em que:

- Q_i é a potência reativa inicial (ângulo φ_1);
- Q_c a potência reativa do capacitor ou conjunto de capacitores;
- Q a potência reativa final (ângulo φ_2).

O valor do capacitor é dado por:

$$C = \frac{P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{(\omega V_{ef}{}^2)}$$

em que P é a potência ativa.

Exemplo

Determine o valor do capacitor para corrigir o fator de potência para 0,95 de um circuito com V_{ef} do gerador igual a 220 V, potência ativa de 2,2 kW, frequência de 60 Hz e fator de potência 0,8.

Solução:

$$\cos\varphi_1 = 0{,}8 \Rightarrow \varphi_1 = 36{,}87°$$

$$\cos\varphi_2 = 0{,}95 \Rightarrow \varphi_2 = 18{,}19°$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 60 = 377\,rad/s$$

$$C = \frac{P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{(\omega V_{ef}{}^2)}$$

$$C = \frac{2\,200(tg\,36{,}87° - tg\,18{,}19°)}{377 \cdot 220^2}$$

$$C = \frac{2\,200 \cdot (0{,}75 - 0{,}33)}{377 \cdot 220^2}$$

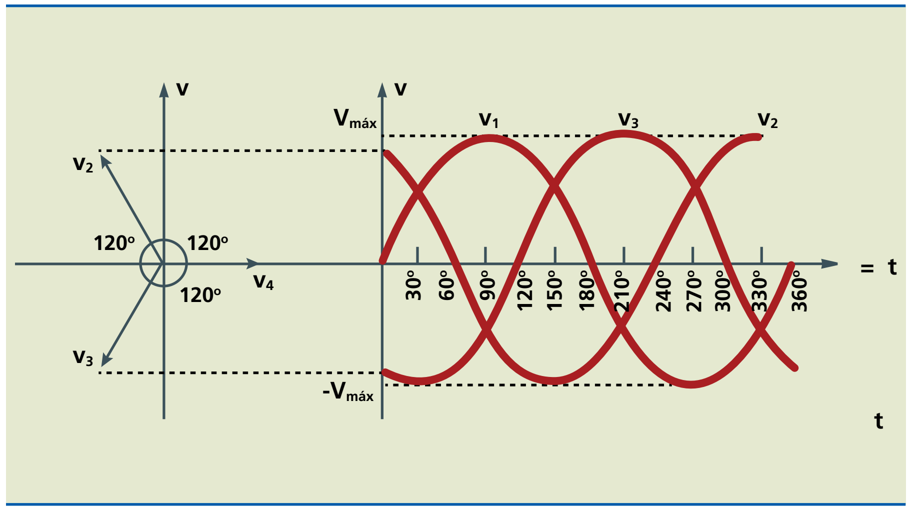
$$C = 50{,}6\;\mu F$$

Capítulo 15

Circuitos trifásicos em corrente alternada

Em um sistema trifásico, o gerador possui três enrolamentos fixos, posicionados no elemento do gerador denominado estator. Os enrolamentos estão dispostos de modo que haja uma separação física de 120° entre eles. Essa mesma diferença se reflete nas tensões geradas com defasagem de 120°, como mostra a figura 15.1.

Figura 15.1
Gráficos das tensões com defasagem de 120°.



Considerando os enrolamentos iguais e, portanto, a mesma tensão máxima ($V_{máx}$), por esse gráfico é possível estabelecer as seguintes relações:

- $V_1(t) = V_{máx}$ sen (ωt)
- $V_2(t) = V_{máx}$ sen ($\omega t + 120°$)
- $V_3(t) = V_{máx}$ sen ($\omega t - 120°$)

Dependendo da ligação dos enrolamentos à carga, o sistema trifásico pode ser: não interligado ou independente; interligado.

15.1 Sistema trifásico não interligado ou independente

Cada enrolamento é ligado a um circuito separado, não havendo nenhuma relação entre eles a não ser o gerador físico (figura 15.2).

