

DETECÇÃO DE FALHAS UTILIZANDO TRANSFORMADAS VETORIAIS TRIFÁSICAS

Rocha C.X., Camacho J.R., Marques L.G., Guimarães Júnior S.C.

UFU-FEELT, Uberlândia – MG, cxrocha@hotmail.com, camacho@ufu.br leonardo.mqs@gmail.com scguimaraes@ufu.br

Resumo—Este artigo é uma abordagem das transformadas vetoriais trifásicas em sistemas desbalanceados, no intuito de utilizá-las como métodos de detecção de falhas em sistemas de geração de energia independente, interligados à rede elétrica. Um sistema trifásico não pode ser considerado simplesmente a soma de três fases independentes, o que nos conduz a aplicar algumas transformadas vetoriais para obter uma representação mais elegante dos sistemas. Um sistema de controle de potência conectado a uma rede trifásica é baseada na transformação destas variáveis.

Palavras-Chave—Clark, Componentes Simétricas, Fortescue, Lyon, Park, Space Vector.

FAULT DETECTION USING THREE-PHASE VECTORIAL TRANSFORMS

Abstract—This article is an approach to unbalanced three-phase transformed into vector systems, in order to use them as methods of detecting faults in independent power generation, interconnected electricity grid. A three-phase system can not be considered simply the sum of three independent stages, which leads us to apply some vector transformed to obtain a more elegant representation of systems. A control system connected to a three-phase power network is based on the transformation of these variables.

Keywords—Fortescue, Lyon, dq, alfa-beta, Space Vector, Park, Clark, Symmetrical Components.

I. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda mundial por energia, o esgotamento dos recursos naturais do planeta (petróleo, carvão, ...), além das preocupações sobre o aquecimento global, estudiosos do mundo inteiro estão se dedicando à geração de energias limpas e renováveis. Nesse contexto, a energia elétrica que pode ser considerada uma das mais importantes formas de distribuição de energia possuem dois problemas principais: a geração de forma eficiente e a interligação da energia gerada às redes de transmissão e distribuição existentes. A geração distribuída por painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas é hoje a forma mais utilizada na geração de energia elétrica alternativa. Neste cenário, é imprescindível grande preocupação com a interligação destes sistemas à rede de distribuição de energia. Os sistemas de geração distribuída, quando interligados com

a rede elétrica, devem possuir sistemas de sincronismo e proteção, a fim de evitar o colapso da *rede existente*. Diante da grande complexidade dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica e da grande quantidade de sistemas de geração independentes interligados ao sistema, há de se considerar que controles existentes devem prever situações de desbalanceamento de fases, harmônicos e até mesmo variações na frequência do sistema de energia. Assim, faz-se necessário definir algoritmos e ferramentas matemáticas para que possamos manter a rede sob controle, ou simplesmente detectar as perturbações existentes e suas origens. Dentre os algoritmos existentes, os mais indicados são os que utilizam as Transformadas Vetoriais como referência:

- Transformadas em Componentes simétricas no domínio da frequência [1];
- Transformadas em Componentes simétricas no domínio do tempo [2];
- Transformadas $\alpha\beta$ [3];
- Transformadas dq [4].

II. TRANSFORMADAS TRIFÁSICAS

A. Componentes Simétricas no Domínio da Frequência

O método das Componentes Simétricas é utilizado para a análise de sistemas desbalanceados polifásicos [1]. Esse método permite a decomposição dos fasores do estado estacionário de um sistema trifásico, em um conjunto de componentes sequenciais, chamados de componentes de sequencias positiva, negativa e zero. Esta abordagem não apenas oferece um método elegante e padronizado para a análise de sistemas polifásicos desbalanceados, mas também permite uma explicação matemática e física dos fenômenos existentes nos sistemas em operação.

