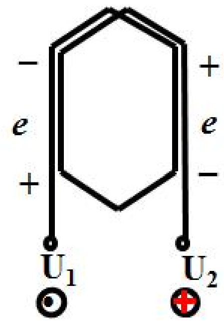
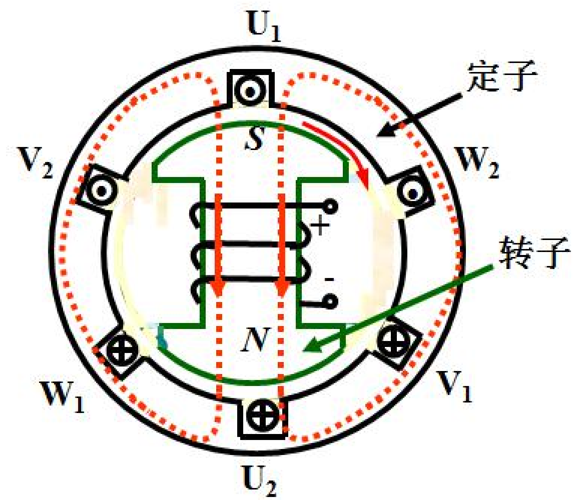
第五章 三相电路

5.1 三相电压

1. 三相电压的产生

工作原理：动磁生电





发电机结构

- 定子
  - 铁心
  - 三相绕组
    - 尺寸、匝数相同
    - 空间排列互差120°
- 转子：直流励磁的电磁铁

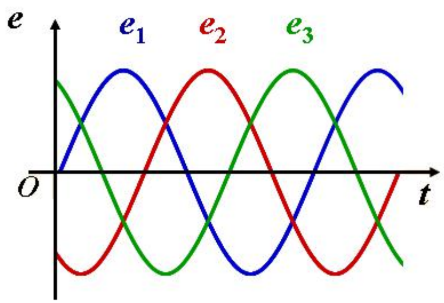
三相交流电到达正最大值的顺序称为相序。

供电系统三相交流电的相序为 U→V→W。

三相电动势瞬时表示式 $e_1 = E_m \sin \omega t$

$$e_2 = E_m \sin(\omega t - 120°)$$

$$e_3 = E_m \sin(\omega t + 120°)$$



相量式

$$\dot{E}_1 = E\angle 0° = E$$

$$\dot{E}_2 = E\angle -120° = E(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})$$

$$\dot{E}_3 = E\angle +120° = E(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})$$

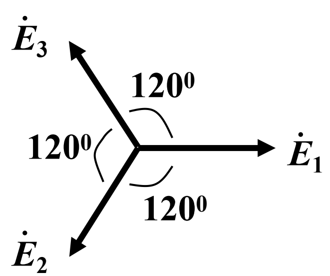
三个正弦交流电动势满足以下特征

最大值相等
频率相同
相位互差120°

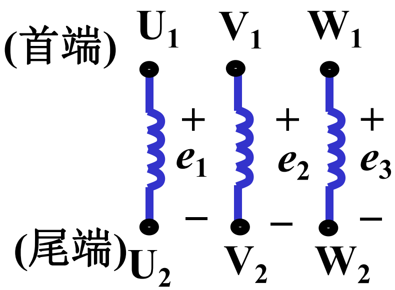
} 称为对称三相电动势

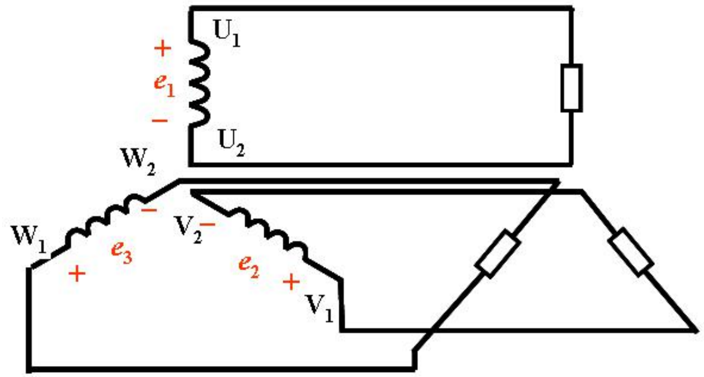
对称三相电动势的瞬时值之和为 0

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0 \qquad \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3 = 0$$



