

第 3 章

三相交流电路及其应用

学习目标

知识目标

- 了解三相电路中三相电源的连接及线电压、相电压的关系；三相负载的连接及线电流、相电流的关系。
- 掌握对称和不对称三相电路的分析与计算。
- 掌握三相电路的安装和测量方法。

技能目标

- 能够进行三相电源 Y 连接和 Δ 连接。
- 能够对功率表进行连接和读数。
- 能够连接三相电路并测量功率。

 教学设计



实例引导

1888年,特斯拉发明了交流多相电力传输系统,促进了交流电的广泛应用,从而推动了第二次工业革命。

在低压配电网中,输电线路通常采用三相四线制。三相四线制供电可以同时获得相电压和线电压,在低压网络中既可以接三相动力负载,也可以接单相照明负载,还可以解决三相负荷不平衡、中性点位移的问题。三相电路可以看成3个频率相同但相位不同的单相电源的组合,如图3-0所示。

对本章介绍的三相电路而言,前面讨论的对单相交流电路分析计算的所有方法完全适用。本章重点介绍三相电源的连接及三相四线制的概念,对称三相电路的分析与计算方法,三相电路功率的分析。



图3-0 案例图

3.1 三相对称电源

3.1.1 三相电源的基本知识

1. 三相电动势的产生

三相正弦交流电压是由三相交流发电机产生的。在三相交流发电机中,如果定子中放3个绕组(线圈) $A \rightarrow X$ 、 $B \rightarrow Y$ 、 $C \rightarrow Z$,由首端(起始端)指向末端,三绕组空间位置各差 120° ,转子装有磁极并以 ω 的速度旋转,则在3个绕组中就会产生3个单相电动势。3个完全相同的绕组(又称为电枢绕组)在空间位置上互差 120° 。每一个绕组称为一相,合称三相绕组。三相绕组的始端分别用A、B、C表示,末端分别用X、Y、Z表示。三相分别称为A相、B相、C相绕组,如图3-1所示。

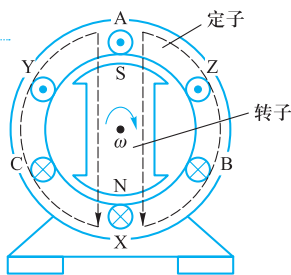


图3-1 三相对称电动势的产生

2. 对称三相电源电压

振幅相等、频率相同,在相位上互差 120° 的三个电动势称为对称三相电动势。三相绕组首末端间电压称为三相对称电源电压,其瞬时值的数学表达式为

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

式中, U_m 为每相电源电压的最大值。

如果以A相电压 U_A 作为参考值,则三相电压的相量形式为

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U_m \angle 0^\circ \\ \dot{U}_B = U_m \angle -120^\circ \\ \dot{U}_C = U_m \angle 120^\circ \end{cases}$$

对称三相电源电压的波形图如图 3-2 所示，相量图如图 3-3 所示。

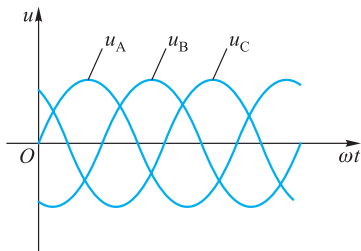


图 3-2 对称三相电源电压波形图

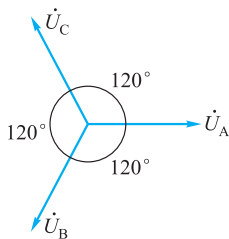


图 3-3 对称三相电源电压相量图

由图 3-3 可以看出，对称三相电源电压满足 $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$ ，即对称三相电源电压的相量之和为零。通常三相发电机产生的都是对称三相电源。本书提到三相电源时，如无特殊说明都指对称三相电源。

3. 相序

三相电源电压达到最大值（振幅）的先后顺序称为相序。 u_A 比 u_B 超前 120° ， u_B 比 u_C 超前 120° 。这种相序称为正相序或顺相序，即 A-B-C-A...；反之，如果三相电压的变化顺序是 A-C-B-A...，这种相序称为负相序或逆相序。

相序是一个十分重要的概念。为使电力系统能够安全可靠地运行，通常统一规定技术标准，在配电盘上用黄色标出 A 相，用绿色标出 B 相，用红色标出 C 相。

3.1.2 三相电源的连接

三相电源中三相绕组的连接方式有两种：一种是 Y（又称为星形）连接，一种是 Δ （又称为三角形）连接，如图 3-4 所示。

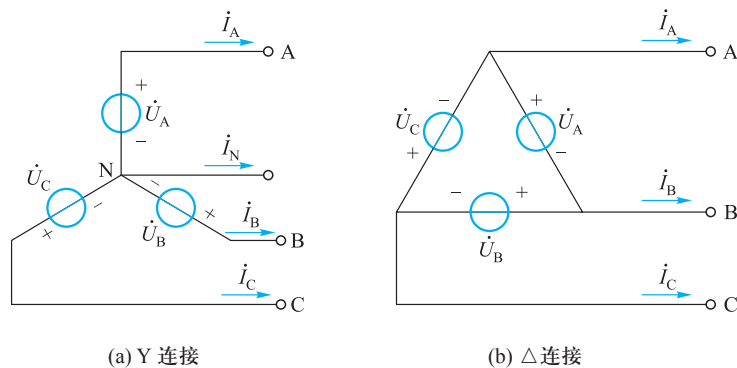


图 3-4 三相电源的两种连接方式

仿真实验
三相对称交流
电源



提示

对称三相电源电压三相的有效值相等，频率相同，各相之间的相位差为 120° 。

提示

现在三相电源除了用 A、B、C 表示，还可以用 U、V、W 表示。

1. 三相电源的 Y 连接

图 3-4(a) 所示的 Y 连接方式中, 公共连接点 N 称为中点。从中点引出的导线称为中线或零线。从端点 A、B、C 引出的 3 根导线称为端线或相线, 俗称火线。这种由 3 根火线和 1 根中线向外供电的方式称为三相四线制供电方式(通常在低压配电网中采用)。除了三相四线制连接方式以外, 其他连接方式都属于三相三线制。

