

三相电力系统由三相电源、三相负载和三相输电线路组成。在目前国内外的电力系统中,电能的生产、传输、分配大都采用三相制,而工业生产与制造业常用的容量较大的动力用电设备也大都采用三相交流电。在发电方面,对于相同尺寸的发电机,三相式比单相式可提高功率约 50%;在输电方面,相同输电条件下,三相输电线路比单相输电节省有色金属约 25%;在配电方面,三相变压器比单相变压器更经济,在不增加任何设备的情况下,可供三相负载和单相负载共同使用。用电设备也由于三相电流能产生旋转磁场这一特殊性质而具有结构简单、成本低、运行可靠、维护方便等优点。

5.1 三相电源

三相交流电压通常由三相交流发电机产生。三相交流发电机主要由固定的定子和可动的转子组成。图 5.1(a)是两磁极三相发电机的原理示意图。定子铁芯槽中嵌有 AX、BY、CZ 三绕组,它们相互独立,形状、尺寸、匝数完全相同,在空间彼此相差 120° ,分别称为 A 相绕组、B 相绕组、C 相绕组。当转子以均匀角速度 ω 转动时,每相绕组依次切割磁力线,在三相绕组中产生频率相同、幅值相等、相位互差 120° 的正弦感应电压,从而形成如图 5.1(b)所示的对称三相电源,记作 u_A 、 u_B 、 u_C 。其中电源正极标注 A、B、C 并被称为始端,电源负极标注 X、Y、Z 称为末端。

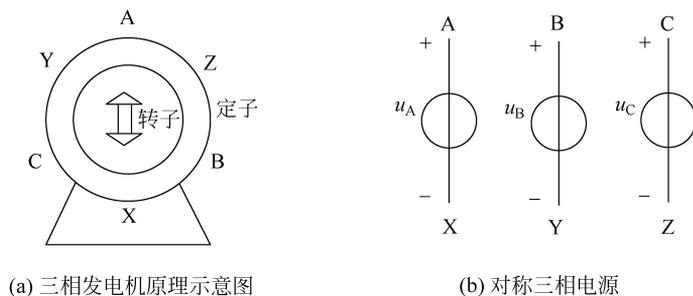


图 5.1 三相发电机原理图及对称三相电源

对称三相交流电压的表示方法有多种,瞬时值表达为

$$\begin{cases} u_A = U_m \sin(\omega t) \\ u_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C = U_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (5.1)$$

也可以用相量表示为

$$\dot{U}_A = U_p \angle 0^\circ \quad \dot{U}_B = U_p \angle -120^\circ \quad \dot{U}_C = U_p \angle 120^\circ$$

其中, U_p 是相量的有效值。三相对称电压的波形图如图 5.2 所示, 相量图如图 5.3 所示。

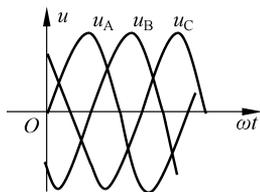


图 5.2 对称三相电源波形图

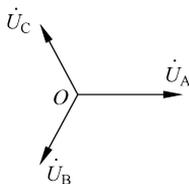


图 5.3 三相对称电压相量图

观察式(5.1)以及波形图和相量图,可以得出:对称三相电压的瞬时值代数和为零,对称三相电压的相量和也为 0,即

$$u_A(t) + u_B(t) + u_C(t) = 0 \quad (5.2)$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad (5.3)$$

对于三相对称电源的这一独有现象既要合理地加以利用,又要对它可能造成的危害有相应的防范措施。

从图 5.2 可以看出,对称三相电压到达零值(最大值)的先后顺序是不同的。通常把这样的先后顺序称为三相电源的相序,相序分为正序(顺序)和负序(逆序)两种。 u_A 比 u_B 超前 120° , u_B 比 u_C 超前 120° ,这时三相电压的相序为 A—B—C 或 B—C—A 或 C—A—B,称为正序;如果反之,则 u_A 比 u_C 超前 120° , u_C 又比 u_B 超前 120° ,三相电源的相序为 A—C—B 或 C—B—A 或 B—A—C,称为负序。相序在电力工程中非常重要,例如,三相发电机或三相变压器并联运行以及三相电动机接入电源时,都要考虑相序问题。以后如果不加说明,均默认为是正序。

在发电机三相绕组中,A 相可以任意指定,但 A 相确定之后,比 A 相落后 120° 的就是 B 相,比 B 相落后 120° 的就是 C 相。在发电厂和变电所中母线通常涂上黄、红、绿 3 种颜色来分别表示 A 相、B 相、C 相。

