

第 3 章 三相交流电路

第 2 章讲的正弦交流电路可以认为是三相交流电路中的一相，因而也叫做单相交流电路。所谓三相制，就是由三个彼此独立而又具有特殊关系的电动势（电压）组成的供电系统。三相电力系统由三相电源、三相负载和三相输电线路三部分组成。三相制供电比单相制供电优越。例如，三相交流发电机比同样尺寸的单相交流发电机的输出功率大；在同样条件下输送同样大的功率，三相输电线路比单相输电线路节省材料等。

本节主要介绍三相交流电路中电压和电流之间的关系，以及三相交流电路的功率。

3.1 三相交流电源

3.1.1 三相电动势的产生

图 3.1 (a) 所示是三相交流发电机的原理图，它主要由电枢和磁极两部分组成。电枢被固定在机壳上，称为定子。定子铁心的内表面冲有槽，用来放置三相电枢绕组。这三相电枢绕组都是一样的，如图 3.1 (b) 所示。各相绕组的始端和末端分别标以 A、X，B、Y 和 C、Z。每个绕组的两边放置在相应的定子铁心的槽内，并保持始端之间和末端之间都彼此相隔 120° 。

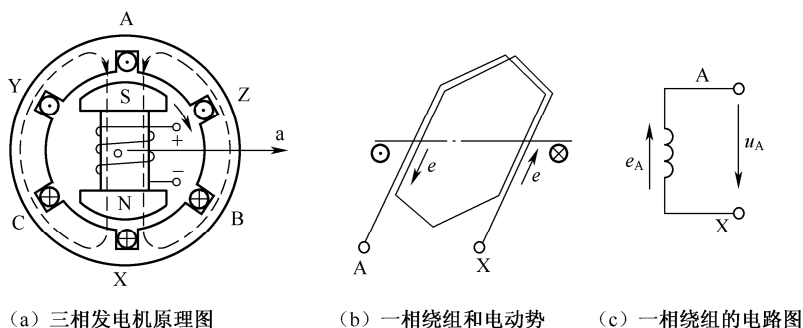


图 3.1 对称三相电动势的产生

磁极是转动的,称为转子。转子铁心上绕有励磁绕组,用直流励磁。选择合适的极面形状和励磁绕组的布置情况,可使空气隙的磁感应强度按正弦规律分布。

当原动机带动转子向某一方向匀速转动时,每相绕组依次切割磁力线,并产生频率相同、最大值相等、相位互差 120° 的正弦电动势 e_A 、 e_B 和 e_C 。电动势的参考方向选为从绕组的末端指向始端,如图3.1(c)所示,则有

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3.1)$$

这三个最大值、频率相同,相位角互差 120° 的正弦电动势称为对称三相电动势。如果电压的参考方向由绕组的始端指向末端,并且忽略发电机绕组的阻抗可能产生的电压降,则有

$$u_A = e_A \quad u_B = e_B \quad u_C = e_C$$

因此发电机三个绕组的端电压是三相对称电压,即最大值相等、频率相同、相位上彼此相差 120° 。若设 u_A 为参考正弦量,且设每相电压的有效值为 U_P ,则三相对称电压可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_A &= \sqrt{2}U_P \sin \omega t \\ u_B &= \sqrt{2}U_P \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C &= \sqrt{2}U_P \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

若用相量表示则为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= U_P \angle 0^\circ \\ \dot{U}_B &= U_P \angle -120^\circ \\ \dot{U}_C &= U_P \angle 120^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

图3.2(a)和(b)分别给出了三相对称电压的波形图和相量图。显然,三相对称电动势或三相对称电压的瞬时值或相量之和为0,即

$$e_A + e_B + e_C = 0, \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0 \quad (3.4)$$

$$u_A + u_B + u_C = 0, \quad \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad (3.5)$$

三相交流电出现正最大值(或负最大值)的先后顺序称为三相电源的相序。上述三相电压的相序是A—B—C,称为正相序。此外还有反相序,即A—C—B。

3.1.2 三相电源的星形连接

如果把三个对称交流电源中的每个电压源分别与负载相连,可以构成三个互

不相关的单相供电系统。这样就要有六条输电线。为经济起见，通常把三个电压源接成星形，如图 3.3 所示。交流电压源的负极性端（X、Y、Z 端）连接在一起，构成一个节点，称为三相电源的中性点或零点，用 N 表示。由中性点引出的导线称为中线或零线；由电压源的正极性端（A、B、C 端）引出的导线称为相线或端线，也叫火线。三相交流电源供电时共引出四条导线，称为三相四线制，其三条火线与中线间的电压称为相电压，用 u_A 、 u_B 、 u_C 表示，其有效值一般用 U_p 表示；任意两条火线间的电压称为线电压，用 u_{AB} 、 u_{BC} 和 u_{CA} 表示，其有效值一般用 U_L 表示。

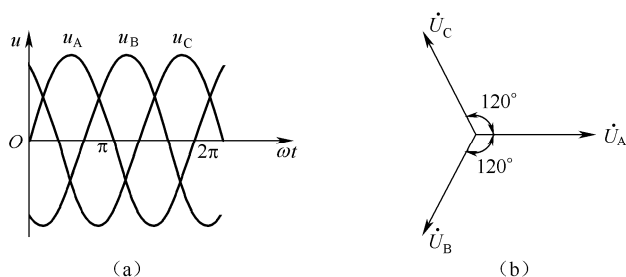


图 3.2 三相对称电压的波形图和相量图

应用基尔霍夫电压定律则可得到相电压与线电压的关系式，如下：

$$u_{AB} = u_A - u_B$$

$$u_{BC} = u_B - u_C$$

$$u_{CA} = u_C - u_A$$

由于这些电压都是同频率的正弦量，也可以用相量来表示。相电压与线电压的关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