端线之间的电压称为线电压, 分别用 \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{CA} 表示, 其值常用 U_L 表示。每一相线与中线间的电压称为相电压, 分别为 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C , 通常用 U_P 表示。

根据分析, Y 连接中各线电压 U_L 与对应的相电压 U_P 的相量关系为

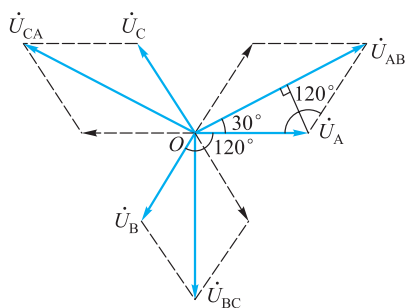


图 3-5 三相电源 Y 连接时电压相量图

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3} \dot{U}_A \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \sqrt{3} \dot{U}_B \angle 30^\circ \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \sqrt{3} \dot{U}_C \angle 30^\circ \end{cases}$$

即, 各线电压 U_L 的相位都超前其对应的相电压 U_P 的相位 30° , 而且满足 $U_L = \sqrt{3} U_P$ 。

线电压和相电压的相量关系如图 3-5 所示。

分析结论如下。

- ① 三相四线制的相电压和线电压都是对称的。
- ② 线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 线电压的相位超前对应的相电压 30° 。



提示

我国低压三相四线制供电系统中, 电源相电压有效值为 220 V, 线电压有效值为 380 V。

2. 三相电源的 Δ 连接

图 3-4(b) 所示的 Δ 连接中, 是把三相电源依次按首末端连接成一个回路, 再从端子 A、B、C 引出导线。 Δ 连接的三相电源的相电压和线电压相等, 即

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C$$

这种没有中线, 只有三根相线的输电方式称为三相三线制。

特别需要注意的是, 在工业用电系统中如果只引出三根导线(三相三线制), 那么就都是火线(没有中线), 这时所说的三相电压大小都指线电压 U_L 。而民用电源则需要引出中线, 所说的电压大小都指相电压 U_P 。

例 3-1 已知发电机三相绕组产生的电动势大小都是 $U = 220 \text{ V}$, 试求: ① 三相电源为 Y 连接时的相电压 U_P 与线电压 U_L ; ② 三相电源为 Δ 连接时的相电压 U_P 与线电压 U_L 。

解: ① 三相电源 Y 连接时:

$$\text{相电压 } U_P = E = 220 \text{ V}$$

$$\text{线电压 } U_L = \sqrt{3} U_P = 380 \text{ V}$$

② 三相电源 Δ 连接时:

$$\text{相电压 } U_P = U = 220 \text{ V}$$

$$\text{线电压 } U_L = U_P = 220 \text{ V}$$

3.2 三相负载的Y连接

三相负载可以是三相电器,如三相交流电动机;也可以是单向负载的组合,如电灯。对于三相线路而言,通常单相负载应该尽量均匀地分布在各相上。至于连接在火线与零线之间,还是连接在两根火线之间,取决于负载的额定电压。三相负载接入电路的原则是对称原则,电源加在负载上的电压要等于负载的额定电压。三相负载的3个接线端总与3根火线相连。对于三相电动机而言,负载的连接形式由内部结构决定。三相负载的连接方式也有两种:Y连接和 Δ 连接。根据三相电源与负载的不同连接方式,可以组成Y-Y、Y- Δ 、 Δ -Y、 Δ - Δ 连接的三相电路。本节主要介绍Y-Y连接方式,如图3-6(a)所示。

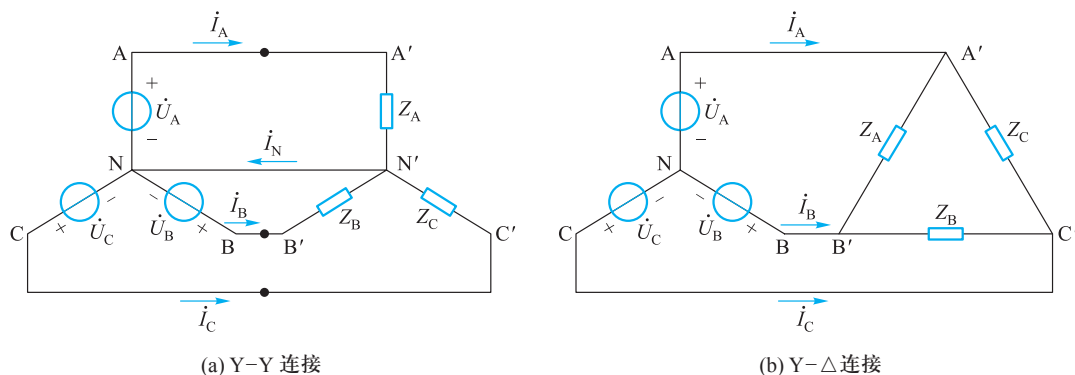


图 3-6 电源与负载的不同连接方式

三相负载中的相电压和线电压、相电流和线电流的定义为:相电压、相电流是指各相负载阻抗的电压、电流。三相负载的3个端子A'、B'、C'向外引出的导线中的电流称为电路的线电流,任意两个端子之间的电压称为负载的线电压。

