Capítulo IV

Componentes simétricas

*Por Cláudio Mardegan**

Todo conceito dos sistemas de corrente alternada é baseado na teoria fasorial (tratamento senoidal). Quando não se dispõem de tensões simétricas e equilibradas, esta teoria não pode ser aplicada.

Fortescue estudou e concluiu que qualquer sistema não simétrico/desequilibrado poderia ser decomposto em três sistemas, um denominado de sequência positiva, um denominado de sequência negativa e outro denominado de sequência zero, de forma que a soma dos fasores correspondentes de cada fase resulta no valor da grandeza daquela fase.

$Ia = Ia0 + Ia1 + Ia2$ (Equação 1)
$Ib = Ib0 + Ib1 + Ib2$ (Equação 2)
$Ic = Ic0 + Ic1 + Ic2$ (Equação 3)

O que Fourier fez para formas de onda não senoidais (componentes harmônicas), Fortescue fez para fasores desiguais e não defasados de 120º.

Veja a representação vetorial (fasorial) dos três sistemas, nas Figuras 1 (sequência positiva), 2 (sequência negativa) e 3 (sequência zero).

Sistema de sequência positiva

É um sistema composto por três fasores de módulos iguais e defasados entre si de 120°. Esses fasores giram com uma frequência angular ω (ω = 2πf) no sentido anti-horário de modo que um observador colocado numa posição qualquer "vê" passar os vetores na ordem "a b c" (ou "b c a" ou "c a b"). Vide diagrama fasorial seguinte.

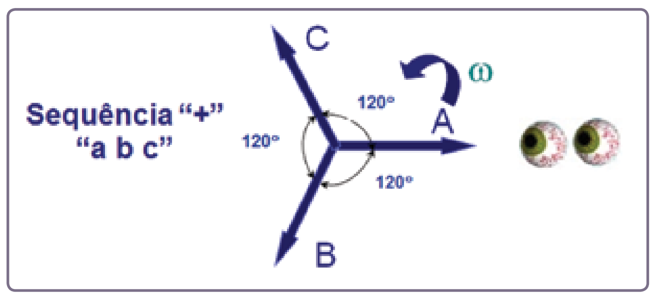


Figura 1 - Sistema de sequência positiva.

Sistema de sequência negativa

É um sistema composto por três fasores de módulos iguais e defasados entre si de 120°. Esses fasores giram com uma frequência angular ω (ω = 2πf) no sentido anti-horário de modo que um observador colocado numa posição qualquer "vê" passar os vetores na ordem "a c b" (ou "c b a" ou "b a c"). Vide diagrama fasorial seguinte.

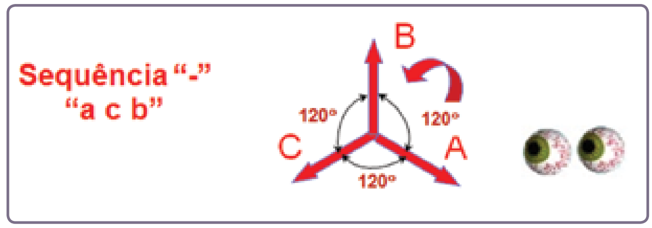


Figura 2 - Sistema de sequência negativa.

Sistema de sequência zero

É composto por três fasores de módulos iguais e em fase (defasagem angular de 0° entre si). Esses fasores giram com uma frequência angular ω (ω = 2πf) no sentido anti-horário de modo que um observador colocado numa posição qualquer "vê" os três fasores passarem juntos. Vide diagrama fasorial seguinte.

