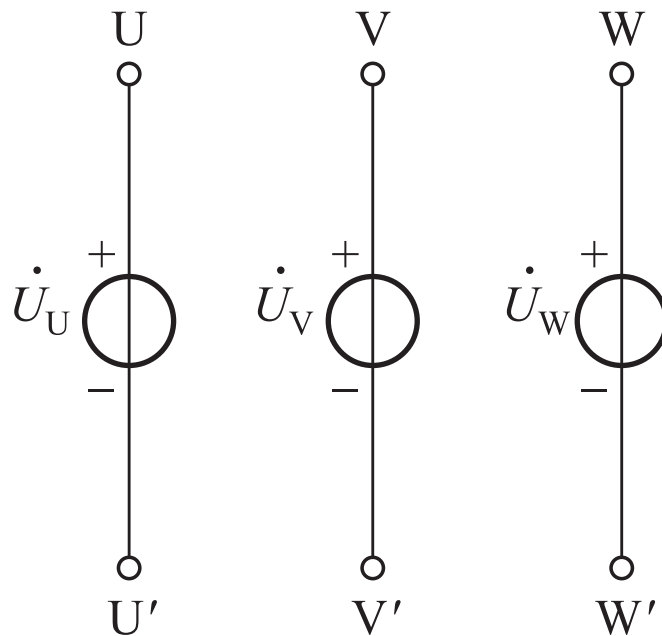
$$\begin{cases} \dot{U}_u = U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_v = U \angle -120^\circ \\ \dot{U}_w = U \angle 120^\circ \end{cases}$$

对称三相电压的瞬时值之和或相量之和均为零，即

$$u_u + u_v + u_w = 0$$

$$\dot{U}_u + \dot{U}_v + \dot{U}_w = 0$$

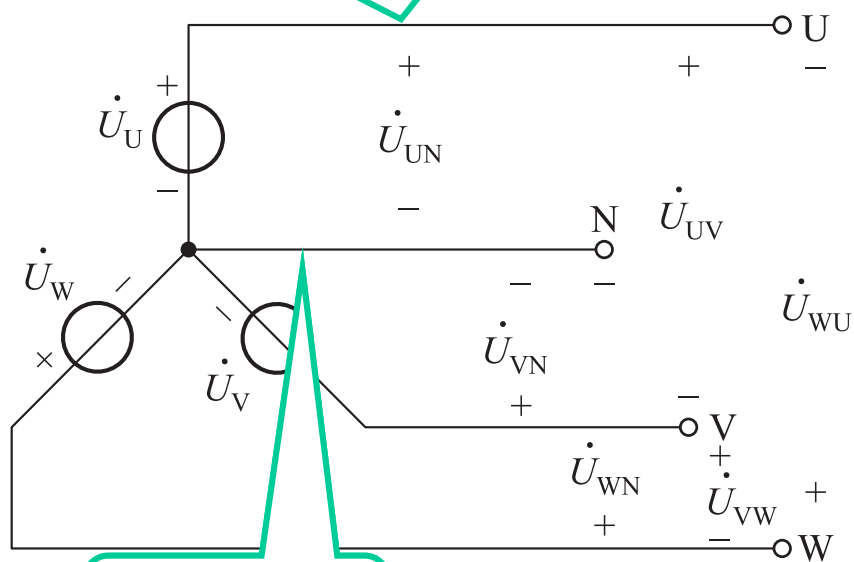
对称三相电源
的电路模型



2. 三相电源的供电方式

(1) 三相四线制

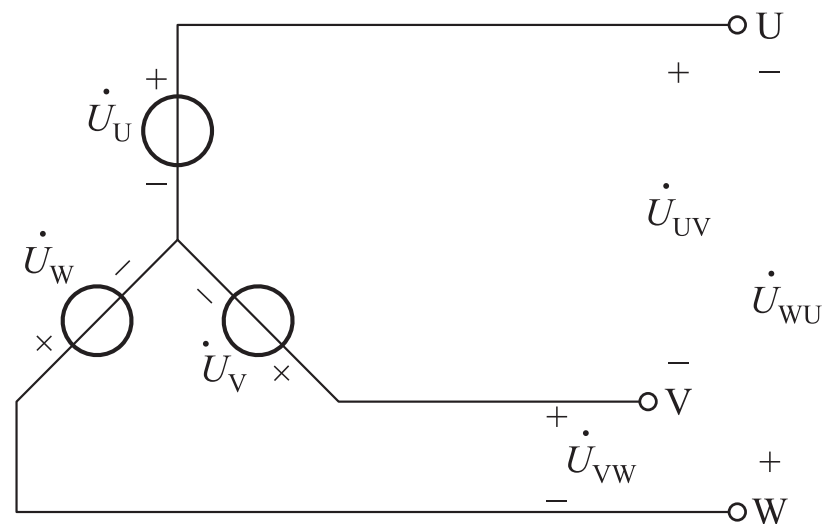
相线（火线）u、v、w



中性线

三相四线电源

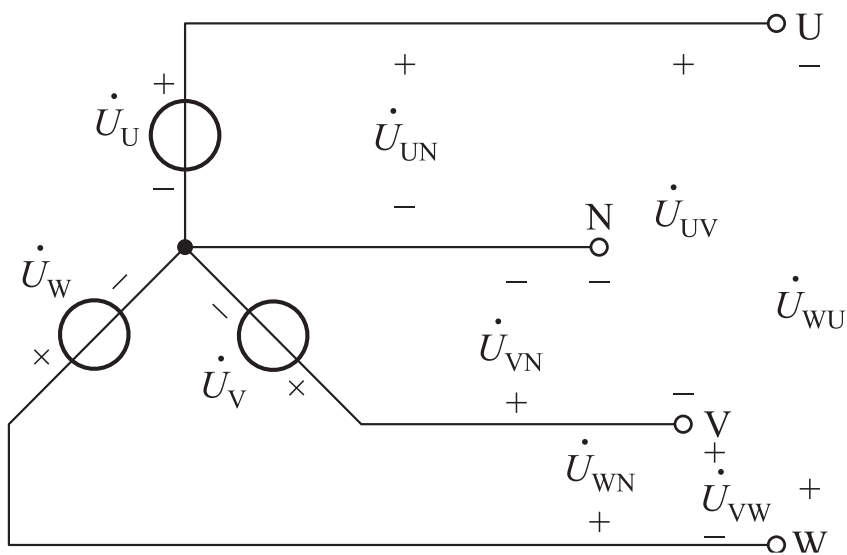
(2) 三相三线制



(b) 星形连接的三相三线电源

3. 三相电源提供的相电压与线电压

(1) 相电压：相线与中性线之间的电压，即

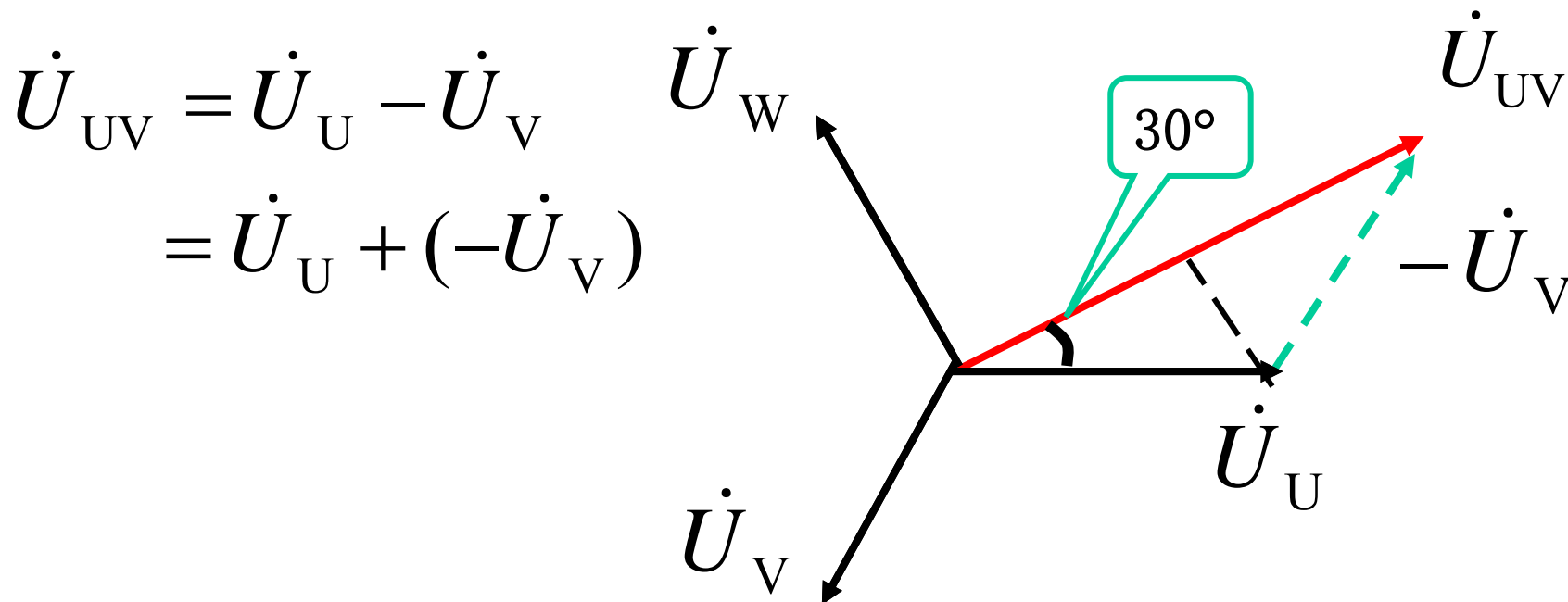


$$\begin{matrix} \dot{U}_{UN} \\ \dot{U}_{VN} \\ \dot{U}_{WN} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \dot{U}_U \\ \dot{U}_V \\ \dot{U}_W \end{matrix}$$