由此关系，根据图 3.4 所示的相量图，不难求出相电压与线电压的大小和相位关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \sqrt{3}\dot{U}_A \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{BC} &= \sqrt{3}\dot{U}_B \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{CA} &= \sqrt{3}\dot{U}_C \angle 30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

可见，线电压大小是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，每个线电压比对应的相电压相位超前 30° 。

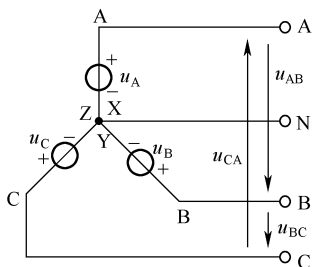


图 3.3 三相交流电源的星形连接

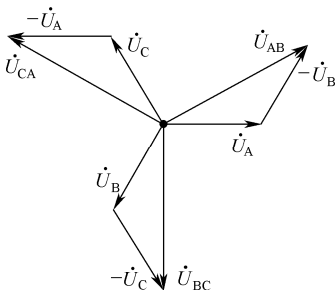


图 3.4 相电压与线电压的相量关系

三相四线制电源为负载提供两种电压。在低压配电系统中，线电压通常为 380V，相电压通常为 220V，电源频率为 50Hz（常称工频）。此外，三相电源还可以连接成三角形，只引出三条火线，而无中线，称为三相三线制，它只能提供一种电压，即线电压。

【思考题】

- 3.1.1 发电机发出的三相电动势是对称的，试说明电动势对称的含义。
- 3.1.2 在将三相发电机的三个绕组连成星形时，如误将 X、Y、C 连成一点，是否也可以产生对称三相电动势？
- 3.1.3 已知星形连接的三相电源 $u_{BC} = 220\sqrt{2} \sin(\omega t - 60^\circ) \text{ V}$ ，相序为 A—B—C。试写出 u_{AB} 、 u_{CA} 、 u_A 、 u_B 和 u_C 的表达式。
- 3.1.4 三相四线制供电系统，频率 $f=50\text{Hz}$ ，相电压 $U_P=220\text{V}$ ，以 u_{AB} 为参考正弦量，试写出电压 u_{BC} 、 u_{CA} 、 u_A 、 u_B 和 u_C 的表达式。
- 3.1.5 某三相发电机绕组作星形连接，每相额定电压为 220V，投入运行时测得相电压 $U_A=U_B=U_C=220\text{V}$ ，但线电压只有 $U_{AB}=380\text{V}$ ，而 $U_{BC}=U_{CA}=220\text{V}$ ，试问是什么原因？
- 3.1.6 当三相对称电源为星形连接时，若 $u_A=220\sqrt{2} \sin(\omega t+45^\circ)\text{V}$ ，线电压 u_{AB} 是多少？

3.2 负载星形连接的三相交流电路

三相电源同三相负载连接，组成完整的三相交流电路。三相负载连接的方式有星形（Y）连接和三角形（ Δ ）连接两种。

三相负载有对称和不对称两种情况。对称负载的特征是每相负载的复阻抗相等, 即

$$Z_a=Z_b=Z_c=Z \angle \varphi$$

将三相负载 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 的一端连在一起, 与电源的中线连接, 各相负载的另一端与相应的电源火线连接, 如图 3.5 所示。这种连接方式称为负载星形 (Y) 连接的三相四线制电路。每相负载的电压等于电源的相电压; 流过每相负载的电流称为相电流, 记作 i_a 、 i_b 、 i_c , 其大小记作 I_P ; 流过每根火线的电流称为线电流, 记作 i_A 、 i_B 、 i_C , 其大小记作 I_L ; 流过中线的电流称为中线电流, 记作 I_N 。显然, 负载星形连接时, 线电流等于对应的相电流, 即

$$i_a=i_A \quad i_b=i_B \quad i_c=i_C$$

采用此种接法 (只要有中线) 时, 不论负载对称与否, 其相电压总是对称的, 且电源相电压和对应的负载相电压相等, 即

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A = \dot{U}_a &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \\ \dot{U}_B = \dot{U}_b &= \frac{\dot{U}_{BC}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \\ \dot{U}_C = \dot{U}_c &= \frac{\dot{U}_{CA}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

每相负载电流等于对应的线电流, 则为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a = \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_a}{Z_a} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_b}{Z_b} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_c}{Z_c} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

中线电流为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

如果三相负载不对称, 在对三相交流电路进行分析计算时, 只能按单相知识一相一相地计算相电流, 再计算中线电流。

如果三相负载对称, 则相电流、线电流也对称, 中线电流为 0, 此时中线不起作用, 可以省去。这样, 图 3.5 所示的电路就变成图 3.6 所示的三相三线制电路。在对三相三线制交流电路进行分析计算时, 可以只计算一相, 然后根据对称性确