相量图



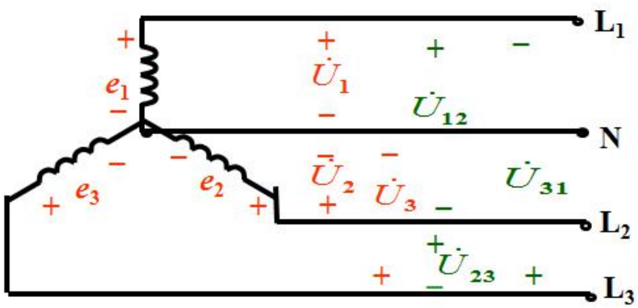


发电机三相绕组的连接

可以接成三个单相电路，但不经济。

2. 三相电源的星形联结

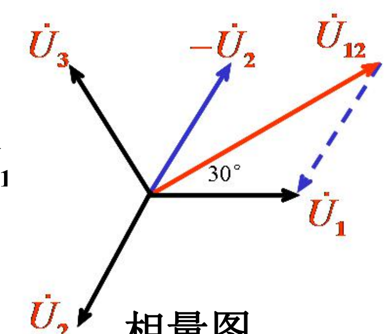
(1) 联接方式



端线(相线、火线)　　中性线(零线、地线)

相电压：端线与中线间的电压　$\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$、$\dot{U}_3$ ，U_p

线电压：端线与端线间的电压　$\dot{U}_{12}$、$\dot{U}_{23}$、$\dot{U}_{31}$ ，U_l



相量图

(2) 线电压与相电压的关系

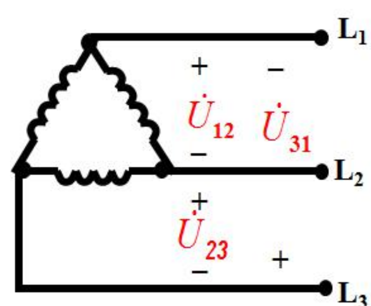
$\dot{U}_{12}=\dot{U}_1-\dot{U}_2$　$\dot{U}_{23}=\dot{U}_2-\dot{U}_3$　$\dot{U}_{31}=\dot{U}_3-\dot{U}_1$

由相量图可得　$\dot{U}_{12}=\sqrt{3}\dot{U}_1\angle 30^\circ$　$\dot{U}_{23}=\sqrt{3}\dot{U}_2\angle 30^\circ$　$\dot{U}_{31}=\sqrt{3}\dot{U}_3\angle 30^\circ$

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°。

3. 三相电源的三角形联结



结论：电源Δ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

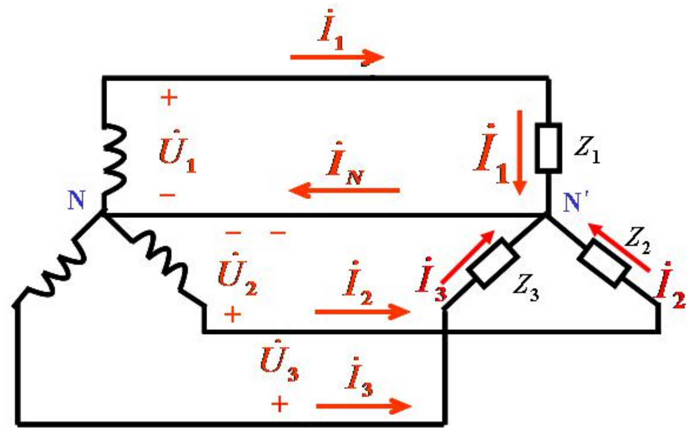
1. 三相负载

负载 $\begin{cases} \text{三相负载：需三相电源同时供电 (三相电动机等)} \\ \text{单相负载：只需一相电源供电 (照明负载、家用电器等)} \end{cases}$

