Análise de sistemas trifásicos desequilibrados através das componentes simétricas de fortescue: uma abordagem computacional

Vitor Amadeu Souza[1]; 0009-0002-1857-6799

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
vitor.amadeu@foa.org.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise computacional da aplicação das componentes simétricas de Fortescue para a decomposição de sistemas trifásicos desequilibrados. O método de Fortescue, desenvolvido em 1918, continua sendo uma ferramenta fundamental para a análise de sistemas elétricos de potência, permitindo a decomposição de um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas balanceados: sequência positiva, negativa e zero. Através de simulações computacionais implementadas em Python, foram analisadas tensões desequilibradas com magnitudes de 230V, 220V e 210V, com ângulos de fase de 0°, -120° e 130°, respectivamente. Os resultados demonstraram a eficácia do método na identificação das componentes: sequência zero (11,08∠-116,81°V), sequência positiva (219,27∠3,18°V) e sequência negativa (16,22∠-8,05°V). A análise fasorial e temporal permitiu uma compreensão do comportamento do sistema desequilibrado, confirmando a precisão da transformação de Fortescue na decomposição e reconstrução das grandezas originais. O trabalho contribui para o entendimento da aplicação das componentes simétricas em sistemas de potência e sua importância na análise de faltas e proteção de sistemas elétricos

Palavras-chave: Componentes simétricas. Fortescue. Sistemas trifásicos. Desequilíbrio. Análise fasorial.

INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência trifásicos são projetados para operar em condições equilibradas, onde as três tensões ou correntes possuem mesma magnitude e estão defasadas de 120° entre si (Stevenson Jr., 1986). Entretanto, na prática, diversos fatores podem causar desequilíbrios no sistema, incluindo cargas monofásicas desiguais, faltas assimétricas, impedâncias diferentes nas três fases e conexões inadequadas (Grainger; Stevenson Jr., 1994).

O método das componentes simétricas, desenvolvido por Charles Legeyt Fortescue em 1918, revolucionou a análise de sistemas trifásicos desequilibrados ao propor a decomposição de um sistema desequilibrado em três sistemas balanceados: sequência positiva, sequência negativa e sequência zero (FORTESCUE, 1918). Este método tornou-se fundamental na análise de sistemas de potência, especialmente no estudo de faltas assimétricas e no projeto de sistemas de proteção (ANDERSON, 1995).

A componente de sequência positiva representa um sistema trifásico equilibrado com a mesma sequência de fases do sistema original. A componente de sequência negativa corresponde a um sistema equilibrado com sequência de fases oposta à original, enquanto a componente de sequência zero representa três fasores iguais em magnitude e fase (BLACKBURN, 1997). Esta decomposição permite que problemas complexos de sistemas desequilibrados sejam resolvidos através da análise separada de cada componente simétrica.

Segundo Kundur (1994), a importância das componentes simétricas na engenharia de sistemas de potência é evidenciada em diversas aplicações, incluindo análise de faltas, coordenação de proteção, análise de estabilidade e estudos de qualidade de energia. A componente de sequência positiva está relacionada à operação normal do sistema, a sequência negativa indica desequilíbrios que podem causar aquecimento em máquinas rotativas, e a sequência zero está associada a faltas envolvendo a terra.

Phadke e Thorp (2009) destacam que o método de Fortescue simplifica significativamente a análise de sistemas complexos, permitindo que engenheiros compreendam e resolvam

problemas que seriam extremamente difíceis de abordar diretamente no domínio das fases. Esta simplificação é particularmente valiosa na era moderna da automação de sistemas de potência, onde algoritmos baseados em componentes simétricas são amplamente utilizados em relés digitais e sistemas de proteção adaptativos.

O desenvolvimento de ferramentas computacionais modernas tem facilitado a implementação e visualização dos conceitos de componentes simétricas. Bergen e Vittal (1999) enfatizam a importância da simulação computacional no ensino e aplicação prática destes conceitos, permitindo uma compreensão mais profunda através da visualização gráfica dos fasores e formas de onda.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicação prática das componentes simétricas de Fortescue através de uma análise computacional, utilizando Python para implementar as transformações matemáticas e visualizar os resultados tanto no domínio fasorial quanto temporal. A metodologia empregada permite uma compreensão do processo de decomposição e reconstrução de sistemas desequilibrados, contribuindo para o entendimento teórico e prático deste importante conceito da engenharia elétrica.

