CAP12 – TABELAS E FIGURAS

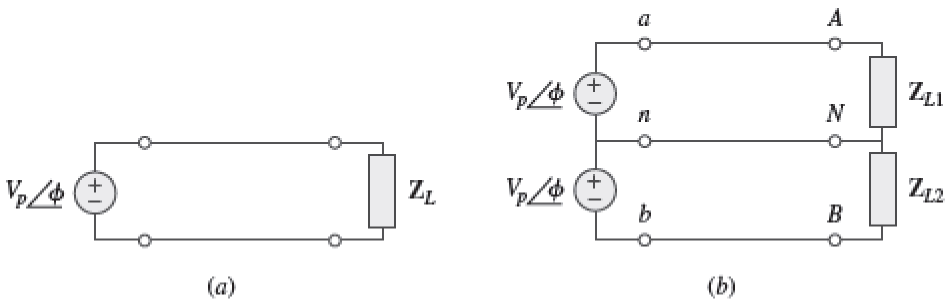


Figura 12.1 Sistemas monofásicos: (*a*) tipo bifilar; (*b*) tipo trifilar.

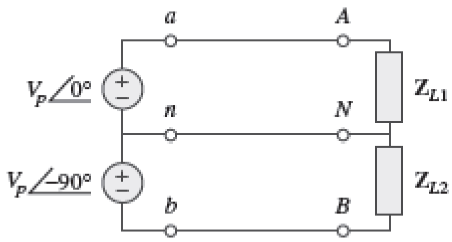


Figura 12.2 Sistema trifilar bifásico.

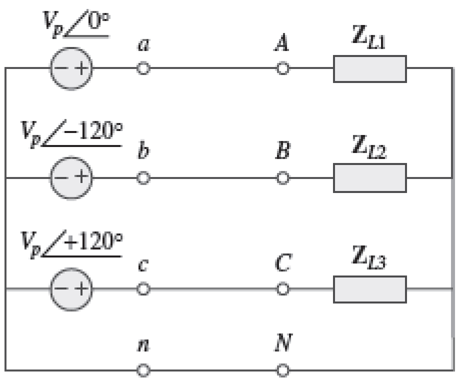


Figura 12.3 Sistema trifilar trifásico.

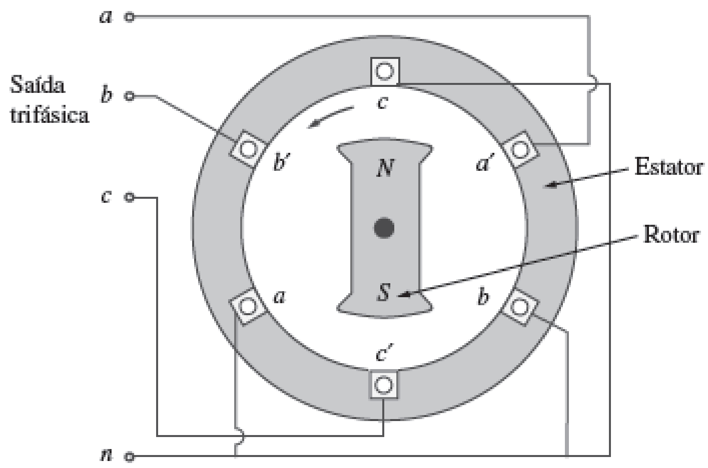


Figura 12.4 Gerador trifásico.

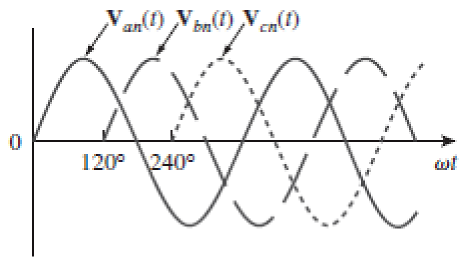


Figura 12.5 As tensões geradas se encontram afastadas a 120° entre si.

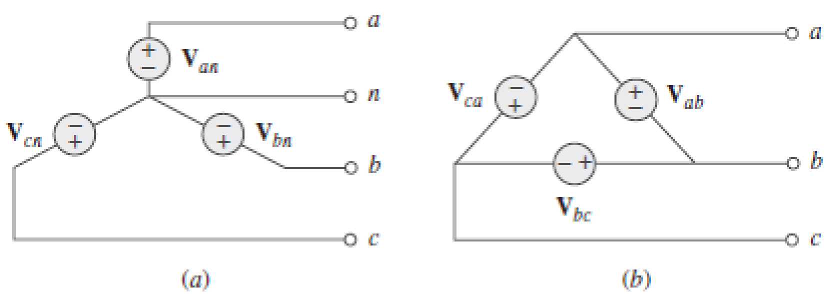


Figura 12.6 Fontes de tensão trifásicas: (*a*) fonte conectada em estrela; (*b*) fonte conectada em triângulo.

