第 5 章 三相电路习题解答

5.1 今测得三角形联接负载的三个线电流均为 10A，能否说线电流和相电流都是对称的？若已知负载对称，试求相电流。

解：设负载线电流分别为i_A、i_B、i_C，由 KCL 可得$\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=0$。又$I_A=I_B=I_C=10A$，则$i_A$、$i_B$、$i_C$的相位彼此相差$120^\circ$，符合电流对称条件，即线电流是对称的。

但相电流不一定对称。例如，若在三角形负载回路内存在环流$\dot{I}_0$（例如，按三角形联接的三相变压器），则负载相电流不再对称，因为

$$\dot{I}'_{AB}=\dot{I}_{AB}+\dot{I}_0,\quad \dot{I}'_{BC}=\dot{I}_{BC}+\dot{I}_0,\quad \dot{I}'_{CA}=\dot{I}_{CA}+\dot{I}_0$$

不满足对称条件。而该环流对线电流却无影响，因为每个线电流都是两个相电流之差（如图题 5.1），即

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

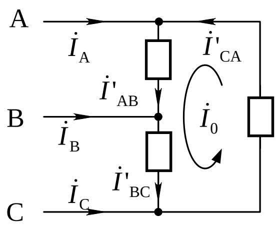
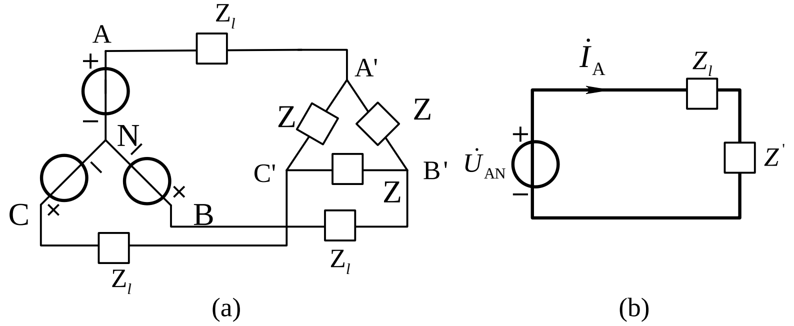


图 题 5.1

如已知负载对称，则相电流也是对称的，每相电流为$10/\sqrt{3}\approx 5.77\,A$。

5.2 对称三角形联接的负载与对称星形联接的电源相接。已知负载各相阻抗为$(8-j6)\Omega$，线路阻抗为$j2\Omega$，电源相电压为 220V，试求电源和负载的相电流。



解：负载化为星形联接法，得各相阻抗

$$Z' = \frac{Z}{3} = \frac{(8-\mathrm{j}6)}{3}\Omega$$

设 A 相电源相电压为$220\angle 0^\circ$，A 相负载线电流与电源相电流相等

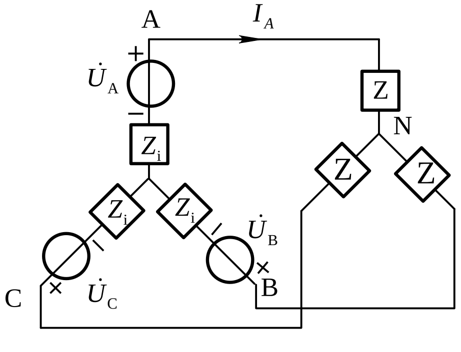
$$\dot{I}_\mathrm{A} = \frac{\dot{U}_\mathrm{AN}}{Z_l + Z'} = \frac{220\angle 0^\circ}{\mathrm{j}2\Omega + \dfrac{(8-\mathrm{j}6)\Omega}{3}} = 82.5\angle 0^\circ\,\mathrm{A}$$

由三角形联接得相电流与线电流关系得

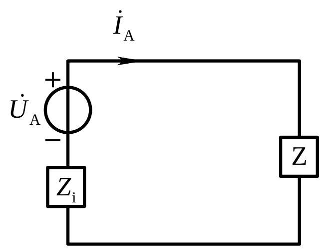
$$I_\mathrm{A'B'} = \frac{I_\mathrm{A}}{\sqrt{3}} = \frac{82.5\mathrm{A}}{\sqrt{3}} = 47.6\mathrm{A}$$

