XXII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

BR/GDS/28
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

UMA PROPOSTA DE INDICADORES DE DESEQUILÍBRIOS E ASSIMETRIAS BASEADA NAS COMPONENTES SIMÉTRICAS GENERALIZADAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS PERIÓDICOS NÃO SENOIDAIS

Costa, L.L.H. (*)
Andritz Hydro INEPAR

Serni, P.J.A.
UNESP/Sorocaba

Marafão, F.P.
UNESP/Sorocaba

RESUMO

Baseado na recente proposta para análise de desequilíbrios e/ou assimetrias em sistemas trifásicos não senoidais, denominada de Componentes Simétricas Generalizadas, este trabalho propõe novos indicadores de desequilíbrio, quepermitemaplicaçãoem sistemas não senoidais, diferentedatradicional análisepelo teorema de Fortescue para sistemas senoidais.
Para tanto, é apresentada uma revisão dos principais conceitos relacionados às componentes de Fortescue e as componentes generalizadas, discutindo correlações entre as componentes resultantes das propostas.
Por fim, é apresentada uma correlação direta entre os novos indicadores de desequilíbrio, propostos para sistemas não senoidais, e o indicador tradicional de distorção harmônica total (DHT) por fase.

PALAVRAS-CHAVE

Componentes Simétricas,Componentes Simétricas Generalizadas, Distorção Harmônica Total, Indicadores De Desequilíbrio.

1.0 - INTRODUÇÃO

Através do teorema proposto por Fortescue[(1)], um sistema trifásico puramente senoidalpode ser decomposto em componentes de sequência positiva, componentes de sequência negativa e componentes de sequência zero.
Nesta condição, se este sistema for simétrico e equilibrado, as componentes de sequência negativa e sequência zero serão nulas, existindo, portanto, apenas componentes de sequência positiva. No entanto, se o sistema for desequilibrado e/ou assimétrico, isso implicará em componentes de sequência negativa e/ou componentes de sequência zeronão nulas, além das componentes de sequência positiva.
Partindo-se, então, das componentes simétricas de Fortescue, pode-se definir indicadores de desequilíbrio. A finalidade desses indicadores é mostrar através de uma relação entre grandezas, o grau de desequilíbrio presente em um sistema trifásico.
No entanto, os indicadores de desequilíbrio clássicos, definidos a partir das componentes simétricas de Fortescue, representam bem o grau do desequilíbrio do sistema trifásico somente se este for puramente senoidal.
Tendo em vista que os sistemas elétricos atuais estão cada vez mais sujeitos à presença de componentes harmônicas, inclusive de componentes harmônicas desequilibradas, faz-se necessário que novos indicadores de desequilíbrio sejam definidos de forma a levar em conta essa nova realidade.
As componentes simétricas generalizadas propostas por Tenti *et.al.*[(2)] tem como objetivo tratar sistemas trifásicos simétricos não senoidais, generalizando o conceito proposto por Fortescue. A partir das componentes simétricas generalizadas serão propostos, neste artigo, novos indicadores de desequilíbrio e assimetria.
Para melhor esclarecer os novos indicadores propostos, as relações entre as componentes de sequência de Fortescue e as componentes generalizadas deve ser elucidada previamente. Uma vez compreendida as diferenças e as relações entre ambos os conceitos de componentes simétricas, será possível demonstrar uma relação entre os indicadores de desequilíbrio e assimetrias e a distorção harmônica total (DHT) de cada fase do sistema trifásico.

(*) Rodovia Manuel de Abreu, km 4,5 – CEP 14.801-970Araraquara, SP, – Brasil
Tel.: (+55 16) 3303-1797 – Fax: (+55 16) 3303-1775 – Email: leandro.costa@andritz.com

2.0 - SISTEMA TRIFÁSICO PERIÓDICO NÃO SENOIDAL

Para iniciar o estudo desenvolvido neste trabalho é necessário inicialmente caracterizar um sistema trifásico periódico não senoidal.
Seja um sistema trifásico periódico não senoidal apresentado em(1), no domínio do tempo.

$$3\phi\begin{cases} f_A(t) & = & F_A\cdot sen(\omega t+\theta_A)+\sum_{k=1}^{\infty}K_A^{(k+1)}\cdot F_A\cdot sen\left[(k+1)\omega t+\varphi_A^{(k+1)}\right] \\ f_B(t) & = & F_B\cdot sen(\omega t+\theta_B)+\sum_{k=1}^{\infty}K_B^{(k+1)}\cdot F_B\cdot sen\left[(k+1)\omega t+\varphi_B^{(k+1)}\right] \\ f_C(t) & = & F_C\cdot sen(\omega t+\theta_C)+\sum_{k=1}^{\infty}K_C^{(k+1)}\cdot F_C\cdot sen\left[(k+1)\omega t+\varphi_C^{(k+1)}\right] \end{cases} \quad (1)$$