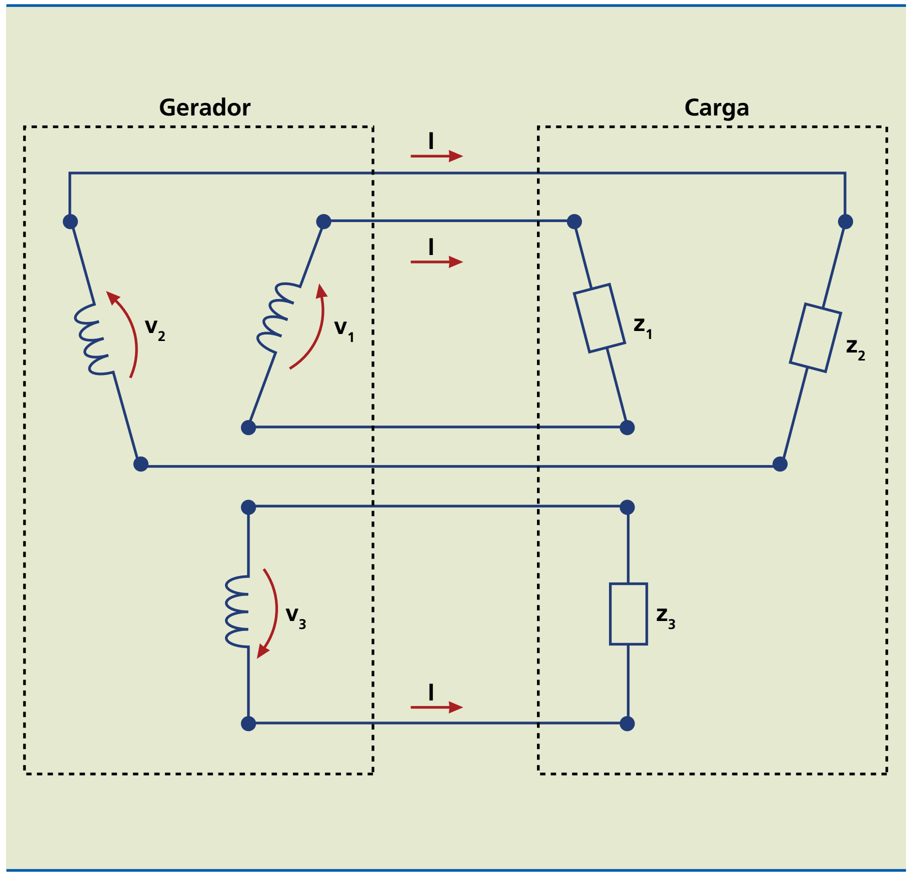


Figura 15.2
Sistema trifásico independente.

Esse sistema não é muito utilizado, porque exige seis fios para as ligações com a carga, o que o torna antieconômico.

15.2 Sistema trifásico interligado

Também chamado simplesmente de sistema trifásico, nesse sistema, há duas formas básicas de ligação, de acordo com a ligação entre os enrolamentos: em estrela ou ípsilon (Y) e triângulo ou delta (Δ).