即负载相电流为$47.6\mathrm{A}$。

5.3 作星形联接的三相电源，其每相内阻抗为$Z_0 = (2+\mathrm{j}4)\Omega$，供给一个功率因数为 0.8 的感性对称三相负载，用电压表和电流表分别测得三相电源输出电压和电流各为 380V 和 2A。若把此负载断开，电源输出电压应为多少？



(a)



(b)

解：电路联接关系如图(a)所示。负载断开时电源的输出线电压等于图中相电压的$\sqrt{3}$倍。下面计算相电压U_A。

设负载 A 相电压为$\dot{U}_\mathrm{AN} = 220\angle 0^\circ\mathrm{V}$，对于感性负载，由$\cos\varphi = 0.8$，得$\varphi = -36.87^\circ$，则$\dot{I}_\mathrm{A} = 2\angle -36.87^\circ\mathrm{A}$

采用单相分析法，如图(b)所示。

电源相电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_\mathrm{A} &= \dot{U}_\mathrm{AN} + \dot{I}_\mathrm{A} Z_\mathrm{i} = [220\angle 0^\circ + 2\angle -36.87^\circ \times (2+\mathrm{j}4)]\mathrm{V} \\ &= 228\angle 1^\circ\mathrm{V}\end{aligned}$$

当负载断开时，电源输出电压为　$U_l = \sqrt{3}U_\mathrm{A} = 395\mathrm{V}$

5.4 如图所示正弦交流电路，AC 之间加以正弦电压$\dot{U}_{\mathrm{S}}$，角频率为ω。现欲使$\dot{U}_{\mathrm{AO}}=U\angle 0^\circ\,\mathrm{V}$，$\dot{U}_{\mathrm{BO}}=U\angle -120^\circ\,\mathrm{V}$，$\dot{U}_{\mathrm{CO}}=U\angle 120^\circ\,\mathrm{V}$，试求参数$R$与$L$的关系以及$R$与$C$的关系。

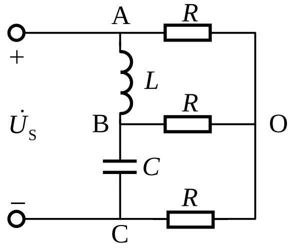


图 题 5.4

解：电感和电容上的电压分别为

$$\dot{U}_{\mathrm{AB}}=\dot{U}_{\mathrm{AO}}-\dot{U}_{\mathrm{BO}}=U\angle 0^\circ-U\angle -120^\circ=\sqrt{3}U\angle 30^\circ\mathrm{V}$$
$$\dot{U}_{\mathrm{BC}}=\dot{U}_{\mathrm{BO}}-\dot{U}_{\mathrm{CO}}=U\angle -120^\circ-U\angle 120^\circ=\sqrt{3}U\angle -90^\circ\mathrm{V}$$

电感和电容上的电流分别为

$$\dot{I}_{\mathrm{AB}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{AB}}}{\mathrm{j}\omega L}=\frac{\sqrt{3}U\angle -60^\circ}{\omega L}\mathrm{A}，\quad \dot{I}_{\mathrm{BC}}=\mathrm{j}\omega C\dot{U}_{\mathrm{BC}}=\omega C\sqrt{3}U\angle 0^\circ\mathrm{A}$$

支路BO上的电流为

$$\dot{I}_{\mathrm{BO}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{BO}}}{R}=\frac{U}{R}\angle -120^\circ$$

对节点 B 列写 KCL 方程得

$$\frac{\sqrt{3}U\angle -60^\circ}{\omega L}=\omega C\sqrt{3}U\angle 0^\circ+\frac{U}{R}\angle -120^\circ$$

化简得

$$\frac{\sqrt{3}}{\omega L}\left(\frac{1}{2}-\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)=\omega C\sqrt{3}+\frac{1}{R}\left(-\frac{1}{2}-\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

由实部和虚部分别相等得

$$R=\frac{\omega L}{\sqrt{3}}=\frac{1}{\sqrt{3}\omega C}$$

5.5　如图所示对称三相电路，已知$\dot{U}_{\mathrm{AB}}=380\angle 0^\circ\,\mathrm{V}$，$Z_1=\mathrm{j}50\Omega$，$Z_2=150\Omega$，求电压$\dot{U}_{\mathrm{A'B'}}$、电流$\dot{I}_{\mathrm{C'A'}}$。