5.2 三相电源的联结

根据三相绕组的联结方式的不同,将三相电源的联结分为星形(Y形)联结和三角形(Δ 形)联结。

5.2.1 三相电源星形联结

三相电源星形联结是指将三相绕组的末端连接起来,如图 5.4 所示。联结点称为中点或零点,从中点引出的导线为中线,俗称零线,担负着负载中点与电源中点间的连接;从始

端 A、B、C 引出三根导线称为**相线**或**端线**，俗称**火线**，用以连接负载或电力网。

火线与中线间的电压即电源电压或负载电压称为**相电压**，有效值为 U_p ；流经每相电源或负载的电流称为**相电流**，有效值用 I_p 表示；两火线之间的电压即任意两始端间的电压称为**线电压**，有效值用 U_l 表示；流经端线的电流叫**线电流**，有效值用 I_l 表示。中线上的电流称为**中线电流**，一般用 I_N 或 I_O 表示。工程上所说的三相电路的电压都是指线电压。

根据基尔霍夫定律，求得星形联结的 3 个线电压与相电压的关系为

$$\begin{cases} u_{AB} = u_A - u_B \\ u_{BC} = u_B - u_C \\ u_{AC} = u_A - u_C \end{cases} \quad (5.4)$$

三相电压又可以表示为相量的形式：

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{cases} \quad (5.5)$$

由于所有线电压和相电压为同频率交流电压，所以可以将线电压与相电压绘于同一相量图中，如图 5.5 所示。

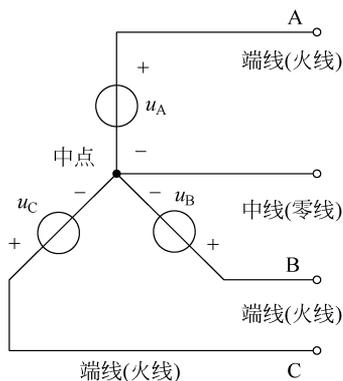


图 5.4 三相电源的星形联结

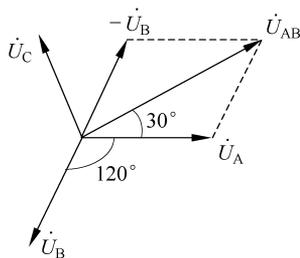


图 5.5 三相电源星形联结各电压相量图

由相量图 5.5 可知，A 相的线电压与相电压之间的关系为

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3} \dot{U}_A \angle 30^\circ \quad (5.6)$$

与之相对称，其余两相的线电压与相电压关系为

$$\dot{U}_{BC} = \sqrt{3} \dot{U}_B \angle 30^\circ \quad (5.7)$$

$$\dot{U}_{CA} = \sqrt{3} \dot{U}_C \angle 30^\circ \quad (5.8)$$

线电压与相电压有效值关系为

$$U_l = \sqrt{3} U_p \quad (5.9)$$

可见，三相对称电源星形（Y）联结，线电压大小是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，相位超前对应的相电压 30° 。

5.2.2 三相电源三角形联结

3个对称电压源依次首尾相连,形成一个闭合路径,从3个联结点引出端线去连接负载或电力网,称为**三角形联结**,如图5.6所示。

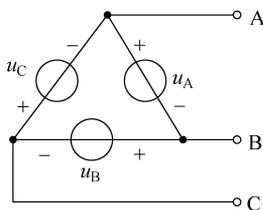


图 5.6 三相电源的三角形联结

3个绕组串联成闭合回路,如果它们完全对称,那么依据式(5.2)和式(5.3),回路中就不会有电流产生。但在实际发电机中,三相绕组有时很难做到完全对称,所以合成电压并不能严格为零,因而电路中会有环流。如果绕组的联结顺序、首尾弄错,就会引起大的环流,致使电源烧坏,发电机烧毁,因此生产实际中,三相发电机的绕组很少采用三角形联结。

可以知道,三相对称电源三角形联结,线电压与相电压大小相等,相位相同。写成相量的形式,即

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C \end{cases} \quad (5.10)$$

线电压与相电压有效值关系为

$$U_l = U_p \quad (5.11)$$

5.3 三相负载的联结

使用交流电的电气设备种类繁多,很多设备必须使用三相电源,例如,三相交流电动机、大功率三相电炉等,这些设备都属于三相负载。三相负载的联结也分为星形(Y)和三角形(Δ)两种联结方式。而三相负载又分为对称负载与非对称负载两种,各相复阻抗均相等($Z_A = Z_B = Z_C = Z$)的负载称为**对称负载**;否则称为**非对称负载**。由三相对称电源和三相对称负载构成的电路叫作**对称三相电路**。三相电源与三相负载的联结方式组合起来共有Y-Y、Y- Δ 、 Δ -Y、 Δ - Δ 以及Y-Y₀等多种,其中Y-Y₀联结指的是在电源与负载之间有4条联结线路,即3条端线与1条中线,这种供电电路叫作**三相四线制**,常用于照明电路,如图5.7所示。