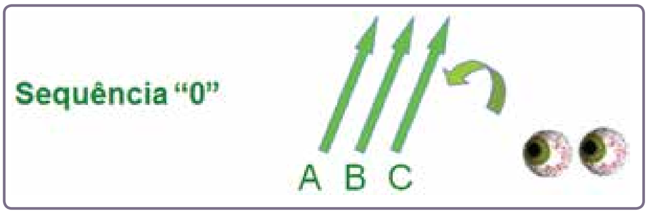
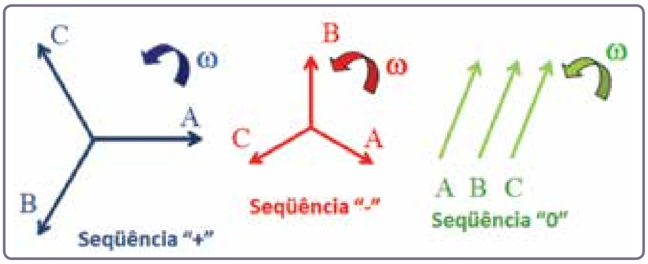


Figura 3 - Sistema de sequência zero.

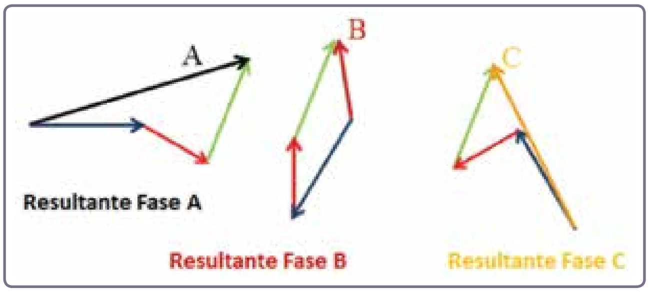
A Figura 4 mostra a comprovação de Fortescue pela forma inversa, ou seja, dos três sistemas: de sequência, positiva, negativa e zero, pode-se chegar a um sistema não simétrico e desequilibrado.

Decomposição de circuitos de sequência

Os três sistemas (sequência positiva, negativa e zero) apresentados a seguir são simétricos e equilibrados.



Se forem somadas vetorialmente (fasorialmente) as componentes de cada fase, ter-se-á a resultante de cada fase.



Colocadas em uma mesma origem, resulta em:

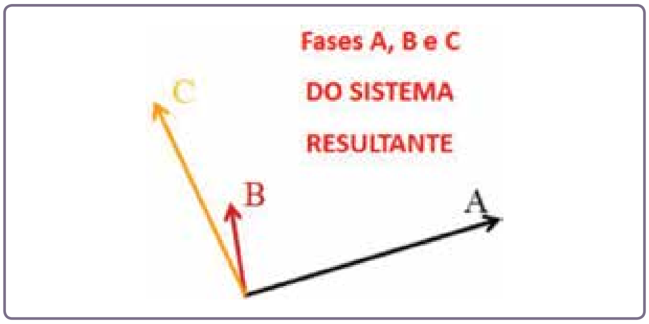


Figura 4 – Decomposição dos circuitos de sequência.

Como pode ser visualizado na figura anterior, o sistema resultante não é simétrico e equilibrado.

Assim, o que Fortescue quis mostrar, de fato, é que este último sistema, que não é nem simétrico e equilibrado, pode ser decomposto nos três sistemas, um de sequência positiva, um de sequência negativa e outro de sequência zero.

O operador "a"

O operador "a" é definido como sendo um vetor de módulo unitário e ângulo de 120°, de forma que quando multiplica outro vetor qualquer rotaciona este vetor em 120°, sem alterar o seu módulo.