三相负载 $\begin{cases} \text{对称三相负载：}Z_1 = Z_2 = Z_3 \text{（如三相电动机）} \\ \text{不对称三相负载： 不满足 } Z_1 = Z_2 = Z_3 \text{（如由单相负载组成的三相负载）} \end{cases}$

三相负载的联接也有 Y和 Δ 两种接法。

2. 负载星形联结的三相电路



(1) 联结形式

相电流：流过每相负载的电流 $\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$、$\dot{I}_3$

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

中线电流：流过中性线的电流 $\dot{I}_N$

结论：负载 Y联结时，线电流等于相电流

(2) 负载Y联结三相电路的计算

1) 负载端的线电压＝电源线电压 $\boxed{U_l = \sqrt{3} U_p}$

2) 负载的相电压＝电源相电压

3) 线电流＝相电流 $\boxed{I_l = I_p}$

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

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1} \qquad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2} \qquad \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_3}{Z_3}$$

结论：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

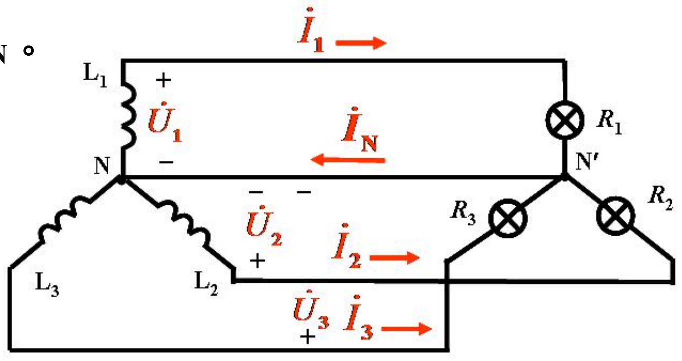
负载对称时，三相电流也对称，只需计算一相电流，其它两相电流可根据对称性直接写出。

结论：负载对称时,中性线无电流,可省掉中性线。 $\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$

例1：一星形联结的三相电路，电源电压对称。设电源线电压 $u_{12} = 380\sqrt{2}\sin(314\,t + 30°)V$

负载为电灯组，若R_1=R_2= R_3 = 5Ω，求线电流及中性线电流 I_N；

若R_1=5 Ω，R_2=10 Ω，R_3=20 Ω，求线电流及中性线电流 I_N 。



解：已知：$\dot{U}_{12} = 380\angle 30°\ V \qquad \dot{U}_1 = 220\angle 0°\ V$

三相对称 $\dot{I}_1 = \dfrac{\dot{U}_1}{R_1} = \dfrac{220\angle 0°}{5} A = 44\angle 0°\ A$

$$\dot{I}_2 = 44\angle -120° A \qquad \dot{I}_3 = 44\angle +120° A$$

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

三相负载不对称 $\dot{I}_1 = \dfrac{\dot{U}_1}{R_1} = \dfrac{220\angle 0°}{5} A = 44\angle 0° A \qquad \dot{I}_2 = \dfrac{\dot{U}_2}{R_2} = \dfrac{220\angle -120°}{10} A = 22\angle -120°\ A$

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

$$\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 44\angle 0° A + 22\angle -120° A + 11\angle +120° A = 29\angle -19°\ A$$

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) L_1相短路

1) 中性线未断： A相电流很大,A相熔断丝熔断,而 B相和C相相电压仍为220V, 正常工作。

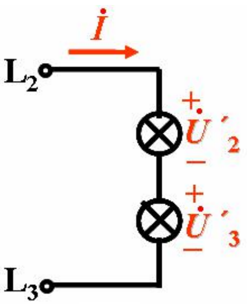
2) 中性线断开: 负载中性点N′ 即为L_1, 负载各相电压为 $U_1'=0\quad U_2'=380\,V\quad U_3'=380\,V$