1. 连接方式

在三相四线制系统中,三相电源的一根相线和零线之间的电压(相电压)为220V。负载如果接成图3-6(a)所示的形式,则每相负载的电压为220V,这种接法称为Y连接。如图3-6(a)所示, Z_A 、 Z_B 、 Z_C 表示三相负载。如果 $Z_A = Z_B = Z_C = Z$,称为对称负载;否则,称为不对称负载。三相电路中,如果电源和负载都对称,称为三相对称电路。

2. 电路计算

在三相四线制Y连接电路中,负载相电流等于对应的线电流。如果忽略导线阻抗,则各相电流为

$$i'_A = \frac{\dot{U}'_A}{Z_A} = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}, \quad i'_B = \frac{\dot{U}'_B}{Z_B} = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}, \quad i'_C = \frac{\dot{U}'_C}{Z_C} = \frac{\dot{U}_C}{Z_C}$$

动画
三相负载的Y
连接



仿真实验
三相负载的Y
连接



所谓三相负载对称, 即 $Z_A = Z_B = Z_C = Z$, 包含 $|Z_A| = |Z_B| = |Z_C| = |Z|$ 和 $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$, 也就是各相的负载数值及性质都相同。

如果 Y 连接的三相负载对称, 则有

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{\dot{U}_A}{|Z|} \angle -\varphi, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z} = \frac{\dot{U}_B}{|Z|} \angle -\varphi, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z} = \frac{\dot{U}_C}{|Z|} \angle -\varphi$$

所以三相电流也是对称的。这时只需要算出任意一相的电流, 就可以知道另外两相的电流。

三相负载对称时, 中性线电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ 。

提示

因为电路对称, 所以三相电流瞬时值的代数和为零。从而, 可以省去中性线不用, 电路就变成三相三线制了。例如, 在发电厂与变电站、变电站与三相电动机之间, 因为负载对称, 就采用三相三线制传输。

例 3-2 在负载为 Y 连接的对称三相电路中, 已知每相负载都是 $|Z| = 50 \Omega$, 设线电压为 380 V, 求各相电流和线电流。

解: 在对称 Y 连接负载中, 相电压 $U_{YP} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \approx 220 \text{ V}$

$$\text{相电流为 } I_{YP} = \frac{U_{YP}}{|Z|} = \frac{220}{50} \text{ A} = 4.4 \text{ A}$$

负载为 Y 连接时线电流与相电流相等。

由本例可知: 对称三相电路的计算可以归结到一相来进行。只要求出其中一相的电压或电流, 其他两相就可以根据对称关系直接写出。

3. 不对称三相电路的分析

在三相电路中, 三相电源、三相输电线阻抗总是对称的, 所以三相负载不对称是引起三相电路不对称的主要原因。例如, 由单相用电器或照明设备组成三相负载就属于这种情况。分析电路时, 要求分别算出每相电流及中线电流。

例 3-3 电路如图 3-7 所示, $U_1 = 380 \text{ V}$, 求各相电流、线电流、中线电流。

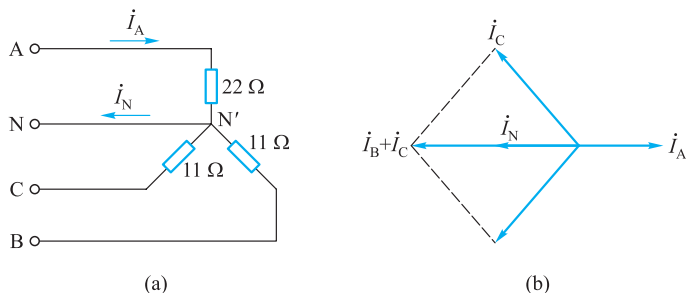


图 3-7 例 3-3 图

仿真实验
不对称负载电路
和中线作用



解：电路为不对称三相负载，但装设中线。显然，三相负载分别承受各相电源电压。

设 $\dot{U}_A = \frac{380}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \text{ V} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$ ，则 $\dot{U}_B = 220 \angle -120^\circ \text{ V}$ ， $\dot{U}_C = 220 \angle 120^\circ \text{ V}$ 。

可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{220 \angle 0^\circ}{22} \text{ A} = 10 \angle 0^\circ \text{ A} \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{220 \angle -120^\circ}{11} \text{ A} = 20 \angle -120^\circ \text{ A} \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{220 \angle 120^\circ}{11} \text{ A} = 20 \angle 120^\circ \text{ A} \\ \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = -10 \text{ A} \end{aligned}$$

三相负载在很多情况下是不对称的。最常见的照明电路就是不对称负载 Y 连接的三相电路。如果无中线，可能使某一相电压过低，这一相的用电设备不能正常工作；也可能使某一相电压过高，损坏这一相的用电设备。所以，中线对于电路的正常工作及安全非常重要，它可以保证 Y 连接的不对称负载的相电压对称，使各用电器都能正常工作，而且互不影响。

在三相四线制供电线路中，规定中线上不允许安装熔断器、开关等装置。为了增强机械强度，有的还加有钢芯；另外通常还要把中线接地，使它与大地电位相同，以保障安全。

分析结论如下。

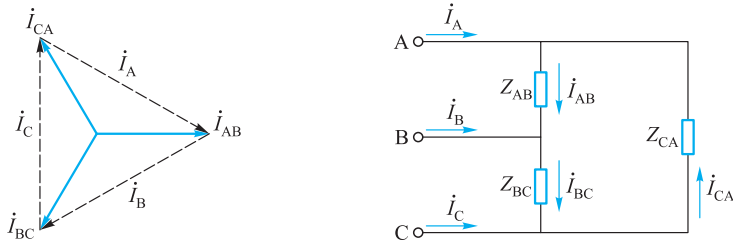
负载为 Y 连接时：

- ① 三相对称电路电源线电压是负载两端相电压的 $\sqrt{3}$ 倍；
- ② 每一相相线的线电流等于流过负载的相电流；
- ③ 对于对称负载，可去掉中性线，变为三相三线制；
- ④ 对于不对称负载，则必须加中线，采用三相四线制。