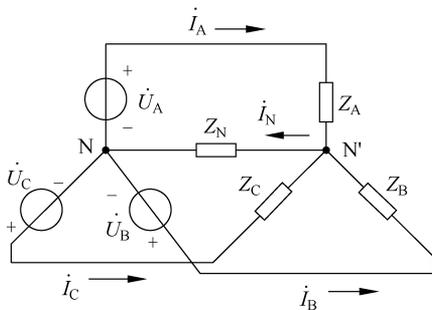


图 5.7 Y-Y₀联结

在三相负载联结中,我们重点讨论电路中电流的关系,因为三相负载无论哪种联结,都是接于对称三相电源,而对称三相电源在不同联结方式下线电压与相电压的关系已经由5.2节的结论给出,所以与之相连的三相负载的电压关系也就可以根据具体的电路联结得出,在这里不再赘述。

5.3.1 三相负载星形联结

在Y-Y₀联结中,设通过三相负载的每条端线的线电流相量为 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C ,电流的参考方向均由电源指向负载,相电流是流过每相负载的电流,参考方向与线电流的方向一致,即指向中点N'。从图5.7可以看出,三相对称负载星形(Y形)联结,线电流与相电流大小相等,相位相同。

在Y-Y₀联结中,还有一种电流,即电源中点N与负载中点N'之间的电流,即中线电流 \dot{I}_N ,方向由N'指向N,则 \dot{I}_N 为3个线电流(此时也是相电流)之和,即

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (5.12)$$

如果三相负载对称,则根据式(5.12)有

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C}{Z} = 0 \quad (5.13)$$

这时中线电流为0,既然中线电流为0,就可以省去,这样的供电制称为三相三线制,例如,常见的三相异步电动机就只需要3根输电线,因为它的三相绕组对称。

在三相对称电路分析中,首先选择三相对称电源中的一相电源电压为参考相量,一般选择A相;然后,按照电路联结中的线电压与相电压关系,求该相负载的相电压,并按照单相交流电路的计算方法求解负载的相电流,再根据相电流与线电流的关系,得出该相负载的线电流;最后,按照对称性直接写出其他两相负载的电量。

【例 5.1】 在如图5.8所示的电路中,已知电源线电压 $U_1 = 380\text{V}$,各项负载阻抗 $Z = (40 + \text{j}30)\Omega$,试求中线阻抗分别为 $Z_N = 0$ (短路), $Z_N = (1 + \text{j}3)\Omega$, $Z_N = \infty$ (开路)时,各相负载的电压、相电流和线电流。

【解】 (1) $Z_N = 0$ 时,电源相电压为

$$U_p = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220(\text{V})$$

负载相电压等于电源相电压,即

$$U_A = U_B = U_C = U_p = 220\text{V}$$

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{220\angle 0^\circ}{40 + \text{j}30} = 4.4\angle -36.9^\circ(\text{A})$$

由对称关系可得

$$\dot{I}_B = 4.4\angle(-36.9^\circ - 120^\circ) = 4.4\angle -156.9^\circ(\text{A})$$

$$\dot{I}_C = 4.4\angle(-36.9^\circ + 120^\circ) = 4.4\angle 83.1^\circ(\text{A})$$

由于负载作星形联结,所以负载线电流等于相电流,即 $I_l = I_p = 4.4\text{A}$ 。

(2) 因为电源及负载都对称,中线不起作用,所以 $Z_N = (1 + \text{j}3)\Omega$ 、 $Z_N = \infty$ 时各相负载的电压、电流值都与 $Z_N = 0$ 时一样。

由上面的讨论知道,三线四线制在负载完全对称的情况下可以简化为三相三线制的供

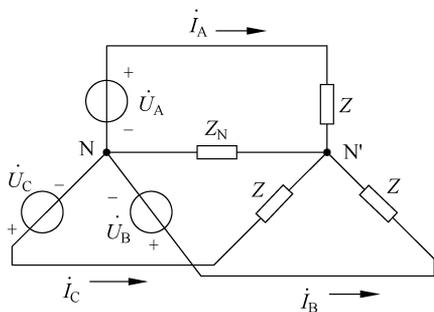


图 5.8 例 5.1 图

电形式,但对于不对称三相负载来说,例如照明用电时,由于电灯使用情况各不相同,为了保证负载获取额定电压,就必须使用三相四线制,而且在使用中,必须确保中线的安全,因为只有中线存在,才能保证无论负载对称与否,负载电压都等于电源相电压,从而满足负载的工作条件。照明电路一般不允许在中性线(干线)上接入熔断器或闸刀开关。