Aplicando o método das componentes simétricas, cada um destes três fasores que representam as tensões trifásicas podem ser transformadas em um novo conjunto de três fasores representando a sequência de componentes de uma das fases do sistema trifásico. Por exemplo, os fasores de sequencia positiva-negativa-zero da fase *a* (V_a^+, V_a^-, V_a^0) pode ser calculada utilizando a seguinte matriz de transformações.

$$V_{+0(a)} = [T_{+0}] V_{abc} \quad (1)$$

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \angle \theta_a \\ V_b \angle \theta_b \\ V_c \angle \theta_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$V_{+0(a)} = \begin{bmatrix} \vec{V}_a^+ \\ \vec{V}_b^- \\ \vec{V}_c^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a^+ \angle \theta_a^+ \\ V_b^- \angle \theta_b^- \\ V_c^0 \angle \theta_c^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$



$$[T_{+-0}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde o operador de Fortescue $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1\angle 120^\circ$. Ou seja, o resultado de um fasor multiplicado por α será outro fasor com o mesmo módulo, mas com uma defasagem angular de 120° .

Os fasores que representam as componentes positivas e negativas das fases b (\vec{V}_b^+ e \vec{V}_b^-) e c (\vec{V}_c^+ e \vec{V}_c^-) podem ser obtidos aplicando as equações (5) e (6) respectivamente, nas componentes da fase a (\vec{V}_a^+ e \vec{V}_a^-).

$$\vec{V}_b^+ = \alpha^2 \vec{V}_a^+ \quad \vec{V}_b^- = \alpha \vec{V}_a^- \quad (5)$$

$$\vec{V}_c^+ = \alpha \vec{V}_a^+ \quad \vec{V}_c^- = \alpha^2 \vec{V}_a^- \quad (6)$$

A transformação dos fasores representados por componentes simétricas da fase a ($V_{+-0(a)}$) para os fasores representando as tensões trifásicas (V_{abc}) é chamada de transformada inversa e é realizada aplicando (7).

$$V_{abc} = [T_{+-0}]^{-1} V_{+-0(a)} \quad (7)$$

onde

$$[T_{+-0}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

1) *Sistemas Equilibrados*: Note que em sistemas equilibrados, conforme Figura 1, temos as formas de ondas das fases perfeitamente senoidais, com os mesmos valores de pico, e igualmente defasadas em 120° (letra a). Nesse caso, conforme previsto, os fasores estão perfeitamente alocados em módulo e ângulo (letra b).

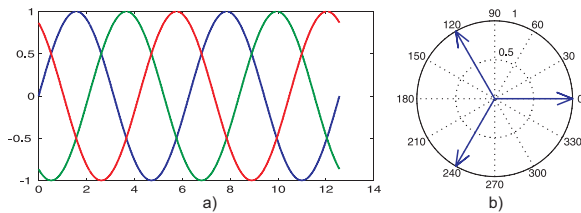


Fig. 1. Sistema Trifásico Equilibrado a)No tempo b)Fasores

Decompondo o sistema trifásico equilibrado em suas componentes simétricas Positiva, Negativa e Zero, através da aplicação da matriz de transformação (4), podemos verificar na Figura 2, que somente a componente Positiva possui o módulo valor de pico das tensões instantâneas, enquanto as componentes Negativa e Zero tem valor nulo.

2) *Sistemas Desequilibrados*: Em sistemas desequilibrados, com formas de ondas das fases senoidais, mas com valores de pico diferentes, e com ângulos de defasamento entre fases também diferentes de 120° , conforme Figura 3.a, observa-se que os módulos dos fasores são de valores diferentes entre si, e os ângulos entre eles não são simétricos, representando com perfeição o sistema no domínio do tempo (letra b).

Fazendo a mesma decomposição simétrica apresentada anteriormente, podemos verificar na Figura 4 que a componente

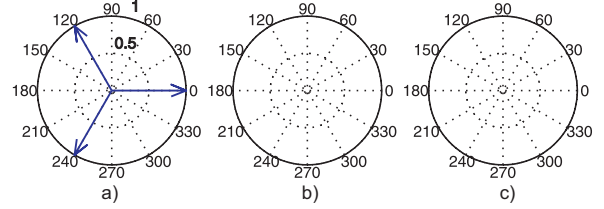


Fig. 2. Sequência de fasores trifásicos equilibrados. a)Positiva b)Negativa c)Zero