3.3 三相负载的 Δ 连接

3.3.1 电路连接方法

把三相负载分别接到三相交流电源的每两根相线之间，这种连接方法称为三角形连接，用符号 Δ 表示，如图 3-8(a) 所示。



(a) 相、线电流相量图

(b) 负载 Δ 连接

图 3-8 负载 Δ 连接及相、线电流相量图

仿真实验
三相负载的 Δ
连接



Δ 连接中的各相负载全都接在了两根相线之间。所以,电源的线电压等于负载两端的电压,即负载的相电压。因此, Δ 连接中相电压与线电压相等。

$$U_{\Delta P} = U_{\Delta L}$$

3.3.2 电路计算

三相负载的 Δ 连接方法如图3-8(b)所示,图中 Z_{AB} 、 Z_{BC} 、 Z_{CA} 分别为三相负载。显然,负载为 Δ 连接时,负载相电压与线电压相同,即

$$U_l = U_p$$

设每相负载中的电流分别为 \dot{I}_{AB} 、 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{CA} ,线电流为 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 。则负载相电流为

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}$$

如果三相负载为对称负载,即 $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z$,则有

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z}$$

Δ 连接相电流和线电流的相量图如图3-7(a)所示。由相量图可知,相电流与线电流的关系为

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ$$

提示

在三相不对称负载为 Δ 连接时,相电流是不对称的,线电流也是不对称的,各相电流必须分别计算。

因为相电流是对称的,所以线电流也是对称的,即 $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$,只要求出一个线电流,其他两个即可依次写出。线电流有效值是相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,相位依次滞后对应相电流相位 30° 。

分析结论如下。

当三相对称负载为 Δ 连接时:

- ① 相电压等于线电压;
- ② 线电流的大小为相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

例3-4 图3-9所示的三相对称电路,电源线电压为380V, Y连接负载阻抗 $Z_Y = 22 \angle -30^\circ \Omega$, Δ 连接的负载阻抗 $Z_{\Delta} = 38 \angle 60^\circ \Omega$ 。求: ① Δ 连接的各相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C ; ② Δ 连接的负载相电流 \dot{I}_{AB} 、 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{CA} ; ③ 传输线电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 。

解: 根据题意,设 $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ \text{V}$ 。

① 由线电压和相电压的关系,可得出Y连接的负载各相电压为

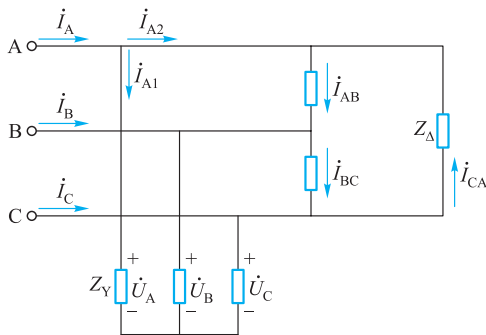


图3-9 例3-4图

$$\dot{U}_A = \frac{380/\angle 0^\circ - 30^\circ}{\sqrt{3}} \text{ V} = 220/\angle -30^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}_B = 220/\angle -150^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}_C = 220/\angle 90^\circ \text{ V}$$

$$\textcircled{2} \Delta \text{连接的负载相电流为 } \dot{I}_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_\Delta} = \frac{380/\angle 0^\circ \text{ V}}{38/\angle 60^\circ \Omega} = 10/\angle -60^\circ \text{ A}$$

$$\text{因为对称, 所以} \quad \dot{I}_{BC} = 10/\angle -180^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}_{CA} = 10/\angle 60^\circ \text{ A}$$

③ 传输线 A 上的电流为 Y 负载的线电流 \dot{I}_{A1} 与 Δ 负载线电流 \dot{I}_{A2} 的和。其中

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}_A}{Z_Y} = \frac{220/\angle -30^\circ \text{ V}}{22/\angle -30^\circ \Omega} = 10/\angle 0^\circ \text{ A}$$

\dot{I}_{A2} 是相电流 \dot{I}_{AB} 的 $\sqrt{3}$ 倍, 相位滞后 \dot{I}_{AB} 相位 30° , 即

$$\dot{I}_{A2} = \sqrt{3}\dot{I}_{AB}/\angle -30^\circ = \sqrt{3} \times 10/\angle -60^\circ - 30^\circ \text{ A} = 10\sqrt{3}/\angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = 10/\angle 0^\circ \text{ A} + 10\sqrt{3}/\angle -90^\circ \text{ A} = (10 - j10\sqrt{3})\text{ A} = 20/\angle -60^\circ \text{ A}$$

$$\text{因为对称, 所以} \quad \dot{I}_B = 20/\angle -180^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}_C = 20/\angle 60^\circ \text{ A}$$

3.4 三相电路的功率

3.4.1 有功功率的计算

无论三相负载是否对称, 也无论负载是 Y 连接还是 Δ 连接, 一个三相电源发出的总有功功率等于电源每相发出的有功功率之和, 一个三相负载接受的总有功功率等于每相负载接受的有功功率之和, 即

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

式中, 电压 U_A 、 U_B 、 U_C 分别为三相负载的相电压; I_A 、 I_B 、 I_C 分别为三相负载的相电流; φ_A 、 φ_B 、 φ_C 分别为三相负载的阻抗角或这个负载对应的相电压与相电流的夹角。

