第 5 章　三相交流电路

现代电力系统的发电、输电及配电大多采用三相制，在用电方面最主要的负载是交流电动机，而交流电动机多数也是三相的，所以讨论三相电路具有实际意义。三相电路通常由 3 个单相电路组成，需要计算 3 次，但如果是对称三相电路，就可以只计算其中一相。可以认为三相电路是单相电路的延续和发展。

5.1　三相对称电源

三相电路由三相电源、三相负载和输电线组成。但是在电工电子学课程中，一般不计输电线的阻抗，认为是理想导线。

三相交流发电机如图 5-1 所示，它的主要组成部分是电枢和磁极。电枢是固定的，也称定子。定子铁芯的内圆周表面中有槽，用以放置三相电枢绕组。每相绕组完全相同，如图 5-2 所示。它们的始端标以 U_1、V_1、W_1，末端标以 U_2、V_2、W_2。将三相绕组均匀地分布在铁芯槽内，使绕组的始端与始端之间、末端与末端之间都相隔 120°。

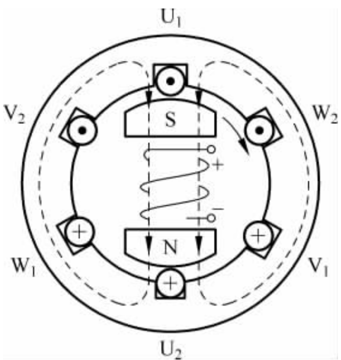

图 5-1　三相交流发电机的原理

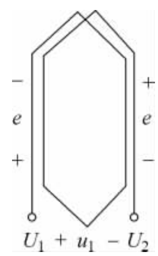

图 5-2　电枢绕组

磁极是转动的，也称转子。转子铁芯上绕有励磁绕组，用直流电产生磁场。选择合适的极面形状和励磁绕组的布置情况，可使空气隙中的磁感应强度按正弦规律分布。

当转子由原动机带动，并以顺时针方向匀速转动时，则每相绕组依次切割磁通，产生电动势；因而在 U_1U_2、V_1V_2、W_1W_2 三相绕组上得到频率相同、幅值相同、相位差也相同（相位差为 120°）的三相对称正弦电压，它们分别用 u_1、u_2、u_3 表示，并取 u_1 的初相为 0°，则

$$\begin{cases} u_1 = U_{\mathrm{m}}\sin\omega t \\ u_2 = U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t - 120°) \\ u_3 = U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t - 240°) = U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t + 120°) \end{cases} \tag{5-1}$$

由于是同频正弦量，可用相量表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = U\underline{/0°} = U \\ \dot{U}_2 = U\underline{/(-120°)} = U\left(-\dfrac{1}{2} - \mathrm{j}\dfrac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ \dot{U}_3 = U\underline{/120°} = U\left(-\dfrac{1}{2} + \mathrm{j}\dfrac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{cases} \tag{5-2}$$

显然，三相对称正弦电压的瞬时值或相量之和为零，即

$$\begin{cases} u_1 + u_2 + u_3 = 0 \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0 \end{cases} \tag{5-3}$$

如果用相量图和正弦波形来表示，如图 5-3 所示。三相对称电压过幅值(或过零值)的顺序称为相序。现在的相序是 $u_1 \to u_2 \to u_3$。如果已知三相对称电压中的任意一个，就可以写出其他两个，称为“知其一，就知其二”。发电机(或变压器)三相绕组的接法通常如图 5-4 所示，即将 3 个末端连接在一起，这一连接点称为中性点或零点，用 N 表示。这种连接方法称为星形连接。从中性点引出的导线称为中性线或零线，从始端 $\mathrm{U_1}$、$\mathrm{V_1}$、$\mathrm{W_1}$ 引出的 3 根导线 L_1、L_2、L_3 称为相线或端线，俗称火线。

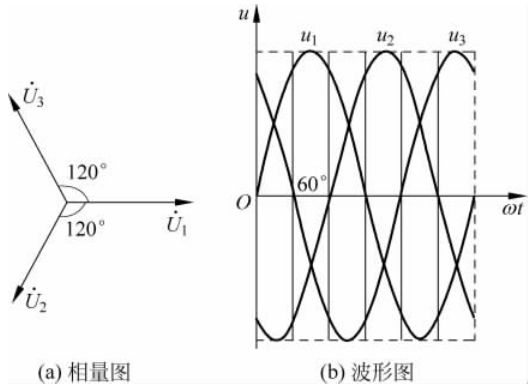

图 5-3　三相对称电压的相量图和正弦波形

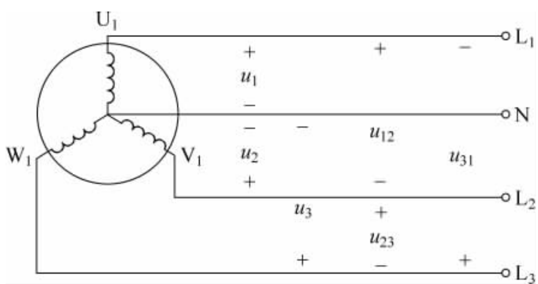

图 5-4　发电机三相绕组的星形连接

在图 5-4 中，每相始端与末端间的电压，即相线与中性线间的电压，称为相电压，其有效值为 U_1、U_2、U_3 或一般用 U_P 表示。而任意两始端间的电压，也称两相线间的电压，称为线电压，用 U_{12}、U_{23}、U_{31} 或一般用 U_L 表示。3 个相电压和 3 个线电压的参考方向如图 5-4 所示。