定另两相。

计算对称负载星形连接的电路时，常用到以下关系式，即

$$I_L = I_P, \quad U_L = \sqrt{3}U_P$$

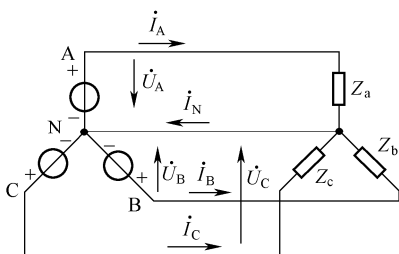


图 3.5 负载星形连接的三相四线制电路

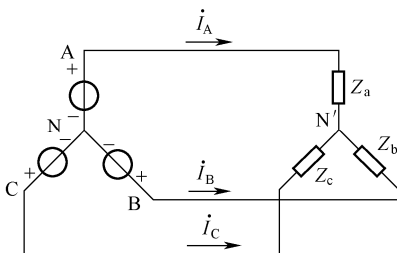


图 3.6 负载星形连接的三相三线制电路

需要强调的是，若负载不对称，中线不能去掉，否则负载上的相电压将会出现不对称现象，有的相电压高于额定电压，有的相电压低于额定电压，负载不能正常工作。星形连接的不对称三相负载一般采用三相四线制。

【例 3.1】星形连接的对称负载，每相负载阻抗为 $Z=6+j8\Omega$ ，接入线电压为 $u_{AB}=380\sqrt{2}\sin(\omega t+30^\circ)\text{V}$ 的三相对称电源上，求线电流 i_A 、 i_B 、 i_C 。

【解】由式（3.8）可知，A 相电压为

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = \frac{\dot{U}_{AB}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ = \frac{380}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ - 30^\circ = 220 \angle 0^\circ \quad (\text{V})$$

$$\text{所以} \quad \dot{I}_a = \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{220 \angle 0^\circ}{6 + j8} = 22 \angle -53^\circ \quad (\text{A})$$

因为负载对称，所以由 A 相的电压和电流可得出 B、C 相的结果，即

$$i_A = 22\sqrt{2} \sin(\omega t - 53^\circ) \quad (\text{A})$$

$$i_B = 22\sqrt{2} \sin(\omega t - 53^\circ - 120^\circ) = 22\sqrt{2} \sin(\omega t - 173^\circ) \quad (\text{A})$$

$$i_C = 22\sqrt{2} \sin(\omega t - 53^\circ + 120^\circ) = 22\sqrt{2} \sin(\omega t + 67^\circ) \quad (\text{A})$$

【例 3.2】三相照明负载（纯电阻）连接于线电压为 380V 的三相四线制的电源上，如图 3.7（a）所示。各相负载为： $R_a=5\Omega$ ， $R_b=10\Omega$ ， $R_c=20\Omega$ 。试求下列情况下各相负载的电压、电流及中线电流：

- （1）如上所述，正常状态下。
- （2）A 相短路。
- （3）A 相短路，且中线断开。
- （4）A 相断开。
- （5）A 相断开，且中线断开。

【解】(1) 因为是三相四线制, 所以不论负载对称与否, 负载上的三相电压总是对称的, 且均为 220V。设以 u_A 为参考正弦量, 则各相电压的相量为

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_A = 220 \angle 0^\circ \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B = 220 \angle -120^\circ \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C = 220 \angle 120^\circ\end{aligned}$$

各相负载电流如下:

$$\begin{aligned}i_A = i_a &= \frac{\dot{U}_a}{R_a} = \frac{220 \angle 0^\circ}{5} = 44 \angle 0^\circ \quad (\text{A}) \\ i_B = i_b &= \frac{\dot{U}_b}{R_b} = \frac{220 \angle -120^\circ}{10} = 22 \angle -120^\circ \quad (\text{A}) \\ i_C = i_c &= \frac{\dot{U}_c}{R_c} = \frac{220 \angle 120^\circ}{20} = 11 \angle 120^\circ \quad (\text{A})\end{aligned}$$

中线电流为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 44 \angle 0^\circ + 22 \angle -120^\circ + 11 \angle 120^\circ = 29.1 \angle -19^\circ \quad (\text{A})$$

即中线电流的有效值为

$$I_N = 29.1 \quad (\text{A})$$

(2) A 相短路, 则 A 相电流很大, A 相的熔断器熔断, 电流为 0; B、C 两相不受影响, 各相电压、电流同上。

(3) A 相短路, 中线断开时, 电路如图 3.7 (b) 所示。此时负载中点 N' 即为 A 点, 因此负载的各相电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}' &= 0, \quad U' = 0 \quad (\text{V}) \\ \dot{U}'_b &= \dot{U}_{BA}, \quad U'_b = 380 \quad (\text{V}) \\ \dot{U}'_c &= \dot{U}_{CA}, \quad U'_c = 380 \quad (\text{V})\end{aligned}$$

B、C 两相的电压都是线电压, 都超过了电灯的额定电压, 这是不允许的。

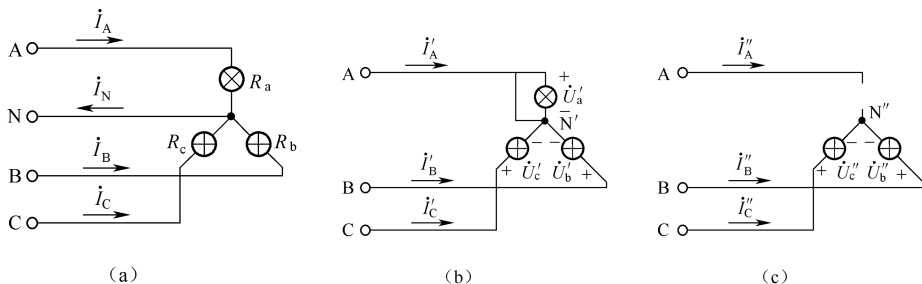


图 3.7 例 3.2 的电路图

(4) A 相断开时, 因仍有中线, B、C 两相的电压仍为电源的相电压, 所以 B、C 两相的电压和电流均和 (1) 相同。

(5) A 相断开, 中线也断开时, 电路如图 3.7 (c) 所示。这时电路成为单相电路。B、C 两相负载串联后接在电源的线电压上。根据分压公式可得

$$U_b'' = U_{BC} \times \frac{R_b}{R_b + R_c} = 380 \times \frac{10}{10 + 20} \approx 127 \text{ (V)}$$

$$U_c'' = U_{BC} \times \frac{R_c}{R_b + R_c} = 380 \times \frac{20}{10 + 20} \approx 253 \text{ (V)}$$