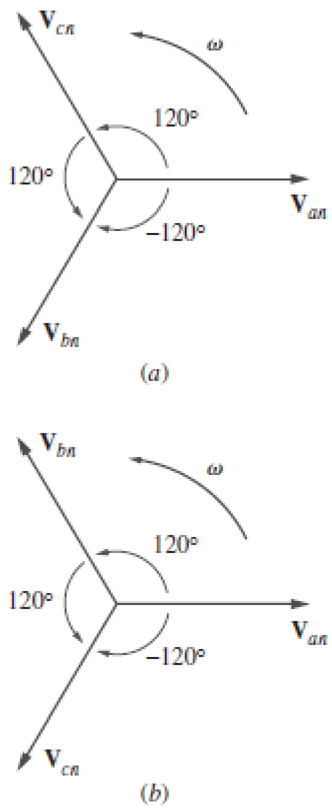


Figura 12.7 Sequências de fases:
(*a*) *abc* ou sequência positiva;
(*b*) *acb* ou sequência negativa.

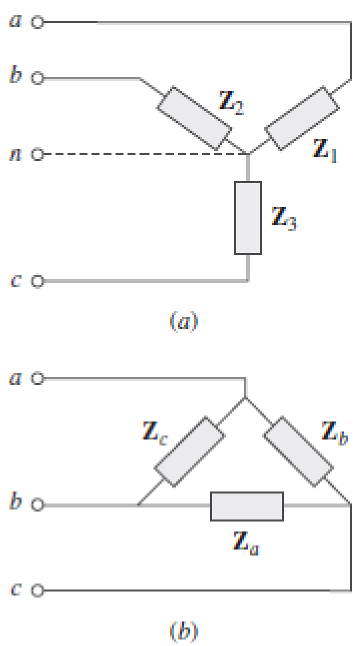


Figura 12.8 Duas configurações possíveis para cargas trifásicas: (*a*) carga conectada em estrela; (*b*) carga conectada em triângulo.

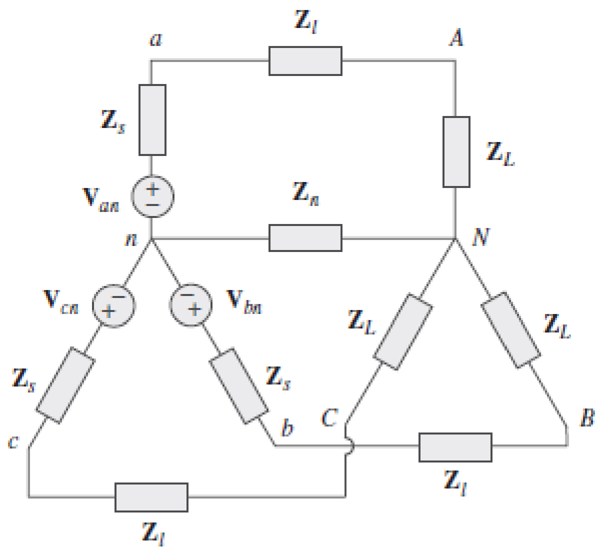


Figura 12.9 Um sistema estrela-estrela equilibrado mostrando as impedâncias da fonte, da linha e das cargas.

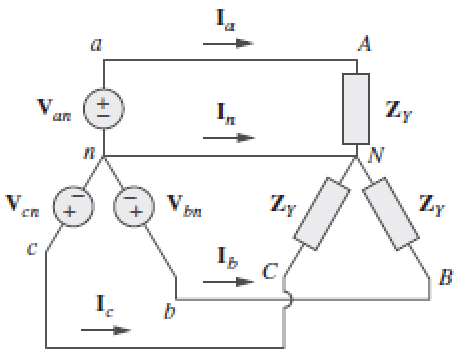


Figura 12.10 Conexão estrela-estrela equilibrada.

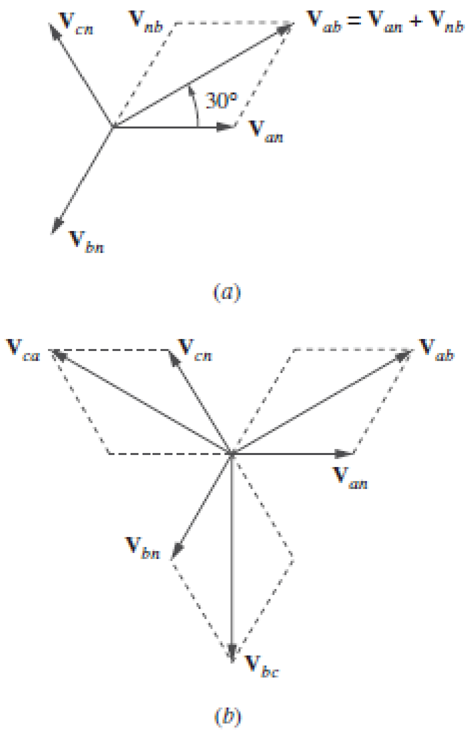


Figura 12.11 Diagrama fasorial ilustrando as relações entre tensões de linha e tensões de fase.