MÉTODOS

A transformação de componentes simétricas baseia-se na decomposição de um sistema trifásico desequilibrado em três componentes balanceadas. Considerando um sistema trifásico com tensões Va, Vb e Vc, a transformação é realizada através da matriz de Fortescue, conforme descrito por Anderson (1995). O operador complexo 'a' é definido como $a = e^{(j2\pi/3)}$, representando uma rotação de 120° no plano complexo. Este operador possui as propriedades fundamentais: $a^3 = 1$, $1 + a + a^2 = 0$, e $a^* = a^2$, onde a^* denota o conjugado complexo de 'a' (Grainger; Stevenson Jr., 1994).

Para este estudo, foram definidas tensões desequilibradas com as seguintes características: $Va = 230\angle 0°V$, $Vb = 220\angle -120°V$, e $Vc = 210\angle 130°V$. Estas tensões foram escolhidas para representar um sistema com desequilíbrio tanto em magnitude quanto em fase, permitindo uma análise completa das componentes simétricas resultantes. A metodologia incluiu duas abordagens complementares de análise: fasorial e temporal. A análise fasorial permite

visualizar as relações de magnitude e fase entre as componentes, enquanto a análise temporal mostra o comportamento das grandezas ao longo do tempo através de formas de onda senoidais.

O código-fonte está disponível para download através do link: https://github.com/vitor-souza-ime/fortescue.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

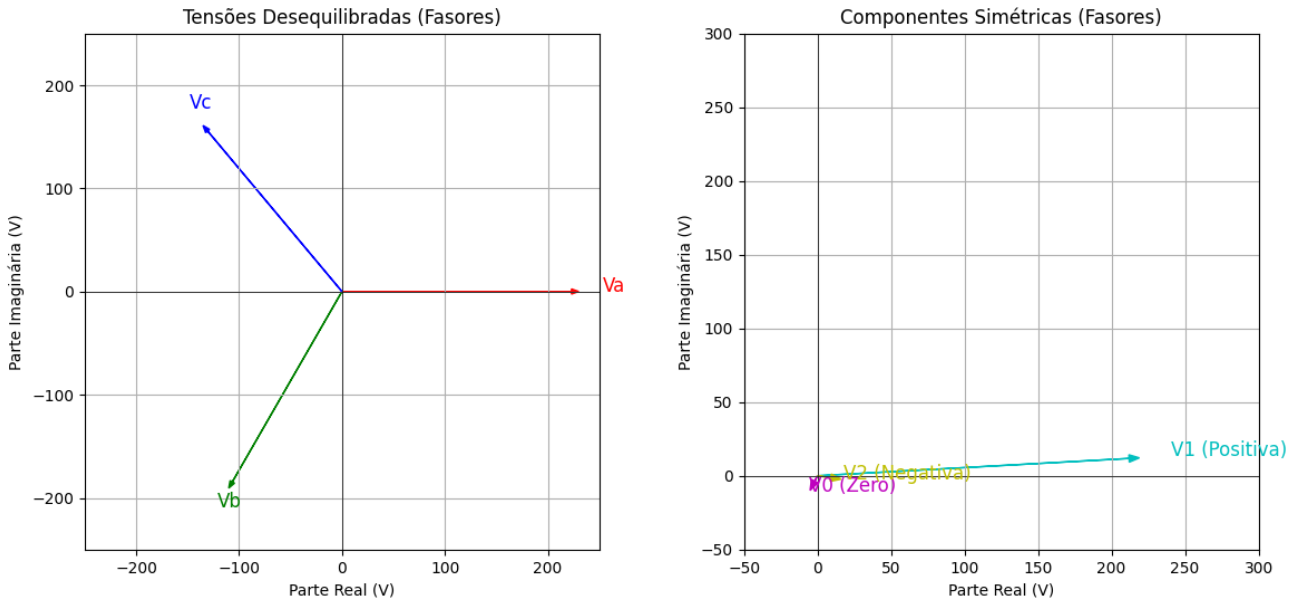
Os resultados obtidos através da implementação computacional revelaram as seguintes componentes simétricas: componente de sequência zero V_0 = 11,08∠-116,81°V, componente de sequência positiva V_1 = 219,27∠3,18°V, e componente de sequência negativa V_2 = 16,22∠-8,05°V. A componente de sequência positiva apresentou magnitude significativamente superior às demais, indicando que o sistema, apesar do desequilíbrio, mantém uma componente fundamental forte. Esta observação é consistente com o esperado para sistemas de distribuição com desequilíbrios moderados, onde a componente positiva permanece dominante (Blackburn, 1997).