由此可以看出, B、C 两相负载的相电压, 在负载不对称且中线又断开时, 会出现一相电压比额定电压高, 一相电压比额定电压低的情况, 这是不允许的。因此, 三相照明系统必须是三相四线制, 依靠中线来维持各相照明负载的相电压等于电源的相电压, 保证负载的相电压对称。

中性线的作用就在于使星形连接的不对称负载的相电压对称。为了保证负载的相电压对称, 中线必须牢固。规定: 严禁在三相四线回路的中线上单独串接熔断器或装开关等。

【思考题】

3.2.1 不对称星形连接的三相交流电路中, 若中线断开, 则三个相电流之和为 0, 即 $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$, 对吗, 为什么?

3.2.2 三相四线制供电系统的中线上为什么不准接熔断器和开关?

3.2.3 若三相负载的阻抗相等, 即 $|Z_A| = |Z_B| = |Z_C|$, 能不能说这个三相负载一定是对称的? 为什么?

3.2.4 在三相四线制对称负载电路中, 负载为纯电阻, 相电流为 5A, 试问:

(1) 若电源电压不变, 中线阻抗忽略不计, 其中一相功率减半, 则中线电流变为多少?

(2) 若一相负载不变, 两相负载电流减至 2A, 则中线电流变为多少?

(3) 当 A 相断开时, 中线电流为多少?

3.2.5 试判断下列结论是否正确:

(1) 当负载做星形连接时, 必须有中性线。

(2) 当负载做星形连接时, 线电流必等于相电流。

(3) 当负载做星形连接时, 线电压必为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

(4) 若电动机每相绕组的额定电压为 380V, 当对称三相电源的线电压为 380V 时, 电动机绕组应接成星形才能正常工作。

3.2.6 从安全的角度考虑, 照明电灯的开关为什么要接在火线上?

3.2.7 有 220V、100W 的电灯 66 个，应如何接入线电压为 380V 的三相四线制电路中？求负载在对称情况下的线电流。

3.3 负载三角形连接的三相交流电路

三相负载依次连接在电源的两根火线之间，称为负载的三角形连接，如图 3.8 所示。每相负载的阻抗分别用 Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 表示，电压、电流的参考方向如图中所示。因为各相负载都直接连接在电源的两根火线之间，所以无论负载对称与否，负载的相电压就是电源的线电压，即

$$U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=U_{ab}=U_{bc}=U_{ca}=U_L=U_P \quad (3.10)$$

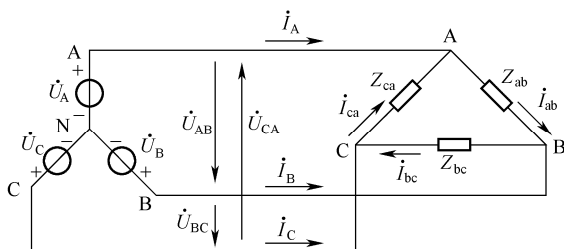


图 3.8 三相负载三角形连接的三相三线制电路

在分析计算三角形连接的电路时，常以电压 u_{AB} 为参考正弦量， $\dot{U}_{AB}$ 为参考相量，即

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= U_L \angle 0^\circ \\ \dot{U}_{BC} &= U_L \angle -120^\circ \\ \dot{U}_{CA} &= U_L \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (3.11)$$

各相负载的相电流分别为

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{ab}} \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{bc}} \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{ca}} \quad (3.12)$$

由基尔霍夫定律的相量形式得负载的线电流分别为

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \quad (3.13)$$

若三相负载对称，可根据上式作出相量图，如图 3.9 所示，由图可知，各线电流对称。此时，线电流的大小是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I_L = \sqrt{3} I_P$ 。线电流在相位上比相应的相电流滞后 30° 。线电流与相电流的相量关系为

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{ab} \angle -30^\circ \quad \dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{I}_{bc} \angle -30^\circ \quad \dot{I}_C = \sqrt{3} \dot{I}_{ca} \angle -30^\circ \quad (3.14)$$