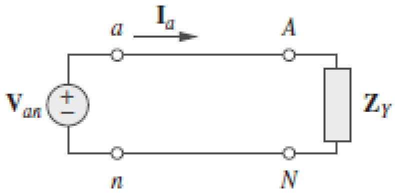


Figura 12.12 Circuito monofásico equivalente.

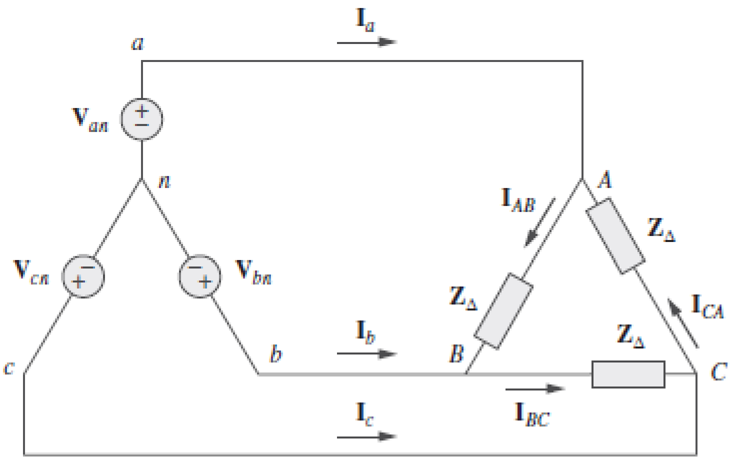


Figura 12.14 Conexão estrela-triângulo equilibrada.

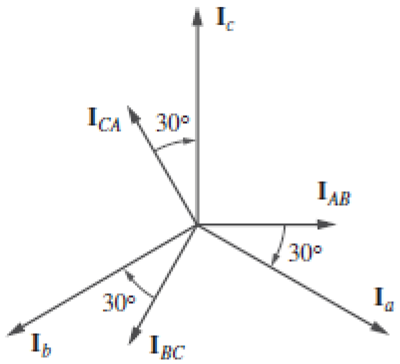


Figura 12.15 Diagrama fasorial ilustrando a relação entre correntes de fase e de linha.

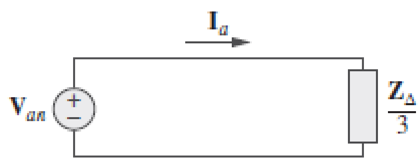


Figura 12.16 Circuito monofásico equivalente a um circuito estrela-triângulo equilibrado.

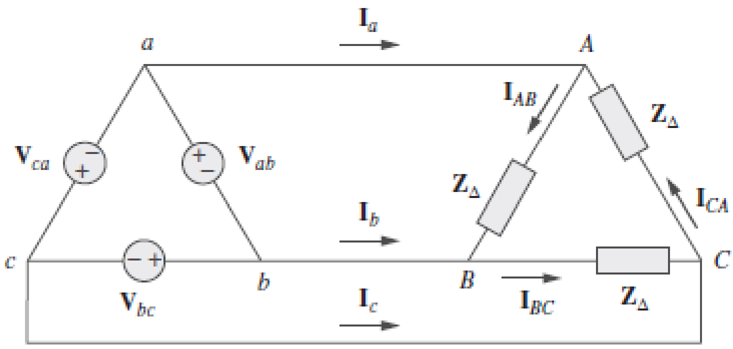


Figura 12.17 Uma conexão triângulo-triângulo equilibrada.

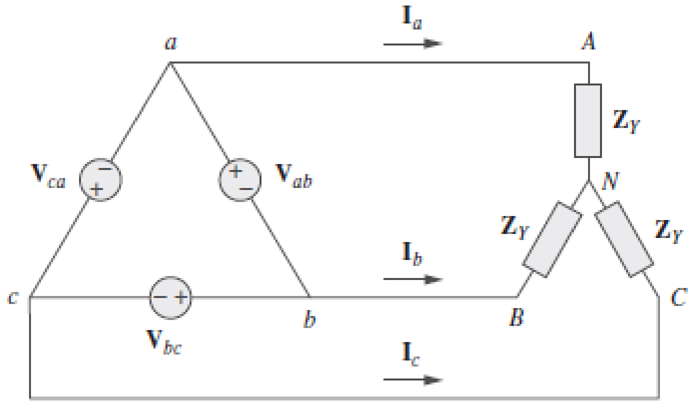


Figura 12.18 Uma conexão triângulo-estrela equilibrada.