【例 5.2】 在图 5.9 中,电源电压对称,线电压 $U_1 = 380\text{V}$; 负载为电灯组,在额定电压下其电阻分别为 $R_A = 5\Omega, R_B = 10\Omega, R_C = 20\Omega$ 。试求: 负载相电压、负载电流及中线电流。

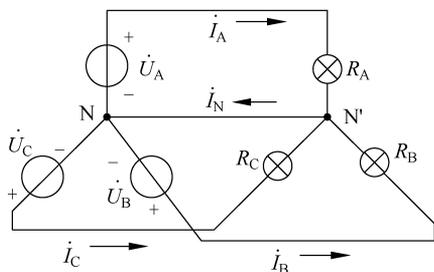


图 5.9 例 5.2 图

【解】 在负载不对称而有中线(其上电压降可忽略不计)的情况下,负载电压和电源电压一样,仍然是对称的,但是各相电流则不能由某一相的结果对称得出,必须逐一计算。

由于中线的存在,各相负载的相电压有效值仍然相等,均为 $\frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$ 。

设 $\dot{U}_A = 220 \angle 0^\circ \text{V}$, 则 $\dot{U}_B = 220 \angle -120^\circ \text{V}$,
 $\dot{U}_C = 220 \angle 120^\circ \text{V}$, 各相电流为

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{R_A} = \frac{220 \angle 0^\circ}{5} = 44 \angle 0^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{R_B} = \frac{220 \angle -120^\circ}{10} = 22 \angle -120^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{R_C} = \frac{220 \angle 120^\circ}{20} = 11 \angle 120^\circ (\text{A})$$

中线电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \\ &= 44 \angle 0^\circ + 22 \angle -120^\circ + 11 \angle 120^\circ \\ &= 27.5 - \text{j}9.45 \\ &= 29.1 \angle -19^\circ (\text{A}) \end{aligned}$$

综上所述,如果负载对称,无论采用三相四线制还是星形三相三线制,各负载两端都能取得与电源相同的对称电压,负载都可以正常工作;如果负载不对称,那么采用三相四线制同样可以使负载取得对称电压保证工作。但是不对称负载采用星形三相三线制联结,则每相负载获取的电压有可能低于或高于自身的额定工作电压,造成用电设备的损坏。

【例 5.3】 电路如图 5.10 所示,三相电源对称,线电压 $U_1 = 380\text{V}$; 负载为电灯组,在额定电压下其电阻分别为 $R_A = 5\Omega, R_B = 10\Omega, R_C = 20\Omega$ 。试求:

- (1) A 相短路而中线存在时,各相负载上的电压;
- (2) A 相短路而中线断开时,各相负载上的电压;
- (3) A 相断开而中线存在时,各相负载上的电压;
- (4) A 相断开而中线也断开时,各相负载上的电压。

【解】 (1) A相短路时,短路电流很大,会将该相熔断器熔断,而由于中线的存在,B相和C相未受影响,相电压仍为220V。

(2) 当A相短路而中线又断开时, N' 与A同电位,因此负载各相电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= 0, & U_a &= 0 \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_{BA}, & U_b &= 380\text{V} \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_{CA}, & U_c &= 380\text{V}\end{aligned}$$

在此情况下,B相与C相的电灯组上所加的电压都超过电灯的额定电压(220V),这是不被允许的。

(3) A相断开而中线存在时,B相和C相未受影响,相电压仍为220V。

(4) A相断开而中线也断开时,电路成为单相电路,即B相的电灯组和C相的电灯组串联,接在线电压 $U_{BC}=380\text{V}$ 的电源上,两相电流相同。B、C相负载电压为

$$\begin{aligned}U_b &= \frac{U_{BC}R_B}{R_B + R_C} = \frac{380 \times 10}{10 + 20} \approx 127(\text{V}) \\ U_c &= \frac{U_{BC}R_c}{R_b + R_c} = \frac{380 \times 20}{10 + 20} \approx 253(\text{V})\end{aligned}$$

计算表明,B相负载的电压低于电灯的额定电压,而C相负载电压高于电灯的额定电压。这都是不被允许的。

从例5.3可以看出,中线的作用是把负载端中性点与电源端中性点强制成为等电位,保证负载相电压平衡。如果中线开路,那么将使各相电压失去平衡,负载不能工作在额定电压下,工作状态“失常”。