当负载对称时, 各相的有功功率是相等的, 因此, 总的有功功率可以表示为

$$P = 3U_p I_p \cos \varphi$$

实际上, 三相电路的相电压和相电流有时难以获得, 但在三相对称电路中, 负载 Y 连接时, $U_L = \sqrt{3} U_p$, $I_L = I_p$; 负载 Δ 连接时, $U_L = U_p$, $I_L = \sqrt{3} I_p$ 。所以, 无论负载是哪种接法, 都有

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

因此上式又可表示为

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

式中, U_L 、 I_L 分别是线电压和线电流, $\cos \varphi$ 仍是每相负载的功率因数。因为线电压或线电流便于实际测量, 而且三相负载铭牌上标识的额定值也都是指线电压和线电流, 所以上式是计算有功功率的常用公式。但需要注意的是, 这个公式只适用于对称三相电路。

3.4.2 无功功率的计算

三相负载的无功功率等于各项无功功率之和, 即

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C$$

当负载对称时, 各相的无功功率相等。因此, 总的有功功率可表示为

$$Q = 3U_P I_P \sin \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi$$

3.4.3 视在功率的计算

三相负载的视在功率为

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

对称三相电路的视在功率为

$$S = 3U_P I_P = \sqrt{3} U_L I_L$$

3.4.4 瞬时功率的计算

三相电路的瞬时功率也是三相负载瞬时功率之和。对称三相电路各相的瞬时功率分别为

$$p_A = u_A i_A = \sqrt{2} U_P \sin \omega t \times \sqrt{2} I_P \sin (\omega t - \varphi) = U_P I_P [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)]$$

$$\begin{aligned} p_B &= u_B i_B = \sqrt{2} U_P \sin (\omega t - 120^\circ) \times \sqrt{2} I_P \sin (\omega t - 120^\circ - \varphi) \\ &= U_P I_P [\cos \varphi - \cos (2\omega t - 240^\circ - \varphi)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_C &= u_C i_C = \sqrt{2} U_P \sin (\omega t + 120^\circ) \times \sqrt{2} I_P \sin (\omega t + 120^\circ - \varphi) \\ &= U_P I_P [\cos \varphi - \cos (2\omega t + 240^\circ - \varphi)] \end{aligned}$$

$$\text{因为} \quad \cos (2\omega t - \varphi) + \cos (2\omega t - 240^\circ - \varphi) + \cos (2\omega t + 240^\circ - \varphi) = 0$$

$$\text{所以} \quad p = p_A + p_B + p_C = 3U_P I_P \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi = P$$

上式表明, 对称三相电路的瞬时功率是定值, 而且等于平均有功功率。这是对称三相电路的一个优越性能。若三相负载是电动机, 则因为三相瞬时功率是定值, 所以电动机的转矩是恒定的; 而因为电动机转矩的瞬时值是和总瞬时功率成正比的, 避免了机械转矩变化引起的机械振动, 所以电动机运转非常平稳。

3.4.5 三相功率的测量

可以用单相功率表或三相功率表测量三相交流电路的功率。

用单相功率表测量时, 根据三相负载的情况, 可以采用一表法、二表法或三表法。

(1) 一表法

用 1 个单相功率表测量三相功率的方法称为一表法。这种方法适用于三相对称电路。三相负载的总功率应为此表读数的 3 倍。

(2) 二表法

用 2 个功率表测三相功率的方法称为二表法，其接线如图 3-10 所示。这种方法适用于测量对称或不对称、 Δ 连接或 Y 连接的三相三线制负载的功率。三相电路总功率应为两个功率表读数的代数和。

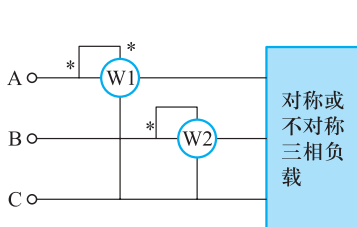


图 3-10 二表法

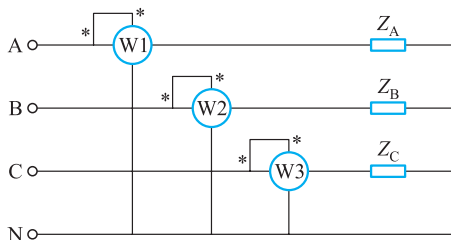


图 3-11 三表法

(3) 三表法

用 3 个功率表测量三相功率的方法称为三表法，其接线如图 3-11 所示。这种方法适用于测量三相四线制不对称负载的功率。三相总功率等于 3 个功率表读数之和，即

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

例 3-5 图 3-12 所示的电路中，已知一组 Y 连接的对称负载，接在线电压为 380 V 的对称三相电源上，每相负载的复阻抗 $Z = 12 + j16 \Omega$ 。求：

① 各负载的相电压及相电流；② 这个三相电路的 P 、 Q 、 S 。

解：① 令线电压 $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$ 。在对称三相三线制电路中，负载电压与电源电压对应相等，而且 3 个相电压也对称，即