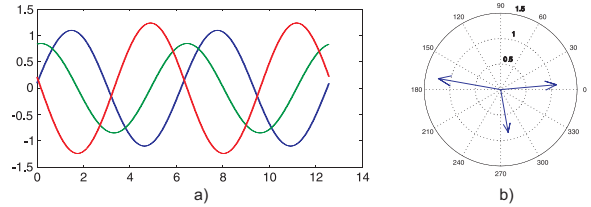


Fig. 3. Sistema Trifásico Desequilibrado a)No tempo b)Fasor

Positiva tem valor em módulo abaixo do valor de pico das tensões instantâneas (letra a), e as componentes Negativa e Zero possuem valores significativos, proporcionais aos distúrbios encontrados (letra b e c). Nota-se que mesmo em um sistema desbalanceado, as fases das componentes Positiva e Negativa estão defasadas igualmente de 120°

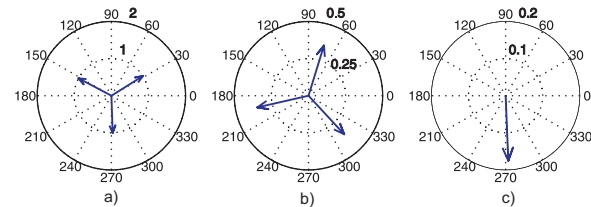


Fig. 4. Sequência de fasores trifásicos desequilibrados. a)Positiva b)Negativa c)Zero

B. Componentes Simétricas no Domínio do Tempo

O método de decomposição em componentes simétricas no domínio do tempo [2] é uma extensão do método de decomposição no domínio da frequência [1]. Sabendo que v_{abc} é a soma de suas componentes simétricas, temos:

$$v_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = v_{abc}^+ + v_{abc}^- + v_{abc}^0 \quad (9)$$

e utilizando-se de (1), temos:

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_a^- \\ v_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

Como visto anteriormente, o operador α representa uma defasagem de 120° no fasor. Conseqüentemente, o operador α^2 representa uma defasagem de 240° ou -120° . Como demonstrado em [5], desenvolvendo as equações (9) (10), temos:

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_a^- \\ v_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_a + v_b(+120) + v_c(+240) \\ v_a + v_b(+240) + v_c(+120) \\ v_a + v_b + v_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\alpha = e^{\frac{2\pi}{3}i} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i \quad (12)$$

$$\alpha^2 = e^{\frac{4\pi}{3}i} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i \quad (13)$$

$$e^{\frac{\pi}{2}i} = i \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_a^- \\ v_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_a - \frac{1}{2}(v_b + v_c) + \frac{\sqrt{3}}{2}e^{\frac{\pi}{2}i}(v_b - v_c) \\ v_a - \frac{1}{2}(v_b + v_c) - \frac{\sqrt{3}}{2}e^{\frac{\pi}{2}i}(v_b - v_c) \\ v_a + v_b + v_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

Utilizando-se de (4), (5) e (6), podemos encontrar:

$$[T_+] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[T_-] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$v_{abc}^+ = [T_+] \cdot v_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$v_{abc}^- = [T_-] \cdot v_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$v_{abc}^0 = [T_0] \cdot v_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

1) *Sistemas Equilibrados*: Como apresentado na Figura 5, em um sistema equilibrado, somente a componente simétrica positiva (v_{abc}^+) é igual as tensões do sistema (v_{abc}), e as componetes Negativa e Zero tem valor nulo.

2) *Sistemas Desequilibrados*: Observando a Figura 6, vimos que em um sistema trifásico desequilibrado, o sistema (v_{abc}) é decomposto em componentes simétrica positivas (v_{abc}^+), negativas (v_{abc}^-) e zero (v_{abc}^0) e possuem valores de pico proporcionais ao desequilíbrio encontrado.

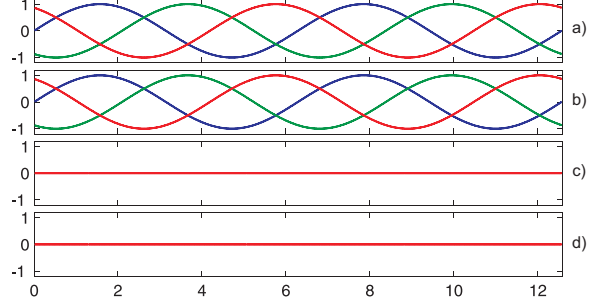


Fig. 5. Sistema Trifásico Equilibrado. a) v_{abc} b) v_{abc}^+ c) v_{abc}^- d) v_{abc}^0