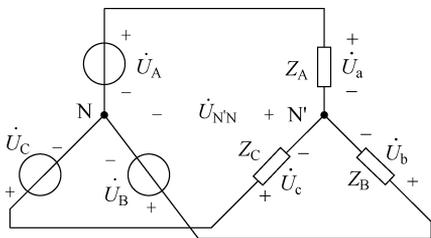


图 5.11 三相不对称Y-Y联结

当不对称的三相负载连接成星形而中线又断开时,就不能按照对称三相电路的方法进行分析。例如,电源对称而负载不对称的三相三线制Y-Y联结的电路如图5.11所示,这类不对称电路的计算常采用中点电压法。

由图5.11可知:

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} \quad (5.14)$$

$\dot{U}_{N'N}$ 为中点 N' 与 N 之间的电压,称为中点电压。于是有

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{N'N} \\ \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{N'N} \\ \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{N'N} \end{cases} \quad (5.15)$$



当三相负载不对称时,电源的相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 虽然对称,但根据式(5.14)可知 $\dot{U}_{N'N} \neq 0$,因此负载的相电压就不对称,这种负载端中点与电源中点不再等电位的现象称为负载中性点偏移。

5.3.2 三相负载三角形联结

三相负载的三角形联结电路如图 5.12 所示,它与三相电源联结时可以构成 Y- Δ 、 Δ - Δ 两种接法。负载在三角形联结时,只能采用三相三线制。每相负载的相电压就是电源对应的线电压,设电源线电压为 \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{CA} ,三相负载分别为 Z_A 、 Z_B 、 Z_C ,则每相负载的相电流 \dot{I}_{AB} 、 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{CA} 分别为

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_A}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_B}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_C} \quad (5.16)$$

若负载对称,则负载的相电流也是对称的,即大小相等,相位互差 120° 。

设三相对称负载的线电流分别为 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C ,由基尔霍夫电流定律可以得到:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \quad (5.17)$$

由式(5.17)知道,若负载对称,各线电流也是对称的。对称负载的线电压与相电流和线电流的相量关系如图 5.13 所示。

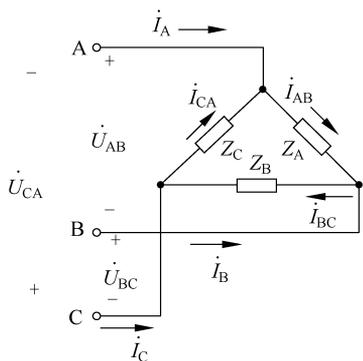


图 5.12 三角形联结

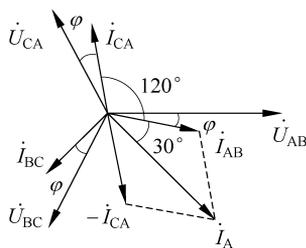


图 5.13 对称负载三角形联结的电压、电流相量图

由图 5.13 中相量关系可以得出:三相对称负载三角形联结,线电流大小是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,相位滞后对应的相电流 30° 。即

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_C = \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ \end{cases} \quad (5.18)$$

$$I_l = \sqrt{3} I_p \quad (5.19)$$

【例 5.4】 在如图 5.12 所示的电路中,已知对称三相三线制的电压为 380V,每相阻抗为 $Z = 10 + j10\Omega$,输电线阻抗忽略不计,求每相负载电流和线电流。



视频 5.2

【解】 设 $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ \text{V}$, 每相负载的阻抗 $Z = 10 + j10 = 10\sqrt{2} \angle 45^\circ \Omega$, 则各相相电流为

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z} = \frac{380 \angle 0^\circ}{10\sqrt{2} \angle 45^\circ} = 26.9 \angle -45^\circ (\text{A})$$

对称得出

$$\dot{I}_{BC} = 26.9 \angle -165^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_{CA} = 26.9 \angle 75^\circ (\text{A})$$

根据式(5.18)得出各线电流为

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ = 46.5 \angle -75^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ = 46.5 \angle -165^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_C = \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ = 46.5 \angle 45^\circ (\text{A})$$