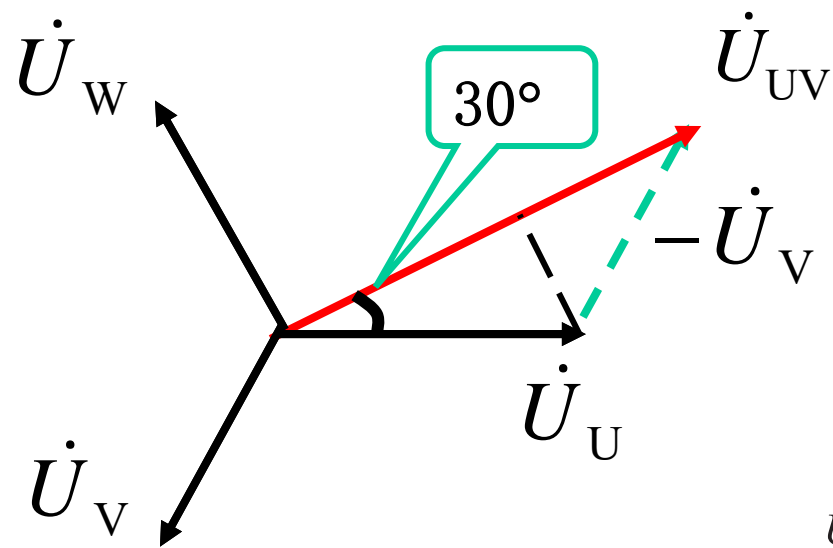
(2) 线电压：两条相线之间的电压，即

$$\begin{cases} \dot{U}_{UV} = \dot{U}_U - \dot{U}_V \\ \dot{U}_{VW} = \dot{U}_V - \dot{U}_W \\ \dot{U}_{WU} = \dot{U}_W - \dot{U}_U \end{cases}$$

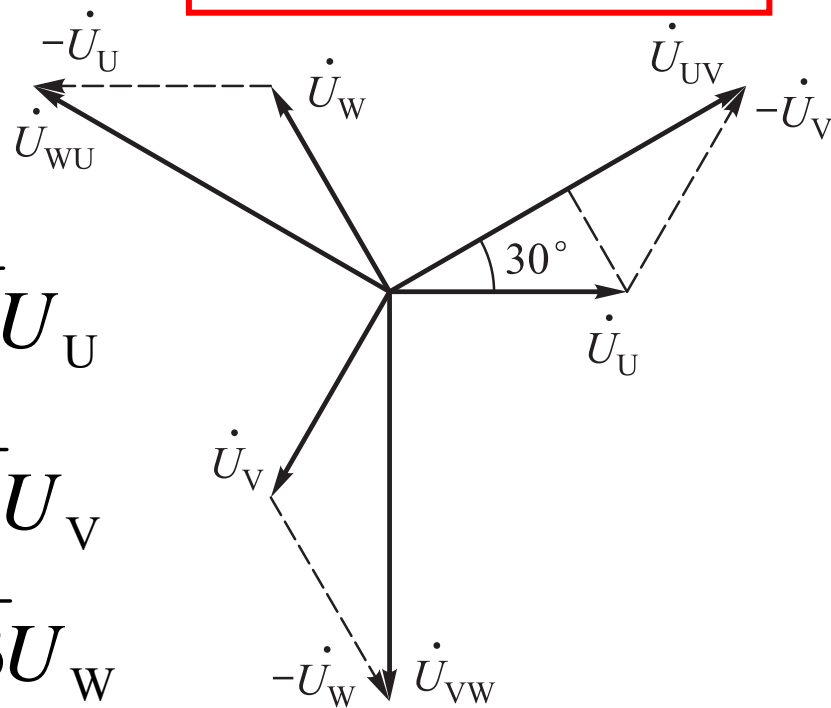
4. 相电压与线电压之间的关系



$$U_{UV} = 2U_U \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_U$$



$$\begin{cases} \dot{U}_{UV} = \dot{U}_U - \dot{U}_V \\ \dot{U}_{VW} = \dot{U}_V - \dot{U}_W \\ \dot{U}_{WU} = \dot{U}_W - \dot{U}_U \end{cases}$$



$$U_{UV} = 2U_U \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_U$$

$$U_{VW} = 2U_V \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_V$$

$$U_{WU} = 2U_W \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_W$$

相量式

$$\begin{cases} \dot{U}_{UV} = \dot{U}_U - \dot{U}_V = \sqrt{3}\dot{U}_U \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{VW} = \dot{U}_V - \dot{U}_W = \sqrt{3}\dot{U}_V \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{WU} = \dot{U}_W - \dot{U}_U = \sqrt{3}\dot{U}_W \angle 30^\circ \end{cases}$$

线电压

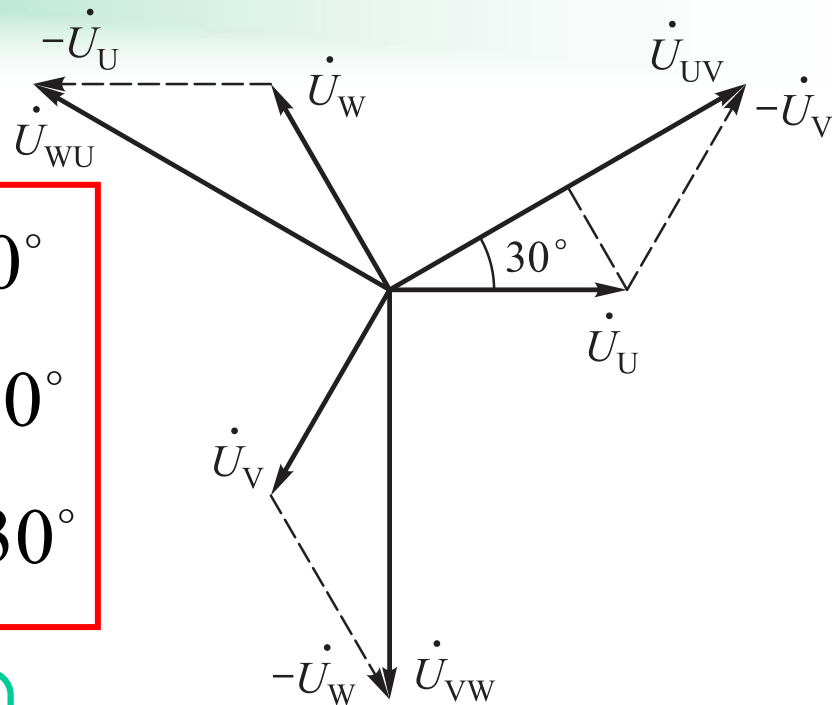
可写为

相电压

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

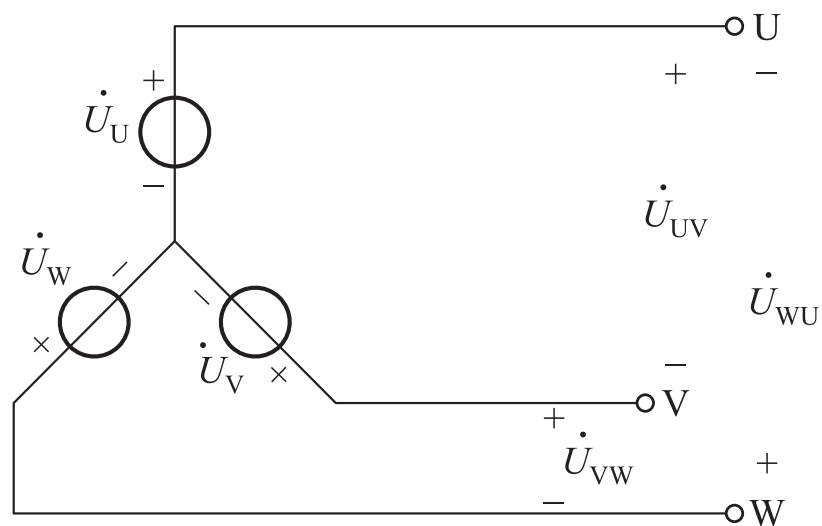
$$U_l = U_{UV} = U_{VW} = U_{WU}$$

$$U_p = U_U = U_V = U_W$$



我国供电系统：
线电压为**380V**，
相电压为**220V**。

(2) 三相三线制



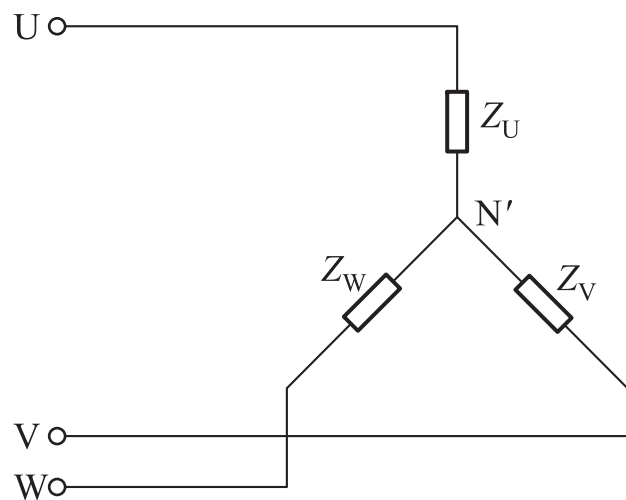
(b) 星形连接的三相三线电源

4.1.2 三相负载

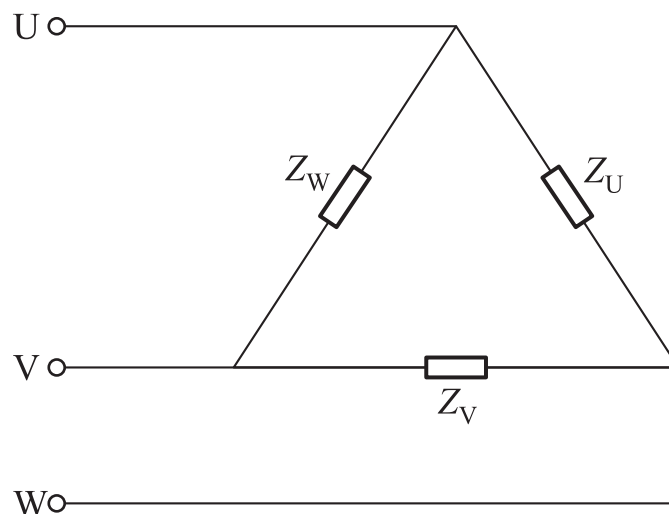
三相电路中的负载包括单相负载和三相负载。

三相负载：负载由三部分电路组成，每一部分称为负载的一个相，如三相异步电动机

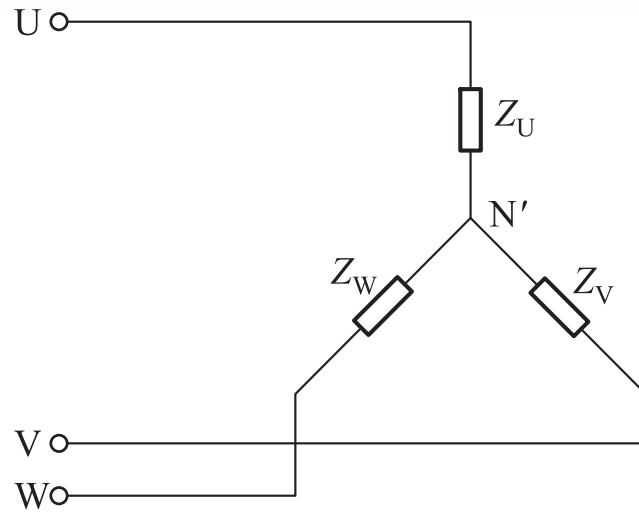
单相负载：照明灯具、家用电器等。三相制中通常把若干单相负载分成三组，组合而成三相负载。