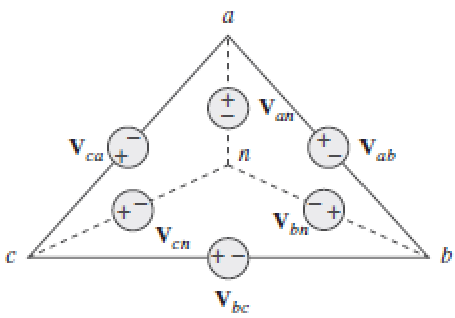


Figura 12.19 Transformação de uma fonte conectada em triângulo em uma fonte conectada em estrela equivalente.

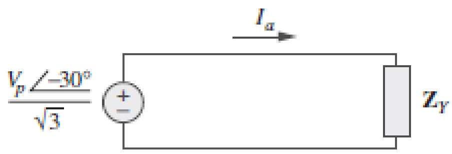


Figura 12.20 Circuito monofásico equivalente.

Tabela 12.1 • Resumo das fórmulas para correntes/tensões de linha e de fase para sistemas trifásicos equilibrados.[1]

Conexão	Correntes/tensões de fases	Idêntico às correntes de linha
estrela-estrela	$\mathbf{V}_{an} = V_p\angle 0^\circ$ $\mathbf{V}_{bn} = V_p\angle -120^\circ$ $\mathbf{V}_{cn} = V_p\angle +120^\circ$ Idêntico às correntes de linha	$\mathbf{V}_{ab} = \sqrt{3}V_p\angle 30^\circ$ $\mathbf{V}_{bc} = \mathbf{V}_{ab}\angle -120^\circ$ $\mathbf{V}_{ca} = \mathbf{V}_{ab}\angle +120^\circ$ $\mathbf{I}_a = \mathbf{V}_{an}/\mathbf{Z}_Y$ $\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_a\angle -120^\circ$ $\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_a\angle +120^\circ$
estrela-triângulo	$\mathbf{V}_{an} = V_p\angle 0^\circ$ $\mathbf{V}_{bn} = V_p\angle -120^\circ$ $\mathbf{V}_{cn} = V_p\angle +120^\circ$ $\mathbf{I}_{AB} = \mathbf{V}_{AB}/\mathbf{Z}_\Delta$ $\mathbf{I}_{BC} = \mathbf{V}_{BC}/\mathbf{Z}_\Delta$ $\mathbf{I}_{CA} = \mathbf{V}_{CA}/\mathbf{Z}_\Delta$	$\mathbf{V}_{ab} = \mathbf{V}_{AB} = \sqrt{3}V_p\angle 30^\circ$ $\mathbf{V}_{bc} = \mathbf{V}_{BC} = \mathbf{V}_{ab}\angle -120^\circ$ $\mathbf{V}_{ca} = \mathbf{V}_{CA} = \mathbf{V}_{ab}\angle +120^\circ$ $\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{AB}\sqrt{3}\angle -30^\circ$ $\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_a\angle -120^\circ$ $\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_a\angle +120^\circ$
triângulo-triângulo	$\mathbf{V}_{ab} = V_p\angle 0^\circ$ $\mathbf{V}_{bc} = V_p\angle -120^\circ$ $\mathbf{V}_{ca} = V_p\angle +120^\circ$ $\mathbf{I}_{AB} = \mathbf{V}_{ab}/\mathbf{Z}_\Delta$ $\mathbf{I}_{BC} = \mathbf{V}_{bc}/\mathbf{Z}_\Delta$ $\mathbf{I}_{CA} = \mathbf{V}_{ca}/\mathbf{Z}_\Delta$	Idêntico às tensões de fase $\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{AB}\sqrt{3}\angle -30^\circ$ $\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_a\angle -120^\circ$ $\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_a\angle +120^\circ$
triângulo-estrela	$\mathbf{V}_{ab} = V_p\angle 0^\circ$ $\mathbf{V}_{bc} = V_p\angle -120^\circ$ $\mathbf{V}_{ca} = V_p\angle +120^\circ$ Idêntico às correntes de linha	Idêntico às tensões de fase $\mathbf{I}_a = \dfrac{V_p\angle -30^\circ}{\sqrt{3}\mathbf{Z}_Y}$ $\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_a\angle -120^\circ$ $\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_a\angle +120^\circ$

[1] Supondo a sequência *abc* ou positiva.