由图 5-4 所示的线电压与相电压的参考方向，可得

$$\begin{cases} u_{12} = u_1 - u_2 \\ u_{23} = u_2 - u_3 \\ u_{31} = u_3 - u_1 \end{cases} \tag{5-4}$$

或用相量表示为

$$\begin{cases}\dot{U}_{12}=\dot{U}_1-\dot{U}_2\\ \dot{U}_{23}=\dot{U}_2-\dot{U}_3\\ \dot{U}_{31}=\dot{U}_3-\dot{U}_1\end{cases} \tag{5-5}$$

图 5-5 是它们的相量图。由相量图可知，线电压也是频率相同、有效值相同、相位互差 120°的三相对称电压。相序为 $u_{12}\to u_{23}\to u_{31}$。

同时，可获知线电压与相电压两组对称相量的关系：①线电压是相电压的$\sqrt{3}$倍；②线电压超前对应的相电压 30°（u_{12}超前 u_1、u_{23}超前 u_2、u_{31}超前 u_3），称为“知其 1 个就知其他 5 个”。该关系也可推广到对称星形负载的线电压与相电压关系，即

$$U_L=\sqrt{3}U_P \tag{5-6}$$

在图 5-6 所示的三相电路图中，侧重于负载的情况。图 5-6(a)是三相四线制，有一根中性线，3 个相线，此时负载可直接获得线电压和相电压两种电压，它的电源是星形连接的；图 5-6(b)是三相三线制，只引出 3 根相线，负载只能直接获得线电压，至于电源如何连接并不重要。常用的低压配电系统中相电压为 220V，线电压为 380V。

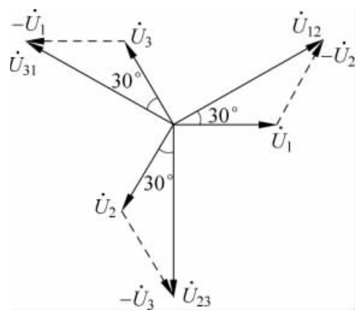

图 5-5 发电机绕组星形连接时相电压与线电压的相量图

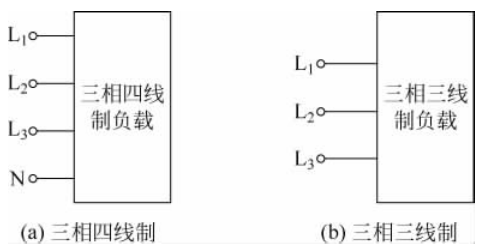

图 5-6 两种常见的三相电路

【例 5-1】 对称三相星形电源，已知 $\dot{U}_{12}=380\angle 0°\text{V}$，写出其他相电压、线电压。

【解】 $\dot{U}_{12}=380\angle 0°\text{V}$，其他两个线电压分别为

$$\dot{U}_{23}=380\angle(-120°)\text{V},\quad \dot{U}_{31}=380\angle 120°\text{V}$$

3 个相电压分别为

$$\dot{U}_1=220\angle(-30°)\text{V},\quad \dot{U}_2=220\angle(-150°)\text{V},\quad \dot{U}_3=220\angle 90°\text{V}$$

知道任意 1 个就能写出其他 5 个相、线电压。

【练习与思考】

5-1 将发电机的三相绕组连成星形时，如果误将 U_2、V_2、W_1 连成一点（中点），用相量图分析是否可获三相对称电压？

5-2 当发电机的三相绕组连成星形时，如果 $u_{12}=380\sqrt{2}\sin(\omega t+30°)\text{V}$，试写出其余线电压和 3 个相电压的相量。

5.2 负载星形连接的三相电路

图5-7是一个由电灯与电动机组成的星形连接的三相电路。在民用电中，线电压为380V、相电压为220V。电灯接在相线与中线之间，其负载电压是220V，三相异步电动机接在相线与相线之间，其绕组电压是380V。负载接在三相电源上，首先要满足电压要求。