L_2相和L_3相的电灯组承受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，由图可求得

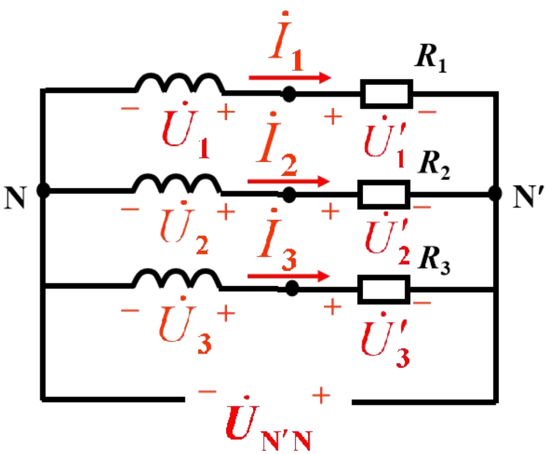


$$I=\frac{U_{23}}{R_2+R_3}=\frac{380}{10+20}=12.7\ \text{A}\qquad U_2'=IR_2=12.7\times10=127\ V\qquad U_3'=IR_3=12.7\times20=254\ \text{V}$$

例3：求例1电路的中性线断开时负载的相电压及相电流。

$$\dot{U}_{N'N}=\frac{\dfrac{\dot{U}_1}{R_1}+\dfrac{\dot{U}_2}{R_2}+\dfrac{\dot{U}_3}{R_3}}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}}=\frac{\dfrac{220\angle0^\circ}{5}+\dfrac{220\angle-120^\circ}{10}+\dfrac{220\angle120^\circ}{20}}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}}$$

$$=(78.6-j\,27.2)=85.3\angle-19^\circ(A)$$

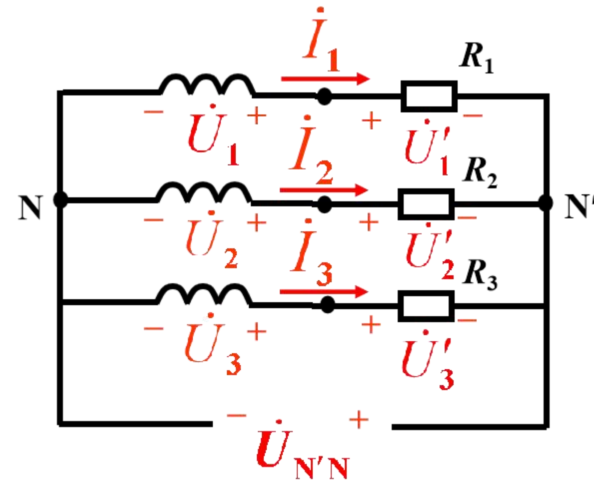


负载电压

$$\dot{U}_1' = \dot{U}_1 - \dot{U}_{N'N} = 144\angle 11^\circ\, V$$

$$\dot{U}_2' = \dot{U}_2 - \dot{U}_{N'N} = 249.4\angle -139^\circ\, V$$

$$\dot{U}_3' = \dot{U}_3 - \dot{U}_{N'N} = 288\angle 131^\circ\, V$$



$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1'}{R_1} = \frac{144\angle 11^\circ}{5} = 28.8\angle 11^\circ (A)$$

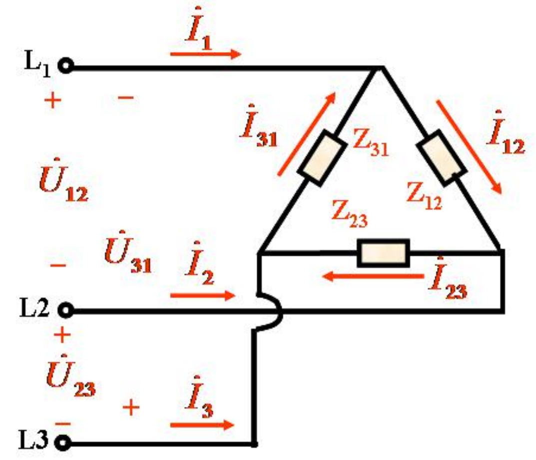
$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2'}{R_2} = \frac{249.4\angle -139^\circ}{10} = 24.94\angle -139^\circ (A)$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_3'}{R_3} = \frac{288\angle 131^\circ}{20} = 14.4\angle 131^\circ (A)$$