Forma polar

$a = 1 \angle 120°$

Forma trigonométrica

$a = 1\,[\cos(120°) + j\,\mathrm{sen}(120°)]$

Forma cartesiana

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Forma exponencial

$a = 1 \times e^{j120°}$

Tabela 1 - Exponenciação do operador "a"

	Forma	
	Exponencial	*Cartesiana*
$a^0 = 1$	$1xe^{j0}$	1.000 + j 0.000
$a^1 = a$	$1xe^{j120}$	-0.500 + j 0.866
$a^2 = a^2$	$1xe^{j240}$	-0.500 - j 0.866
$a^3 = 1$	$1xe^{j360} = 1xe^{j0}$	1.000 + j 0.000
$a^4 = a$	$1xe^{j480} = 1xe^{j120}$	-0.500 + j 0.866
$a^5 = a^2$	$1xe^{j600} = 1xe^{j240}$	-0.500 - j 0.866

$$1 + a + a^2 = 0$$

$$1 - a^2 = \sqrt{3}\angle 30^\circ$$

$$a^2 - 1 = \sqrt{3}\angle -150^\circ$$

$$1 - a = \sqrt{3}\angle -30^\circ$$

$$a - 1 = \sqrt{3}\angle 150^\circ$$

$$a - a^2 = \sqrt{3}\angle 90^\circ = j\sqrt{3}$$

$$a^2 - a = \sqrt{3}\angle -90^\circ = -j\sqrt{3}$$

$$a^2 + a = -1$$

$$a^2 + 1 = 1\angle -60^\circ$$

Apresenta-se na Figura 5, um resumo das propriedades do operador "a".

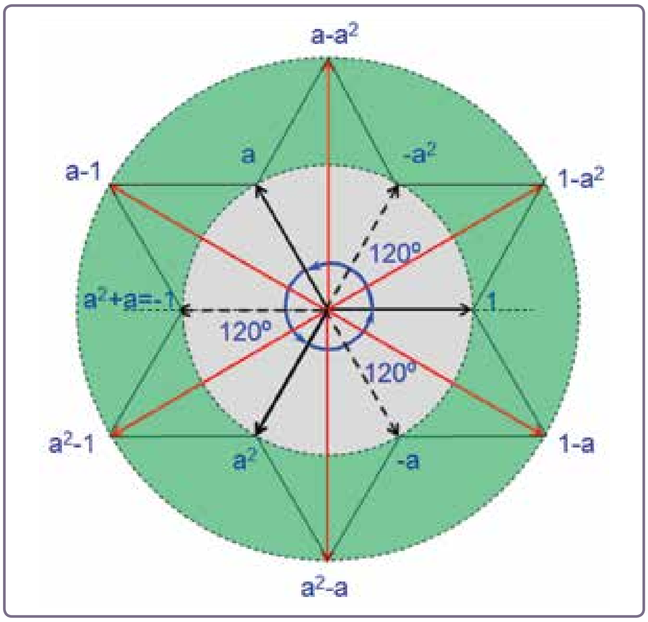


Figura 5 - Resumo das principais propriedades do operador "a".

Aplicando-se o operador "a" nas equações 1 a 3, tem-se:

$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$
$I_b = I_{a0} + a^2\,I_{a1} + a\,I_{a2}$
$I_c = I_{a0} + a\,I_{a1} + a^2\,I_{a2}$

Estas equações são chamadas de "Equações de síntese", que, em "síntese", obtém os valores dos fasores de fase a partir do conhecimento das componentes de sequência positiva, negativa e zero, que na forma matricial pode ser escrita:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Fazendo-se a inversão da matriz "A", apresentada anteriormente, obtém-se as "Equações de análise", ou seja, a partir do conhecimento das grandezas de fase, tem-se as componentes de sequência.

$$A^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

O conjunto de equações pode então ser escrito como segue:

$I_{a0} = ⅓\,(I_a + I_b + I_c)$
$I_{a1} = ⅓\,(I_a + a\,I_b + a^2\,I_c)$
$I_{a2} = ⅓\,(I_a + a^2\,I_b + a\,I_c)$

Essas equações também valem para tensão.