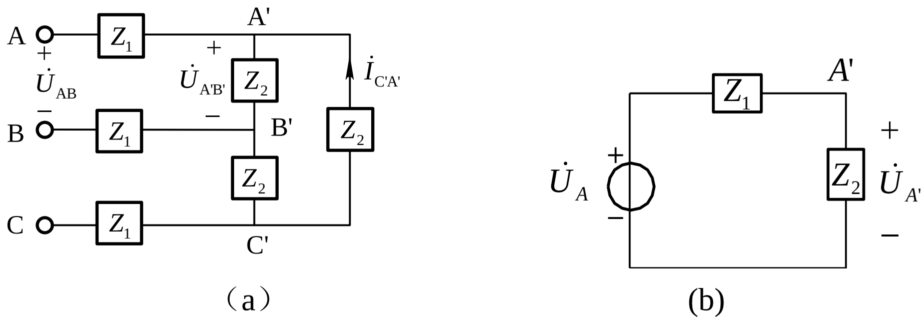


图 题 5.5

解：　画出单相等效电路如图（b）所示。由图(b)得：

$$\dot{U}_{A'}=\frac{50}{50+j50}\dot{U}_A\approx155.56\angle-75^\circ\ \mathrm{V}$$

$$\dot{U}_{A'B'}=\sqrt{3}\dot{U}_{A'}\angle30^\circ\approx269.44\angle-45^\circ\ \mathrm{V}$$

$$\dot{I}_{A'B'}=\frac{\dot{U}_{A'B'}}{Z_2}\approx1.796\angle-45^\circ\ \mathrm{A}$$

$$\dot{I}_{C'A'}=\dot{I}_{A'B'}\angle120^\circ\approx1.796\angle75^\circ\ \mathrm{A}$$

5.6 图示电路电流表的读数均为 2A，求电流 $\dot{I}_A,\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ 。

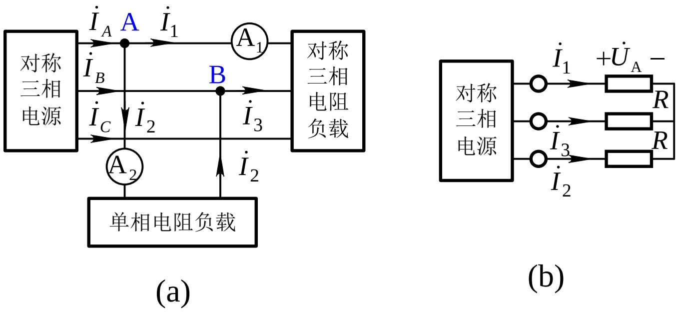


图 题 5.6

解：设线电流 $\dot{I}_1=2\angle0°\mathrm{A}$，由于负载对称，故其它线电流为：

$$\dot{I}_C=2\angle120°\mathrm{A}$$
$$\dot{I}_3=2\angle-120°\mathrm{A}$$

设对称三相电阻负载的星形等效电路如图(b)所示。对电阻负载，$\dot{I}_1$ 与 $\dot{U}_A$ 同相。由于

线电压$\dot{U}_{\mathrm{AB}}$超前相电压$\dot{U}_{\mathrm{A}}$为30°，故$\dot{I}_{\mathrm{AB}}$超前$\dot{I}_1$的角度也为30°。图(a)中$\dot{I}_2$是流过电阻负载的电流，它与$\dot{U}_{\mathrm{AB}}$同相，即$\dot{I}_2$超前$\dot{I}_1$ 30°：

$$\dot{I}_2 = 2\angle 30^\circ \mathrm{A}$$

$$\dot{I}_{\mathrm{A}} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 2\angle 0^\circ + 2\angle 30^\circ = 3.864\angle 15^\circ \mathrm{A}$$

$$\dot{I}_{\mathrm{B}} = \dot{I}_3 - \dot{I}_2 = 2\angle -120^\circ - 2\angle 30^\circ = 3.864\angle 45^\circ \mathrm{A}$$