结论： **1.** 不对称三相负载做星形联结且无中性线时, 三相负载的相电压不对称。

2. 负载三相不对称，必须采用三相四线制供电方式，且中性线上不允许接刀闸和熔断器。

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 $\boxed{\text{即：} U_P = U_L}$

一般电源线电压对称，因此负载相电压对称, 即 $U_{12}=U_{23}=U_{31}=U_l=U_P$

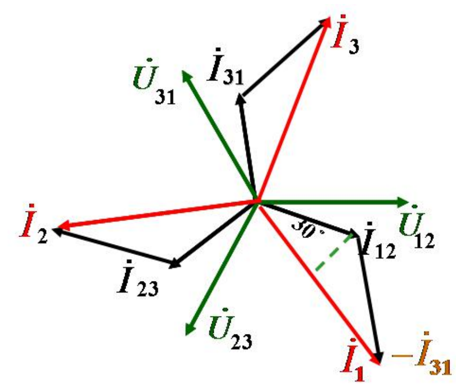
(2) 相电流 $\dot{I}_{12}=\dfrac{\dot{U}_{12}}{Z_{12}}$ $\dot{I}_{23}=\dfrac{\dot{U}_{23}}{Z_{23}}$ $\dot{I}_{31}=\dfrac{\dot{U}_{31}}{Z_{31}}$

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

线电流也对称，即 $I_1=I_2=I_3=I_l$

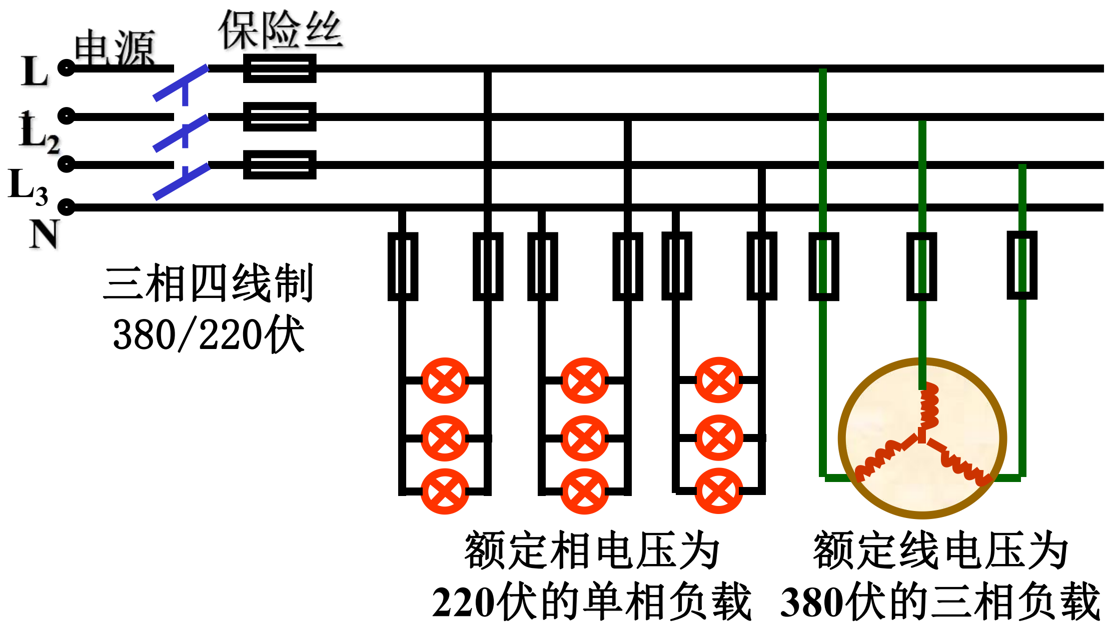
$I_1 = 2I_P\cos 30° = \sqrt{3}I_P$ 线电流比相应的相电流滞后30°