负载星形连接的三相四线制电路一般可用图5-8所示电路表示。每相负载的阻抗分别为 Z_1、Z_2 和 Z_3。电流的参考方向已在图中标出。

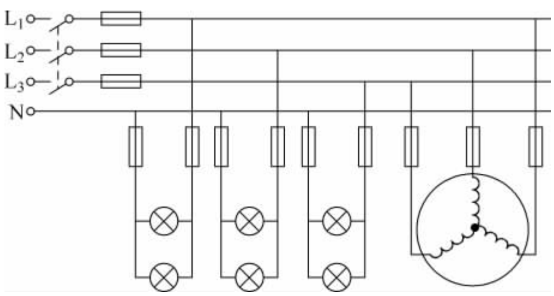

图5-7 电灯与电动机的星形连接

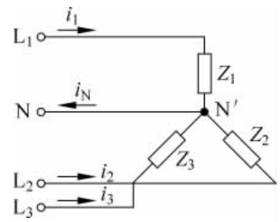

图5-8 负载星形连接的三相四线制电路

三相电路中的电流也有相电流和线电流之分。每相负载上的电流 I_P 称为相电流，每根相线上的电流 I_L 称为线电流。当负载星形连接时，根据KCL，相电流即为线电流，即

$$I_P = I_L \tag{5-7}$$

不计相线和中性线阻抗，根据KVL，电源相电压即为负载相电压。电源相电压和负载阻抗已知，就是3个单相电路，分别计算各相的负载电流。设电源相电压 $\dot{U}_1$ 为参考正弦量，则得

$$\dot{U}_1 = U\angle 0°, \quad \dot{U}_2 = U\angle(-120°), \quad \dot{U}_3 = U\angle 120°$$

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dfrac{\dot{U}_1}{Z_1} = \dfrac{U\angle 0°}{|Z_1|\angle\varphi_1} = I_1\angle(-\varphi_1) \\ \dot{I}_2 = \dfrac{\dot{U}_2}{Z_2} = \dfrac{U\angle(-120°)}{|Z_2|\angle\varphi_2} = I_2\angle(-120° - \varphi_2) \\ \dot{I}_3 = \dfrac{\dot{U}_3}{Z_3} = \dfrac{U\angle 120°}{|Z_3|\angle\varphi_3} = I_3\angle(120° - \varphi_3) \end{cases} \tag{5-8}$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \tag{5-9}$$

如果负载也对称，各相阻抗也相等，有 $Z_1 = Z_2 = Z_3$，阻抗的模和相位角都相等，即

$$|Z_1| = |Z_2| = |Z_3| \quad 且 \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

由式(5-9)，因为相电压对称，所以负载相电流也是对称的，由对称电流的特征，中性线的电流等于零，即

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

其电压和电流的相量图如图5-9所示。作相量图时，先以$\dot{U}_1$为参考相量作出$\dot{I}_1$，而后由对称性，分别作出$\dot{U}_2$和$\dot{U}_3$以及$\dot{I}_2$和$\dot{I}_3$。

既然中性线上没有电流通过，就可以将中性线断开。因此图5-8所示三相四线制电路变成图5-10所示的电路，这就是三相三线制电路。也就是说，当负载对称时三相三线制电路与三相四线制电路完全相同，可以用三相四线制来求解且可以只求一相，另外两相电流根据对称性直接写出。通常生产上的三相负载是对称负载，所以三相三线制电路在生产上应用极为广泛。而三相四线制电路应用于有单相负载的电路中，如民用电路。

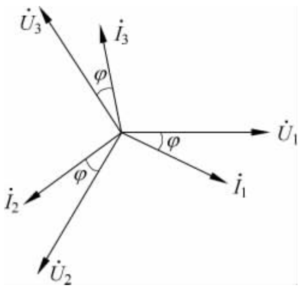

图5-9　对称负载(感性)星形连接时相电压和相电流的相量图

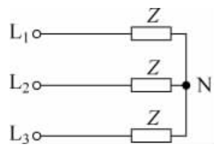

图5-10　对称负载星形连接的三相三线制电路

【例5-2】　有一星形连接的三相对称负载，负载阻抗$Z=(6+j8)\Omega$。设三相电源提供对称电压，且$u_{12}=380\sqrt{2}\sin(\omega t+30°)\text{V}$。试求各相电流。

【解】　因为负载对称，只算一相即可。

$$\dot{U}_{12}=380\underline{/30°}\text{V},\quad \dot{U}_1=220\underline{/0°}\text{V}$$

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_1}{Z}=22\underline{/(-53°)}\text{A}$$

所以，有

$$\dot{I}_2=22\underline{/(-173°)}\text{A}$$

$$\dot{I}_3=22\underline{/67°}\text{A}$$

【例5-3】　在图5-8中，电源电压对称，每相电压$U_P=220\text{V}$。L_1相接入40W、220V白炽灯一只，L_2相接入40W、220V白炽灯两只(并联)，L_3相接入40W、220V、$\cos\varphi=0.5$的日光灯一只。试求负载相电压、相电流及中性线电流。