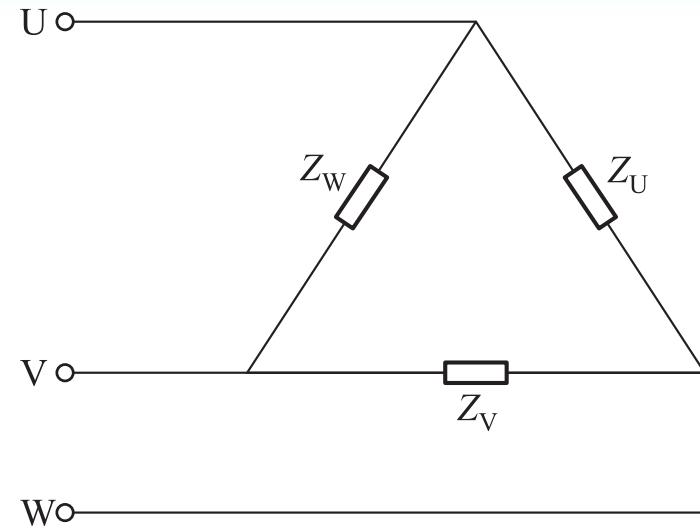
(a) 三相负载星形联结



(b) 三相负载三角形联结



(a) 三相负载星形联结

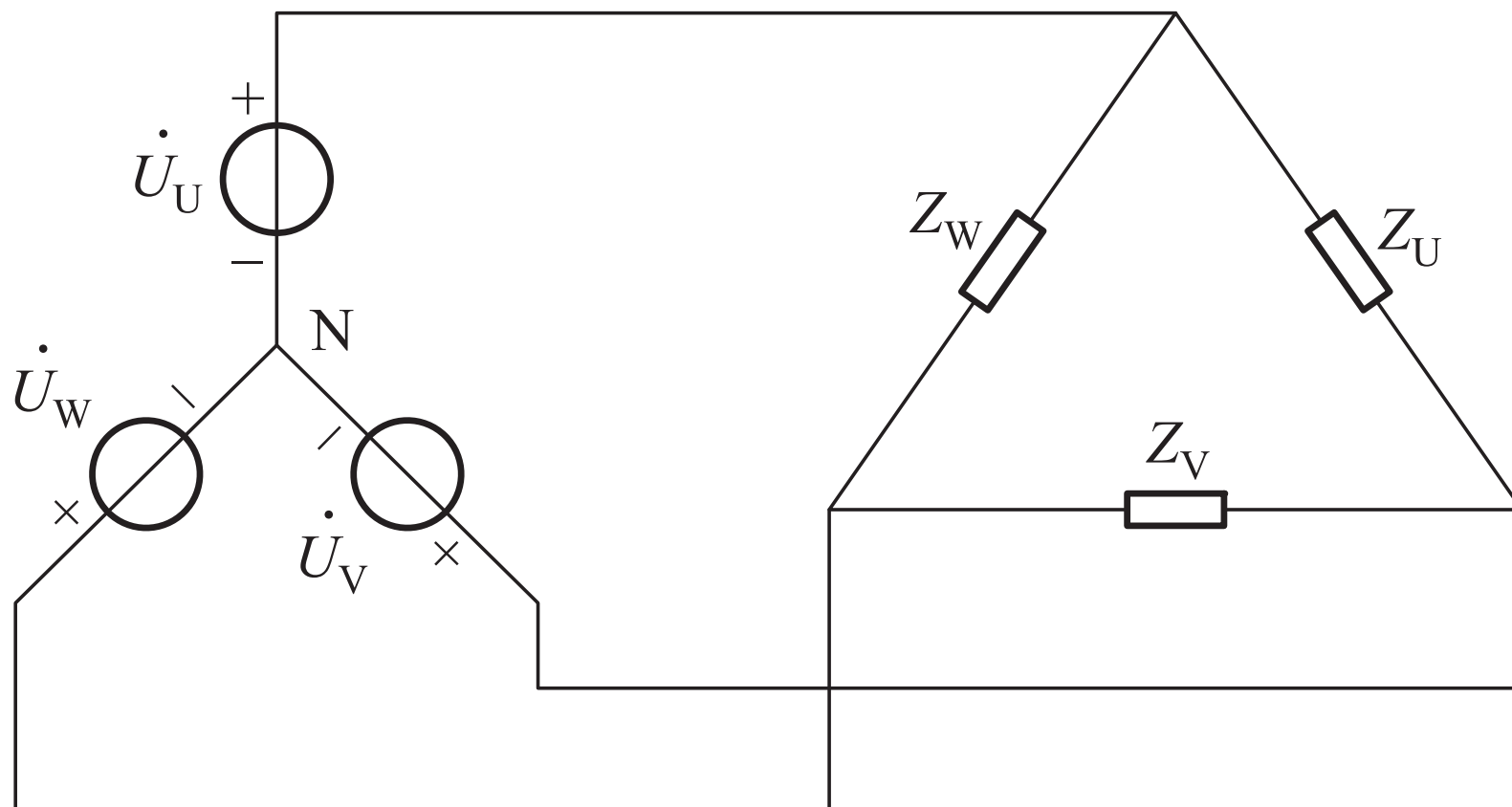


(b) 三相负载三角形联结

对称三相负载: $Z_U = Z_V = Z_W$

不对称三相负载: $Z_U \neq Z_V \neq Z_W$

三相电路



4.2 三相电路的分析

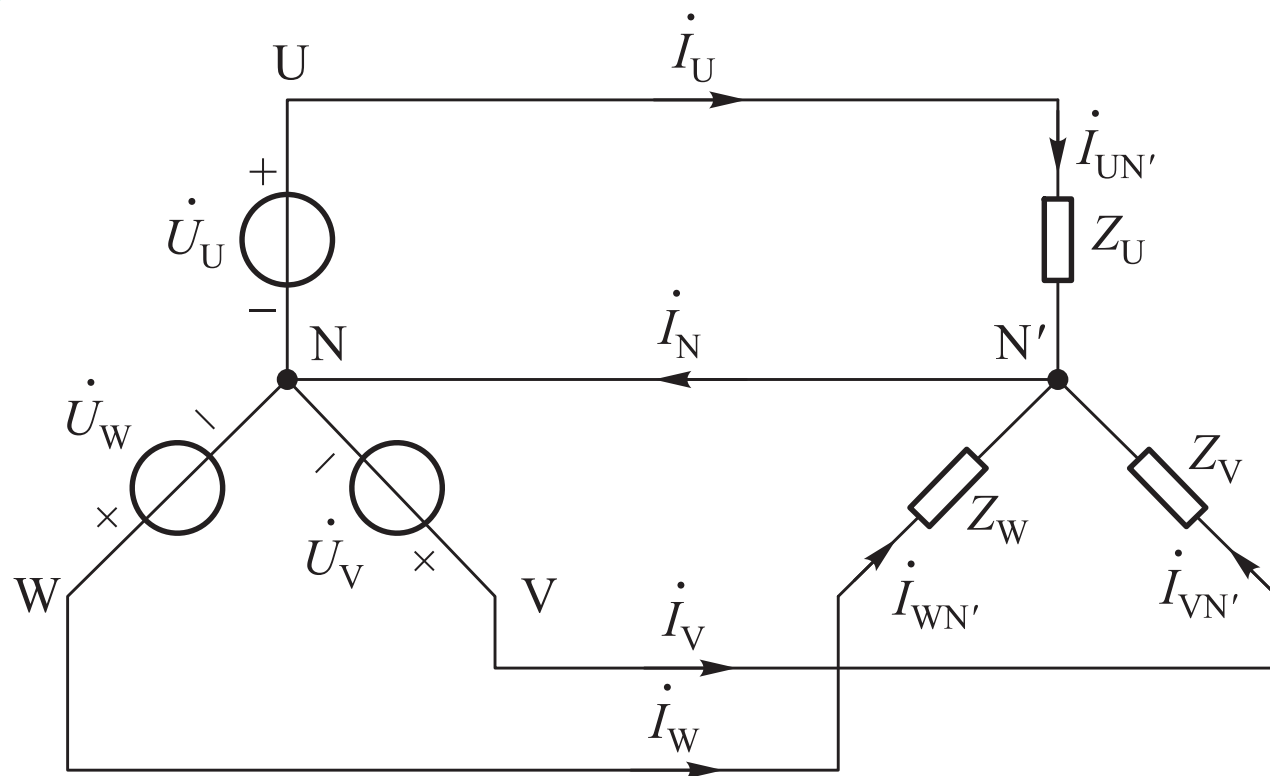
负载的相电压就等于电源的相电压

1. 负载的

$$\dot{U}_{UN'} = \dot{U}_U$$

$$\dot{U}_{VN'} = \dot{U}_V$$

$$\dot{U}_{WN'} = \dot{U}_W$$



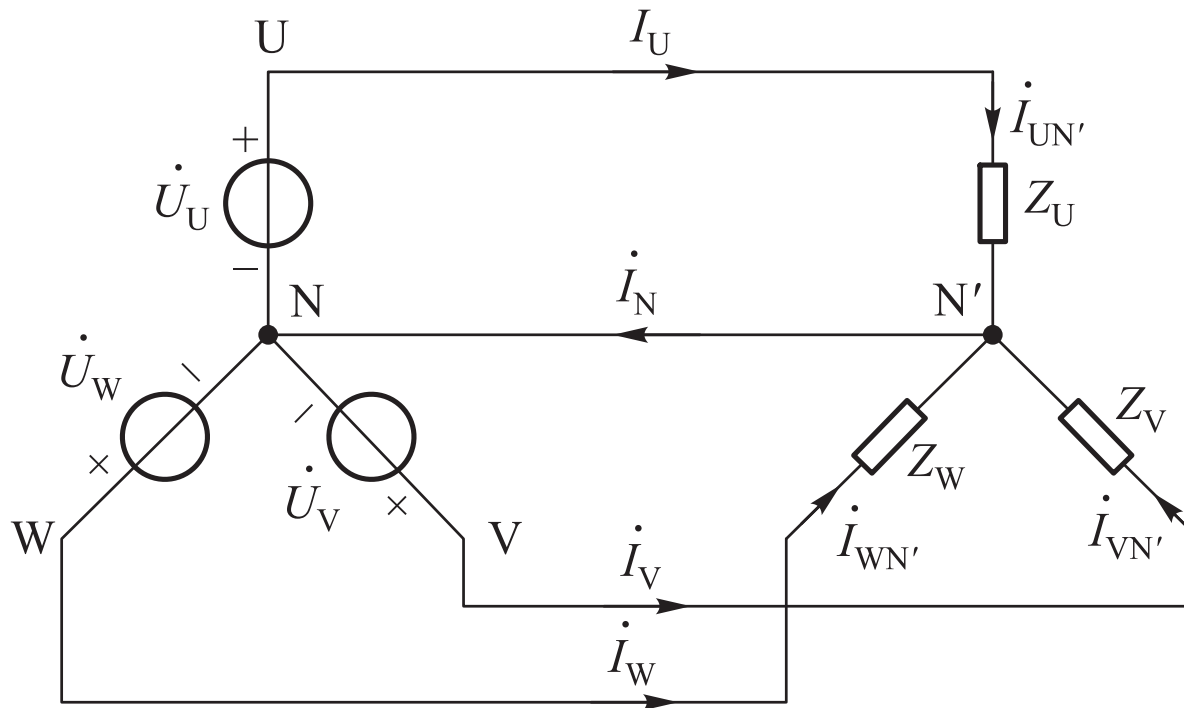
2. 负载的相电流

负载的相电流就是流过每相负载的电流

$$\dot{I}_{UN'}$$

$$\dot{I}_{VN'}$$