如果三相负载不对称，在对三相交流电路进行分析计算时，只能按单相知识

一相一相地计算相电流，再由式（3.13）计算线电流。

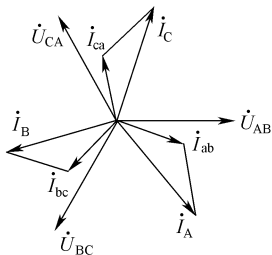


图 3.9 对称负载三角形连接的相量关系

如果三相负载对称，则相电流、线电流也对称，在对三相交流电路进行分析计算时，可以只计算一相，然后根据相电流、线电流的关系确定线电流。

三相电动机的绕组可以连接成星形，也可以连接成三角形，照明负载一般都连接成星形（带中线）。

【思考题】

3.3.1 在工农业生产中广泛采用的三相负载大多为对称负载，对称负载的含义是什么？

3.3.2 三个阻抗相同的负载先后接成星形和三角形，并由同一对称电源供电。试比较两种接线方式的相电流哪个大？线电流哪个大？各大几倍？

3.3.3 试判断下列结论是否正确：

(1) 负载做三角形连接时，线电流必为相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

(2) 在三相三线制供电线路中，无论负载是何种接法，也不论三相电流是否对称，三相线电流之和总为 0。

(3) 三相负载做三角形连接时，如果测出三相的相电流相等，则三个线电流也必然相等。

3.3.4 为什么三相电动机负载可用三相三线制电源，而三相照明负载必须用三相四线电源？

3.3.5 在三相交流电路中，什么情况下 $U_L = \sqrt{3} U_P$ ？什么情况下 $I_L = \sqrt{3} I_P$ ？

3.3.6 对称三相电源，线电压 $U_L = 380V$ ，对称三相电阻炉做三角形连接。若已知线电流为 $33A$ ，试问此电炉每相电阻 R 为多少？你能以 $\dot{U}_{AB}$ 为参考相量画出各电压电流的相量图吗？

3.4 三相交流电路的功率

三相交流电路的功率与单相交流电路一样，分为有功功率、无功功率和视在

功率。不论负载怎样连接，三相有功功率等于各相有功功率之和，即

$$P = P_A + P_B + P_C \quad (3.15)$$

因此，可分别计算出各相的功率，然后相加便得出总的有功功率，当三相负载做星形连接时

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c \quad (3.16)$$

当三相负载做三角形连接时

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca} \quad (3.17)$$

当对称负载为星形连接时，因为

$$U_L = \sqrt{3} U_p, \quad I_L = I_p$$

$$\text{所以} \quad P = 3 \frac{U_L}{\sqrt{3}} \times I_L \times \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

当对称负载为三角形连接时，因为

$$U_L = U_p, \quad I_L = \sqrt{3} I_p$$

$$\text{所以} \quad P = 3 U_L \times \frac{I_L}{\sqrt{3}} \times \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

对于三相对称负载，无论负载是星形接法还是三角形接法，三相有功功率的计算公式相同，因此三相总功率的计算公式如下：

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi \quad (3.18)$$

通常，在工程实际中，测量线电压和线电流比较方便，所以上式常应用线电压与线电流的形式来表示。

同理，当负载对称时，三相无功功率和三相视在功率的计算公式为

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi \quad (3.19)$$

$$S = \sqrt{3} U_L I_L \quad (3.20)$$

使用式(3.18)和式(3.19)时需要注意，式中的功率因数角是相电压与相电流的相位差角，即每相负载的阻抗角。一般情况下三相负载的视在功率不等于各相视在功率之和，只有当负载对称时，三相视在功率才等于各相视在功率之和。

如果三相负载不对称，则三相负载的视在功率只能由下式计算：

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

【例 3.3】三相对称负载做星形连接，其电源的线电压为 380V，电流为 10A，功率为 5700W。求负载的功率因数、各相负载的复阻抗、电路的无功功率和视在功率。

【解】因为

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

$$\text{所以 } \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_L I_L} = \frac{5700}{\sqrt{3} \times 380 \times 10} = 0.866$$

$$|Z| = \frac{U_P}{I_P} = \frac{380}{10\sqrt{3}} = 22 \text{ } (\Omega)$$

$$\varphi = \arccos 0.866 = 30^\circ$$

$$Z = 22 \angle 30^\circ \text{ } (\Omega)$$

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 10 \times \sin 30^\circ = 3291 \text{ (Var)}$$

$$S = \sqrt{3}U_L I_L = \sqrt{3} \times 380 \times 10 = 6528 \text{ (V} \cdot \text{A)}$$

【例 3.4】一对称三相负载，每相负载阻抗为 $Z = (6 + j8) \Omega$ ，接入电压为 380V (线电压) 的三相电源。试问：

- (1) 当负载做星形连接时，消耗的功率是多少？
- (2) 若误将负载连接成三角形时，消耗的功率又是多少？

【解】(1) 负载做星形连接时

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$$

式中

$$U_L = 380 \text{ (V)}$$

$$I_L = I_P = \frac{U_P}{|Z|} = \frac{\frac{U_L}{\sqrt{3}}}{|Z|} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 22 \text{ (A)}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 0.6$$

所以

$$P = \sqrt{3} \times 380 \times 22 \times 0.6 = 8688 \text{ (W)}$$

- (2) 负载误接成三角形时

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$$

式中

$$U_L = 380 \text{ (V)}$$

$$I_L = \sqrt{3}I_P = \sqrt{3} \frac{U_P}{|Z|} = \sqrt{3} \frac{U_L}{|Z|} = \sqrt{3} \times \frac{380}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 65.8 \text{ (A)}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 0.6$$

$$P = \sqrt{3} \times 380 \times 65.8 \times 0.6 = 25985 \text{ (W)}$$

以上计算结果表明，若误将负载连接成三角形，负载消耗的功率是星形连接

时的3倍,负载将被烧毁。此时,每相负载上的电压是星形连接时的 $\sqrt{3}$ 倍,因而每相负载的电流也是星形连接时的 $\sqrt{3}$ 倍。

【思考题】

3.4.1 有人说:“对称三相负载的功率因数角,对于星形连接是指相电压与相电流的相位差,对于三角形连接则指线电压与线电流的相位差”。这句话对吗?

3.4.2 对称三相负载做星形连接,每相阻抗 $Z=(30+j40)\Omega$,将其接在线电压为380V的三相电源上,试问负载消耗的总功率是多少?