【解】　L_1相接入40W、220V的白炽灯，则

$$P_1=U_1I_1,\quad I_1=\frac{P_1}{U_1}=0.18\text{A}$$

$$\dot{U}_1=220\underline{/0°}\text{V},\quad \dot{I}_1=0.18\underline{/0°}\text{A}$$

L_2相接入40W、220V的白炽灯两只，则

$$P_2=U_2I_2,\quad I_2=\frac{P_2}{U_2}=0.36\text{A}$$

$$\dot{U}_2=220\underline{/(-120°)}\text{V},\quad \dot{I}_2=0.36\underline{/(-120°)}\text{A}$$

L_3 相接入 40W、220V、$\cos\varphi=0.5$ 的日光灯一只，为感性负载 $\varphi=60°$，则

$$P_3=U_3I_3\cos\varphi,\quad I_3=\frac{P_3}{U_3\cos\varphi}=0.36\text{A}$$

$$\dot{U}_3=220\underline{/120°}\text{V}$$

$$\dot{I}_3=0.36\underline{/(120°-60°)}=0.36\underline{/60°}\text{A}$$

$$\dot{I}_N=\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}_3=0.18+0.36\underline{/(-120°)}+0.36\underline{/60°}=0.18\text{A}$$

如果已知负载的 P、U、$\cos\varphi$，则负载的阻抗 $Z=\dfrac{U^2\cos\varphi}{P}\underline{/\varphi}$。

【例 5-4】 在图 5-11 中，①L_3 相断开(开关断开)，但中性线存在；②L_3 相断开而中性线也断开时，试求各相负载上的电压、中点电压、L_3 相开关处的电压。

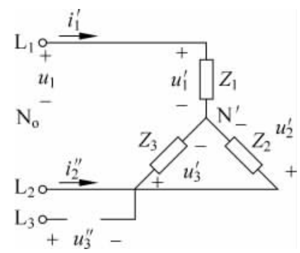

图 5-11 例 5-4 的电路图

【解】 ① L_1 和 L_2 相未受影响，相电压和相电流不变。②这时 L_1 相与 L_2 相负载的电流相同，为单相串联电路，一个灯泡电阻是 R，两个灯泡并联的电阻为 $0.5R$，接在线电压 $\dot{U}_{12}$ 上。负载相电压为

$$\dot{U}_1'=\frac{R}{R+0.5R}\dot{U}_{12}=253.3\underline{/30°}\text{V}$$

$$\dot{U}_2'=-\frac{0.5R}{R+0.5R}\dot{U}_{12}=126.7\underline{/(-150°)}\text{V}$$

中点电压 $\dot{U}_{N'N}$ 通过 KVL 得到

$$\dot{U}_{N'N}=\dot{U}_1-\dot{U}_1'=0.64-\text{j}126.7=126.7\underline{/(-89.7°)}\text{V}$$

L_3 相断开，此相负载电压 $\dot{U}_3'=0$，L_3 相开关处的电压 $\dot{U}_3''$ 由 KVL 知

$$\dot{U}_3''=\dot{U}_1'+\dot{U}_{31}=253.3\underline{/30°}+380\underline{/150°}=335.1\underline{/109.1°}\text{V}$$

在实验中，测量的 L_3 相负载的相电压实际上是 U_3''，因为开关包括在负载中。

此时 L_1 相相电压大于额定值，而 L_2 相相电压低于额定值。这也是不允许的。对于三相三线制不对称电路，只分析特殊电路，不作一般要求。

从上面所举的几个例题可以看出以下几点。

(1) 负载不对称且无中性线时，尽管电压相电压仍对称，但负载的相电压却不对称，而且各相之间相互影响。有的负载相电压高于负载额定值，有的负载相电压低于负载额定电压，这是不允许的。要保证三相负载的相电压对称，使负载相电压等于其额定电压。

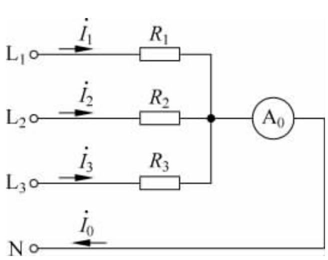

图 5-12 例 5-5 的电路图

(2) 中性线的作用就是使星形连接的不对称负载的相电压对称。要保证负载相电压对称，就不应让中性线断开。在中性线的干线内不接入熔断器或闸刀开关。

【例 5-5】 已知电源相电压加在电阻 R 上的电流为 I，在图 5-12 所示三相电路中，求电流表的读数。(1) 当 $R_1=R_2=\dfrac{R}{2}$，$R_3=R$ 时；(2) 当 $R_1=R$，$R_2=\dfrac{R}{2}$，$R_3=\dfrac{R}{3}$ 时。

【解】 电路为三相四线制电路，用电流表测中线电流。

(1)
$$\begin{aligned}\dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \\ &= 2I\underline{/0^\circ} + 2I\underline{/(-120^\circ)} + I\underline{/120^\circ} \\ &= -I\underline{/120^\circ}\end{aligned}$$