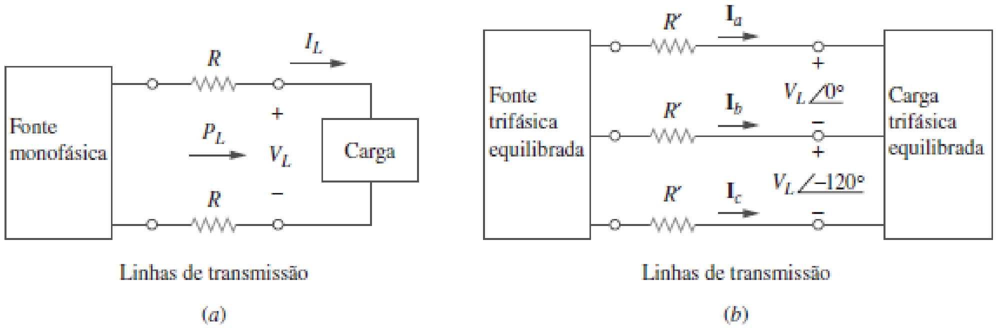


Figura 12.21 Comparação da perda de potência entre: (*a*) sistemas monofásicos; (*b*) sistemas trifásicos.

RESOLUÇÃO DE EXERCÍCIOS

12.5 Para uma carga conectada em estrela, as expressões no domínio do tempo para três tensões linha-neutro nos terminais são:

$$v_{AN} = 120\cos(\omega t + 32°)\text{ V}$$
$$v_{BN} = 120\cos(\omega t - 88°)\text{ V}$$
$$v_{CN} = 120\cos(\omega t + 152°)\text{ V}$$

Escreva as expressões no domínio do tempo para as tensões linha-linha v_{AB}, v_{BC} e v_{CA}.

$\mathbf{V}_{AB} = 1.7321\text{x}\mathbf{V}_{AN}\angle{+30°} = 207.8\angle(32°+30°) = 207.8\angle 62°$ V or

$$v_{AB} = \mathbf{207.8cos(\omega t+62°)\ V}$$

which also leads to,

$$v_{BC} = \mathbf{207.8cos(\omega t-58°)\ V}$$

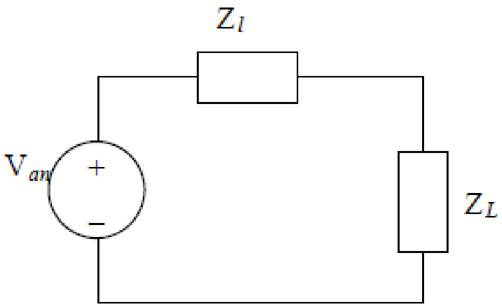
and

$$v_{CA} = \mathbf{207.8cos(\omega t+182°)\ V}$$

207.8cos(ωt+62°) V, 207.8cos(ωt–58°) V, 207.8cos(ωt+182°) V

12.8 Em um sistema trifásico estrela-estrela equilibrado, a fonte é uma sequência *abc* de tensões e $\mathbf{V}_{an} = 100\underline{/20°}$ V RMS. A impedância de linha por fase é $0{,}6 + j1{,}2\ \Omega$, enquanto a impedância por fase da carga é $10 + j14\ \Omega$. Calcule as correntes de linha e as tensões de carga.

Consider the per phase equivalent circuit shown below.



5.396∠–35.1° A

$\mathbf{I_a} = \mathbf{V_{an}}/(\mathbf{Z}_l + \mathbf{Z}_L) = (100\angle 20°)/(10.6+j15.2) = (100\angle 20°)/(18.531\angle 55.11°)$

$= \mathbf{5.396\angle{-35.11}° \text{ amps}}.$

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_a \angle{-120^\circ} = \mathbf{5.396\angle{-155.11^\circ}\ amps}.$$

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_a \angle{+120^\circ} = \mathbf{5.396\angle{84.89^\circ}\ amps}.$$

$$\mathbf{V}_{La} = \mathbf{I}_a\mathbf{Z}_L = (4.414\text{–}j3.103)(10+j14) = (5.396\angle{-35.11^\circ})(17.205\angle{54.46^\circ})$$

$$= \mathbf{92.84\angle{19.35^\circ}\ volts}.$$

$$\mathbf{V}_{Lb} = \mathbf{V}_{La} \angle{-120^\circ} = \mathbf{94.84\angle{-100.65^\circ}\ volts}.$$

$$\mathbf{V}_{Lc} = \mathbf{V}_{La} \angle{+120^\circ} = \mathbf{94.84\angle{139.35^\circ}\ volts}.$$