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

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。



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）。

负载的额定电压 = 电源的线电压 应作Δ联结

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

5.4 三相功率

无论负载为 Y 或△联结，每相有功功率都应为$P_p = U_p I_p \cos\varphi_p$

总有功功率为：$P = P_1 + P_2 + P_3$

当负载对称时：$P = 3U_p I_p \cos\varphi_p$

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

所以 $P = 3U_P I_P \cos\varphi_P = \sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi_P$

同理： 无论负载为 Y 或 Δ 联结，每相无功功率都应为$Q_p = U_p I_p \sin\varphi_p$

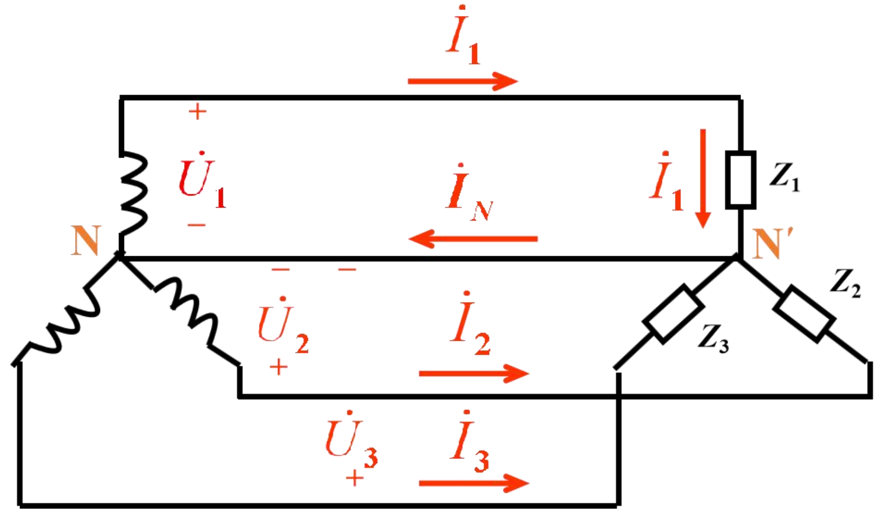
总无功功率为： $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

当负载对称时　$Q = 3U_p I_p \sin\varphi_p = \sqrt{3}U_l I_l \sin\varphi_p$

视在（表观）功率：$S \cancel{=} S_1 + S_2 + S_3$　　$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

当负载对称时：　$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_P I_P = \sqrt{3}U_l I_l$

正误判断　　对称负载 Y联结



$I_l \overset{\times}{=} \dfrac{U_l}{|Z|}$　　$I_1 \overset{\times}{=} \dfrac{U_{12}}{|Z_1|+|Z_2|}$　　$I_1 \overset{\times}{=} \dfrac{U_{12}}{|Z_1+Z_2|}$

$I_l \overset{\surd}{=} \dfrac{U_P}{|Z|}$　　$I_l \overset{\times}{=} \sqrt{3} I_P$　　$U_l \overset{\times}{=} U_P$

$U_l \overset{\surd}{=} \sqrt{3} U_P$　　$I_P \overset{\surd}{=} \dfrac{U_P}{|Z|}$

$\dot{I}_1 \overset{\times}{=} \dfrac{\dfrac{\dot{U}_{12}}{\sqrt{3}}}{Z_A}$　　$\dot{I}_1 \overset{\times}{=} \dfrac{\dfrac{\dot{U}_{12}\angle 30^\circ}{\sqrt{3}}}{Z_1}$　　$\dot{I}_1 \overset{\surd}{=} \dfrac{\dfrac{\dot{U}_{12}\angle -30^\circ}{\sqrt{3}}}{Z_1}$