$$\dot{I}_{WN'}$$



可用下式计算

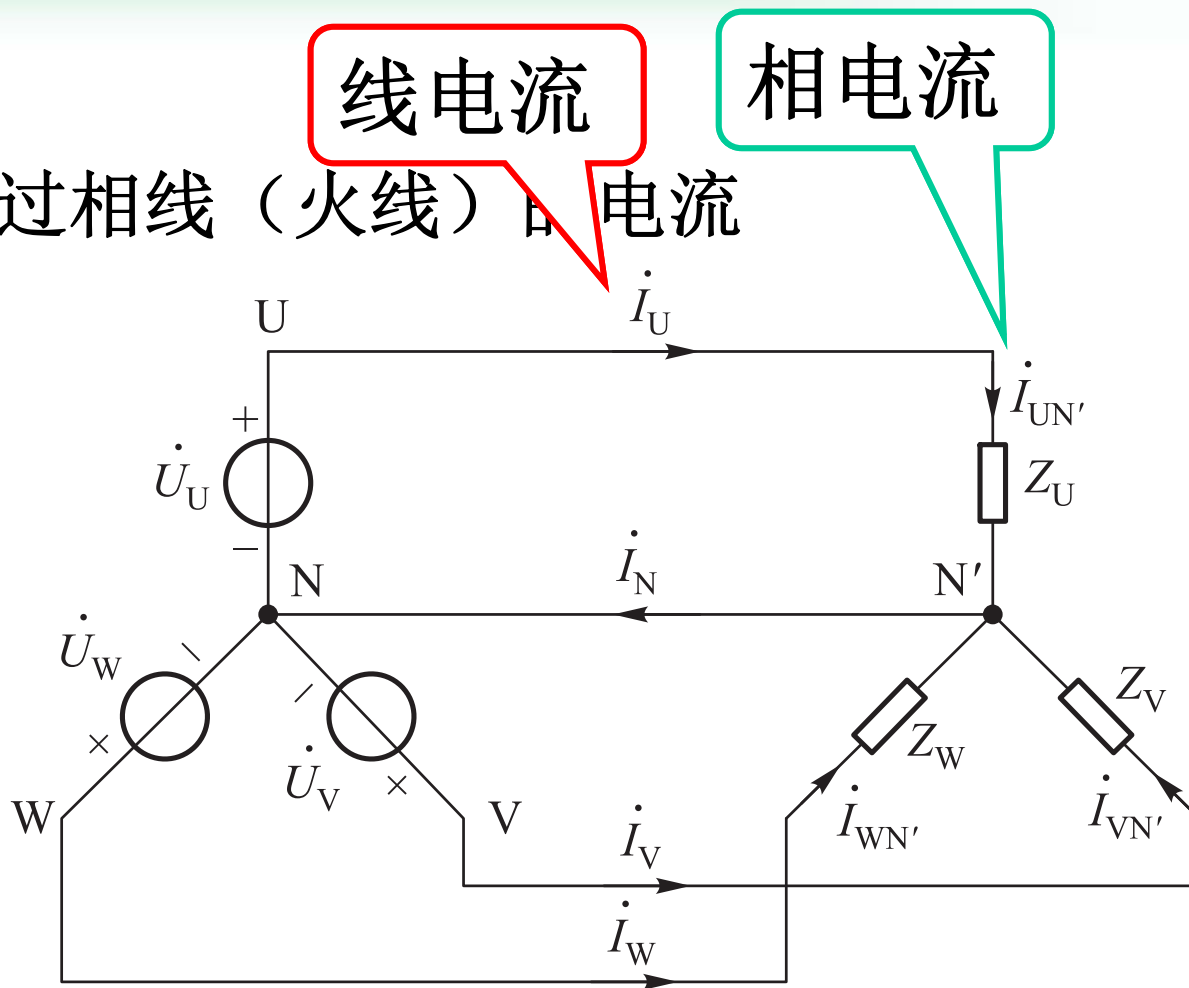
$$\dot{I}_{UN'} = \frac{\dot{U}_U}{Z_U} \quad \dot{I}_{VN'} = \frac{\dot{U}_V}{Z_V} \quad \dot{I}_{WN'} = \frac{\dot{U}_W}{Z_W}$$

3. 线电流

线电流就是流过相线（火线）的电流

$$\dot{I}_U, \dot{I}_V, \dot{I}_W$$

负载星形联结时，线电流等于相电流，即



$$\dot{I}_U = \dot{I}_{UN'}, \dot{I}_V = \dot{I}_{VN'}, \dot{I}_W = \dot{I}_{WN'}$$

4. 中性线电流

中性线上流过的电流称为中性线电流，

中性线电流

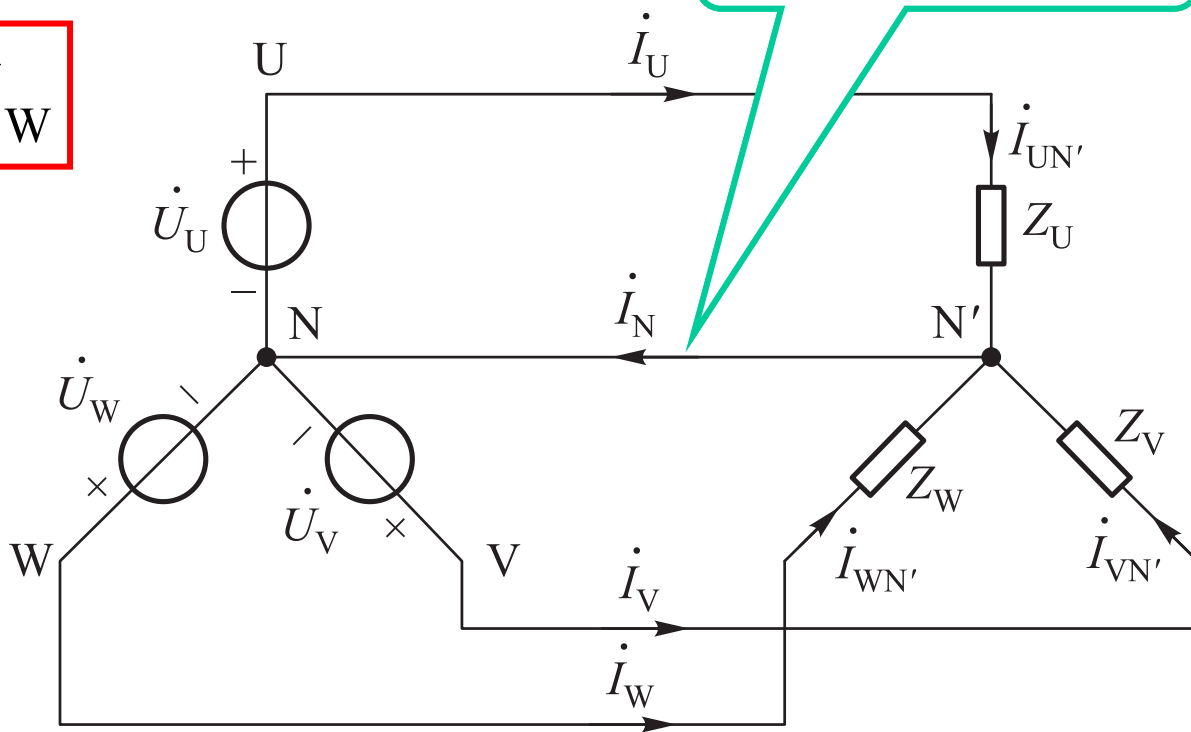
$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W$$