Equações de análise

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Equações de síntese

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Análise da corrente no neutro

Num sistema trifásico, a corrente no neutro é dada por:

$In = Ia + Ib + Ic$

$In = (Ia_0 + Ia_1 + Ia_2) + (Ib_0 + Ib_1 + Ib_2) + (Ic_0 + Ic_1 + Ic_2)$

$In = (Ia_0 + Ia_1 + Ia_2)\ (Ia_0 + a^2 \times Ia_1 + a \times Ia_2) + (Ia_0 + a \times Ia_1 + a^2 \times Ia_2)$

Agrupando tem-se:

$In = 3 \times Ia_0 + Ia_1\ (1 + a + a^2) + Ia_2\ (1 + a + a^2)$

Porém, $1 + a + a^2 = 0$, logo:

$In = 3 \times Ia_0$

Quando um sistema trifásico não permite retorno pelo neutro (sistema isolado), a corrente In será nula.

Analisando a equação anterior, vê-se, então, que a corrente Iao também deve ser nula, em condições de regime (sem falta à terra), ou seja, as correntes de linha não possuirão componentes de sequência zero.

Assim, um sistema ligado em triângulo não permite circular corrente de sequência zero na linha.

Corrente de sequência zero em transformador triângulo-estrela

Quando ocorre um curto-circuito fase-terra no secundário de um transformador triângulo-estrela, aterrado no secundário, irá circular corrente de sequência zero no lado secundário, mas na linha, no primário não irá circular corrente de sequência zero, ficará confinada dentro do delta. Veja Figura 6.

Similaridade entre a corrente de sequência zero e a corrente de 3ª harmônica

À frequência fundamental (60 Hz), as correntes de um sistema elétrico trifásico simétrico e equilibrado são dadas por:

$I_a = I_{Máx} \bullet Sen(\omega \bullet t)$

$I_b = I_{Máx} \bullet Sen(\omega \bullet t - 120^o)$

$I_c = I_{Máx} \bullet Sen(\omega \bullet t + 120^o)$

Em 180 Hz (3ª harmônica):

$I_{a3} = I_{3Máx} \bullet Sen(3\omega t)$

$I_{b3} = I_{3Máx} \bullet Sen(3\omega t - 360^o) = I_{3Máx} \bullet Sen(3\omega t)$

$I_{c3} = I_{3Máx} \bullet Sen(3\omega t + 360^o) = I_{3Máx} \bullet Sen(3\omega t)$

Como pode ser notado, na corrente de 3ª harmônica (de sequência positiva), as correntes estão em fase nas três fases. Dessa forma, quando estas correntes chegam ao neutro não se anulam, se somam. Este comportamento é similar ao da corrente de sequência zero.

Notas:

(a) É importante saber que podem existir correntes de 3ª harmônica de sequência positiva e negativa;

(b) Locais onde existem muitas fontes chaveadas (microlândias, data-centers), devido à terceira harmônica circular pelo neutro, podem promover o aparecimento de tensões neutro terra que podem provocar a queima de dispositivos eletrônicos sensíveis (tais como dispositivos de armazenamento de massa);

(c) Correntes de energização de transformadores (correntes inrush) possuem elevado teor de 3ª harmônica e podem causar operações indevidas de relés (de terra e diferenciais).

Circuitos de sequência

Apresenta-se na Figura 7 os circuitos de sequência.

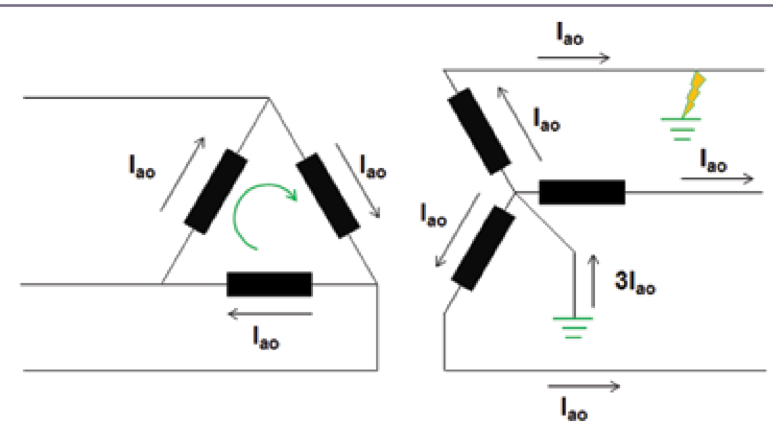


Figura 6 - Corrente de sequência zero para uma falta fase-terra em um transformador triângulo-estrela.