所以电流表读数为 I。

(2)
$$\begin{aligned}\dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \\ &= I\underline{/0^\circ} + 2I\underline{/(-120^\circ)} + 3I\underline{/120^\circ} \\ &= I\left(-1.5 + \mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\end{aligned}$$

所以电流表读数为$\sqrt{3}I$。

利用三相对称电流的相量和为零，是分析此类问题的关键。

【练习与思考】

5-3 在图 5-7 所示的电路中，为什么中性线不接开关，也不接入熔断器？

5-4 为什么电灯开关要接在相线上？

5-5 三相电路中的对称电压(电流)中的对称与对称负载中的对称含义相同吗？

5.3 负载三角形连接的三相电路

负载三角形连接的三相电路可用图 5-13 所示电路来表示。

不考虑线路阻抗时，负载的线电压等于电源的线电压。各相负载都直接在相线上，负载的相电压等于负载的线电压，而与负载无关，是三角形连接电路的基本特征，即

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_L = U_P \tag{5-10}$$

负载的相电流分别为

$$\begin{cases}\dot{I}_{12} = \dfrac{\dot{U}_{12}}{Z_{12}} \\ \dot{I}_{23} = \dfrac{\dot{U}_{23}}{Z_{23}} \\ \dot{I}_{31} = \dfrac{\dot{U}_{31}}{Z_{31}}\end{cases} \tag{5-11}$$

负载的相电流与线电流是不同的，由 KCL 得出

$$\begin{cases}\dot{I}_1 = \dot{I}_{12} - \dot{I}_{31} \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{23} - \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_{31} - \dot{I}_{23}\end{cases} \tag{5-12}$$

如果负载对称，即

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{31} = Z$$

则负载的相电流也对称，只需求出$\dot{I}_{12}$，可直接写出$\dot{I}_{23}$和$\dot{I}_{31}$。

此时负载对称时线电流与相电流的关系，可从式(5-12)作出的相量图(图 5-14)看出线

电流也是对称的。(1)在相位上较相电流滞后 30°($\dot{I}_1$ 滞后于 $\dot{I}_{12}$,$\dot{I}_2$ 滞后于 $\dot{I}_{23}$,$\dot{I}_3$ 滞后于 $\dot{I}_{31}$);(2)线电流也是相电流有效值的$\sqrt{3}$倍,即

$$I_L = \sqrt{3} I_P \tag{5-13}$$

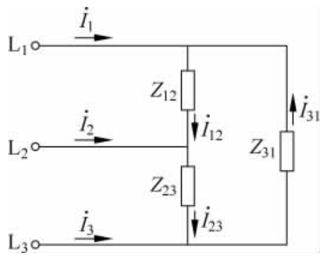

图 5-13　负载三角形连接的三相电路

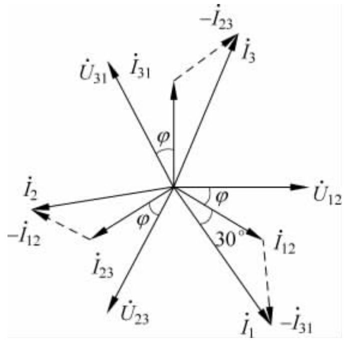

图 5-14　对称三角形负载电压与电流的相量图

【例 5-6】 有一台三相异步电机(三相对称负载),当电源线电压为 220V 时,采用三角形连接,电机额定电流为 11.18A;电源线电压为 380V 时,采用星形连接,电机额定电流为 6.47A。请解释为何电压大时电流小,而电压小时电流大。

【解】 对于三相负载而言,其额定电压或额定电流为线电压或线电流。因为线电压或线电流较相电压或相电流便于测量。但计算三相电路时,不论是星形连接还是三角形连接,都要从相上开始,因为只有相电流、相电压与阻抗间才满足欧姆定律,而线电流、线电压与阻抗间不满足欧姆定律,即$\dot{U}=Z\dot{I}$ 中的$\dot{U}$、$\dot{I}$ 只能是相电压和相电流。线电压为 220V 三角形连接时,相电压也是 220V,虽然线电流为 11.8A,但相电流为 $11.18/\sqrt{3}=6.47$A;线电压为 380V 星形连接时,其相电压也是 220V,相电流是 6.47A,线电流也是 6.47A。也就是说,相电压都是 220V,相电流都是 6.47A,完全一致。

【例 5-7】 线电压为 380V 的三相电源上接有两组对称负载:一组三角形连接的负载阻抗 $Z_\Delta=\mathrm{j}38\Omega$;另一组星形连接的负载阻抗 $R_Y=22\Omega$,如图 5-15 所示。试求:(1)各组负载的相电流;(2)电路线电流。