3.4.3 对称三相电源, $U_L=380V$,对称三相电阻炉作三角形连接,若电炉工作时每相电阻为 $R=20\Omega$,试计算此三相电炉的电功率。如改为星形连接,试计算线电流 I_L 和三相功率 P 。

*3.5 安全用电

3.5.1 安全用电常识

人们在用电过程中,如果不注意用电安全,就会造成电气设备的损坏,危及到电力系统,甚至造成人身伤亡。为了更好地使用电能并保证人身、设备及电力系统的安全,一定要掌握一些必要的电气安全知识。下面简要介绍安全用电的基本概念。

1. 电流对人体的作用

发生触电事故时,人体会受到各种不同的伤害。根据伤害性质可分为电击和电伤两种。

电击是指触电后人体成为电流通路的一部分,电流通过人体引起生理变化,使内部器官组织受到损伤。如果受害者不能迅速摆脱带电体,最后会造成触电死亡事故。

电伤是指在电弧作用下或熔丝熔断时,对人体外部的烧伤、溅伤等。

根据大量触电事故资料的分析和实验,证实电击引起的伤害程度与下列各种因素有关:

(1) 人体电阻。人体电阻是决定流过人体电流大小的主要因素。人体的电阻越大,通入人体的电流就越小,伤害程度也就越轻。研究结果表明,人体电阻的数值变化范围很大。当皮肤有完好的角质外层且很干燥时,人体电阻大约为 $10^4\sim 10^5\Omega$;当角质外层破坏时,人体电阻则降到 $800\sim 1000\Omega$ 。

(2) 触电持续时间。电流通过人体的时间越长,对人体的伤害越严重。我国

现行的 $30\text{mA}\cdot\text{s}$ 安全值的规定就是根据这一道理提出来的。

(3) 触电电流。触电电流越大，对人体组织的破坏作用就越大。研究证明，通过人体的电流在 50mA 以上时，人就有生命危险。因此一般把 30mA 作为安全电流值。

通常，接触 36V 以下的电压时，通过人体的电流不致超过 50mA ，故把 36V 的电压作为安全电压。如果在潮湿的场所，安全电压还要规定得低一些，通常是 24V 和 12V 。

此外，电击对人体的伤害程度还与电流类型及频率、电流的途径以及与带电体接触的面积和压力等有关。

2. 触电方式

(1) 接触正常带电体。电源中性点接地的单相触电，如图 3.10 所示。这时人体处于相电压之下，危险性较大。若人体与地面的绝缘较好，危险性可以大大减小。

电源中性点不接地的单相触电，如图 3.11 所示。这种触电也有危险。因为导线与地面间的绝缘可能不良（对地绝缘电阻为 R' ），甚至有一相接地，在这种情况下人体中就有电流通过。在交流的情况下，导线与地面间存在的分布电容也可构成电流的通路。

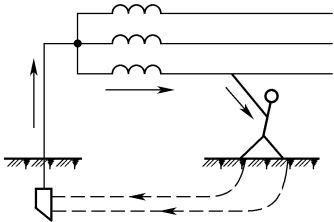


图 3.10 电源中性点接地的单相触电

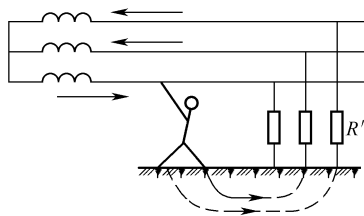


图 3.11 电源中性点不接地的单相触电

两相触电最危险，因为人体处于线电压之下，但这种情况不常见。

(2) 接触正常不带电的金属体。触电的另一种情况是接触正常不带电的金属部分。例如，一些电气设备的外壳本来是不带电的，由于内部绕组绝缘损坏而与外壳相接触，使其也带电。人触及带电的外壳，相当于单相触电。大多数触电事故属于这一种。

3. 触电急救

抢救触电人员最有效的办法是现场急救。当发现有人触电时，首先应迅速切断电源，或用绝缘器具迅速使伤员脱离电线或带电体。若发现伤员呼吸困难或呼

吸暂时停止或心脏暂时停止跳动,则应立即用人工呼吸法和心脏按摩法进行抢救,千万不能等到送医院而耽误抢救的时机。在抢救过程中切记不能使用“强心针”,否则会加速触电者的死亡。

3.5.2 安全用电的防范

1. 防雷

大气层中带电的云(即雷云)对地放电的现象称为雷。雷云放电产生的冲击电压,其最大值可高达数十万伏至数百万伏。如此高的电压,如果侵入到电力系统,将可能损坏电气设备的绝缘,甚至会窜入低压电路,造成严重后果。因此,电力设备必须注意防雷。常见的防雷措施有安装避雷针、避雷线、避雷网、避雷器,保护间隙和设备外壳可靠接地等。

2. 防火

电气线路、开关、熔丝、照明器具、电动机、电炉及电热器具等在出现事故或使用不当时,会产生电火花、电弧或发热量大大增加。当这些电气设备与可燃物体接近或接触时,就会引起火灾。电力变压器、互感器和电力电容器等电气设备除了可能引起火灾以外,还可能发生爆炸。

造成电气火灾的原因是电气设备内部出现短路、电气设备严重过载、电路中的触点接触不良、电气设备或线路的绝缘损坏或老化,以及电气设备中的散热部件或通风设施损坏等。在选用和安装电气设备时,应选用合理的类型,例如防爆型、密封型和防尘型等。为防止火灾或爆炸,应严格遵守安全操作规程和有关规定,确保电气设备的正常运行。要定期检查设备,排除事故隐患。要保持通风良好,采用耐火材料及良好的保护装置等。