5.7 一个联接成星形的对称负载接在线电压为 380V 的对称三相电源上(无中线)，负载每相阻抗$Z=(8+\mathrm{j}6)\Omega$。(1)求负载相电压和相电流，作电压、电流相量图；(2)设 C 相断线，重求各相电压和相电流；(3)设 C 相负载短路，再求各相电压和相电流。

解：设电源为星形联接，电源 A 相电压相量为$\dot{U}_{\mathrm{AN}} = \dfrac{380\mathrm{V}}{\sqrt{3}} = 220\angle 0^\circ \mathrm{V}$，则电源线电压分别为$\dot{U}_{\mathrm{AB}} = 380\angle 30^\circ \mathrm{V}$，$\dot{U}_{\mathrm{BC}} = 380\angle -90^\circ \mathrm{V}$，$\dot{U}_{\mathrm{CA}} = 380\angle 150^\circ \mathrm{V}$。

（1） 设电路联接如图(a)所示，化为单相计算，如图(b)所示。

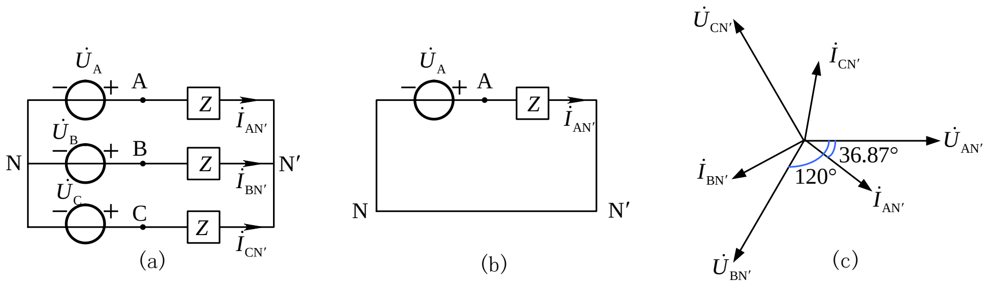


图 题 5.7

因为负载为星形联接，所以负载相电压

$$\dot{U}_{\mathrm{AN'}} = 220\angle 0^\circ \mathrm{V}，\dot{U}_{\mathrm{BN'}} = 220\angle -120^\circ \mathrm{V}，\dot{U}_{\mathrm{CN'}} = 220\angle -240^\circ \mathrm{V}$$

又因为$Z=(8+\mathrm{j}6)\Omega = 10\angle 36.87^\circ \Omega$,

相电流

$$\dot{I}_{\mathrm{AN'}} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{AN'}}}{Z} = 22\angle -36.87^\circ \mathrm{A}，\dot{I}_{\mathrm{BN'}} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{BN'}}}{Z} = 22\angle -156.87^\circ \mathrm{A}$$

$$\dot{I}_{\text{CN'}}=\frac{\dot{U}_{\text{CN'}}}{Z}=22\angle-276.87°\text{A}$$

电压、电流相量图如图(c)所示。

（2） C 相断线时，$I_{CN'}=0$，电源线电压降落在 AB 相上。如图(d)所示。

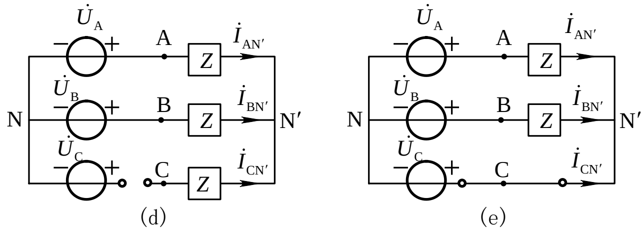


图　题 5.7

$$\dot{I}_{\text{AN'}}=-\dot{I}_{\text{BN'}}=\frac{\dot{U}_{\text{AB}}}{2Z}=\frac{380\angle30°\text{V}}{2\times10\angle36.87°\Omega}=19\angle-6.87°\text{A}$$

$$U'_{\text{AN'}}=-\dot{U}_{\text{BN'}}=190\angle30°\text{V}$$

$$\dot{U}_{\text{CN'}}=\dot{U}_{\text{CA}}+\dot{U}_{\text{AN'}}=380\angle150°\text{V}+190\angle30°\text{V}=329\angle120°\text{V}$$