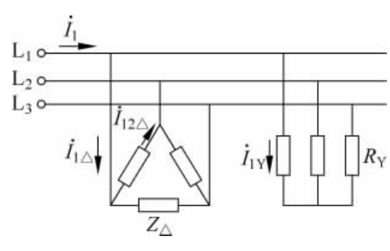

图 5-15　例 5-7 的电路

【解】 设线电压 $\dot{U}_{12}=380\angle 30°$V,则$\dot{U}_1=220\angle 0°$ V。

(1) 由于两组负载对称,计算一相即可得其他两相。

三角形负载的相电流为

$$\dot{I}_{12\Delta}=\frac{\dot{U}_{12}}{Z_\Delta}=\frac{380\angle 30°}{\mathrm{j}38}=10\angle(-60°)\mathrm{A}$$

星形负载的相电流即为线电流,即

$$\dot{I}_{1Y}=\frac{\dot{U}_1}{R_Y}=\frac{220\angle 0°}{22}=10\angle 0°\mathrm{A}$$

(2) 先求三角形负载的线电流 $\dot{I}_{1\Delta}=10\sqrt{3}\angle(-90^\circ)\mathrm{A}$，由 KCL 得

$$\dot{I}_1=\dot{I}_{1\Delta}+\dot{I}_{1Y}=10\sqrt{3}\angle(-90^\circ)+10=20\angle(-60^\circ)\mathrm{A}$$

电路的线电流也对称，得

$$\dot{I}_2=20\angle(-180^\circ)\mathrm{A}$$

$$\dot{I}_3=20\angle 60^\circ\mathrm{A}$$

【练习与思考】

5-6　负载三角形连接的三相电路一定是三相三线制吗？

5-7　请说出对称负载三角形连接和对称负载星形连接三相电路中的$\sqrt{3}$倍、30°角的关系。

5.4　三相功率

将正弦交流电路的功率应用到三相电路即可。不论负载如何连接，三相电路的有功功率等于各相的有功功率之和，三相电路的无功功率等于各相的无功功率之和，即

$$\begin{cases}P=P_1+P_2+P_3\\Q=Q_1+Q_2+Q_3\end{cases}\tag{5-14}$$

如果负载是对称的，则每相有功功率都相等。因此，三相有功功率是各相有功功率的 3 倍，即

$$P=3U_\mathrm{P}I_\mathrm{P}\cos\varphi\tag{5-15}$$

式中，φ 是某相相电压超前该相相电流的角度，即阻抗的阻抗角。

当对称负载星形连接时，有

$$U_\mathrm{L}=\sqrt{3}U_\mathrm{P},\quad I_\mathrm{L}=I_\mathrm{P}$$

当对称负载三角形连接时，有

$$U_\mathrm{L}=U_\mathrm{P},\quad I_\mathrm{L}=\sqrt{3}I_\mathrm{P}$$

将上述关系代入式(5-14)中，有

$$P=\sqrt{3}U_\mathrm{L}I_\mathrm{L}\cos\varphi\tag{5-16}$$

但是，φ 仍与式(5-15)中相同。

式(5-15)和式(5-16)都可用来计算对称负载的三相有功，但多用式(5-16)，因为线电压和线电流的数值较相电压和相电流容易测量出。

同理，可得出三相无功功率和视在功率为

$$Q=3U_\mathrm{P}I_\mathrm{P}\sin\varphi=\sqrt{3}U_\mathrm{L}I_\mathrm{L}\sin\varphi\tag{5-17}$$

$$S=3U_\mathrm{P}I_\mathrm{P}=\sqrt{3}U_\mathrm{L}I_\mathrm{L}\tag{5-18}$$

【例 5-8】　有一三相电动机，每相等效阻抗 $Z=(29+\mathrm{j}21.8)\Omega$，绕组为星形连接于线电压 $U_\mathrm{L}=380\mathrm{V}$ 的三相电源上。试求电动机的相电流、线电流，以及从电源吸收的有功功率和无功功率。

【解】 $I_P = \dfrac{U_P}{|Z|} = 6.1\text{A}$

$$I_L = I_P = 6.1\text{A}$$

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 6.1 \times \frac{29}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 3.21(\text{kW})$$

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 6.1 \times \frac{21.8}{\sqrt{29^2 + 21.8^2}} = 2.41(\text{kvar})$$

【例 5-9】 求例 5-7 中电路的三相有功功率、三相无功功率。

【解】 例 5-4 电路由两组对称三相电路组成，不能直接使用式(5-15)、式(5-16)和式(5-17)求整个三相电路的功率。可以将两组对称三相电路合并为一组对称三相电路后再使用公式，也分别计算两组负载的功率后再求和，即三相电路的有功功率等于星形连接负载消耗有功功率和三角形负载消耗有功功率之和，三相电路的无功功率等于星形连接负载消耗无功功率和三角形电路消耗无功功率之和。

$$P = P_Y = \sqrt{3} \times 380 \times 10 = 6.6(\text{kW})$$

$$Q = Q_\Delta = \sqrt{3} \times 380 \times 10\sqrt{3} = 11.4(\text{kvar})$$

【例 5-10】 在图 5-16 所示的电路中，$U_L = 380\text{V}$，设三相对称负载为星形和三角形连接，分别求负载每相阻抗 Z。

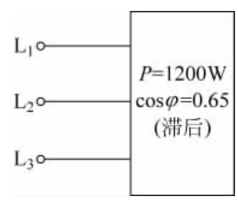

图 5-16 例 5-10 的图

【解】

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}U_L\cos\varphi} = 2.80\text{A}$$