已知：三相负载对称,Y联结

$\dot{U}_{12} = 380\angle 30^\circ V$

$Z = 20\angle 53^\circ \Omega$

$P \overset{\times}{=} \sqrt{3} \times 380 \times \dfrac{220}{20} \times \cos 23^\circ W$

$P \overset{\surd}{=} \sqrt{3} \times 380 \times \dfrac{220}{20} \times \cos 53^\circ W$

$P \overset{\surd}{=} 3 \times 220 \times \dfrac{220}{20} \times \cos 53^\circ W$

例1: 三相对称负载星形联接，接至线电压380V的三相电源上。其电流为10A，功率为5700W。求负载的功率因数，各相负载的等效阻抗，电路的无功功率和表观功率。

解: $\because P=\sqrt{3}U_l I_l\cos\varphi$ $\quad\therefore \cos\varphi=P/\sqrt{3}U_l I_l=5700/\sqrt{3}\times380\times10=0.866$

$$|Z|=\frac{U_p}{I_p}=\frac{U_l}{\sqrt{3}I_p}=\frac{380}{\sqrt{3}\times10}=22\ \Omega \qquad \varphi=\arccos 0.866=30^\circ \qquad \therefore Z=|Z|\angle\varphi=22\angle30^\circ\ \Omega$$

$$Q=\sqrt{3}U_l I_l\sin\varphi=\sqrt{3}\times380\times10\times\sin30^\circ=3291\,\text{var}$$

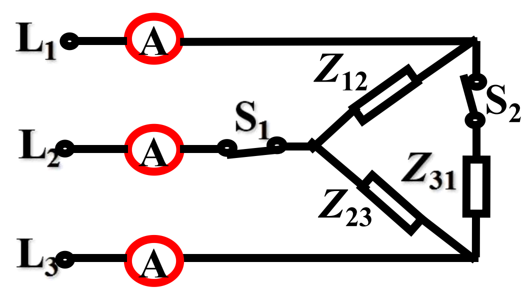
$$S=\sqrt{3}U_l I_l=\sqrt{3}\times380\times10=6528\ \text{V}\cdot\text{A}$$

例2: 三相对称负载作三角形联结，U_L=220V，当S_1、S_2均闭合时，各电流表读数均为17.3A，三相功 率$P=4.5$ 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) $|Z|=\frac{U_P}{I_P}=\frac{220}{17.32/\sqrt{3}}=22\Omega$

$$\cos\varphi=\frac{P}{\sqrt{3}U_L I_L}=0.68 \qquad R=|Z|\cos\varphi=22\times0.68=15\Omega$$

$$X_L=|Z|\sin\varphi=22\times0.733=16.1\Omega$$

或: $P=I^2R$ $\quad P=UI\cos\varphi$ $\quad tg\varphi=X_L/R$

2) 流过电流表 A、C 的电流变为相电流 I_P，流过电流表B 的电流仍为线电流I_L 。

$\therefore\ I_1 = I_3 = 10A \qquad I_2 = 17.32\ A$

因为开关S均闭合时， 每相有功功率 P =1.5 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。 $P = P_{12} + P_{23} = 3\ kW$

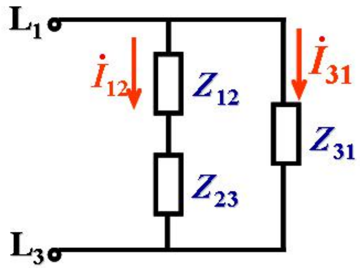
3) I_2=0

I_{31} 仍为相电流 I_P， I_{12} 变为 1/2 I_P 。

$\therefore\ I_1 = I_3 = 10 + 5 = 15A$

$\because\ I_{12}$ 变为 1/2 I_P，所以 L_{12}、 L_{23} 相的功率变为原来的1/4 。

$P = 1/4\ P_{12} + 1/4\ P_{23} + P_{31} = 0.375\ W + 0.375\ W + 1.5\ W = 2.25\ kW$



变为单相电路

思考题：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？

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。

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。