【例 5.5】 对称三相负载分别联结成星形和三角形, 电路如图 5.14 所示, 求两种接线方式下的线电流的关系。

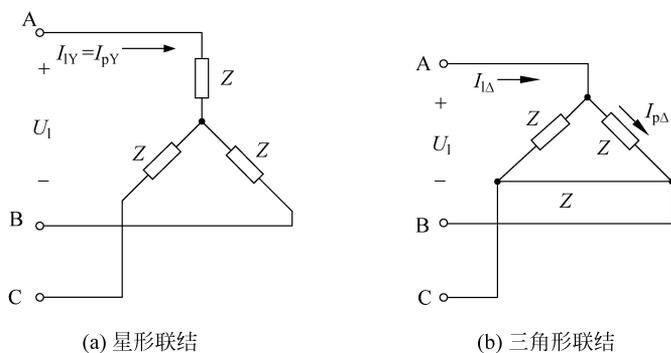


图 5.14 例 5.5 图

【解】 负载为星形联结时, 有

$$I_{LY} = I_{PLY} = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{|Z|}$$

负载为三角形联结时, 有

$$I_{LY} = \sqrt{3} I_{PLY} = \sqrt{3} \frac{U_1}{|Z|}$$

即

$$\frac{I_Y}{I_\Delta} = \frac{1}{3}$$

上述结论在工程实际中常应用于三相笼型电动机的起动环节。因为电动机起动会带来较大的起动电流, 该电流对电动机自身和线路负载都有一定的危害, 因而在起动时, 一些电动机采取降压起动方式。其原理是电动机起动时将其定子绕组连接成星形, 等到转速接近

额定值时再切换接成三角形。这样,起动时定子每相绕组上的电压降为正常工作电压的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$, 起动时的电流降为直接起动时的 $\frac{1}{3}$ 。

5.3.3 三相负载联结方式的选择

灵活运用三相负载的两种联结方式,可以使负载在不同电源条件下正常工作。联结方式要依据电源电压和负载额定电压来选择,其原则是,负载的实际电压应等于其额定电压。

(1) 负载的额定电压等于电源线电压的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 时,负载应采用星形联结方式。

(2) 负载的额定电压等于电源线电压时,负载应采用三角形联结方式。

例如,负载额定电压为 220V,如果电源线电压为 380V,则负载应接成星形,若电源线电压为 220V,则负载应接成三角形。

5.4 三相电路的功率

在三相对称电路中,设 A 相瞬时电压与瞬时电流分别为 $u_A = \sqrt{2}U_p \sin\omega t$ V, $i_A = \sqrt{2}I_p \sin(\omega t - \varphi)$ A,那么 A 相的瞬时功率为

$$p_a(t) = \sqrt{2}U_p \sin\omega t \sqrt{2}I_p \sin(\omega t - \varphi)$$

依据三相电源的对称关系,同样能得到 B、C 两相的瞬时功率,将三相电路瞬时功率相加,得到

$$p(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3U_p I_p \cos\varphi \quad (5.20)$$

从式(5.20)可以得出这样的结论:在对称三相电路中,瞬时总功率为一常量,这种性质称为瞬时功率平衡,这是三相制的一个优点,它使得三相发电机的瞬时输出功率为常值,据此,推动它旋转所需要的机械功率和机械转矩也一定是恒定的,这样就避免了发电机在运转时的震动。

由于瞬时总功率是一个常数,所以平均功率就等于这个常数,即

$$P = 3U_p I_p \cos\varphi \quad (5.21)$$

其中, U_p 、 I_p 分别为每相的相电压与相电流有效值, φ 为二者的相位差。

由于三相电源、三相负载的线电压、线电流比它们的相电压、相电流更容易测量,所以三相功率一般用线电压与线电流表示,设线电压、线电流有效值分别为 U_1 、 I_1 ,当负载作星形联结时有

$$U_p = \frac{U_1}{\sqrt{3}}, \quad I_p = I_1$$

代入式(5.21),得

$$P = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi$$

负载作三角形联结时,有

$$U_p = U_1, \quad I_p = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$$

则有

$$P = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi$$

可见无论哪种情况,都有

$$P = 3U_p I_p \cos\varphi = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi \quad (5.22)$$

其中功率因数仍然指的是每相负载的功率因数。

同理,对称三相负载的无功功率也等于三相无功功率的代数和,无论是何种联结方式都有

$$Q = 3U_p I_p \sin\varphi = \sqrt{3}U_1 I_1 \sin\varphi \quad (5.23)$$

三相交流电路的视在功率定义为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.24)$$

将式(5.22)和式(5.23)代入式(5.24),得到

$$S = 3U_p I_p = \sqrt{3}U_1 I_1 \quad (5.25)$$

值得注意的是,上式是在各相负载对称的前提下得出的计算公式,在不对称三相电路中,各相电压与电流之间没有特定的对称关系,仍依照式(5.24)计算,非对称负载的视在功率并不等于各相视在功率的代数和,即 $S \neq S_a + S_b + S_c$ 。