(1) 三相星形对称负载时，则

$$I_P = I_L = 2.80\text{A}$$

$$U_P = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

$\cos\varphi$ 滞后就是电流滞后电压，负载是感性的，有

$$\cos\varphi = 0.65, \quad \varphi = 49.5^\circ$$

$$Z = |Z| \angle\varphi = \frac{U_P}{I_P}\angle\varphi = 78.6\angle 49.5^\circ\,\Omega$$

(2) 三相三角形对称负载时，则

$$U_L = U_P = 380\text{V}$$

$$I_P = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = 1.62\text{A}$$

$$Z = |Z| \angle\varphi = \frac{U_P}{I_P}\angle\varphi = 235.8\angle 49.5^\circ\,\Omega$$

【练习与思考】

5-8 不对称负载能否用 $P = \sqrt{3}U_L I_L\cos\varphi$、$Q = \sqrt{3}U_L I_L\sin\varphi$ 和 $S = \sqrt{3}U_L I_L$ 来计算三相有功功率、三相无功功率和视在功率？如果已知各相电路的有功功率分别为 P_1、P_2 和 P_3，求三相有功功率。

5-9 $P = 3U_P I_P\cos\varphi$ 中的 φ 可认为是某相电压超前对应相电流的角度，那么 $P = \sqrt{3}U_L I_L\cos\varphi$ 中可以认为是某线电压超前对应线电流的角度吗？

本章小结

在三相对称电源的基础上，分析了负载星形和三角形连接三相电路的电压、电流和各种功率。重点掌握对称星形和三角形的三相电路以及不对称的三相四线制电路的分析，了解其他不对称三相电路的分析。

习　　题

5-1　有一三相对称负载，其每相的阻抗 $Z=(4+\mathrm{j}3)\Omega$，如果将负载连成星形和三角形接于线电压 $U_L=380\mathrm{V}$ 的三相电源上，试求相电压、相电流及线电流。

5-2　三相四线制电路中，电源线电压 $U_L=380\mathrm{V}$，$Z_1=11\Omega$，$Z_2=\mathrm{j}22\Omega$，$Z_3=-\mathrm{j}22\Omega$。(1)试求负载相电压、相电流及中性线电流，并作出它们的相量图；(2)如有中性线，当 L_1 相短路时求其他两相电压和电流；(3)如无中性线，当 L_3 相断开时求另外两相的电压和电流。

5-3　图 5-17 所示的三相四线制电路中，设 $\dot{U}_1=220\angle 0°\mathrm{V}$，接有对称星形连接的白炽灯负载，其总功率为 180W。此外，在 L_3 相上接有额定电压为 220V，功率 30W，功率因数 $\cos\varphi=0.5$ 的日光灯一只。试求电流 $\dot{I}_N$、$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$、$\dot{I}_3$。

5-4　在线电压为 380V 的三相电源上，接有两组对称负载，如图 5-18 所示，试求线路电流 I 及三相有功功率。

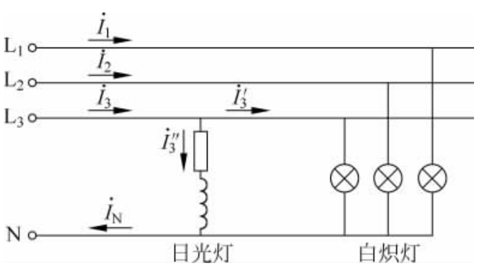

图 5-17　习题 5-3 的图

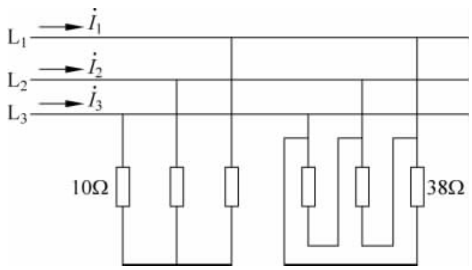

图 5-18　习题 5-4 的图

5-5　三相四线制电路中，电源线电压 $U_L=380\mathrm{V}$，现有 220V、60W 的白炽灯和 220V、功率 30W、功率因数 $\cos\varphi=0.5$ 的日光灯两种负载，按以下要求接入在电路中，分别求各相电流和中线电流，并画出电路图：(1)每相都接入白炽灯和日光灯各一只；(2)L_1 相接入白炽灯两只，L_2 相接入日光灯两只，L_3 接入白炽灯和日光灯各一只；(3)L_1 相负载开关断开，L_2 相接入日光灯一只，L_3 白炽灯和接入日光灯各一只。