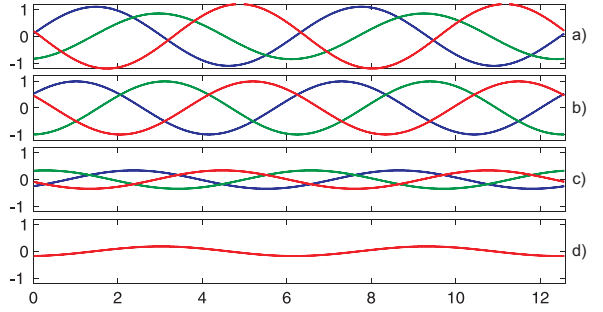


Fig. 6. Sistema Trifásico Desequilibrado. a) v_{abc} b) v_{abc}^+ c) v_{abc}^- d) v_{abc}^0

C. Componentes ($\alpha\beta$)

Esta transformação matemática [3] é bastante utilizada na engenharia elétrica para a simplificação da análise de sistemas trifásicos. Ela transforma um sistema trifásico em um sistema bifásico equivalente, com eixo imaginário β e eixo real α ortogonais. Esta transformação é aplicada no domínio do tempo, multiplicando a matriz de transformação $[T_{\alpha\beta 0}]$ pelo vetor de tensões $[v_a, v_b, v_c]^T$.

$$v_{\alpha\beta 0} = [T_{\alpha\beta 0}] v_{abc} \quad (21)$$

$$[T_{\alpha\beta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

A matriz transformada de Clarke (22) possui a propriedade de sua matriz transposta ser igual a sua matriz inversa.

$$[T_{\alpha\beta 0}]^{-1} = [T_{\alpha\beta 0}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

É importante ressaltar que após a aplicação da transformada nas tensões de um sistema trifásico abc temos que:

$$v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2 = v_a^2 + v_b^2 + v_c^2 \quad (25)$$

E com relação a potência resultante temos:

$$p = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{v}_{abc} \cdot \mathbf{i}_{abc} \quad (26)$$

1) *Sistemas Equilibrados*: A Figura 7 mostra a decomposição em $\alpha\beta$ em Figura 7.b de um sistema equilibrado abc em Figura 7.a, o módulo de V_α e V_β calculado como $\sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2}$ em Figura 7.c permanece constante, e o ângulo θ calculado como sendo $\arctan\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right)$ em Figura 7.d, que é uma forma de onda dente de serra perfeita.

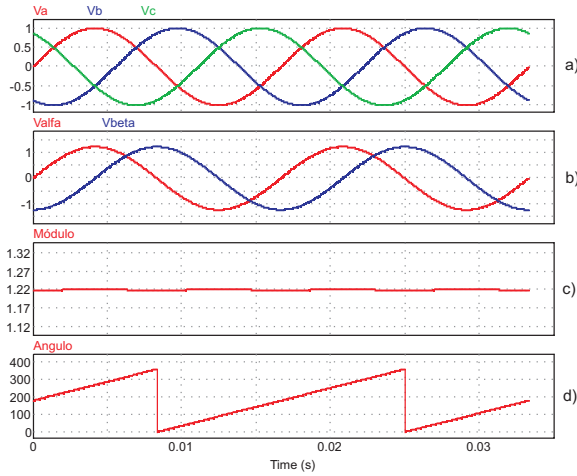


Fig. 7. Sistema Equilibrado a) V_{abc} b) $V_{\alpha\beta}$ c) Módulo de $\alpha\beta$ d) Ângulo de $\alpha\beta$

2) *Sistemas Desequilibrados*: A Figura 8 mostra a decomposição $\alpha\beta$ em Figura 8.b de um sistema desequilibrado abc em Figura 8.a, o módulo de V_α e V_β calculado como $\sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2}$ em Figura 8.c não é constante e o ângulo θ calculado como sendo $\arctan\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right)$ em Figura 8.d, não é uma onda dente de serra perfeita.