O sistema apresentado em (1)tem por objetivo representar um sistema trifásico no qual além da frequência fundamental, haja também a presença de um conteúdo harmônico tal que possa ser decomposto por meio da série de Fourier, e não haja componente CC (contínua) em nenhuma das fases.
É possível dividir o sistema (1), segundo as características das frequências que o compõem. Dessa forma, o sistema trifásico periódico não senoidal será dividido em quatro subsistemas distintos.

i. Sistema trifásico da frequência fundamental
ii. Sistema trifásico das harmônicas de ordem 3k
iii. Sistema trifásico das harmônicas de ordem 3k+1
iv. Sistema trifásico das harmônicas de ordem 3k-1

3.0 - COMPONENTES SIMÉTRICAS DE FORTESCUE

As componentes simétricas ou também chamadas componentes de sequência, representam uma abordagem clássica para análise de sistemas trifásicos senoidais em condições desequilibradas.Essa ferramenta proposta por Fortescue[(1)] permite a decomposição de um sinal trifásico periódico senoidal em três sistemas trifásicos compostos pelas componentes de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero.As componentes simétricas de Fortescueforam inicialmente propostas no domínio da frequência. No entanto, este trabalho foi todo desenvolvido no domínio do tempo, o que levou a necessidade de serem utilizadas expressões das componentes simétricas de Fortescue no domínio do tempo.
Para que seja possível aplicar a transformada de Fortescue a um sistema trifásico composto por várias frequências, é necessária a sua decomposição em frequências, valendo-se da transformada de Fourier. Assim aplica-se o teorema das componentes simétricas de Fortescue para cada um dos subsistemas trifásicos. O equacionamento da transformada de Fortescueno domínio do tempo proposto neste trabalho foidesenvolvido de forma que seja possível abordar, com as mesmas expressões, o subsistema da frequência fundamental ($k=1$) ou qualquer outro subsistema de qualquer componente harmônica ($k=2,3,4\ldots$).
Portanto, considerando-se um subsistema apresentado em(2) advindo da decomposição do sistema trifásico periódico não senoidal por meio da transformada de Fourier, de uma dada frequência qualquer.

$$3\phi_k\begin{cases} f_A^k(t) & = & F_A^k\cdot sen\left(k\omega t+\varphi_A^k\right) \\ f_B^k(t) & = & F_B^k\cdot sen\left(k\omega t+\varphi_B^k\right) \\ f_C^k(t) & = & F_C^k\cdot sen\left(k\omega t+\varphi_A^k\right) \end{cases} \quad (2)$$

3.1 Componentes Simétricas de Sequência Zero

O sistema apresentado em (3) é composto pelas componentes de sequência zero, obtidas a partir de (2).

$$3\phi_k^{Zero}\begin{cases} f_{ZA}^k(t) & = & \tfrac{1}{3}\left[f_A^k(t)+f_B^k(t)+f_C^k(t)\right] \\ f_{ZB}^k(t) & = & \tfrac{1}{3}\left[f_A^k(t)+f_B^k(t)+f_C^k(t)\right] \\ f_{ZC}^k(t) & = & \tfrac{1}{3}\left[f_A^k(t)+f_B^k(t)+f_C^k(t)\right] \end{cases} \quad (3)$$

3.2 Componentes Simétricas de Sequência Positiva

O sistema apresentado em (4) é composto pelas componentes de sequência positiva, obtidas a partir de (2).

$$3\phi_k^{Positiva}\begin{cases} f_{PA}^k(t) & = & \tfrac{1}{3}\left[f_A^k(t)+f_B^k\left(t+T^k/3\right)+f_C^k\left(t-T^k/3\right)\right] \\ f_{PB}^k(t) & = & \tfrac{1}{3}\left[f_A^k\left(t-T^k/3\right)+f_B^k(t)+f_C^k\left(t+T^k/3\right)\right] \\ f_{PC}^k(t) & = & \tfrac{1}{3}\left[f_A^k\left(t+T^k/3\right)+f_B^k\left(t-T^k/3\right)+f_C^k(t)\right] \end{cases} \quad (4)$$

3.3 Componentes Simétricas de Sequência Negativa
O sistema apresentado em (5) é composto pelas componentes de sequência negativa, obtidas a partir de (2).