当负载对称时，

$$Z_U = Z_V = Z_W = |Z| \angle \varphi$$

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

$$\dot{I}_U = \frac{\dot{U}_U}{Z_U} = I_U \angle -\varphi$$

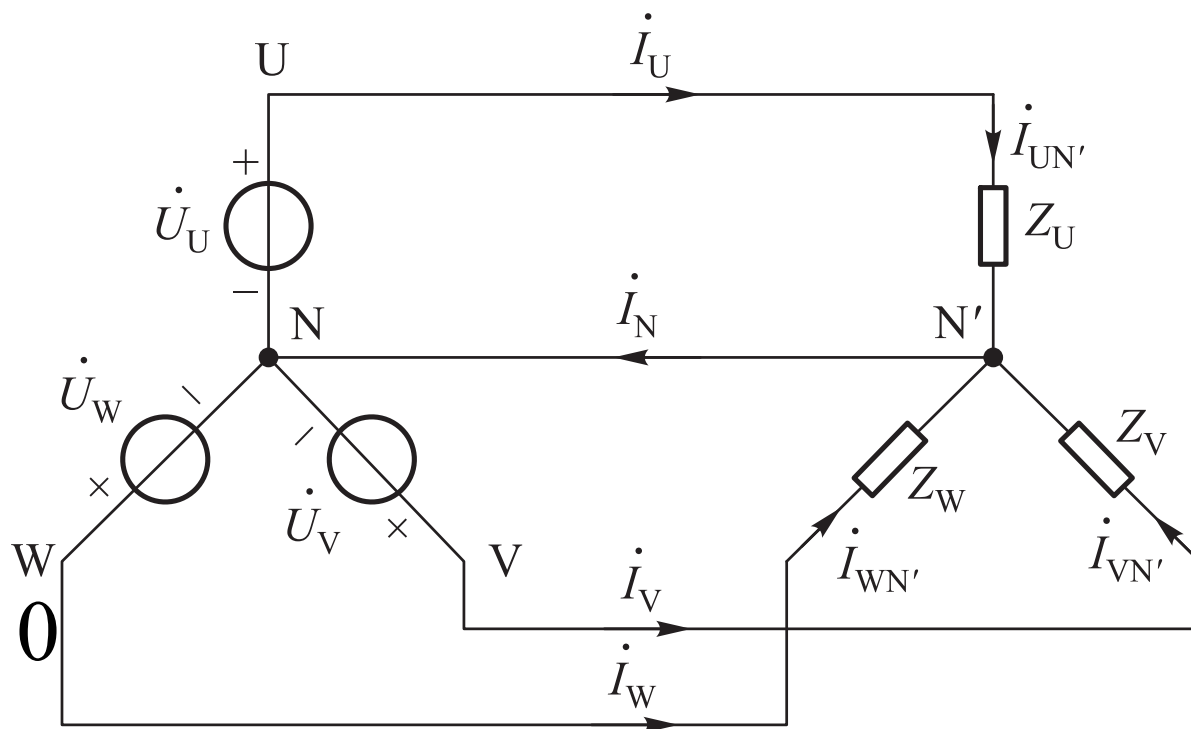


$$\dot{I}_U = \frac{\dot{U}_U}{Z_U} = I_U \angle -\varphi$$

$$\dot{I}_V = I_U \angle -\varphi - 120^\circ$$

$$\dot{I}_W = I_U \angle -\varphi + 120^\circ$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 0$$

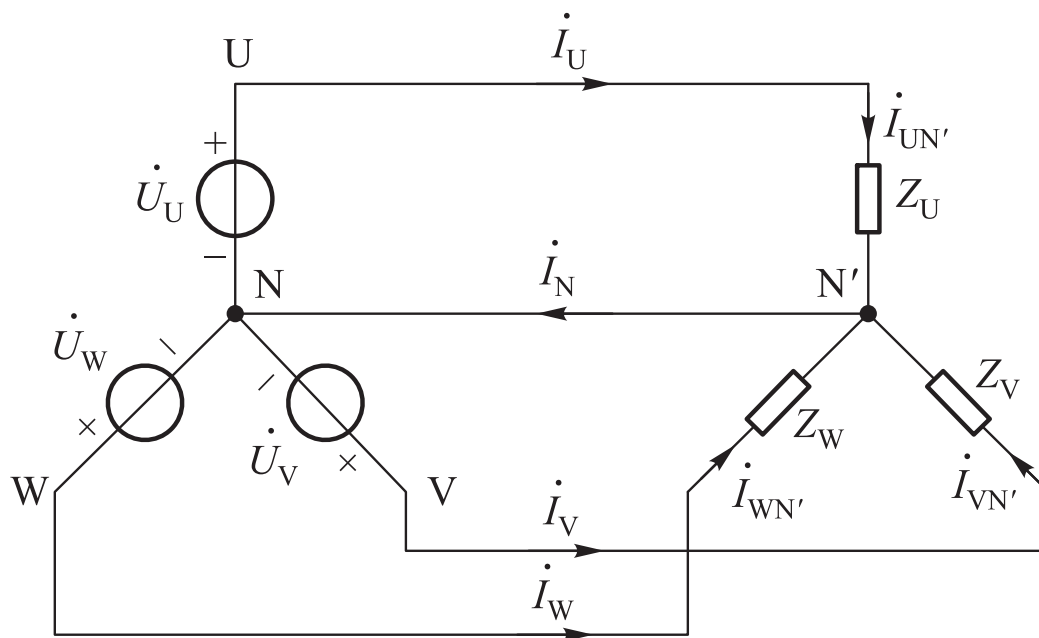


当负载对称时，中线电流为零。

【例 4.2.1】 在图所示的电路中，已知每相负载的阻抗为 $(60 + j80)\Omega$ ，电源的线电压为 380V 。求：

- (1) 负载的相电流 i_U, i_V, i_W ；
- (2) 中性线电流 i_N ；
- (3) 画出负载上电压、电流的相量图。

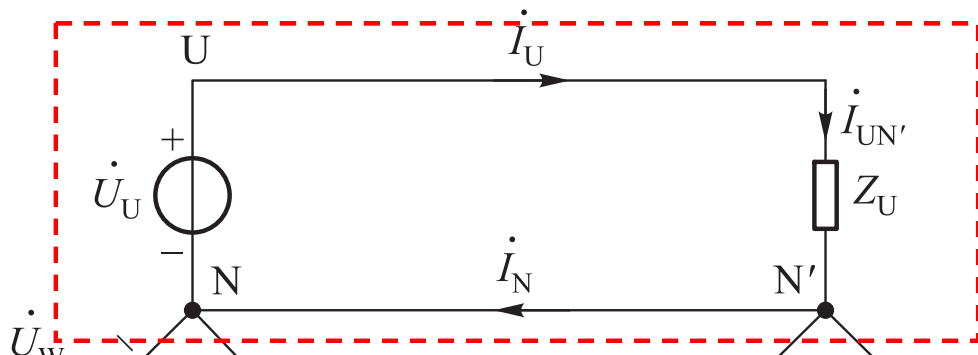
【解】



【例 4.2.1】 $Z = (60 + j80)\Omega$, $U_l = 380V$ 。求：

(1) 负载的相电流 i_U, i_V, i_W ;

【解】 因为三相负载对称，可化成单相电路计算



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

$$\dot{I}_U = \frac{\dot{U}_U}{Z} = \frac{220\angle 0^\circ}{60 + j80}$$

$$i_V = 2.2\sqrt{2} \sin(\omega t - 173.1^\circ) \text{ A}$$

$$= \frac{220\angle 0^\circ}{100\angle 53.1}$$

$$i_W = 2.2\sqrt{2} \sin(\omega t + 66.9^\circ) \text{ A}$$

$$= 2.2\angle -53.1^\circ \text{ A}$$

$$i_U = 2.2\sqrt{2} \sin(\omega t - 53.1^\circ) \text{ A}$$

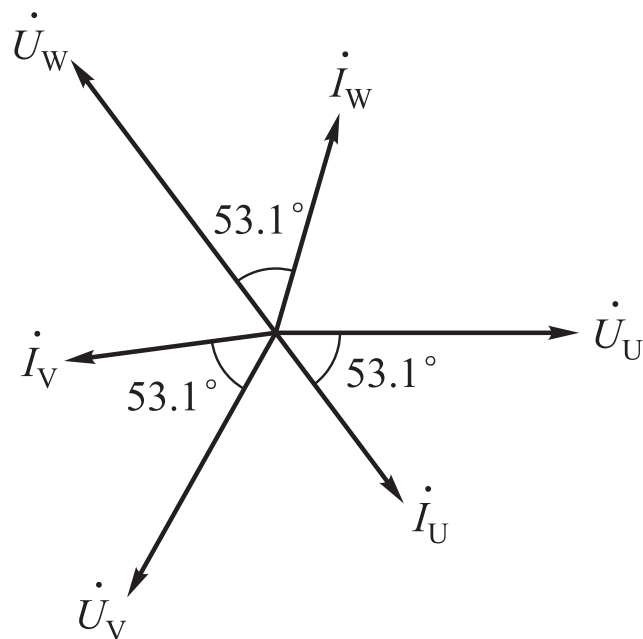
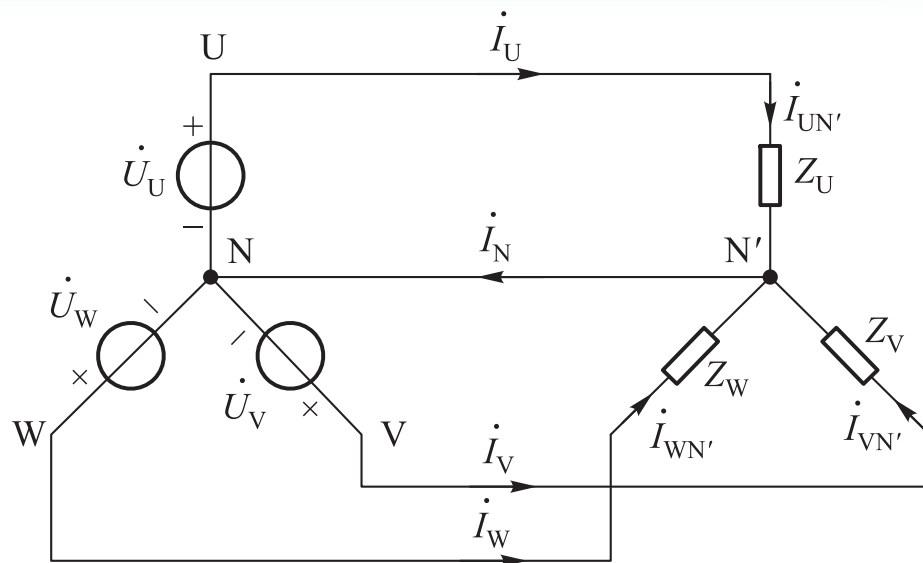
(2) 中性线电流 i_N