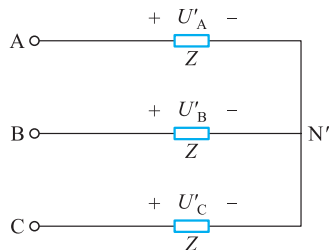


图 3-12 例 3-5 图

$$\dot{U}'_A = \frac{380 \angle (0^\circ - 30^\circ)}{\sqrt{3}} \text{ V} = 220 \angle -30^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}'_B = 220 \angle -150^\circ \text{ V},$$

$$\dot{U}'_C = 220 \angle 90^\circ \text{ V}$$

负载相电流也对称，即

$$\dot{I}'_A = \frac{\dot{U}'_A}{Z} = \frac{220 \angle -30^\circ}{12 + j16} \text{ A} = 11 \angle -83^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}'_B = \frac{\dot{U}'_B}{Z} = 11 \angle -203^\circ \text{ A} = 11 \angle 157^\circ \text{ A},$$

$$\dot{I}'_C = \frac{\dot{U}'_C}{Z} = 11 \angle 37^\circ \text{ A}$$

② 根据有功功率、无功功率、视在功率的计算公式，可得

仿真实验
三相电路功率的
测量



$$P = 3 \dot{U}'_A I_A \cos \varphi = 3 \times 220 \times 11 \cos 53^\circ \text{ W} = 4\,370 \text{ W}$$

$$Q = 3 \dot{U}'_A I_A \sin \varphi = 3 \times 220 \times 11 \sin 53^\circ \text{ var} = 5\,800 \text{ var}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ V} \cdot \text{A} = 7\,262 \text{ V} \cdot \text{A}$$

例 3-6 一台三相异步电动机，定子绕组按 Y 连接方式与线电压为 380 V 的三相交流电源相连。测得线电流为 6 A，总有功功率为 3 kW。求各相绕组的等效电阻 R 和等效感抗 X_L 的值。

解：

$$\cos \varphi = \frac{3\,000}{3 \times 220 \times 6} \approx 0.758, \quad |Z| = \frac{380}{\sqrt{3} \times 6} \Omega \approx 36.7 \Omega$$

$$R = 36.7 \times 0.758 \Omega \approx 27.8 \Omega, \quad X_L = 36.7 \times \sin(\arccos 0.758) \Omega \approx 23.9 \Omega$$

例 3-7 一组对称三相负载，每相等效电阻为 $R = 6 \Omega$ ，等效感抗为 $X_L = 8 \Omega$ ，接在电压为 380 V（线电压）的三相电源上，求：

- ① 当负载 Y 连接时消耗的功率。
- ② 误将负载连接成 Δ 连接时消耗的功率。

解：

$$\text{① 负载 Y 连接时 } P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi, \quad U_L = 380 \text{ V}$$

$$\text{式中 } I = I_p = \frac{U_L}{|Z|} = \frac{380}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{6^2 + 8^2}} \text{ A} = 22 \text{ A}, \quad \cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 0.6$$

$$\text{所以 } P = \sqrt{3} \times 380 \times 22 \times 0.6 \text{ W} = 8\,688 \text{ W} \approx 8.7 \text{ kW}$$

② 负载误接成 Δ 时

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi, \quad U_L = 380 \text{ V}$$

$$\text{式中 } I_L = \sqrt{3} I_p = \sqrt{3} \frac{U_p}{|Z|} = \sqrt{3} \frac{380}{\sqrt{6^2 + 8^2}} \text{ A} = 65.9 \text{ A}, \quad \cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 0.6$$

$$\text{所以 } P = \sqrt{3} \times 380 \times 65.8 \times 0.6 \text{ W} = 25\,985 \text{ W} \approx 26 \text{ kW}$$

以上计算结果表明，如果误将负载连接成 Δ ，负载消耗的功率是 Y 连接时的 3 倍，负载可能被损坏。这时，每相负载上的电压是 Y 连接时的 $\sqrt{3}$ 倍，所以每相负载的电流也是 Y 连接时的 $\sqrt{3}$ 倍。

分析结论如下。

① 对称负载为 Y 连接或 Δ 连接时，线电压是相同的，相电流是不相等的。 Δ 连接时的线电流是 Y 连接时线电流的 3 倍。

② φ 仍然是相电压与相电流之间的相位差，而不是线电压与线电流之间的相位差。也就是说，功率因数是指每相负载的功率因数。

③ 负载是 Δ 连接时的功率是相同条件下 Y 连接时的 3 倍。



3.5 仿真实例：三相四线制不对称负载电路

三相交流电机的电枢有3组绕组。在向外供电时，把3组绕组的末端X、Y、Z连在一起，从连接点引出一条零线（中线），再从绕组另一端A、B、C各引出一条线，这种连接方法称为三相四线制。