D. Componentes (dq)

Outra transformação matemática bastante utilizada para análise de sistemas trifásicos é a transformada dq [4], onde as componentes vetoriais $\alpha\beta$ podem ser convertidas em componentes vetoriais síncronas dq utilizando a matriz de transformação $[T_{dq0}]$ dada por:

$$[T_{dq0}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Assim podemos escrever

$$\mathbf{v}_{dq0} = [T_{dq0}] \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \quad (28)$$

Resultado em

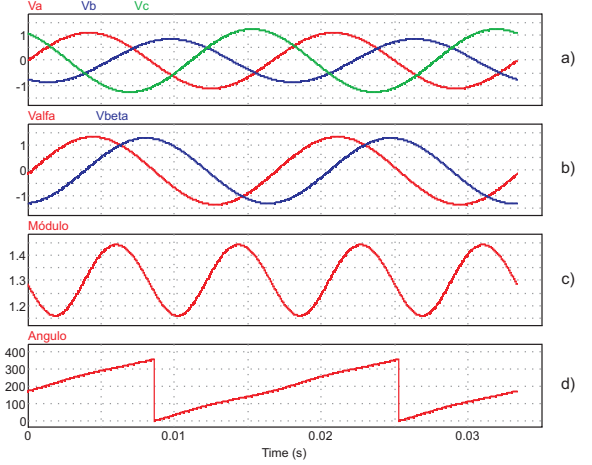


Fig. 8. Sistema Desequilibrado a) V_{abc} b) $V_{\alpha\beta}$ c) Módulo de $\alpha\beta$ d) Ângulo de $\alpha\beta$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

também neste caso, temos que $[T_{dq0}]^{-1} = [T_{dq0}]^T$.

Em vários casos de análises de sistemas trifásicos, necessitamos somente das transformadas dq , não sendo necessário o cálculo da transformada $\alpha\beta$, assim podemos passar diretamente do sistema trifásico abc para dq , sem passar por $\alpha\beta$, aplicando a matriz de transformação $[T_\theta]$, definida abaixo:

$$[T_\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{v}_{dq0} = [T_\theta] \mathbf{v}_{abc} \quad (31)$$

As tensões se comportam como em (32).

$$v_d^2 + v_q^2 + v_0^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2 = v_a^2 + v_b^2 + v_c^2 \quad (32)$$

e as potências como em (33).

$$p = \mathbf{v}_{dq0} \cdot \mathbf{i}_{dq0} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{v}_{abc} \cdot \mathbf{i}_{abc} \quad (33)$$

1) *Sistemas Equilibrados*: Como mostrado Figura 9, em sistemas trifásicos equilibrados Figura 9.a, a componente \mathbf{d} é nula Figura 9.b, e a componente \mathbf{q} permanece constante no valor de pico das tensões \mathbf{abc} Figura 9.c.

2) *Sistemas Desequilibrados*: Conforme Figura 10, em sistemas trifásicos desequilibrados Figura 10.a, a componente \mathbf{d} oscila em torno do valor 0 Figura 10.b, e a componente \mathbf{q} oscila em torno do valor de picos das tensões \mathbf{abc} Figura 10.c.