3. 防静电

静止的电荷称为静电。积累的电荷越多电位也就越高。绝缘物体之间相互摩擦会产生静电,日常生活中的静电现象一般不会造成危害。

工业上有不少场合会产生静电,例如石油、塑料、化纤和纸张等在生产过程或运输中,由于固体物质的摩擦、气体和液体的混合及搅拌等都可能产生和积累静电,静电电压有时可达几万伏。高的静电电压不仅会给工作人员带来危害,而且当发生静电放电形成火花时,可能引起火灾和爆炸。例如,曾有巨型油轮和大型飞机因油料静电而引起火灾和爆炸,矿井因静电引起瓦斯爆炸的事故发生。

为了防止因静电而发生火災,常采用的措施有:

- 采用防静电接地,给静电提供转移和泄漏路径。
- 利用异性电荷中和静电,限制静电的产生。

【思考题】

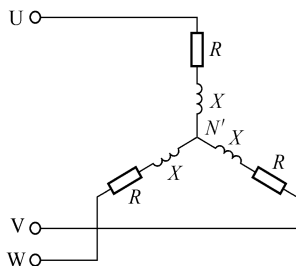
3.5.1 试说明安全用电的意义及安全用电的措施。

3.5.2 试说明触电急救的意义和步骤。

习题三

3.1 某三相同步发电机，三相绕组连接成星形时的线电压为 10.5kV ，若将它连接成三角形，则线电压是多少？若连接成星形时，B 相绕组的首末端接反了，则 3 个线电压的有效值 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 各是多少？

3.2 题 3.2 图所示的三相对称电路，线电压 $U_L=380\text{V}$ ，每相负载 $Z=6+j8\Omega$ ，试求相电压、相电流和线电流，并画出电压和电流的相量图。



题 3.2 图

3.3 有一电源和负载都是星形连接的对称三相电路，已知电源相电压为 220V ，负载每相阻抗 $|Z|=10\Omega$ ，试求负载的相电流和线电流。

3.4 已知星形连接的对称三相负载，每相阻抗为 $40\angle 25^\circ (\Omega)$ ；对称三相电源的线电压为 380V 。求负载相电流，并绘出电压、电流的相量图。

3.5 已知星形连接的对称三相负载，每相阻抗为 $10 (\Omega)$ ；对称三相电源的线电压为 380V 。求负载的相电流和线电流，并绘出电压、电流的相量图。

3.6 有一台三相交流电动机，定子绕组接成星形，接在线电压为 380V 的电源上。已测得线电流 $I_L=6.6\text{A}$ ，三相功率 $P=3.3\text{KW}$ ，试计算电动机每相绕组的阻抗 Z 和参数 R 、 X_L 各为多少？

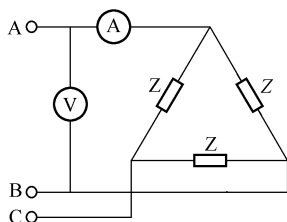
3.7 有一电源和负载都是三角形连接的对称三相电路，已知电源相电压为 220V ，负载每相阻抗 $|Z|=10\Omega$ ，试求负载的相电流和线电流。

3.8 有一电源为三角形连接，而负载为星形连接的对称三相电路，已知电源相电压为 220V ，每相负载的阻抗为 10Ω ，求负载的相电流和线电流。

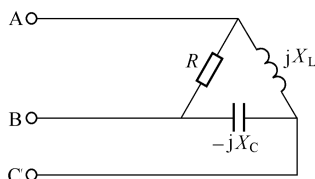
3.9 题 3.9 图所示电路中的电流表在正常工作时的读数是 17.3A ，电压表读数是 380V ，电源电压对称。在下列情况之一时求各相的负载电流：

- (1) 正常工作。
- (2) AB 相负载断路。
- (3) A 相线断路。

3.10 在题 3.10 图所示的三相电路中， $R=X_C=X_L=25\Omega$ ，接于线电压为 220V 的对称三相电源上，求各相线中的电流和线电流。



题 3.9 图



题 3.10 图

3.11 三相对称负载做三角形连接，线电压为 380V ，线电流为 17.3A ，三相总功率为 4.5kW ，求每相负载的电阻和感抗。

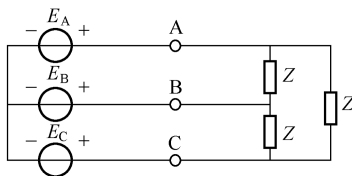
3.12 三相电阻炉每相电阻 $R=8.68\Omega$ ，求：

(1) 三相电阻做星形连接，接在 $U_L=380\text{V}$ 的对称电源上，电炉从电网吸收多少电功率？

(2) 电阻做三角形连接，接在 $U_L=380\text{V}$ 的对称电源上，电炉从电网吸收的电功率又是多少？

3.13 有一三相四线制照明电路，相电压为 220V ，已知三相的照明灯组分别由 34、45、56 只白炽灯并联组成，每只白炽灯的功率都是 100W ，求三个线电流和中性线电流的有效值。

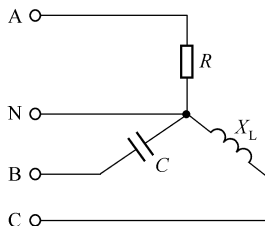
3.14 电路如题 3.14 图所示，对称三相感性负载接于电路中，测得线电流为 30.5A ，负载的三相有功功率为 15kW ，功率因数为 0.75 ，求电源的视在功率、线电压以及负载的电阻和电抗。