（3） C 相负载短路时，如图(e)所示。

$U_{\text{AN'}}=U_{\text{BN'}}=U_{\text{AC}}=380\text{V}$，$U_{\text{CN'}}=0$

$$\dot{I}_{\text{AN'}}=\frac{\dot{U}_{\text{AN'}}}{Z}=\frac{\dot{U}_{\text{AC}}}{Z}=38\angle-66.87°\text{A}$$

$$\dot{I}_{\text{BN'}}=\frac{\dot{U}_{\text{BC}}}{Z}=38\angle-126.97°\text{A}$$

$$\dot{I}_{\text{CN'}}=-\dot{I}_{\text{AN'}}-\dot{I}_{\text{BN'}}=65.82\angle83.13°\text{A}$$

5.8 一个联接成三角形的负载，其各相阻抗 $Z=(16+\text{j}24)\Omega$，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，重求相电流和线电流；(3)设一条端线断路，再求相电流和线电流。

解：(1)电路模型如图(a)所示。

负载相电流　$I_{\text{AB}}=\dfrac{U_{\text{AB}}}{|\text{Z}|}=\dfrac{380\text{V}}{\sqrt{16^2+24^2}\Omega}\approx13.17\text{A}$

负载线电流

$$I_{\rm A}=\sqrt{3}I_{\rm AB}\approx 22.81{\rm A}$$

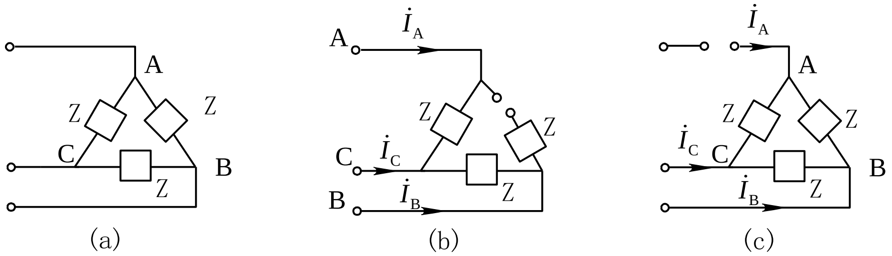


图　题 5.8

(2)设 A 相负载断路，如图(b)所示。

由图(b)可见，$I_{\rm AB}=0$，B、C 相负载因相电压不变，均为电源线电压，故相电流

$$I_{\rm BC}=I_{\rm CA}=13.17{\rm A}$$
$$I_{\rm C}=\sqrt{3}I_{\rm BC}=22.81{\rm A}$$
$$I_{\rm A}=I_{\rm B}=I_{\rm BC}=13.17{\rm A}$$

(3)设端线 A 断路，如图(c)所示。

由图(c)可见，$I_{\rm A}=0$，

$$I_{\rm B}=I_{\rm C}=\frac{U_{\rm BC}}{|{\rm Z}//2{\rm Z}|}\approx 19.76{\rm A}$$

$$I_{\rm AB}=I_{\rm CA}=\frac{U_{\rm BC}}{|2Z|}\approx 6.587{\rm A}$$

$$I_{\rm BC}=\frac{U_{\rm BC}}{|Z|}\approx 1317{\rm A}$$

5.9 某对称负载的功率因数为$\lambda=0.866$(感性)，当接于线电压为380V 的对称三相电源时，其平均功率为 30kW。试计算负载为星形接法时的每相等效阻抗。

解：因为三相负载平均功率等于每相负载平均功率的 3 倍，所以

$$P=3\times\frac{U_p^2}{|Z|}\times\lambda=3\times\frac{(\frac{U_l}{\sqrt{3}})^2}{|Z|}\times\lambda$$

$$|Z|=\frac{U_l^2}{P}\times\lambda\approx 4.18\Omega$$

$$Z=|Z|\cos\varphi+|Z|\sin\varphi=(3.62+{\rm j}2.09)\Omega$$

5.10 某负载各相阻抗 Z=(6+j8)Ω，所加对称线电压是 380V，分别计算负载接成星形和三角形时所吸收的平均功率。

解：　星形接法时 $U_l = 380\text{V}$ ，　$I_l = I_p = \dfrac{U_p}{|Z|} = \dfrac{U_l}{\sqrt{3}|Z|} = \dfrac{380\text{V}}{\sqrt{3}|Z|} = 22\text{A}$

$$P = 3I_l^2 \times 6 = \sqrt{3} \times 380\text{V} \times 22\text{A} \times 0.6 = 8687.97\text{W}$$