A magnitude de 219,27V da sequência positiva representa aproximadamente 96% da tensão nominal do sistema, demonstrando que o desequilíbrio, embora presente, não compromete severamente a operação fundamental do sistema. A componente de sequência negativa, com magnitude de 16,22V, representa aproximadamente 7% da componente positiva. Bergen e Vittal (1999) destacam que componentes de sequência negativa desta ordem podem causar aquecimento adicional em motores de indução, sendo necessário monitoramento adequado para prevenir danos aos equipamentos. O ângulo de fase de -8,05° da sequência negativa indica uma defasagem específica que deve ser considerada na análise de proteção do sistema.

A componente de sequência zero, com magnitude de 11,08V, embora menor em relação à sequência positiva, é significativa o suficiente para indicar a presença de desequilíbrios que poderiam estar relacionados a faltas incipientes ou conexões inadequadas. Phadke e Thorp (2009) enfatizam que a presença de sequência zero em sistemas sem neutro aterrado pode indicar problemas no isolamento ou conexões desbalanceadas.

A Figura 1 mostra os diagramas fasoriais tanto das tensões desequilibradas originais quanto das componentes simétricas resultantes. O diagrama fasorial das tensões desequilibradas evidencia o desequilíbrio do sistema, onde as três tensões não formam um sistema equilibrado típico. As magnitudes diferentes (230V, 220V, 210V) e os ângulos de fase alterados (0°, -120°, 130°) demonstram a complexidade da análise direta deste sistema desequilibrado. No diagrama das componentes simétricas, observa-se a dominância da componente de sequência positiva, representada pelo fasor de maior magnitude. A componente de sequência zero e negativa aparecem com magnitudes menores, mas com orientações específicas que caracterizam o tipo e a severidade do desequilíbrio presente no sistema.

Figura 1 - Diagramas fasoriais

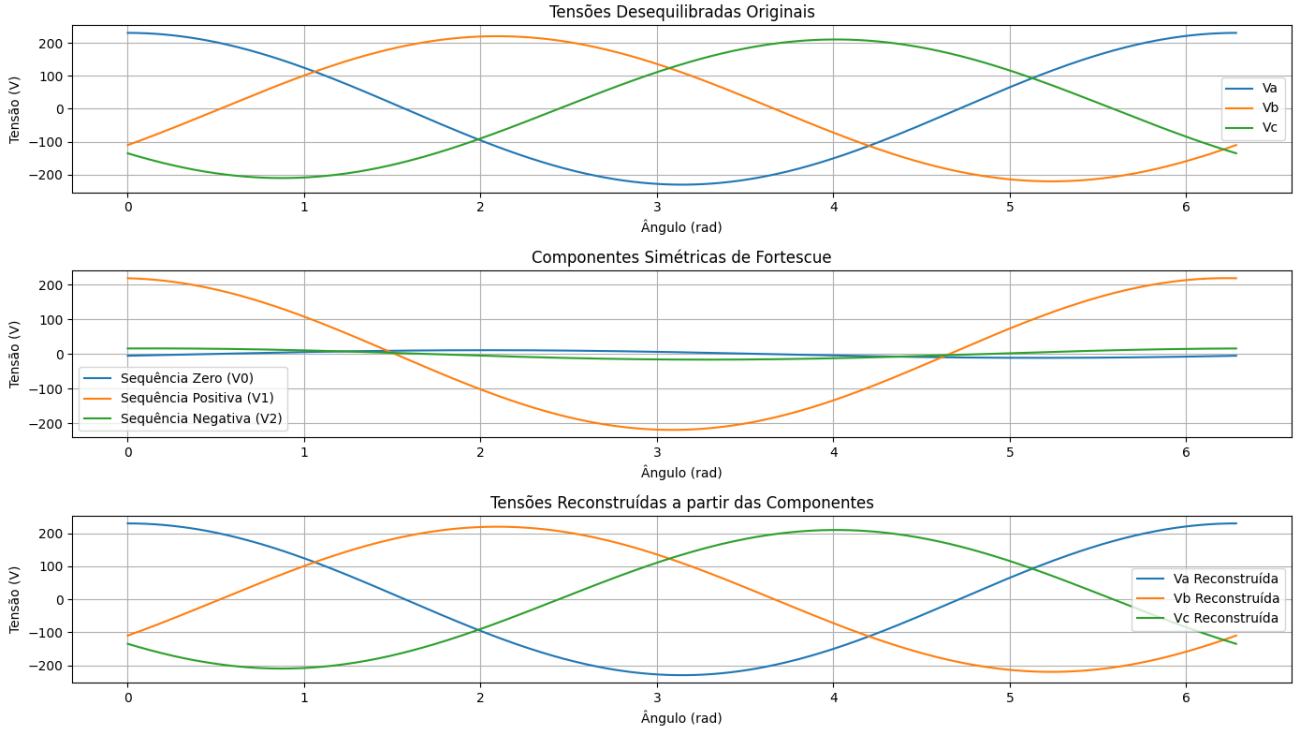


Fonte: O autor.