5-6　在图 5-19 所示电路中，假定三相电动机是星形对称负载，$U_{1'2'}=380\mathrm{V}$，三相电动机吸收的功率为 5.28kW，其功率因数 $\cos\varphi'=0.8$，$Z_L=(0.4+\mathrm{j}2.8)\Omega$。求负载的阻抗 Z、电源线电压 U_{12} 和电源端的功率因数 $\cos\varphi$、电源输出的有功功率、无功功率。

5-7　在图 5-20 所示的三相电路中，已知 $Z=(1+\mathrm{j}6\sqrt{10})\Omega$。

(1) 当开关 S_1 和 S_2 都闭合，且 S_3 和 S_0 都断开时，电流表 A_1 读数为 10A，求电源线电压。

(2) 当 S_1、S_2 和 S_3 只有一个开关闭合，而 S_0 闭合时，求电流表 A_0 读数。

(3) S_1、S_2 和 S_3 这 3 个开关中有一个断开，其他开关都闭合时，求电流表 A_0 的读数。

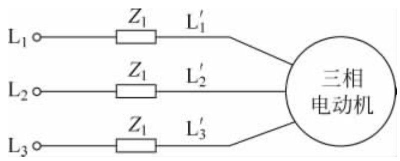

图 5-19　习题 5-6 的图

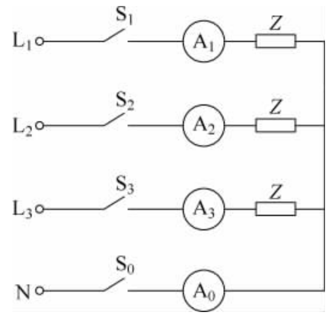

图 5-20　习题 5-7、5-9 图

5-8　图 5-21 所示的电路中，电源线电压 $U_L=220\text{V}$，线电流 $I_L=17.32\text{A}$，三相无功功率 $Q=3\text{kvar}$。求：(1)每相负载的阻抗、三相有功功率 P；(2)当 L_1L_2 相断开时，图中各线电流和三相有功功率 P；(3)当 L_1 线断开时，图中各线电流和三相有功功率 P。

5-9　在图 5-20 所示的电路中，$U_L=380\text{V}$，当开关 S_1、S_2、S_3 都闭合时，$I_L=10\text{A}$，三相无功功率 $Q=3300\sqrt{2}\,\text{var}$。求：(1)对称负载 Z；(2)S_1 断开，其他仍然闭合时的各相电流、中线电流、相电压、三相有功、三相无功；(3)S_1 和 S_0 都断开，其他仍然闭合时的各相电流、中线电流、相电压、三相有功、三相无功。

5-10　三角形电路如图 5-22 所示，$\dot{U}_{12}=220\angle 0^\circ\text{V}$，$R=X_L=X_C=22\Omega$，求相电流、线电流、三相有功、三相无功。

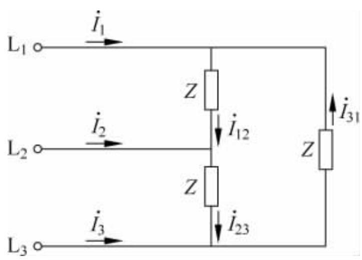

图 5-21　习题 5-8 的图

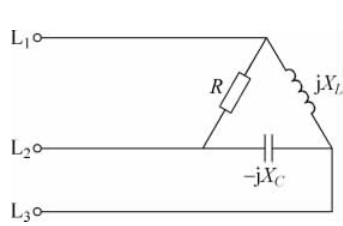

图 5-22　习题 5-10 的图

5-11　三相对称电路三角形中，$\dot{U}_{12}=380\angle 0^\circ\text{V}$，$\dot{I}_3=5\sqrt{3}\angle 60^\circ\text{A}$。求：(1) 电路的 P 和 Q；(2) 负载阻抗 Z。

5-12　在图 5-23 所示电路中，S 闭合时三相电路的有功功率是 P，无功功率是 Q。当 S 断开时，求电路的有功功率和无功功率。

5-13 在图 5-24 所示电路中，$U_L=380V$，当 $Z_1=Z$ 时，L_1 相消耗有功功率是 P，求 $Z_1=2Z$ 时 L_1 相消耗有功功率。

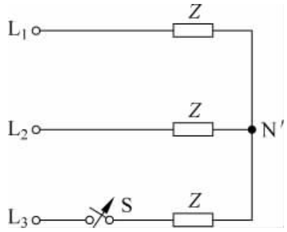

图 5-23 习题 5-12 的图

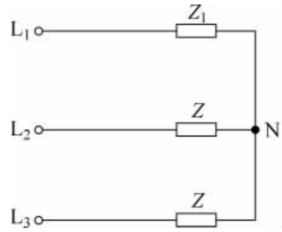

图 5-24 习题 5-13 的图