Multisim 电路仿真如图 3-13 所示。电路接入不对称负载时，负载线电压、相电压依然保持不变，未发生中点位移现象。

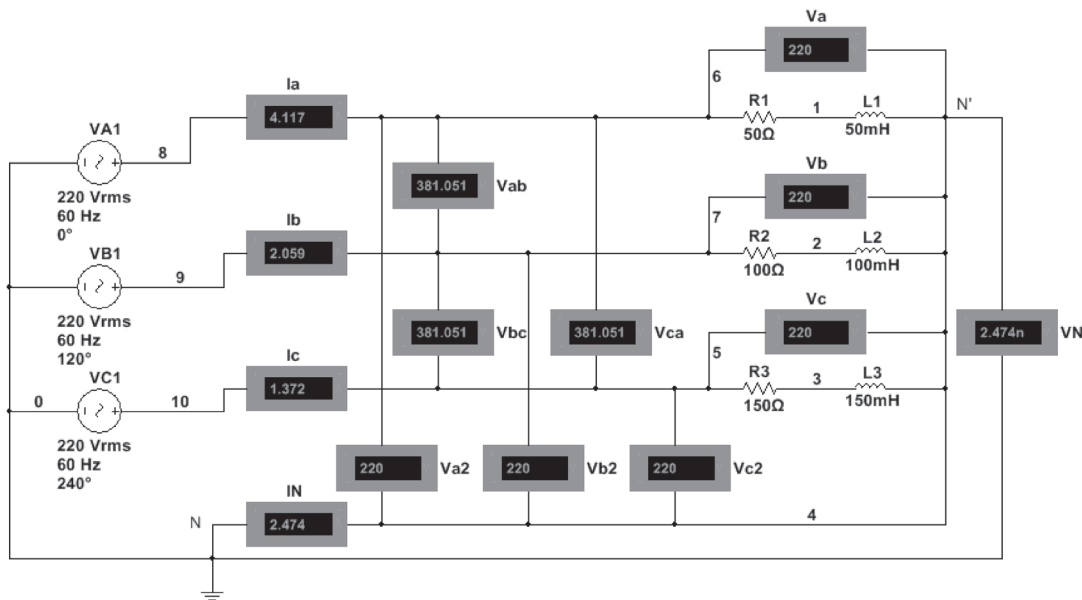


图 3-13 三相四线制不对称负载电路仿真

3.6 技能训练：测试三相电路负载

一、训练目的

1. 测试三相负载的 Y 连接和 Δ 连接的线电压和相电压；线电流和相电流之间的关系。
2. 了解三相四线制电路中中点位移的概念，进一步理解中线的作用。
3. 掌握测量三相电路有功功率的方法。

二、训练设备

电工实验操作柜	1 组
交流电流表	1 个
交流电压表	1 个
功率表	1 个
测电流插头及导线	若干

三、训练内容

1. 三相负载 Y 连接电路测试

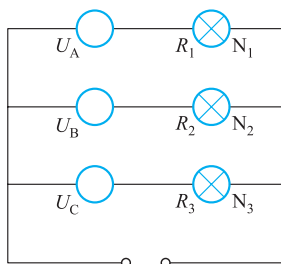


图 3-14 三相 Y 负载接线图

(1) 测三相 Y 负载的线电压、相电压、中点电压

按图 3-14 接线。按表所列项目测量负载的线电压、相电压、中点电压。将测量结果记入表 3-1。

(2) 测三相 Y 负载的线电流、相电流、中线电流

电路如图 3-14 所示,按表 3-1 所列项目测量三相负载的线电流、相电流、中线电流。将测量结果记入表中。

(3) 测量三相 Y 连接负载功率

按图 3-14 接线,分别用“三表法”和“二表法”按表 3-2、表 3-3 所列项目测量 Y 连接负载的功率,并将测量结果计入表 3-2、表 3-3,

计算三相总功率。

(4) 训练结果

表 3-1 Y 连接电路测试数据

负载状态		线电压 /V			相电压 /V			相(线)电流 /A			中线电流 /A	中点间电压 /V
		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C		
负载对称	有中线											
	无中线											
负载不对称	有中线											
	无中线											

表 3-2 一表法测三相四线制负载功率

负载形式	A 相负载 (灯泡功率 × 数量)	B 相负载 (灯泡功率 × 数量)	C 相负载 (灯泡功率 × 数量)	P_A	P_B	P_C	$P = P_A + P_B + P_C$
三相四线制 不对称负载							

表 3-3 二表法测三相三线制负载有功功率

负载形式	A 相负载 (灯泡 功率 × 数量)	B 相负载 (灯泡 功率 × 数量)	C 相负载 (灯泡 功率 × 数量)	P_1	P_2	$P = P_1 + P_2$

如果实验中只有一个功率表，可以分两次测量。

2. 三相负载 Δ 连接电路测试

(1) 三相负载 Δ 连接电路 (如图 3-15 所示)

(2) 测三相 Δ 连接负载的线电压 (相电压)

按图 (自行设计) 接线, 按表所列项目测量三相 Δ 连接负载的线电压 (相电压), 将测量结果记入表 3-4。

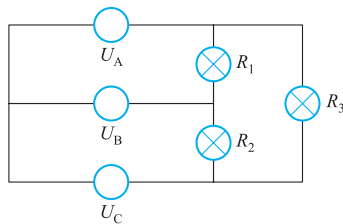
(3) 测量三相 Δ 连接负载的线电流、相电流

测量三相 Δ 连接负载的线电流 (相电流), 将测量结果记入表 3-4。

(4) 用二表法测量三相 Δ 连接负载的功率

测量三相 Δ 连接负载的功率, 将测量结果记入表 3-5, 并计算总功率。

(5) 训练结果

图 3-15 三相负载 Δ 连接电路表 3-4 三相负载 Δ 连接电压、电流测试值

负载状态	线电压 /V			相电流 /A			线电流 /A			线电流 / 相电流 /A		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_A/I_{AB}	I_B/I_{BC}	I_C/I_{CA}
对称负载												
不对称负载												

表 3-5 二表法测三相三线制负载有功功率

负载形式	A 相负载 (灯泡 功率 × 数量)	B 相负载 (灯泡 功率 × 数量)	C 相负载 (灯泡 功率 × 数量)	P_1	P_2	$P = P_1 + P_2$

如果实验中只有一个功率表, 则可以分两次测量。

四、训练报告

由实验数据分析中线的作用。为什么照明供电都采用三相四线制？在三相四线制中，中线是否能接入保险丝和开关，为什么？

五、注意事项

- ① 负载不对称连接时，可以同时控制电容与灯泡的各种连接。
- ② 如果使用电流表插座，应控制插头快速进出，同时把电流表量程适当选大一些，防止电容负载电流瞬态冲击，使过载记录器启动。
- ③ 本实验操作电压高，所以必须小心接线，改接线路必须断电，特别注意不要在电流表插头线悬空时插入有电插座。
- ④ 用二表法测三相功率时，功率表电压绕组承受电源线电压，注意功率表电压量程。
- ⑤ 电压和电流的待测量很多，要正确选择各测试点。
- ⑥ 测定相序实验中，较亮的灯泡承受过高电压(约为330 V)，观察时间不可过长，以免白炽灯长时间过载。