三角形接法时负载每相承受电压为 380V，是星形接法时的 $\sqrt{3}$ 倍。根据功率与电压的平方成正比关系可知，三角形联接时负载的平均功率是星形联接的 3 倍。即

$P = 3 \times 8687.97 = 26063.91\text{W}$

5.11 两组对称负载并联如图所示。其中一组接成三角形，负载功率为 10kW，功率因数为 0.8(感性)，另一组接成星形，负载功率也是 10kW，功率因数为 0.855(感性)。端线阻抗 $Z_\text{L} = (0.1 + \text{j}0.2)\Omega$ 。要求负载端线电压有效值保持 380V，问电源线电压应为多少？

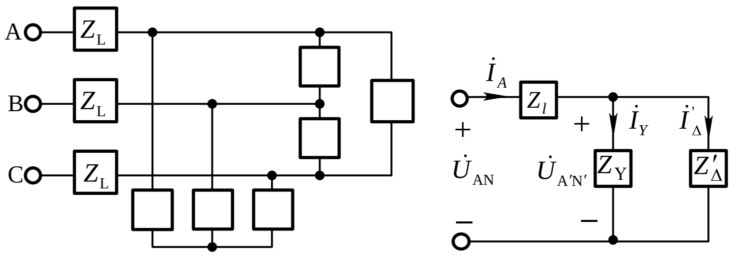


图 题 5.11

解：由已知功率因数 $\cos\varphi_\text{Y} = 0.85$， $\cos\varphi_\Delta = 0.8$

可求得星形和三角形负载的阻抗角分别为：$\varphi_\text{Y} = 31.24°$， $\varphi_\Delta = 36.87°$

方法一：

因为负载端线电压　　　　　　　　　$U_l = 380\text{V}$

所以星形负载相电流为

$$I_\text{Y} = \frac{P_Y}{\sqrt{3}U_l\cos\varphi_\text{Y}} = \frac{10k\text{W}}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.855} = 17.77\text{A}$$

三角形负载线电流为

$$I_\Delta = \frac{P_\Delta}{\sqrt{3}U_l \cos\varphi_\Delta} = \frac{10k\mathrm{W}}{\sqrt{3}\times 380\mathrm{V}\times 0.8} = 18.99\mathrm{A}$$

将三角形联接等效成星形联接，设负载阻抗为$Z'_\Delta, Z'_\Delta = \dfrac{Z_\Delta}{3}$

化为单相分析法，则电路如右图所示。

设$\dot{U}_{\mathrm{A'N'}} = 220\angle 0^\circ\ \mathrm{V}, \dot{I}_\mathrm{Y} = 17.77\angle -31.24^\circ$，$\dot{I}_\Delta = 18.99\angle -36.87^\circ$

$$\dot{I}_\mathrm{A} = \dot{I}_\mathrm{Y} + \dot{I}_\Delta = 17.77\angle -31.24^\circ + 18.99\angle -36.87^\circ = 36.76\angle -34.14^\circ\ \mathrm{A}$$

由KVL方程得，电源相电压为

$$\dot{U}_{\mathrm{AN}} = \dot{I}_\mathrm{A}\times I_l + \dot{U}_{\mathrm{A'N'}} = 227.1\angle 1^\circ \mathrm{V}$$

则电源线电压为

$$U_{\mathrm{AB}} = \sqrt{3}U_{\mathrm{AN}} = 393.3\ \mathrm{V}$$

方法二：

负载总平均功率　$P = P_Y + P_\Delta = 2\times 10\mathrm{kW} = 20\mathrm{kW}$

负载总无功功率　$Q = P_Y \times \mathrm{tg}\varphi_Y + P_\Delta \times \mathrm{tg}\varphi_\Delta = (6.066 + 7.5)\mathrm{kW} = 13.566\mathrm{kvar}$