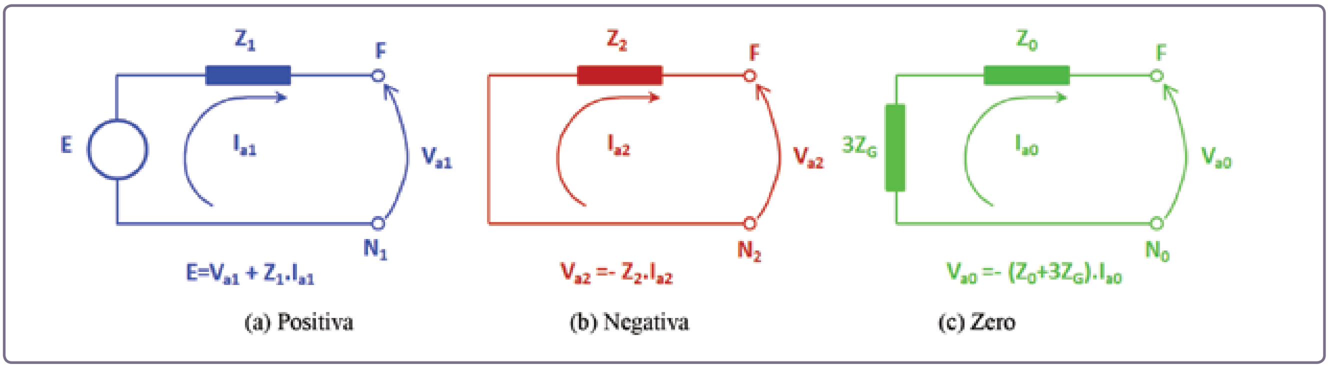


Figura 7 - Circuitos de sequência positiva, negativa e zero.

Notas importantes:

1 - Os pontos N1, N2 e N0, via de regra, não são o mesmo ponto e não tem necessariamente o mesmo potencial;

2- O 3 que aparece multiplicando 3.ZG deve-se ao fato de que a tensão real que aparece no resistor quando de uma falta fase-terra é ZG.3Iao. Como no circuito de sequência, tem-se apenas Iao, ZG deve ser multiplicado por 3 para manter a tensão corretamente;

3 – Só o circuito de sequência positiva tem fonte, pois, a princípio, as fontes são projetadas para gerarem tensões e correntes de sequência positiva;

4- As tensões nos circuitos de sequência, quando convertidas de pu para volts devem utilizar os valores base na fase e não entre fases;

5 – As componentes harmônicas de sequência negativa devem ter suas reatâncias multiplicadas pelas respectivas ordens harmônicas, nesse circuito. As componentes de sequência positiva idem. As componentes harmônicas de ordens múltiplas de 3 devem ser multiplicadas pelas suas respectivas ordens e entram no diagrama de sequência zero.

**Cláudio Sérgio Mardegan é diretor da EngePower Engenharia e Comércio Ltda. É engenheiro eletricista formado pela Unifei, especialista em proteção de sistemas elétricos industriais e qualidade de energia, com experiência de mais de 35 anos nesta área. É autor do livro "Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais", patrocinado pela Schneider, e coautor do "Guia O Setor Elétrico de Normas Brasileiras". É membro sênior do IEEE e participa também dos Working Groups do IEEE que elaboram os "Color Books". É Chairman do Capítulo 6 do Buff Book, atual 3004 series (3004.6) sobre Ground Fault Protection e também participa de Forensics.*

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO
Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br