A Figura 2 apresenta as componentes simétricas no domínio temporal. A componente de sequência positiva apresenta amplitude elevada e comportamento senoidal regular, representando a parte equilibrada dominante do sistema. As componentes de sequência zero e negativa apresentam amplitudes menores, mas com características temporais específicas que refletem a natureza do desequilíbrio. Anderson (1995) destaca que esta visualização temporal das componentes simétricas é fundamental para compreender como

cada componente contribui para o comportamento geral do sistema. O terceiro gráfico mostra as tensões reconstruídas a partir das componentes simétricas, demonstrando a correspondência com as tensões originais. Esta concordância valida a implementação matemática e confirma que a transformação de Fortescue é reversível, propriedade fundamental para sua aplicação prática em sistemas de potência.

Figura 2 - Diagramas temporais



Fonte: O autor.

Do ponto de vista da proteção, as componentes calculadas fornecem informações valiosas para ajuste de relés de proteção. Relés de sequência negativa podem ser ajustados com base no valor calculado para detectar desequilíbrios anômalos, enquanto relés de sequência zero podem ser configurados para detectar faltas à terra (Blackburn, 1997).

A reconstrução das tensões originais a partir das componentes simétricas confirma a correção dos cálculos matriciais e a adequação da metodologia empregada. Esta validação é fundamental para a confiabilidade dos resultados e sua aplicação prática na análise de sistemas de potência. A utilização de Python e suas bibliotecas especializadas mostrou-se

adequada para implementação de algoritmos de componentes simétricas, oferecendo precisão numérica e facilidade de visualização dos resultados. Bergen e Vittal (1999) destacam a importância de ferramentas computacionais modernas no ensino e aplicação prática de conceitos de sistemas de potência, facilitando a compreensão através de visualizações gráficas e simulações interativas.

CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou a aplicação das componentes simétricas de Fortescue na análise de um sistema trifásico desequilibrado através de implementação computacional em Python. Os resultados obtidos confirmaram a eficácia do método na decomposição de sistemas complexos em componentes balanceadas de mais fácil análise. A componente de sequência positiva calculada (219,27∠3,18°V) representou a maior contribuição para o sistema, indicando que, apesar do desequilíbrio, o sistema mantém uma base operacional sólida. A componente de sequência negativa (16,22∠-8,05°V) revelou um desequilíbrio significativo que requer atenção do ponto de vista operacional, especialmente para proteção de equipamentos rotativos. A componente de sequência zero (11,08∠-116,81°V) indicou desequilíbrios que podem estar relacionados a problemas de conexão ou distribuição de cargas.

Do ponto de vista prático, os resultados fornecem informações valiosas para operação e proteção de sistemas elétricos. As magnitudes das componentes de sequência negativa e zero calculadas indicam a necessidade de monitoramento contínuo do sistema para prevenir danos a equipamentos e garantir operação adequada.

A metodologia computacional desenvolvida mostrou-se adequada para análise de componentes simétricas, oferecendo precisão numérica e capacidade de visualização dos resultados. Esta abordagem pode ser facilmente adaptada para análise de diferentes cenários de desequilíbrio e aplicada em estudos mais complexos de sistemas de potência.

Como contribuições futuras, sugere-se a extensão da metodologia para análise de sistemas com múltiplos níveis de tensão, incorporação de impedâncias de sequência para análise de

faltas, e desenvolvimento de interfaces gráficas interativas para facilitar a aplicação educacional e profissional dos conceitos de componentes simétricas.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. M. Analysis of Faulted Power Systems. New York: IEEE Press, 1995. 512 p.

BERGEN, A. R.; VITTAL, V. Power Systems Analysis. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 619 p.

BLACKBURN, J. L. Protective Relaying: Principles and Applications. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1993. 688 p.

FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 37, n. 2, p. 1027-1140, 1918. DOI: 10.1109/T-AIEE.1918.4765570.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON Jr., W. D. Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, 1994. 787 p.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. Computer Relaying for Power Systems. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. 384 p.

STEVENSON Jr., W. D. Elements of Power System Analysis. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1981. 436 p.