12.14 Obtenha as correntes de linha no circuito trifásico da Figura 12.47.

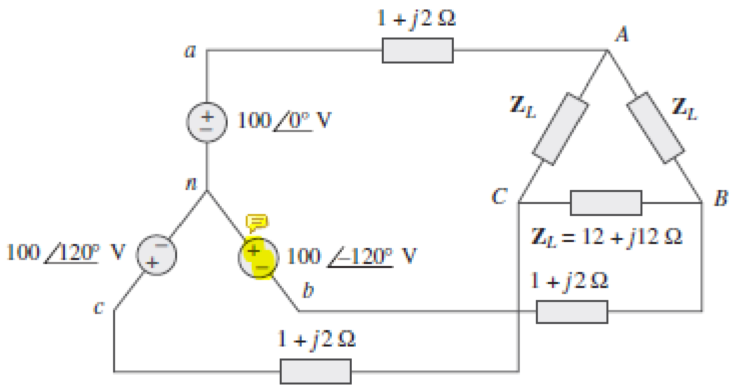
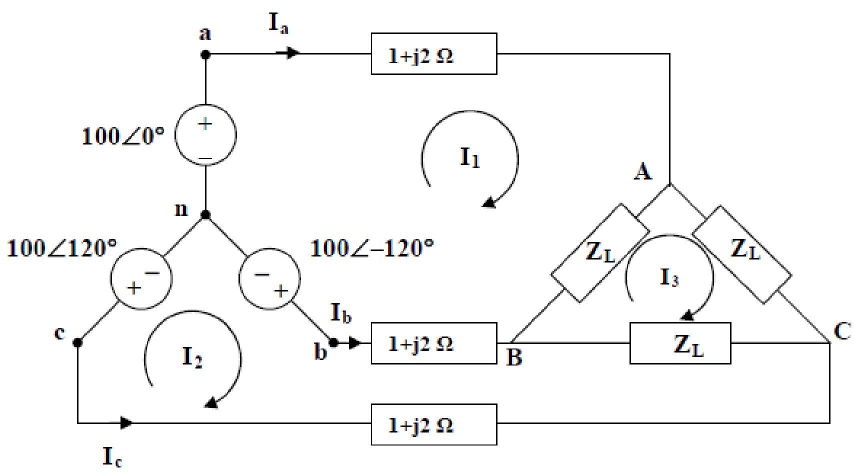


Figura 12.47 Esquema para o Problema 12.14.

We apply mesh analysis with $Z_L = (12{+}j12)\ \Omega$.



For mesh 1,

$$-100 + 100\angle -120^{\circ} + I_1(14 + j16) - (1 + j2)I_2 - (12 + j12)I_3 = 0 \text{ or}$$

$$(14 + j16)I_1 - (1 + j2)I_2 - (12 + j12)I_3 = 100 + 50 - j86.6 = 150 + j86.6 \qquad (1)$$

For mesh 2,

$$100\angle 120^o - 100\angle -120^o - I_1(1+j2) - (12+j12)I_3 + (14+j16)I_2 = 0 \text{ or}$$

$$-(1+j2)I_1 + (14+j16)I_2 - (12+j12)I_3 = -50 - j86.6 + 50 - j86.6 = -j173.2 \qquad (2)$$

For mesh 3,

$$-(12+j12)I_1 - (12+j12)I_2 + (36+j36)I_3 = 0 \text{ or } \mathbf{I_3 = I_1 + I_2} \qquad (3)$$

Solving for $\mathbf{I_1}$ and $\mathbf{I_2}$ using (1) to (3) gives

$\mathbf{I_1} = 12.804\angle{-50.19}°$ A = (8.198 – j9.836) A and
$\mathbf{I_2} = 12.804\angle{-110.19}°$ A = (–4.419 – j12.018) A

$$\mathbf{I_a = I_1 = 12.804\angle{-50.19}° \text{ A}}$$

$$\mathbf{I_b = I_2 - I_1 = 12.804\angle{-170.19}° \text{ A}}$$

$$\mathbf{I_c = -I_2 = 12.804\angle 69.81° \text{ A}}$$

As a check we can convert the delta into a wye circuit. Thus,

$\mathbf{Z_Y}$ = (12+j12)/3 = 4+j4 and $\mathbf{I_a}$ = 100/(1+j2+4+j4) = 100/(5+j6)

= 100/(7.8102∠50.19°) =

12.804 ∠–50.19° A.

So, the answer does check.

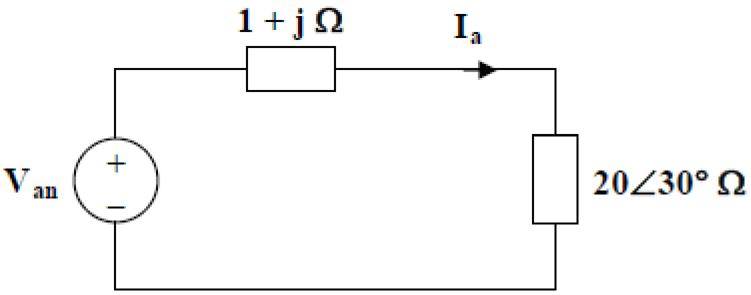
12.24 Uma fonte conectada em triângulo equilibrada tem tensão de fase $V_{ab} = 416\angle 30^\circ$ V e uma sequência de fases positiva. Se esta for conectada a uma carga em triângulo equilibrada, determine as correntes de linha e de fase. Adote como impedância de carga por fase $60\angle 30^\circ\ \Omega$ e impedância de linha por fase $1 + j1\ \Omega$.