总 结

对称三相电源是对称三相正弦量(包括电压、电流或电动势)的特点：最大值相等，频率相同，相位互差 120° ，而且有 $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$ 和 $u_A + u_B + u_C = 0$ 。

三相电源的连接方式：Y(Y)和 Δ (Δ)。

Y连接：线电压 U_L 和相电压 U_P ，两者关系为 $U_L = \sqrt{3} U_P$ ，线电压在相位上超前相应相电压 30° 。

Δ 连接：线电压等于相电压。

分析计算三相电路时，通常不需要知道电源的连接方式，只需要知道电源的线电压。

三相负载的连接方式：Y(Y)和 Δ (Δ)。

相电流 I_P ：流过每相负载的电流。

线电流 I_L ：三根端线(电源线)中流过的电流。

负载Y连接：无论负载对称与否，无论有无中线，线电流恒等于相应的相电流。

负载 Δ 连接：相电流用 \dot{I}_{AB} 、 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{CA} 表示，线电流用 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 表示。

当三相负载对称时，线电流与相电流的关系为 $I_L = \sqrt{3} I_P$ ，线电流在相位上落后相应相电流 30° 。

不对称电路的功率为 $P = P_A + P_B + P_C$ ； $Q = Q_A + Q_B + Q_C$ ； $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ 。

对称电路的功率为 $P = 3U_P I_P \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$ ， $Q = 3U_P I_P \sin \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi$ ， $S = 3U_P I_P = \sqrt{3} U_L I_L$ 。

习 题

3.1 三相四线制电路中,满足什么条件时可省略中线,变电路为三相三线制?相电压和线电压有什么关系?

3.2 在对称三相四线制电路中,如果已知线电压 $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ$,求 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{CA} 及相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 。

3.3 对称星形负载接在三相四线制电源上,如图 3-16 所示。如果电源线电压为 380 V,当 D 点的负载连接断开时, U_1 为 ()。

- A. 220 V B. 380 V C. 190 V

3.4 有一台三相电阻炉,各相负载的额定电压都为 220 V,当电源线电压为 380 V 时,这个电阻炉应接成 () 形。

- A. Y B. Δ C. Y 或 Δ

3.5 已知对称三相四线制电源的相电压 $u_B = 10 \sin(\omega t - 60^\circ)$ V,相序为 A-B-C,试写出所有相电压和线电压的表达式。

3.6 已知 Y 连接的对称三相纯电阻负载,每相的阻值为 10Ω ;对称三相电源的线电压为 380 V。求负载相电流,并画出电压、电流的相量图。

3.7 某一对称三相负载,每相的电阻 $R = 8 \Omega$, $X_L = 6 \Omega$,连成 Δ 形,接在线电压为 380 V 的电源上,求它的相电流和线电流。

3.8 图 3-17 所示电路中,对称三相负载各相的电阻为 80Ω ,感抗为 60Ω ,电源的线电压为 380 V。在开关 S 投向上方和投向下两种情况下,三相负载消耗的有功功率各为多少?

3.9 图 3-18 所示的 Δ 连接的三相对称电路中,已知线电压为 380 V, $R = 8 \Omega$, $X_L = 6 \Omega$ 。求线电流 \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C , 并画出相量图。

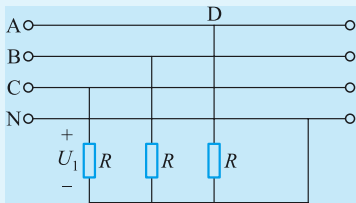


图 3-16

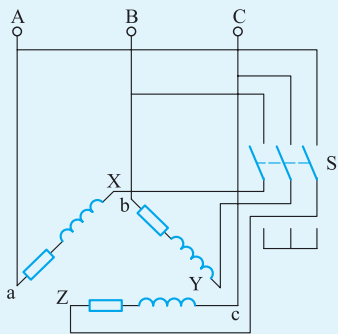


图 3-17

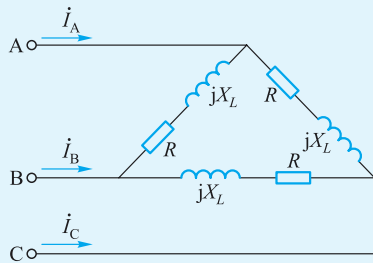


图 3-18

3.10 一台三相异步电动机的输出功率为 4 kW,功率因数 $\lambda = 0.85$,效率 $\eta = 0.85$,额定相电压为 380 V,供电线路为三相四线制,线电压为 380 V。

① 电动机应采用哪种接法？② 求负载的线电流和相电流；③ 求每相负载的等效复阻抗。

3.11 某工厂有3个车间，每个车间装有10盏220 V、100 W的白炽灯，用380 V的三相四线制供电。① 画出合理的配电接线图；② 如果各车间的灯同时点燃，求电路的线电流和中线电流；③ 如果只有2个车间用灯，求电路的线电流和中线电流。

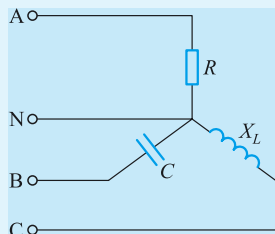


图 3-19

3.12 电路如图3-19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 这个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。

3.13 已知三相对称负载按 Δ 连接，接在线电压为220 V，频率为工频的三相电源上，火线上通过的电流都是17.3 A，三相功率为4.5 kW。求各相负载的电阻和自感系数L。



习题答案



拓展习题与
详解