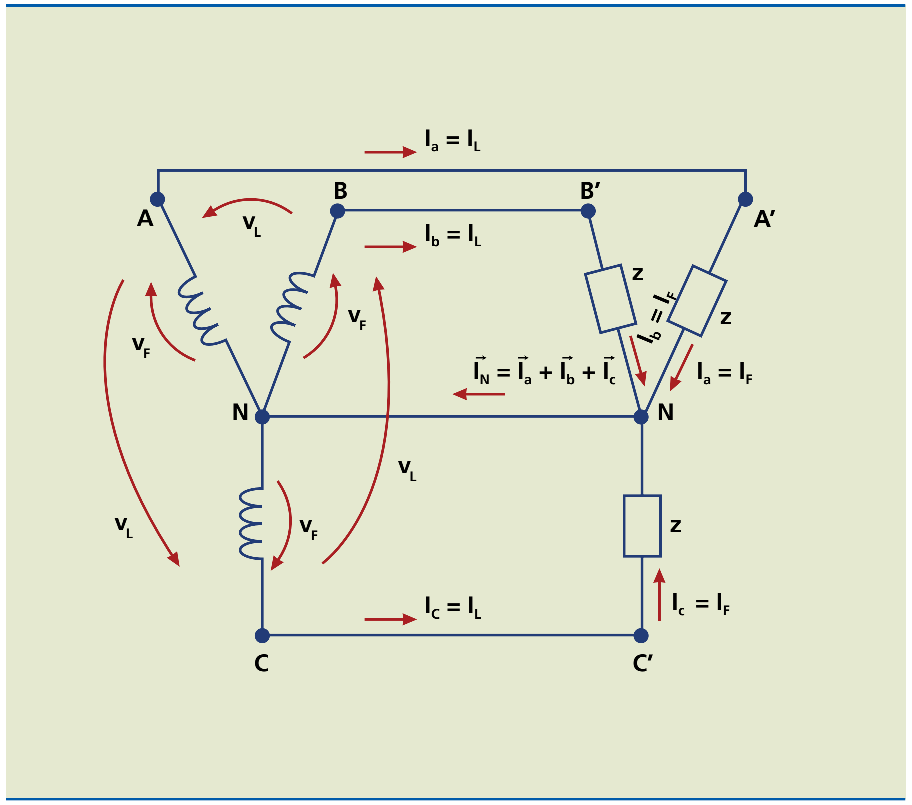
Neste estudo, vamos analisar apenas os circuitos com cargas balanceadas ou iguais ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$), chamados de sistemas equilibrados, pois, do contrário, a parte matemática se torna complexa por causa da defasagem de 120° entre os sinais.

Nada impede, ainda, que o gerador esteja ligado, por exemplo, em triângulo e a carga em estrela ou vice-versa, porém faremos as representações apenas com ligações dos mesmos tipos, ou seja, triângulo-triângulo ou estrela-estrela.

15.2.1 Ligação em estrela ou ípsilon (Y)

Nesse caso, os três enrolamentos do gerador, ou as três cargas, possuem um ponto comum, denominado neutro. Geralmente também são interligados o neutro do gerador com o neutro da carga (figura 15.3).

Figura 15.3
Ligação de carga e geradores em estrela com neutros interligados.



Como se observa na figura:

$I_n = I_a + I_b + I_c$ (soma vetorial)

Para o sistema equilibrado, $I_n = 0$.

Tensões e correntes de linha e fase

Tensões de fase (V_F) são as tensões sobre cada enrolamento do gerador, ou sobre cada carga, ou, ainda, entre um dos terminais do gerador e o ponto comum ou neutro. Correntes de fase (i_F) são as correntes que circulam entre os terminais e o neutro, ou nos enrolamentos, ou, ainda, em cada carga separadamente em direção ao neutro.

Tensões de linha (V_L) são as tensões entre cada dois terminais do gerador (menos o neutro) e, no caso da carga, a tensão do gerador. Correntes de linha (i_L) são as correntes que saem do gerador em direção à carga.

Analisando as tensões e correntes de linha e fase do gerador e da carga em estrela, obtêm-se as relações:

$$v_L = v_F\sqrt{3}$$

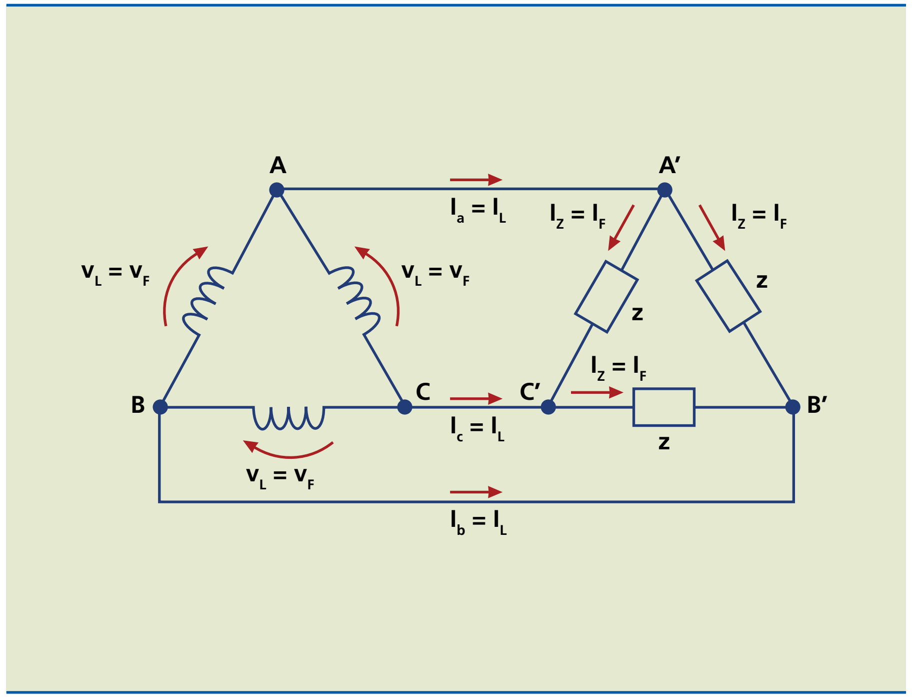
e

$$i_L = i_F$$

15.2.2 Ligação em delta ou triângulo (Δ)

Nesse caso, os enrolamentos do gerador, ou as cargas, possuem dois a dois um ponto em comum, e a ligação adquire o formato de um triângulo (figura 15.4).

Figura 15.4
Ligação dos geradores em triângulo.



Como se pode observar, a tensão do gerador é a mesma que chega à carga, e ocorre uma composição de correntes duas a duas em cada carga, devido à soma vetorial, por causa da defasagem de 120° entre elas, resultando em:

$$v_L = v_F$$

e

$$i_L = i_F\sqrt{3}$$

15.3 Potências em sistemas trifásicos

Lembrando os estudos de circuitos em série e paralelo, não importa o circuito, sua potência total é sempre a soma das potências individuais. O mesmo se repete em sistemas trifásicos.

A potência que interessa aqui é a potência sobre cada carga, ou seja, a potência com valores de fase e eficazes do circuito. Assim, analisando cada ligação (triângulo ou estrela), observa-se que a relação entre as tensões e correntes de fase e linha estão invertidas, ou seja, ora as tensões de linha e fase são iguais (triângulo) e as correntes têm relação de √3, ora o inverso (estrela), porém os produtos finais mantêm a mesma relação.

Potência ativa por fase

$$P = v_F \cdot i_F \cdot \cos\varphi$$

Relacionando com valores de linha em estrela:

$$P = (v_L/\sqrt{3}) \cdot i_L \cdot \cos\varphi$$

Relacionando com valores de linha em triângulo:

$$P = (i_L/\sqrt{3}) \cdot v_L \cdot \cos\varphi$$

Nota

Por diversas razões, as relações entre as potências calculadas por valores de fase e por valores de linha em estrela e triângulo são iguais. Logo, efetuaremos a representação de apenas uma delas, uma vez que a relação final é a mesma. É importante lembrar, no entanto, que os valores em cada uma das ligações são diferentes; o que se mantém são as relações.