Convert both the source and the load to their wye equivalents.

$$\mathbf{Z}_Y = \frac{\mathbf{Z}_\Delta}{3} = 20\angle 30^\circ = 17.32 + j10$$

$$\mathbf{V}_{an} = \frac{\mathbf{V}_{ab}}{\sqrt{3}}\angle -30^\circ = 240.2\angle 0^\circ$$

We now use per-phase analysis.



$$\mathbf{I}_a = \frac{\mathbf{V}_{an}}{(1 + j) + (17.32 + j10)} = \frac{240.2}{21.37\angle 31^\circ} = \mathbf{11.24\angle -31^\circ\ A}$$

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_a\angle -120^\circ = \mathbf{11.24\angle -151^\circ\ A}$$

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_a\angle 120^\circ = \mathbf{11.24\angle 89^\circ\ A}$$

But $\quad \mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{AB}\sqrt{3}\angle -30^\circ$

$$\mathbf{I}_{AB} = \frac{11.24\angle -31^\circ}{\sqrt{3}\angle -30^\circ} = \mathbf{6.489\angle -1^\circ\ A}$$

$$\mathbf{I}_{BC} = \mathbf{I}_{AB}\angle -120^\circ = \mathbf{6.489\angle -121^\circ\ A}$$

$$\mathbf{I}_{CA} = \mathbf{I}_{AB}\angle 120^\circ = \mathbf{6.489\angle 119^\circ\ A}$$

12.28 As tensões linha-linha em uma carga conectada em estrela têm magnitude igual a 440 V e estão na sequência positiva em 60 Hz. Se as cargas estiverem equilibradas com $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 25\underline{/30^\circ}$, determine todas as correntes de linha e tensões de fase.

$$V_L = |V_{ab}| = 440 = \sqrt{3}V_P \quad \text{or} \quad V_P = 440/1.7321 = 254$$

For reference, let V_{AN} = $\mathbf{254\angle 0^\circ\ V}$ which leads to
V_{BN} = $\mathbf{254\angle{-120^\circ}\ V}$ and V_{CN} = $\mathbf{254\angle 120^\circ\ V}$.

The line currents are found as follows,

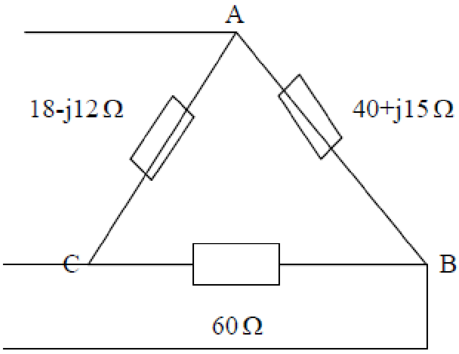
$I_a = V_{AN}/Z_Y = 254/25\angle 30^\circ$ = $\mathbf{10.16\angle{-30^\circ}\ A}$.
This leads to, I_b = $\mathbf{10.16\angle{-150^\circ}\ A}$ and I_c = $\mathbf{10.16\angle 90^\circ\ A}$.

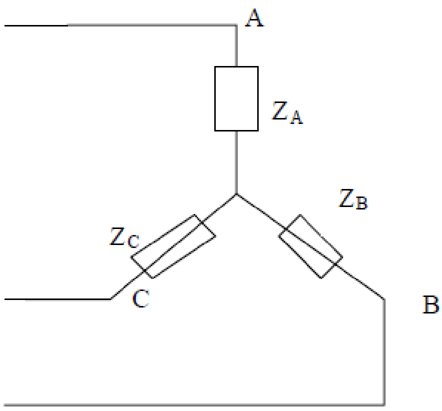
12.48 Uma fonte conectada em estrela equilibrada e de sequência positiva tem $\mathbf{V}_{an} = 240\underline{/0°}$ V RMS e alimenta uma carga conectada em triângulo desequilibrada por meio de uma linha de transmissão de impedância $2 + j3\ \Omega$ por fase.

(a) Calcule as correntes de linha para $\mathbf{Z}_{AB} = 40 + j15\ \Omega$, $\mathbf{Z}_{BC} = 60\ \Omega$ e $\mathbf{Z}_{CA} = 18 - j12\ \Omega$.

(b) Determine a potência complexa fornecida pela fonte.

(a) We first convert the delta load to its equivalent wye load, as shown below.