【例 5.6】 已知三相电源线电压为 380V,对称三相负载,负载 $Z = 10 \angle 36.9^\circ \Omega$,试求当三相负载为星形联结和三角形联结时的平均功率。

【解】 星形联结:

$$U_1 = 380\text{V}, \quad I_1 = I_p = \frac{380/\sqrt{3}}{10} = 22(\text{A})$$

$$P = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 22 \times \cos 36.9^\circ = 11.58(\text{kW})$$

三角形联结:

$$U_1 = U_p = 380\text{V}, \quad I_1 = \sqrt{3} I_p = \sqrt{3} \times \frac{380}{10} = 65.82(\text{A})$$

$$P = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 65.82 \times \cos 36.9^\circ = 34.7(\text{kW})$$

【例 5.7】 额定电压为 220V 的三相对称负载,其阻抗为 $Z = 6.4 + j4.8\Omega$,欲接入线电压为 220V 的三相电网上。

(1) 应如何联结? 其总功率为多少?

(2) 如接入线电压为 380V 的电网,应如何联结? 总功率为多少?

【解】 (1) 线电压与相电压相等,所以应为三角形联结:

$$P = 3U_p I_p \cos\varphi = 3 \times 220 \times \frac{220}{\sqrt{6.4^2 + 4.8^2}} \times \frac{6.4}{\sqrt{6.4^2 + 4.8^2}} = 14.5(\text{kW})$$

(2) 线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,所以应为星形联结:

$$P = 3U_p I_p \cos\varphi = 3 \times 220 \times \frac{220}{\sqrt{6.4^2 + 4.8^2}} \times \frac{6.4}{\sqrt{6.4^2 + 4.8^2}} = 14.5(\text{kW})$$

5.5 工程应用——智能电网

经过近年大量研究与探索,世界各国逐渐认同电网智能化建设的必要性,并倾向于使用“Smart Grid”表示智能电网,中国将之翻译为“智能电网”,并在国内统一推广这一概念。

在2009年5月召开的“2009特高压输电技术国际会议”上,中国国家电网公司正式提出“坚强智能电网”的概念,并计划于2020年基本完成中国的坚强智能电网。

智能电网是将先进的传感量测技术、信息通信技术、分析决策技术、自动控制技术和能源电力技术相结合,并与电网基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。

坚强智能电网是以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础,以通信信息平台为支撑,具有信息化、自动化、互动化特征,包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节,覆盖所有电压等级,实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合的现代电网。

智能电网主要内涵是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动,它将推动智能小区、智能城市的发展,提升人们的生活品质。

(1) 让生活更便捷。家庭智能用电系统既可以实现对空调、热水器等智能家电的实时控制和远程控制,又可以为电信网、互联网、广播电视网等提供接入服务,还能够通过智能电表实现自动抄表和自动转账交费等功能。

(2) 让生活更低碳。智能电网可以接入小型家庭风力发电和屋顶光伏发电等装置,并推动电动汽车的大规模应用,从而提高清洁能源消费比重,减少城市污染。

(3) 让生活更经济。智能电网可以促进电力用户角色转变,使其兼有用电和售电两重属性;能够为用户搭建一个家庭用电综合服务平台,帮助用户合理选择用电方式,节约用能,有效降低用能费用支出。

在智能电网建设中,信息通信技术将成为支撑智能电网发展的主要技术手段,带给人们信息化、自动化、互动化的丰富体验。

例如,通过信息通信网络技术构建智能电网的神经系统,用以感知、收集外部信息并完成信息加工、整合,进而在电网中枢的控制下,对外界做出反应。

在智能电网中,人们可以通过多媒体交互的方式获取更详尽、更准确、更实时的电力相关信息,比如通过空间信息技术进行地理定位和遥感;运用物联网技术,实现人与人、人与物,乃至物与物之间随时随地的沟通,有效地对电力传输系统的电厂、大坝、变电站、高压输电线路直至用户终端进行智能化处理,对电力系统的运行状态进行实时监控和自动故障处理,确定电网整体的健康水平,触发可能导致电网故障发展的早期预警、确定是否需要立即进行检查或采取相应措施,分析电网系统的故障、电压降低、电能质量差、过载和其他不良状态,并基于分析结果采取适当控制行动。

习题

5.1 已知对称星形联结三相电源的A相电压为 $u_{AN} = 311\cos(\omega t - 30^\circ)\text{V}$,试写出各线电压瞬时表达式。

5.2 星形联结的对称三相电源的相序为 A、B、C, 已知相电压 $u_A = 10\sin\omega t \text{ V}$, 请问线电压 u_{CA} 的表达式是什么?