Potência ativa total no sistema trifásico (circuitos equilibrados)

$$P_T = 3P = 3v_F i_F \cos\varphi \ \ [W]$$

ou

$$P_T = \sqrt{3} v_L i_L \cos\varphi \ \ [W]$$

Potência reativa total no sistema trifásico (circuitos equilibrados)

$$Q_T = 3Q = 3v_F i_F \operatorname{sen}\varphi \ \ [VAr]$$

ou

$$Q_T = \sqrt{3} v_L i_L \operatorname{sen}\varphi \ \ [VAr]$$

Potência aparente total no sistema trifásico (circuitos equilibrados)

$$S_T = 3S = 3v_F i_F \ \ [VA]$$

ou

$$S_T = \sqrt{3} v_L i_L \ \ [VA]$$

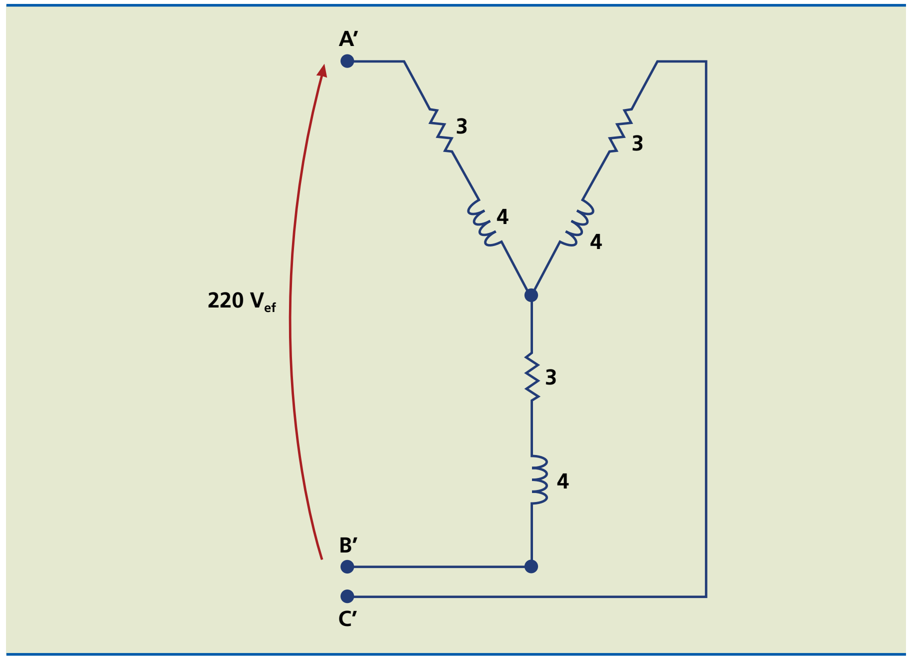
Exemplo

Um motor possui enrolamentos com reatância indutiva de 4 Ω e resistência interna de 3 Ω cada um. A tensão da rede que alimenta o motor é de 220 V_{ef} (tensão de linha). Determine as correntes de linha e fase, bem como as potências ativa, aparente e reativa totais, para as ligações em estrela e em triângulo.

Solução:

a) Ligação em estrela (figura 15.5):

Figura 15.5



$$z = 3 + 4j \ [\Omega]$$

logo:

$$z = 5\angle 53{,}13°$$

Trabalhando apenas com o módulo, temos:

$$v_L = v_F \cdot \sqrt{3} \Rightarrow 220 = v_F \cdot \sqrt{3} \Rightarrow v_F = 127 \ \ [V_{ef}]$$

$$i_L = i_F = \frac{v_F}{Z} \Rightarrow i_L = i_F = \frac{127}{5} \Rightarrow i_L = i_F = 25{,}4 \ \ [A_{ef}]$$

$$S_T = 3S = 3v_F i_F = 127 \cdot 25{,}4 \rightarrow S_T = 3\,225{,}8 \ \ [VA]$$

$$P_T = S_T \cos\varphi = 3\,225{,}8 \cdot \cos 53{,}13° \Rightarrow P_T = 1935{,}48 \ \ [W]$$

$$Q_T = S_T \operatorname{sen}\varphi = 3\,225{,}8 \cdot \operatorname{sen} 53{,}13° \Rightarrow Q_T = 2\,580{,}64 \ \ [VAr]$$