由于负载对称，
中性线电流为零，
即

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 0$$

$$i_N = 0$$

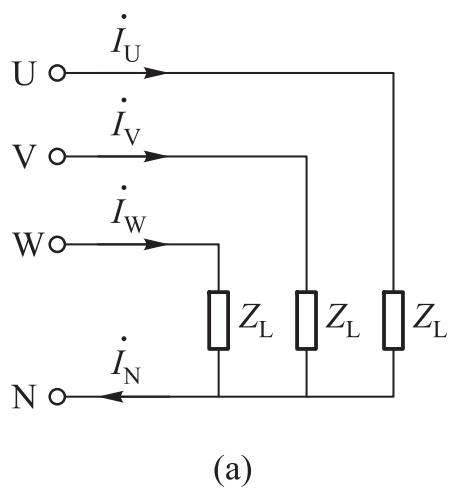
(3) 相量图



【例4.2.2】某学校三层教学楼共有60盏日光灯，接在线电压为380V的三相四线制电源上。已知每盏日光灯消耗的功率为30W，额定电压为220V,功率因数为0.9。求：（1）画出这些日光灯三相四线制电源供电的接线电路；（2）60盏日光灯全亮时，计算每相负载的相电流和中性线电流 I_U 、 I_V 、 I_W 和 I_N ；（3）当U相亮20盏，V相亮10盏，W相全不亮时，再计算各相电流和中性线电流；（4）在（3）情况下，若中性线断开，U、V两相日光灯是否能正常工作？

【例4.2.2】 三层教学楼共有60盏日光灯，线电压为380V，每盏日光灯消耗的功率为30W，额定电压为220V，功率因数为0.9。求：（1）画出接线电路图（2）60盏日光灯全亮时，计算每相负载的相电流和中性线电流 \dot{I}_U 、 \dot{I}_V 、 \dot{I}_W ； \dot{I}_N ；

【解】（1）将60盏日光灯均匀分成三组，每组20盏，接到三相四线制电源上。



$$(2) I_P = \frac{P}{U \cos \varphi} \times 20 = \frac{30}{220 \times 0.9} \times 20 = \frac{600}{198} = 3A$$

$$\dot{U}_U = 220 \angle 0^\circ V, \cos \varphi = 0.9, \varphi = 25.84^\circ$$

$$\dot{I}_U = 3 \angle -25.84^\circ A \quad \dot{I}_W = 3 \angle 94.16^\circ A$$

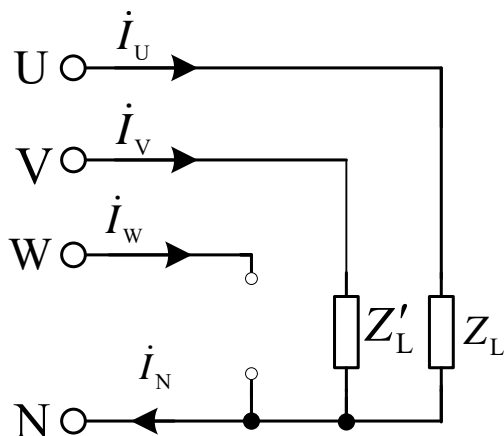
$$\dot{I}_V = 3 \angle -145.84^\circ A \quad \boxed{\dot{I}_N = 0}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_N &= \dot{I}_U + \dot{I}_V = 3\angle -25.84^\circ + 1.5\angle -145.84^\circ \\ &= 2.7 - j1.3 - 1.24 - j0.84 = 1.46 - j2.14 = 2.59\angle -55.7^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

若中性线断开，U、V两相日光灯是否能正常工作？

【解】（3）此时负载不对称了，如图所示。

因为有中性线，不对称负载各相正常工作。



$$\dot{I}_U = 3\angle -25.84^\circ \text{ A, 不变}$$

$$I_V = \frac{P}{U \cos \varphi} \times 10 = \frac{30}{220 \times 0.9} \times 10 = 1.5 \text{ A}$$

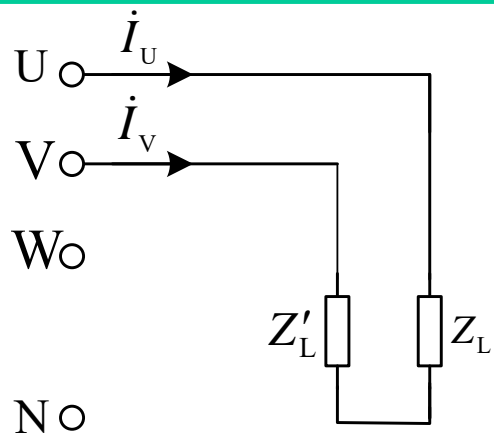
$$\dot{I}_V = 1.5\angle -25.84^\circ - 120^\circ = 1.5\angle -145.84^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_W = 0$$

$$\dot{U}_U = \frac{Z_L}{Z_L + Z'_L} \dot{U}_{UV} = \frac{73.3 \angle 25.84^\circ \times 380 \angle 30^\circ}{198 + j96.9} = \frac{27854 \angle 55.84^\circ}{220.4 \angle 26^\circ} = 126.4 \angle 29.8^\circ \text{ V}$$

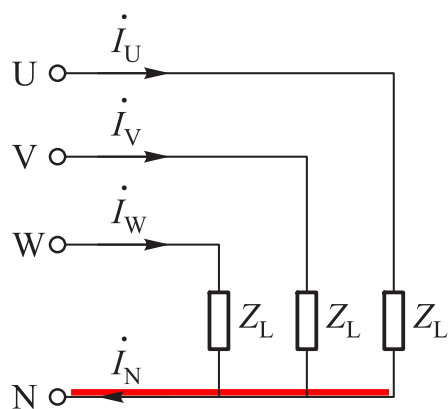
$$\dot{U}_V = \frac{Z'_L}{Z_L + Z'_L} \dot{U}_{UV} = \frac{146.7 \angle 25.84^\circ \times 380 \angle 30^\circ}{198 + j96.9} = \frac{55746 \angle 55.84^\circ}{220.4 \angle 26^\circ} = 252.9 \angle 29.8^\circ \text{ V}$$

可见，V相负载两端电压超过额定电压**220V**，则V相负载烧毁，U相负载两端电压低于额定电压**220V**，U相负载不能正常工作。

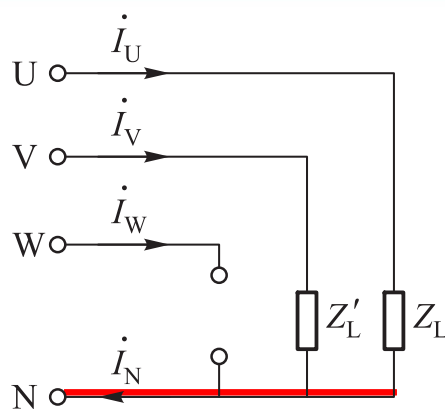


$$Z_L = \frac{\dot{U}_U}{\dot{I}_U} = \frac{220 \angle 0^\circ}{3 \angle -25.84^\circ} = 73.3 \angle 25.84^\circ = (66 + j32.3) \Omega$$

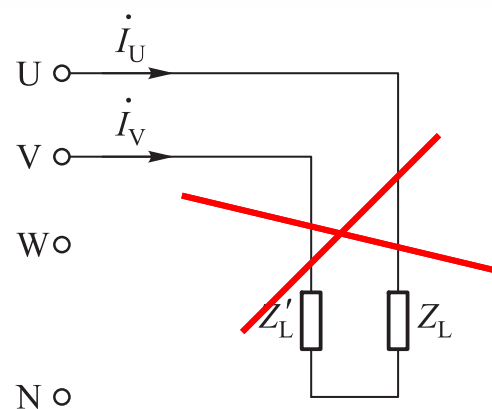
$$Z'_L = \frac{\dot{U}_V}{\dot{I}_V} = \frac{220 \angle -120^\circ}{1.5 \angle -145.84^\circ} = 146.7 \angle 25.84^\circ = (132 + j64.6) \Omega$$



(a)



(b)



(c)

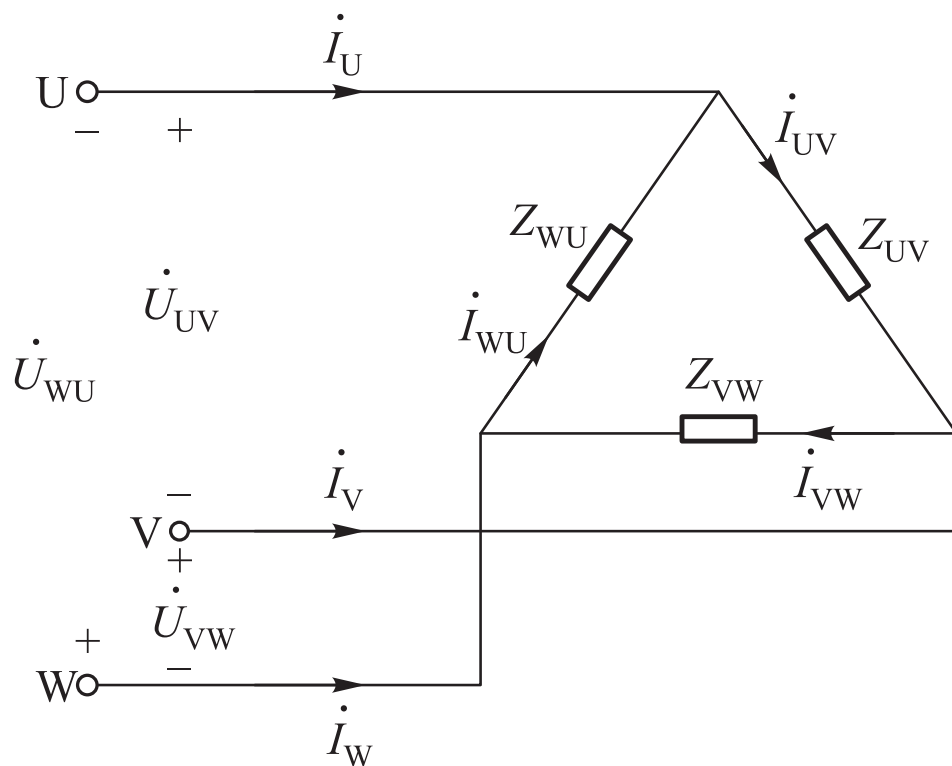
结论：单相负载作星形连接必须有中性线，即必须接到三相四线制电源上。中性线的作用是保证不对称负载的相电压对称。所以，为了保证负载的正常工作，中性线不允许断开，中性线不允许接开关和熔断器。