题 3.14 图

3.15 电路如题 3.15 图所示，电源电压 $U_L=380\text{V}$ ，每相负载的阻抗为 $R=X_L=X_C=10\Omega$ 。

- (1) 该三相负载能否称为对称负载？为什么？
- (2) 计算中线电流和各相电流，画出相量图。
- (3) 求三相总功率。



题 3.15 图

3.16 一台三相交流电动机，定子绕组星形连接于 $U_L=380\text{V}$ 的对称三相电源上，其线电流 $I_L=2.2\text{A}$ ， $\cos\varphi=0.8$ ，试求电动机每相绕组的阻抗 Z 。

3.17 已知对称三相交流电路，每相负载的电阻为 $R=8\Omega$ ，感抗为 $X_L=6\Omega$ 。

(1) 设电源电压为 $U_L=380\text{V}$ ，求负载星形连接时的相电流、相电压和线电流，并画相量图。

(2) 设电源电压为 $U_L=220\text{V}$ ，求负载三角形连接时的相电流、相电压和线电流，并画相量图。

(3) 设电源电压为 $U_L=380\text{V}$ ，求负载三角形连接时的相电流、相电压和线电流，并画相量图。

3.18 如题 3.18 图所示的三相四线制电路，三相负载连接成星形，已知电源线电压为 380V ，负载电阻 $R_a=11\Omega$ ， $R_b=R_c=22\Omega$ ，试求：

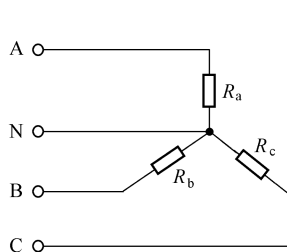
- (1) 负载的各相电压、相电流、线电流和三相总功率。
- (2) 中线断开，A 相又短路时的各相电流和线电流。
- (3) 中线断开，A 相断开时的各线电流和相电流。

3.19 三相对称负载三角形连接，其线电流为 $I_L=5.5\text{A}$ ，有功功率 $P=7760\text{W}$ ，功率因数 $\cos\varphi=0.8$ ，求电源的线电压 U_L 、电路的无功功率 Q 和每相阻抗 Z 。

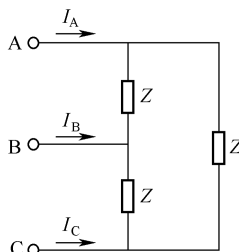
3.20 电路如题 3.20 图所示，已知 $Z=12+j16\Omega$ ， $I_L=32.9\text{A}$ ，求 U_L 。

3.21 对称三相负载星形连接，已知每相阻抗 $Z=31+j22\Omega$ ，电源线电压为 380V ，求三相交流电路的有功功率、无功功率、视在功率和功率因数。

3.22 在线电压为 380V 的三相电源上，接有两组电阻性对称负载，如题 3.22 图所示。试求线路上的总线电流 I 和所有负载的有功功率。

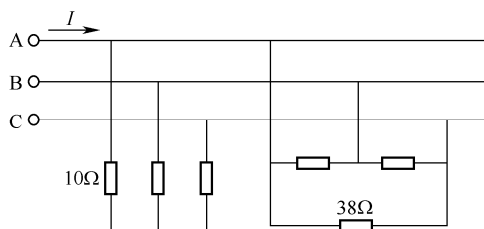


题 3.18 图

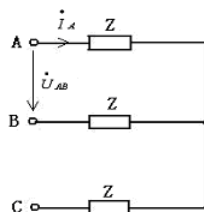


题 3.20 图

3.23 对称三相电路如题 3.23 图所示, 已知 $\dot{I}_A = 5\angle 30^\circ$ (A), $\dot{U}_{AB} = 380\angle 90^\circ$ (V)。试求: (1) 相电压 $\dot{U}_A$; (2) 每相阻抗 Z ; (3) 每相功率因数; (4) 三相总功率 P 。



题 3.22 图



题 3.23 图

3.24 对称三相电阻炉做三角形连接, 每相电阻为 38Ω , 接于线电压为 380V 的对称三相电源上, 试求负载相电流 I_P 、线电流 I_L 和三相有功功率 P , 并绘出各电压电流的相量图。

3.25 题 3.20 图所示的电路中, 对称负载连接成三角形, 已知电源线电压 $U_L=220\text{V}$, 若测得线电流 $I_L=17.3\text{A}$, 三相功率 $P=4.5\text{kW}$, 试求: (1) 每相负载的电阻和感抗; (2) 当 A 相火线断开时, 电路中的线电流、相电流和三相总功率; (3) 当 AB 相负载断开时, 电路中的线电流、相电流和三相总功率。

3.26 对称三相电源, 线电压 $U_L=380\text{V}$, 对称三相感性负载做星形连接, 若测得线电流 $I_L=17.3\text{A}$, 三相功率 $P=9.12\text{kW}$, 求每相负载的电阻和感抗。

3.27 三相异步电动机的三个阻抗相同的绕组连接成三角形, 接于线电压 $U_L=380\text{V}$ 的对称三相电源上, 若每相阻抗 $Z=8+j6\Omega$, 试求此电动机工作时的相电流 I_P 、线电流 I_L 和三相电功率 P 。

3.28 有三个相同的电感性单相负载, 额定电压为 380V , 功率因数为 0.8 , 在此电压下消耗的有功功率为 1.5kW 。把它接到线电压为 380V 的对称三相电源上, 试问应采用什么连接方法? 负载的 R 和 X_L 各是多少?