$$3\phi_k^{Negativa}\begin{cases} f_{NA}^k(t) &= \frac{1}{3}\left[f_A^k(t) + f_B^k\left(t - T^k/3\right) + f_C^k\left(t + T^k/3\right)\right] \\ f_{NB}^k(t) &= \frac{1}{3}\left[f_A^k\left(t + T^k/3\right) + f_B^k(t) + f_C^k\left(t - T^k/3\right)\right] \\ f_{NC}^k(t) &= \frac{1}{3}\left[f_A^k\left(t - T^k/3\right) + f_B^k\left(t + T^k/3\right) + f_C^k(t)\right] \end{cases} \tag{5}$$

4.0 - COMPONENTES SIMÉTRICAS GENERALIZADAS

O conceito das componentes simétricas generalizadas proposto por Tenti*et al.*[(2)]permite uma decomposição direta de um sistema trifásico periódico não senoidal em componentes de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. Isto é, para aplicar o conceito das componentes generalizadas a um dado sistema trifásico periódico não senoidal qualquer, não é necessário que ele seja decomposto em subsistemas de cada frequência.
A proposta das componentes simétricas generalizadas introduz uma pequena modificação no cálculo das componentes de sequência positiva, negativa e zero. Além disso, propõe uma nova componente, denominada componente generalizada residual.
Considere um sistema trifásico periódico qualquer, sem nível CC, conforme apresentado em(6).

$$3\phi\begin{cases} f_A(t) \\ f_B(t) \\ f_C(t) \end{cases} \tag{6}$$

4.1 Componentes Simétricas Generalizadas de Sequência Zero
As componentes de sequência zero também são chamadas de componentes homopolares. O sistema apresentado em(7)expressaas componentes generalizadas de sequência zero obtidas a partir de (6).

$$3\phi_{Zero}^{Generalizada}\begin{cases} f_{ZA}^G(t) &= \frac{1}{3}\left[f_A(t) + f_B(t) + f_C(t)\right] \\ f_{ZB}^G(t) &= \frac{1}{3}\left[f_A(t) + f_B(t) + f_C(t)\right] \\ f_{ZC}^G(t) &= \frac{1}{3}\left[f_A(t) + f_B(t) + f_C(t)\right] \end{cases} \tag{7}$$

4.2 Componentes Heteropolares
Para a obtenção das demais componentes generalizadas, é necessário calcular componentes intermediárias, denominadas componentes heteropolares. As componentes heteropolares estão expressas em (8).

$$3\phi_{Heteropolares}^{Generalizada}\begin{cases} \tilde{f}_A(t) &= f_A(t) - f_{ZA}^G(t) \\ \tilde{f}_B(t) &= f_B(t) - f_{ZB}^G(t) \\ \tilde{f}_C(t) &= f_C(t) - f_{ZC}^G(t) \end{cases} \tag{8}$$

4.3 Componentes Simétricas Generalizadas de Sequência Positiva
As componentes simétricas generalizadas de sequência positiva são calculadas a partir do sistema formado pelas componentes heteropolares demonstrado em(8), conforme indicado em (9).

$$3\phi_{Positiva}^{Generalizada}\begin{cases} f_{PA}^G(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_B(t + T/3) + \tilde{f}_C(t + 2T/3)\right] \\ f_{PB}^G(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_A(t + 2T/3) + \tilde{f}_B(t) + \tilde{f}_C(t + T/3)\right] \\ f_{PC}^G(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_A(t + T/3) + \tilde{f}_B(t + 2T/3) + \tilde{f}_C(t)\right] \end{cases} \tag{9}$$

4.4 Componentes Simétricas Generalizadas de Sequência Negativa
As componentes simétricas generalizadas de sequência negativa são calculadas do sistema formado pelas componentes heteropolares demonstrado em(8), conforme indicado em (10).

$$3\phi^{Generalizada}_{Negativa}\begin{cases} f^G_{NA}(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_A(t)+\tilde{f}_B(t-T/3)+\tilde{f}_C(t-2T/3)\right] \\ f^G_{NB}(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_A(t-2T/3)+\tilde{f}_B(t)+\tilde{f}_C(t-T/3)\right] \\ f^G_{NC}(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_A(t-T/3)+\tilde{f}_B(t-2T/3)+\tilde{f}_C(t)\right] \end{cases} \quad (10)$$

4.5 Componentes Simétricas Generalizadas Residuais

As componentes generalizadas residuais são calculadas independentemente para cada uma das fases, a partir do sistema formado pelas componentes heteropolares demonstrado em(8), conforme indicado em (11).