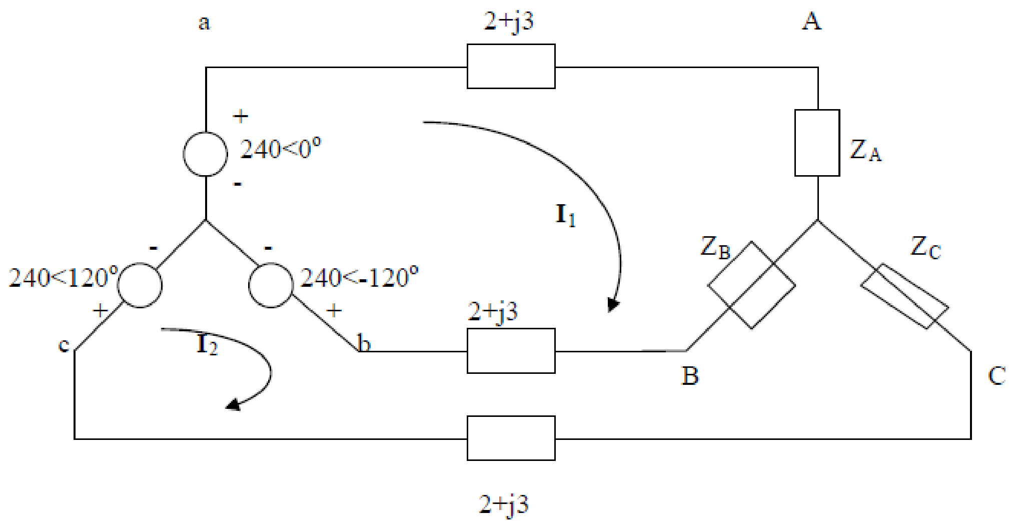


$$Z_A = \frac{(40 + j15)(18 - j12)}{118 + j3} = 7.577 - j1.923$$

$$Z_B = \frac{60(40 + j15).}{118 + j3} = 20.52 + j7.105$$

$$Z_C = \frac{60(18 - j12)}{118 + j3} = 8.992 - j6.3303$$

The system becomes that shown below.



We apply KVL to the loops. For mesh 1,

$$-240 + 240\angle -120^o + I_1(2Z_l + Z_A + Z_B) - I_2(Z_B + Z_l) = 0$$

or

$$(32.097 + j11.13)I_1 - (22.52 + j10.105)I_2 = 360 + j207.85 \qquad (1)$$

For mesh 2,

$$240\angle 120^o - 240\angle -120^o - I_1(Z_B + Z_l) + I_2(2Z_l + Z_B + Z_C) = 0$$

or

$$-(22.52 + j10.105)I_1 + (33.51 + j6.775)I_2 = -j415.69 \qquad (2)$$

Solving (1) and (2) gives

$I_1 = 23.75 - j5.328, \qquad I_2 = 15.165 - j11.89$

$$\boldsymbol{I_{aA} = I_1 = \underline{24.34\angle -12.64^o\ \text{A}}, \qquad I_{bB} = I_2 - I_1 = \underline{10.81\angle -142.6^o\ \text{A}}}$$

$$\boldsymbol{I_{cC} = -I_2 = \underline{19.27\angle 141.9^o\ \text{A}}}$$

(b) $\mathbf{S_a = (240\angle 0^\circ)(24.34\angle 12.64^\circ) = 5841.6\angle 12.64^\circ}$

$\mathbf{S_b = (240\angle -120^\circ)(10.81\angle 142.6^\circ) = 2594.4\angle 22.6^\circ}$

$\mathbf{S_c = (240\angle 120^\circ)(19.27\angle -141.9^\circ) = 4624.8\angle -21.9^\circ}$

$\mathbf{S = S_a + S_b + S_c = 12.386 + j0.55\ \ kVA = \underline{12.4\angle 2.54^\circ\ kVA}}$

12.49 Cada carga de fase é constituída por um resistor de 20 Ω e uma reatância indutiva de 10 Ω. Com uma tensão de linha igual a 220 V RMS, calcule a potência média absorvida pela carga se:

(a) As cargas trifásicas estiverem conectadas em triângulo.

(b) As cargas estiverem conectadas em estrela.

(a) For the delta-connected load, $Z_p = 20 + j10\Omega, \quad V_p = V_L = 220 \text{ (rms)}$,

$$S = \frac{3V^2{}_p}{Z^*{}_p} = \frac{3x220^2}{(20 - j10)} = 5808 + j2904 = \underline{6.943\angle 26.56^o \text{ kVA}}$$

P = **5.808 kW**

(b) For the wye-connected load, $Z_p = 20 + j10\Omega, \quad V_p = V_L / \sqrt{3}$,

$$S = \frac{3V^2{}_p}{Z^*{}_p} = \frac{3x220^2}{3(20 - j10)} = \underline{2.164\angle 26.56^o \text{ kVA}}$$

P = **1.9356 kW**