4.2.2 三相三线制电路的分析

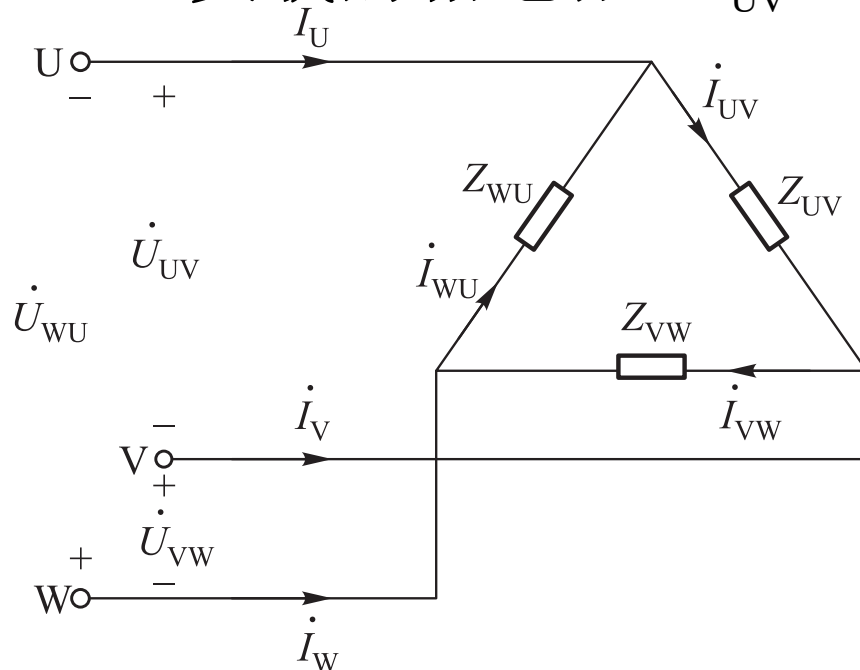
1. 负载为三角形联接

(1) 负载的相电压：等于电源的线电压，即

$$\dot{U}_{UV}、\dot{U}_{VW}、\dot{U}_{WU}$$



(2) 负载的相电流: \dot{I}_{UV} 、 \dot{I}_{VW} 、 \dot{I}_{WU}



$$\dot{I}_{UV} = \frac{\dot{U}_{UV}}{Z_{UV}}, \dot{I}_{VW} = \frac{\dot{U}_{VW}}{Z_{VW}},$$

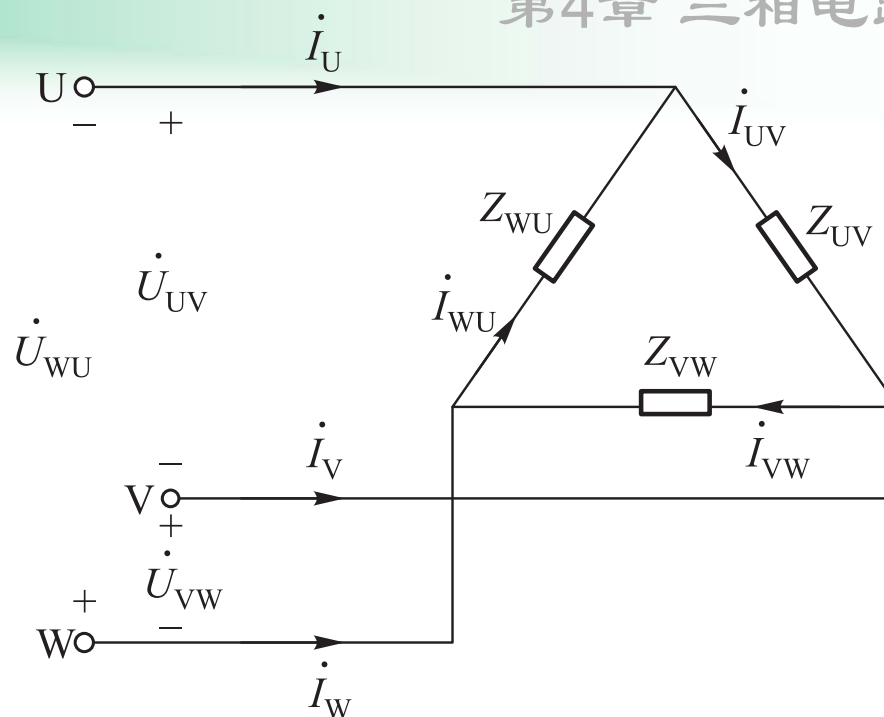
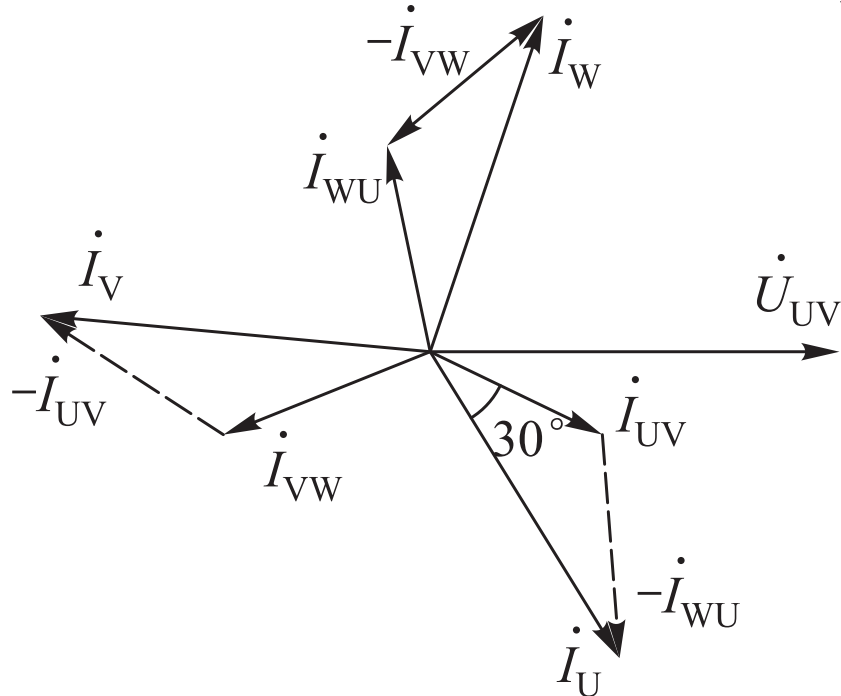
$$\dot{I}_{WU} = \frac{\dot{U}_{WU}}{Z_{WU}}$$

(3) 线电流: 负载为三角形接法时, 线电流和相电流不相等, 即

$$\begin{cases} \dot{I}_U = \dot{I}_{UV} - \dot{I}_{WU} \\ \dot{I}_V = \dot{I}_{VW} - \dot{I}_{UV} \\ \dot{I}_W = \dot{I}_{WU} - \dot{I}_{VW} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_U = \dot{I}_{UV} - \dot{I}_{WU} \\ \dot{I}_V = \dot{I}_{VW} - \dot{I}_{UV} \\ \dot{I}_W = \dot{I}_{WU} - \dot{I}_{VW} \end{cases}$$

当 $Z_{UV} = Z_{VW} = Z_{WU}$ 时,



$$I_l = \sqrt{3} I_p$$

$$\begin{cases} \dot{I}_U = \sqrt{3} \dot{I}_{UV} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_V = \sqrt{3} \dot{I}_{VW} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_W = \sqrt{3} \dot{I}_{WU} \angle -30^\circ \end{cases}$$

【例 4.2.3】 在图示的三相三线制电路中，已知每相负载的阻抗为 $(30 + j40)\Omega$ ，电源线电压为 **220V**

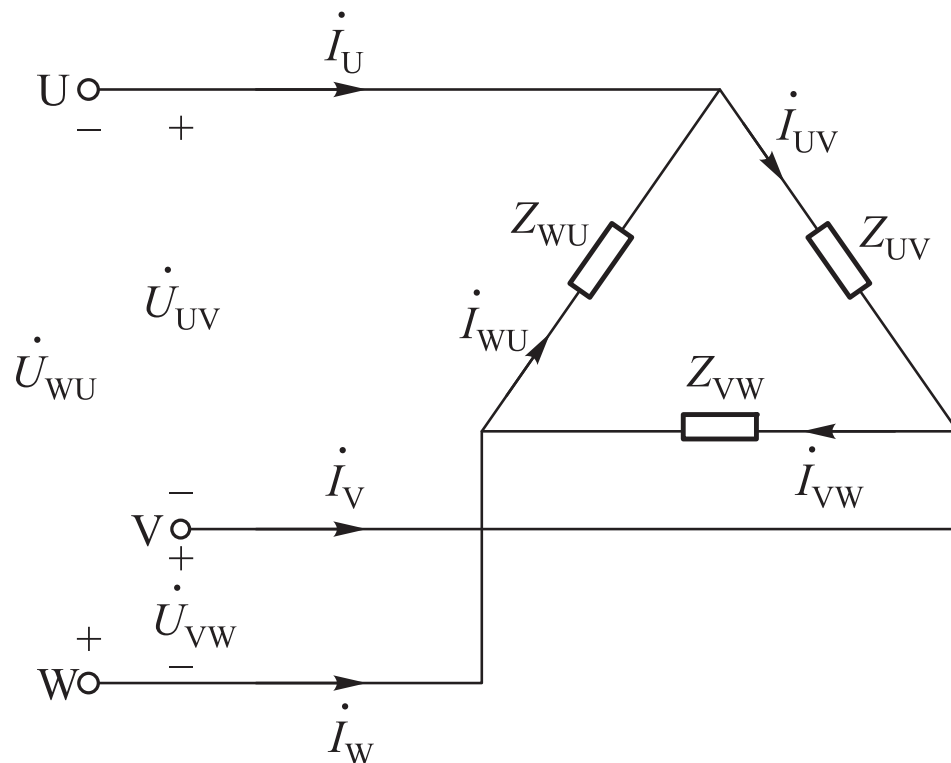
求：（1）负载的相电流 \dot{I}_{UV} 、 \dot{I}_{VW} 、 \dot{I}_{WU} ；