负载总功率因数　$\lambda = \dfrac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = 0.8276$

因为　$P = \sqrt{3}U_l I_l \lambda$

负载线电流　$I_l = \dfrac{P}{\sqrt{3}U_l \lambda} = 36.72\mathrm{A}$

电源发出平均功率为

$$\begin{aligned} P_\mathrm{S} &= P + 3I_l^2 \times \mathrm{Re}[Z_l] \\ &= 20\times 10^3\,\mathrm{W} + 3\times (36.72\mathrm{A})^2 \times 0.1\Omega \\ &= 20404.43\mathrm{W} \end{aligned}$$

无功功率为

$$\begin{aligned} Q_\mathrm{S} &= Q + 3I_l^2 \times \mathrm{Re}[Z_l] \\ &= 13.566\times 10^3\,\mathrm{W} + 3\times (36.72\mathrm{A})^2 \times 0.2\Omega \\ &= 14374.88\,\mathrm{var} \end{aligned}$$

电源视在功率为

$$S_{\mathrm{S}}=\sqrt{P_{\mathrm{S}}^{2}+Q_{\mathrm{S}}^{2}}=\sqrt{3}U_{\mathrm{AB}}I_{l}$$

$$U_{\mathrm{AB}}=393.3\mathrm{V}$$

5.12 图示三相电路，对称三相电源供电，已知$\dot{U}_{\mathrm{A}}=220\angle 0^{\circ}\mathrm{V}$，$R=9\Omega$，$X=4\Omega$，$Z_1=(8+\mathrm{j}6)\Omega$。求三角型负载的平均功率与单相负载上的电流$\dot{I}_1$。

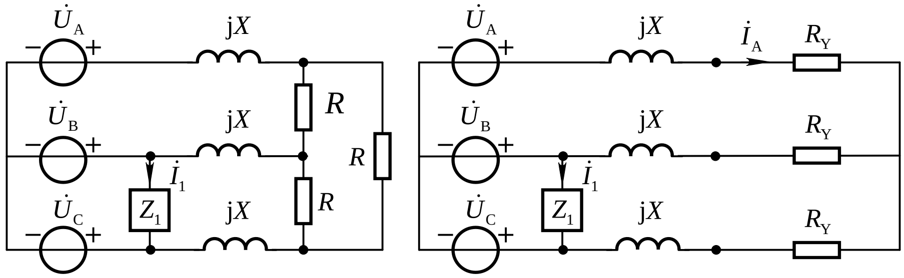


图　题 5.12

解：经过星—三角等效变换的电路如右图所示，其中

$$R_{\mathrm{Y}}=\frac{1}{3}R=3\Omega$$

对于对称部分取A相进行计算，有

$$\dot{I}_{\mathrm{A}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{A}}}{R_{\mathrm{Y}}+\mathrm{j}X}=\frac{220\angle 0^{\circ}}{3+\mathrm{j}4}=44\angle -53.1^{\circ}\mathrm{A}$$

则三角型负载吸收的平均功率为

$$P=3I_{\mathrm{A}}^{2}R_{\mathrm{Y}}=17.424\mathrm{kW}$$

已知$\dot{U}_{\mathrm{A}}=220\angle 0^{\circ}\mathrm{V}$

则$\dot{U}_{\mathrm{AB}}=380\angle 30^{\circ}\mathrm{V}$，$\dot{U}_{\mathrm{BC}}=380\angle -90^{\circ}\mathrm{V}$

并联的单相负载的电流为

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_{\mathrm{BC}}}{Z_1}=\frac{380\angle -90^{\circ}}{8+\mathrm{j}6}=38\angle -126.9^{\circ}\mathrm{A}$$

5.13 图示电路中，A、B和C为对称三相电源的三根端线，设$\dot{U}_{\mathrm{AB}}=380\angle 0^{\circ}\mathrm{V}$，$R_1=R_2=R_3=R_4=X_C=10\Omega$，试求两个功率表$\mathrm{W}_1$和$\mathrm{W}_2$的读数。