$$3\phi^{Generalizada}_{\mathrm{Re}\,sidual}\begin{cases} f^G_{RA}(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_A(t)+\tilde{f}_A(t+T/3)+\tilde{f}_A(t+2T/3)\right] \\ f^G_{RB}(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_B(t)+\tilde{f}_B(t+T/3)+\tilde{f}_B(t+2T/3)\right] \\ f^G_{RC}(t) &= \frac{1}{3}\left[\tilde{f}_C(t)+\tilde{f}_C(t+T/3)+\tilde{f}_C(t+2T/3)\right] \end{cases} \quad (11)$$

5.0 - RELAÇÃO DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS GENERALIZADAS E FORTESCUE

Uma vez estabelecidas as expressões das componentes simétricas de Fortescue e das componentes simétricas generalizadas utilizadas neste trabalho, foi possível a definição de relações entre esses conceitos aplicadas à um sistema trifásico periódico não senoidal tal qual expresso em(1).O detalhamento matemático que relaciona os dois teoremas de componentes simétricas não será alvo deste trabalho, mas pode ser encontrado em [(3)][(4)] [(5)].

5.1 Componentes Simétricas de Sequência Zero - Generalizadas e Fortescue

O sistema apresentado em(12)mostra as componentes generalizadas de sequência zero em função das componentes simétricas de Fortescue.

$$3\phi^{Generalizada}_{Zero}\begin{cases} f^G_{ZA}(t) &= f_{ZA1h}(t)+f_{ZAZh}(t)+f_{ZAPh}(t)+f_{ZANh}(t) \\ f^G_{ZB}(t) &= f_{ZB1h}(t)+f_{ZBZh}(t)+f_{ZBPh}(t)+f_{ZBNh}(t) \\ f^G_{ZC}(t) &= f_{ZC1h}(t)+f_{ZCZh}(t)+f_{ZCPh}(t)+f_{ZCNh}(t) \end{cases} \quad (12)$$

$f_{ZA1h}(t);\ f_{ZB1h}(t);\ f_{ZC1h}(t)$ = componente de sequênciazero da frequência fundamental dafase A, B e C.

$f_{ZAZh}(t);\ f_{ZBZh}(t);\ f_{ZCZh}(t)$ = componente de sequência zerodas harmônicas de ordem 3k dafase A, B e C.

$f_{ZAPh}(t);\ f_{ZBPh}(t);\ f_{ZCPh}(t)$ = componente de sequência zerodas harmônicas de ordem 3k+1 dafase A, B e C.

$f_{ZANh}(t);\ f_{ZBNh}(t);\ f_{ZCNh}(t)$ = componente de sequênciazerodas harmônicas de ordem 3k-1dafase A, B e C.

5.2 Componentes Simétricas de Sequência Positiva - Generalizadas e Fortescue

O sistema apresentado em (13) mostra as componentes generalizadas de sequência positiva em função das componentes simétricas de Fortescue.

$$3\phi^{Generalizada}_{Positiva}\begin{cases} f^G_{PA}(t) &= f_{PA1h}(t)+f_{PAPh}(t)+f_{NANh}(t) \\ f^G_{PB}(t) &= f_{PB1h}(t)+f_{PBPh}(t)+f_{NBNh}(t) \\ f^G_{PC}(t) &= f_{PC1h}(t)+f_{PCPh}(t)+f_{NCNh}(t) \end{cases} \quad (13)$$

$f_{PA1h}(t);\ f_{PB1h}(t);\ f_{PC1h}(t)$ = componente de sequênciapositiva da frequência fundamental dafase A, B e C.

$f_{PAPh}(t);\ f_{PBPh}(t);\ f_{PCPh}(t)$ = componente de sequência positivadas harmônicas de ordem 3k+1 dafase A, B e C.

$f_{NANh}(t);\ f_{NBNh}(t);\ f_{NCNh}(t)$ = componente de sequêncianegativadas harmônicas de ordem 3k-1dafase A, B e C.

5.3 Componentes Simétricas de Sequência Negativa - Generalizadas e Fortescue

O sistema apresentado em (14) mostra as componentes generalizadas de sequência negativa em função das componentes simétricas de Fortescue.

$$3\phi^{Generalizada}_{Negativa}\begin{cases} f^G_{NA}(t) &= f_{NA1h}(t)+f_{NAPh}(t)+f_{PANh}(t) \\ f^G_{NB}(t) &= f_{NB1h}(t)+f_{NBPh}(t)+f_{PBNh}(t) \\ f^G_{NC}(t) &= f_{NC1h}(t)+f_{NCPh}(t)+f_{PCNh}(t) \end{cases} \quad (14)$$

$f_{NA1h}(t)$; $f_{NB1h}(t)$; $f_{NC1h}(t)$ = componente de sequêncianegativa da frequência fundamental da fase A, B e C.