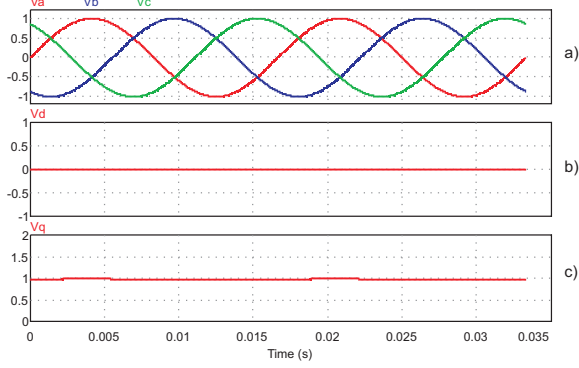


Fig. 9. Sistema Equilibrado a) V_{abc} b) V_d c) V_q

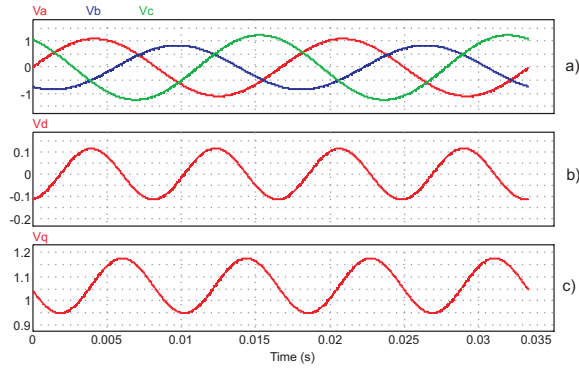


Fig. 10. Sistema Desequilibrado a) V_{abc} b) V_d c) V_q

E. Componentes Simétricas Positivas e Negativas nas Transformadas Alfa e Beta

No intuito de minimizar o esforço computacional na detecção de falhas em sistemas trifásicos, ao invés calcular as componentes trifásicas positivas e negativas das fases a, b e c individualmente para posteriormente analisarmos cada fase, calculamos as componentes simétricas de $\alpha\beta$, e assim podemos analisar o sistema, detectando falhas na amplitude, frequência e defasagem entre as fases. Desenvolvendo as equações apresentadas abaixo, e utilizando a transformada $[T_{\alpha\beta}]$ e a transformada $[T_{+-0}]$, podemos encontrar $V_{\alpha\beta}^+$ e $V_{\alpha\beta}^-$ de um sistema trifásico v_{abc} .

$$v_{\alpha\beta} = [T_{\alpha\beta}] v_{abc} \quad (34)$$

$$v_{abc} = [T_{\alpha\beta}]^{-1} v_{\alpha\beta} = [T_{\alpha\beta}]^T v_{\alpha\beta} \quad (35)$$

$$v_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] v_{abc}^+ = [T_{\alpha\beta}] [T_+] v_{abc} \quad (36)$$

$$v_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] [T_+] [T_{\alpha\beta}]^T v_{\alpha\beta} \quad (37)$$

Substituindo (37), (39) e (40) em (37), encontramos as componentes positiva de α e β (41).

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$[T_+] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$[T_{\alpha\beta 0}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$v_{\alpha\beta}^+ = \begin{bmatrix} 1 & -e^{-\frac{i\pi}{2}} \\ e^{\frac{i\pi}{2}} & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \quad (41)$$

Para encontrar a componente negativa, basta substituir $[T_+]$ por $[T_-]$ nas equações anteriores e encontramos (42).

$$v_{\alpha\beta}^- = \begin{bmatrix} 1 & e^{-\frac{i\pi}{2}} \\ -e^{\frac{i\pi}{2}} & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \quad (42)$$

Fazendo $q = e^{-\frac{i\pi}{2}}$, onde o operador q , que quando aplicado a um sinal de entrada, obtém-se uma saída com uma defasagem de 90° em relação ao sinal de entrada, temos:

$$[T_{\alpha\beta+}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$[T_{\alpha\beta-}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

O objetivo deste estudo é verificar ou não a existência/variação das componentes positiva e negativa, no intuito de detectar distúrbios no sistema trifásico. Assim com as equações abaixo, calculamos o módulo das componentes positivas e negativas de $\alpha\beta$.

$$|v^+| = \sqrt{(v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2} \quad (45)$$

$$|v^-| = \sqrt{(v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2} \quad (46)$$

1) *Sistemas Equilibrados*: Analisando a Figura 11, em um sistema trifásico equilibrado Figura 11.a, vimos que o módulo da componente positiva de $\alpha\beta$ é constante e igual ao valor de pico de V_{α} e V_{β} Figura 11.c, e o módulo da componente negativa de $\alpha\beta$ é nula Figura 11.d.

2) *Sistemas Desequilibrados*: Já nos sistemas trifásicos desequilibrados, conforme mostrado na Figura 12.a, vimos que o módulo da componente positiva de $\alpha\beta$ também é constante e mas diferente ao valor de pico de V_{α} e V_{β} Figura 12.c, e o módulo da componente negativa de $\alpha\beta$ é diferente de zero Figura 12.d.