5.3 在某对称星形连接的三相负载电路中, 已知线电压 $u_{AB} = 380\sqrt{2}\sin\omega t \text{ V}$, 写出 C 相的相电压有效值相量。

5.4 电路如图 5.15 所示, 对称三相电路中, 若 $\dot{U}_{AB} = 380\angle 30^\circ \text{ V}$, $Z = (100 + j100)\Omega$, 求 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 和 \dot{I}_C 。

5.5 三相对称负载连成三角形接于线电压 380V 的三相电源上, 已知每相负载 $Z = (8 + j6)\Omega$ 。求: 负载端的相电压、相电流、线电流。

5.6 如图 5.16 所示负载三角形联结的对称三相电路中, 已知负载阻抗 $Z = R + jX_L = 38\angle 30^\circ \Omega$ 。若线电流 $\dot{I}_A = 10\sqrt{3}\angle -60^\circ \text{ A}$, 求线电压的有效值。

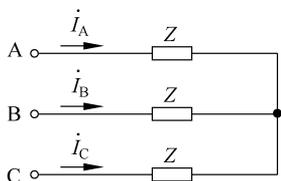


图 5.15 习题 5.4 图

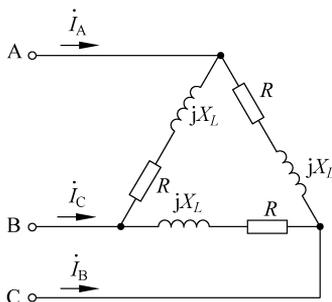


图 5.16 习题 5.6 图

5.7 对称三相电源的线电压 $U_L = 230\text{V}$, 对称负载阻抗 $Z = (12 + j16)\Omega$, 忽略端线阻抗, 负载分别为星形和三角形联结时, 负载的线电流之比是多少?

5.8 一个联结成三角形的负载, 其各相阻抗 $Z = (16 + j24)\Omega$, 接在线电压为 380V 的对称三相电源上。

- (1) 求线电流和负载相电流。
- (2) 设负载中一相断路, 求线电流和相电流。
- (3) 设一条端线断路, 再求线电流和相电流。

5.9 星形联结的负载接于线电压为 380V 的对称三相电源上, 没有中线联结, 各相负载的电阻分别为 10Ω 、 12Ω 、 15Ω , 试求各相电压。

5.10 某楼电灯发生故障, 第二层和第三层楼的所有电灯突然都暗淡下来, 而第一层楼的电灯亮度未变, 试问这是什么原因? 该楼的电灯是如何连接的? 同时又发现第三层楼的电灯比第二层楼的要暗一些, 这又是什么原因?

5.11 如图 5.17 所示的电路是一种相序指示器, 由一个电容器 C 和两只信号灯组成。将相序指示器 3 个端头接到相序未知的 3 根相线上, 如果 $X_C = R_B = R_C = R$, $U_p = 220\text{V}$, 试证明: 如果电容器所接的是 A 相, 则灯光较亮的是 B 相, 较暗的是 C 相, 从而确定电源的相序 A、B、C。

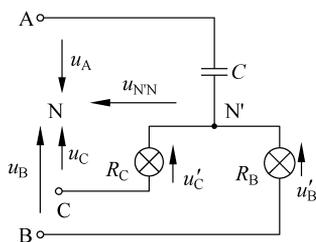


图 5.17 习题 5.11 图



视频 5.3



视频 5.4



视频 5.5



视频 5.6



视频 5.7

5.12 已知星形联结的负载各相阻抗为 $Z = (10 + j15)\Omega$, 接于线电压为 380V 的对称三相电源, 求此负载的功率因数和吸收的平均功率。

5.13 有一个三相异步电动机, 其绕组接成三角形, 接在线电压 $U_1 = 380\text{V}$ 的电源上, 从电源所取的功率 $P_1 = 11.43\text{kW}$, 功率因数 $\cos\varphi = 0.87$, 试求电动机的相电流和线电流。

5.14 某三相对称负载总有功功率为 5.5kW, 现按三角形联结法把它接在线电压为 380V 的三相电源线路中, 设此刻该负载取用的线电流 $I_1 = 19.5\text{A}$, 求此负载的相电流 I_p 、功率因数和每相阻抗的模。



5.15 如果电压相等, 输送功率相等, 距离相等, 线路功率损耗相等, 则三相输电线(设负载对称)的用铜量为单相输电线的用铜量的 $3/4$ 。试证明之。