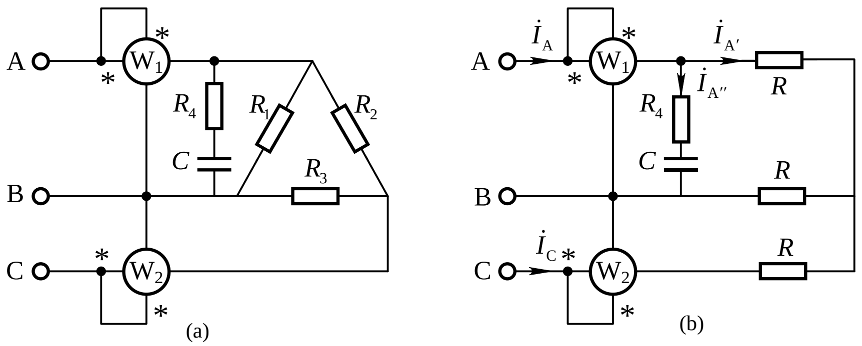


图 题 5.13

解：经过星—三角等效变换的电路如图(b)所示，其中

$$R = R_1 = R_2 = R_3 = 10/3\Omega$$

对于对称部分取A 相进行计算，有

$$\dot{I}_{A'} = \frac{\dot{U}_A}{R} = \frac{380/\sqrt{3}\angle -30^\circ}{10/3} = 38\sqrt{3}\angle -30^\circ \text{A}$$

则C 相线电流为

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{A'}\angle -30^\circ + 120^\circ = 38\sqrt{3}\angle 90^\circ \text{A}$$

并联的单相负载的电流为

$$\dot{I}_{A''} = \frac{\dot{U}_{AB}}{R_4 - jX_C} = \frac{380\angle 0^\circ}{10 - j10} = 19\sqrt{2}\angle 15^\circ \text{A}$$

则A 相总电流为

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A'} + \dot{I}_{A''} = 38\sqrt{3}\angle -30^\circ + 19\sqrt{2}\angle 45^\circ = 77.26\angle -10.37^\circ \text{A}$$

功率表 W1 测量的是A 、B 两相间的线电压和A 相的线电流，则 W1 的读数为

$$P_1 = U_{AB} I_A \cos(\varphi_{u_{AB}} - \varphi_{i_A}) = 380 \times 77.26 \times \cos(10.37^\circ) = 28.88\text{kW}$$

功率表 W2 测量的是C 、B 两相间的线电压和C 相的线电流， C 、B 相的电压为

$$\dot{U}_{CB} = -\dot{U}_{BC} = -380\angle -120^\circ = 380\angle 60^\circ \text{V}$$

则 W2 的读数为

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos(\varphi_{u_{CB}} - \varphi_{i_C}) = 380 \times 38\sqrt{3} \times \cos(60^\circ - 90^\circ) = 21.66\text{kW}$$

5.14 图示为用功率表测量对称三相电路无功功率的一种方法，已知功率表的读数为 4000W，求三相负载的无功功率。

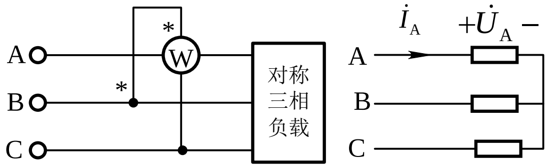


图　题5.14

解：设电源电压 $\dot{U}_{AB}=U_l\angle 0^\circ$，则 $\dot{U}_{BC}=\dot{U}_{AB}\angle -120^\circ = U_l\angle -120^\circ$

设负载为星形联接，如右图所示。阻抗角为 φ，则 A 相负载电流 $\dot{I}_A$ 滞后电压 $\dot{U}_A$ 的角度为 φ，滞后 $\dot{U}_{AB}$ 的角度为 $30^\circ+\varphi$，即

$$\dot{I}_A = I_l\angle(-\varphi-30^\circ)$$

功率表的读数= $P=U_{BC}I_A\cos(-120^\circ-(-\varphi-30^\circ))=U_lI_l\cos(\varphi-90^\circ)=U_lI_l\sin\varphi$

由对称三相负载无功功率的计算公式得

$$Q=\sqrt{3}U_lI_l\sin\varphi=\sqrt{3}P=4000\sqrt{3}\ \ \text{var}$$