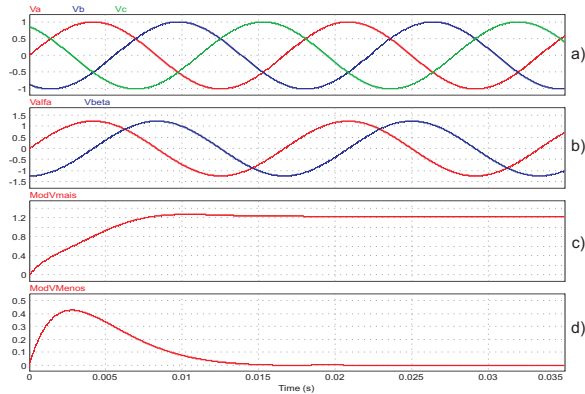


Fig. 11. Sistema Equilibrado a) V_{abc} b) $V_{\alpha\beta}$ c) Componente Positiva c) Componente Negativa

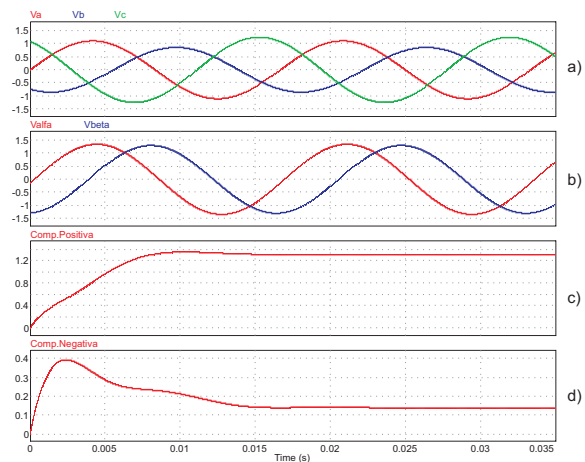


Fig. 12. Sistema Desequilibrado a) V_{abc} b) $V_{\alpha\beta}$ c) Componente Positiva c) Componente Negativa

III. CONCLUSÕES

Um estudo detalhado das Transformadas Vetoriais Trifásicas foi realizado no intuito de elucidar seus comportamentos, quando da existência de perturbações em sistemas elétricos. Os algoritmos apresentados são facilmente implementados em microcontroladores, podendo ser utilizados em sistemas embarcados. Foram objeto de estudo, os algoritmos relacionados abaixo:

- 1) Transformadas Clarke ($\alpha\beta$).
- 2) Transformadas Park (dq).
- 3) Componentes Simétricas com $\alpha\beta$.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Faculdade de Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (FEELT-UFU), e do Instituto Federal de Goiás (IFG).

Referencias

- [1] C. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 1027–1140, July 1918.
- [2] W. Lyon, "Application of the method of symmetrical components," *McGraw-Hill*, 1937.
- [3] W. Dueterhoeft, M. W. Schulz, and E. Clarke, "Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 70, no. 2, pp. 1248–1255, July 1951.
- [4] R. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 48, no. 3, pp. 716–727, July 1929.
- [5] M. R. Iravani and M. Karimi-Ghartemani, "Online estimation of steady state and instantaneous symmetrical components," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 150, no. 5, pp. 616–622, 2003.

Cássio Xavier Rocha concluiu o mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia em 1998. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia em 1991. Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase na conexão de Fontes Alternativas de Energia com a rede elétrica.

José Roberto Camacho concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica University of Canterbury Nova Zelândia em 1993. Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Uberlândia. Membro Senior do IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas, Dispositivos de Potência, Geração Distribuída, Fontes Alternativas de Energia e Energia para o meio rural. Em suas atividades profissionais interagiu com 50 colaboradores em co-autorias de trabalhos científicos. Em seu currículo Lattes os termos mais frequentes na contextualização da produção científica, tecnológica e artístico-cultural são: motor de indução, motor linear, monofásico, bifásico, motor assíncrono, gerador de indução, assimetria magnética, chaveamento de capacitores, Conexão Unitária e controle de velocidade.

Leonardo Garcia Marques possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Goiás (2007) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2013). Atualmente é Analista de Tecnologia da Informação no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás e Professor no Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara. Tem experiência nas áreas de Ciência da Computação e Engenharia Elétrica, com ênfase em Inteligência Artificial, atuando principalmente nos seguintes temas: computação evolutiva, algoritmos genéticos e programação genética

Sebastião Camargo Guimarães Júnior possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1980), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1983) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1998). Atualmente é Professor Associado 4 da Universidade Federal de Uberlândia. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atuando principalmente nos seguintes temas: Aterramentos, Descargas Atmosféricas, Método dos Elementos Finitos.