（2）线电流 \dot{I}_U 、 \dot{I}_V 、 \dot{I}_W ；

（3）若负载 Z_{WU} 相断开，再求上两项内容。

【解】

（1）由于负载对称，只算出一相电流即可。



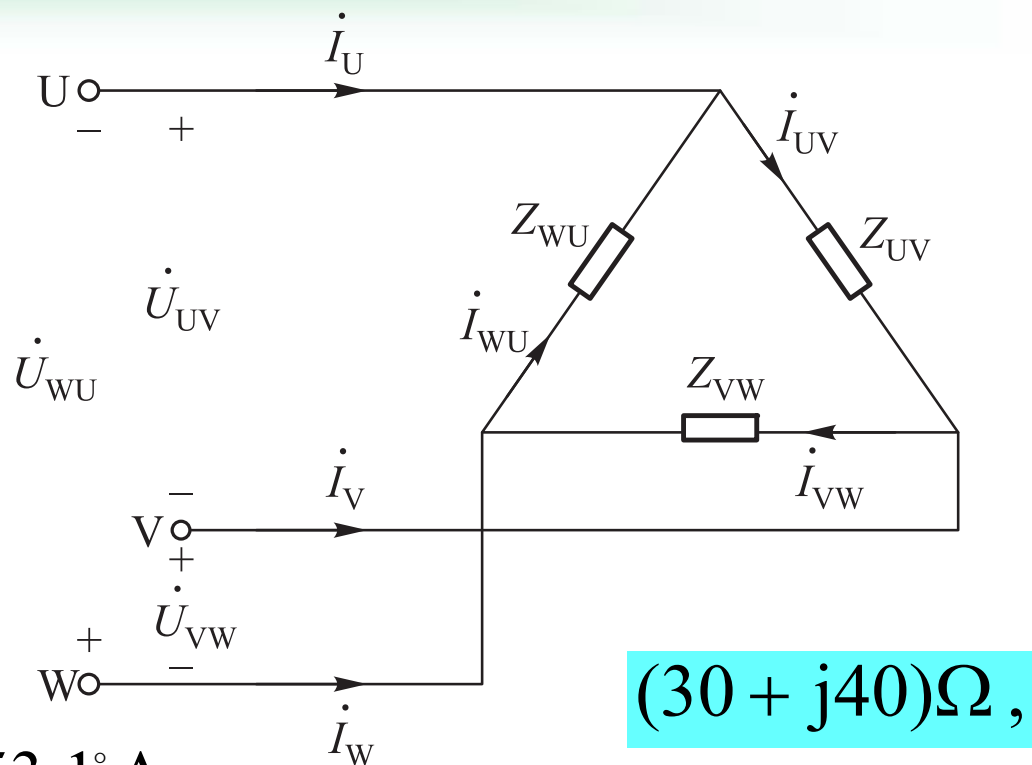
【解】

(1) 由于负载对称，只算出一相电流即可。

$$\begin{aligned}\dot{I}_{UV} &= \frac{\dot{U}_{UV}}{Z_{UV}} = \frac{220\angle 0^\circ}{30 + j40} \\ &= \frac{220\angle 0^\circ}{50\angle 53.1^\circ} = 4.4\angle -53.1^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{VW} = 4.4\angle -53.1^\circ - 120^\circ = 4.4\angle -173.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{WU} = 4.4\angle -53.1^\circ + 120^\circ = 4.4\angle 66.9^\circ \text{ A}$$

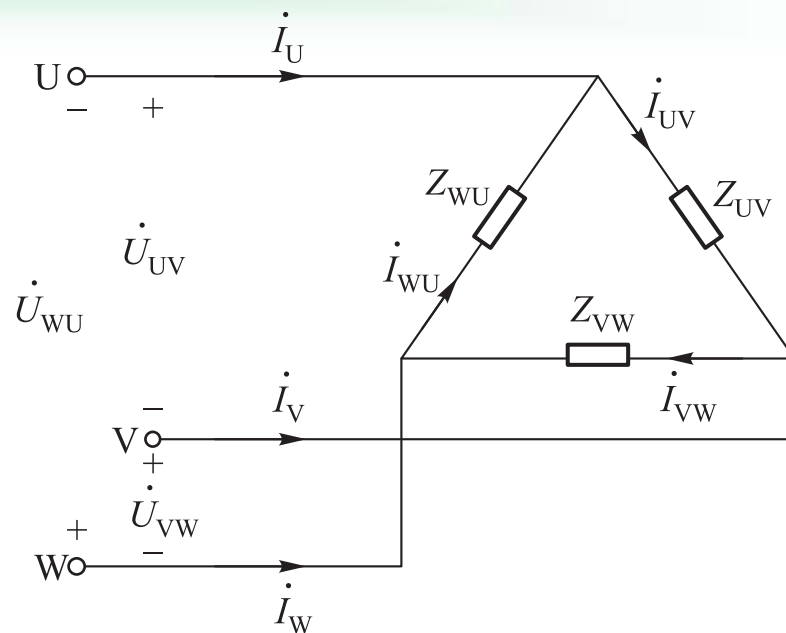


$$\dot{I}_{UV} = 4.4 \angle -53.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{VW} = 4.4 \angle -173.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{WU} = 4.4 \angle +66.9^\circ \text{ A}$$

(2) 线电流



$$\dot{I}_U = \sqrt{3} \dot{I}_{UV} \angle -30^\circ = 4.4 \sqrt{3} \angle -30^\circ - 53.1^\circ = 7.6 \angle -83.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_V = 7.6 \angle -83.1^\circ - 120^\circ = 7.6 \angle -203.1^\circ = 7.6 \angle 156.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_W = 7.6 \angle -83.1^\circ + 120^\circ = 7.6 \angle 36.9^\circ \text{ A}$$

(3) 若负载 Z_{WU} 相断开，再求上两项内容。

相电流和线电流

$$\dot{I}_{UV} = 4.4 \angle -53.1^\circ \text{ A} \quad \text{不变}$$

$$\dot{I}_{VW} = 4.4 \angle -173.1^\circ \text{ A} \quad \text{不变}$$

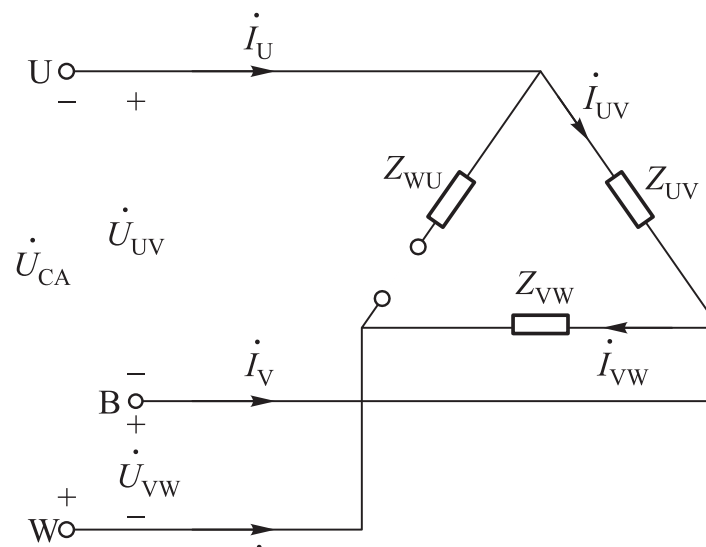
$$\dot{I}_{WU} = 0$$

$$\dot{I}_U = \dot{I}_{UV} = 4.4 \angle -53.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_W = -\dot{I}_{VW} = -4.4 \angle -173.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_V = 7.6 \angle 156.9^\circ \text{ A} \quad \text{不变}$$

可见，其他两相正常工作。



$$\dot{I}_{UV} = 4.4 \angle -53.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{VW} = 4.4 \angle -173.1^\circ \text{ A}$$

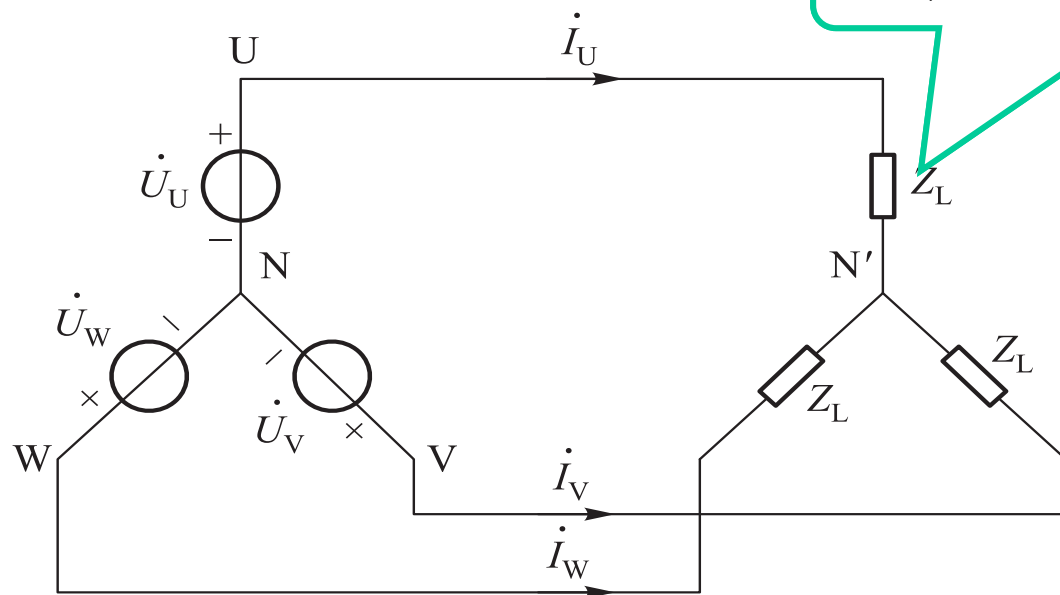
$$\dot{I}_{WU} = 4.4 \angle +66.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_U = 7.6 \angle -83.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_V = 7.6 \angle 156.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_W = 7.6 \angle 36.9^\circ \text{ A}$$

2. 负载为星形联接



由于三相负载对称（三相异步电动机），负载的相电压、相电流对称。计算时化成单相电路，求一相电流，其他两相的相电流由对应关系求出。

至于单相负载星接时，由于很难保证三相负载对称，所有只能用三相四线制电源供电。