$f_{NAPh}(t)$; $f_{NBPh}(t)$; $f_{NCPh}(t)$ = componente de sequência negativadas harmônicas de ordem 3k+1 da fase A, B e C.

$f_{PANh}(t)$; $f_{PBNh}(t)$; $f_{PCNh}(t)$ = componente de sequênciapositivadas harmônicas de ordem 3k-1dafase A, B e C.

5.4 Componentes Residuais - Generalizadas e Fortescue

O sistema apresentado em(15) mostra as componentes generalizadas residuais em função das componentes simétricas de Fortescue.

$$3\phi^{Generalizada}_{\mathrm{Re}\,sidual}\begin{cases} f^G_{RA}(t) &= f_{PAZh}(t)+f_{NAZh}(t) \\ f^G_{RB}(t) &= f_{PBZh}(t)+f_{NBZh}(t) \\ f^G_{RC}(t) &= f_{PCZh}(t)+f_{NCZh}(t) \end{cases} \tag{15}$$

$f_{PAZh}(t)$; $f_{PBZh}(t)$; $f_{PCZh}(t)$ = componente de sequênciapositivadas harmônicas de ordem 3kda fase A, B e C.

$f_{NAZh}(t)$; $f_{NBZh}(t)$; $f_{NCZh}(t)$ = componente de sequência negativadas harmônicas de ordem 3k da fase A, B e C.

6.0 - INDICADORES DE DESEQUILÍBRIO E ASSIMETRIA GENERALIZADOS

Os indicadores de desequilíbrio generalizadosapresentado neste trabalho constituem uma proposta baseada nas componentes simétricas generalizadas. O objetivo desses novos indicadores é permitir que o desequilíbrio das grandezas elétricas seja avaliado mesmo em sistemas trifásicos sujeitos à distorções harmônicas[(3)].

Da mesma forma que os indicadores de desequilíbrio clássicos são calculados valendo-se dos valores RMS das componentes simétricas de Fortescue, os indicadores de desequilíbrio generalizados utilizam-se de valores RMS para serem calculados.

A referência adotada para os indicadores propostos é a componente simétrica de sequência positiva de Fortescue da frequência fundamental. A justificativa para essa escolha é que essa componente representa um sistema trifásico ideal, isto é, um sistema trifásico simétrico, equilibrado e puramente senoidal.

Portanto, são propostos oito indicadores generalizados, que visam representar o grau de desequilíbrio dos sistemas trifásicos em condições não senoidais, mas sem perder as informações de desequilíbrio da frequência fundamental.

Os primeiros dois indicadores apresentados a seguir, representam o grau de desequilíbrio referente à frequência fundamental, os quais são convencionalmente utilizados para caracterização de desequilíbrios em sistemas trifásicos.

6.1 Fator de Desequilíbrio Generalizado de Sequência Zero da Frequência Fundamental

O indicador que representa o fator de desequilíbrio de sequência zero da frequência fundamental é a razão apresentada em (16).

$$K^Z_{1h} = \frac{F_{Z1h}}{F_{P1h}} \tag{16}$$

6.2 Fator de Desequilíbrio Generalizado de Sequência Negativa da Frequência Fundamental

O indicador que representa o fator de desequilíbrio de sequência negativa da frequência fundamental é a razão apresentada em (17).

$$K^N_{1h} = \frac{F_{N1h}}{F_{P1h}} \tag{17}$$

F_{P1h} = valor RMS da componente simétrica de sequência positiva de Fortescue da frequência fundamental.

F_{Z1h} = valor RMS da componente simétrica de sequência zero de Fortescue da frequência fundamental.

F_{N1h} = valor RMS da componente simétrica de sequência negativa de Fortescue da frequência fundamental.

6.3 Fator de Distorção Generalizado de Sequência Positiva

O indicador que representa o fator de distorção generalizado de sequência positiva do sistema trifásico não senoidal é definido como em (18).

$$K^P_G = \frac{\sqrt{\left(F^G_P\right)^2-\left(F_{P1h}\right)^2}}{F_{P1h}} \tag{18}$$

F^G_P = valor RMS da componente simétrica generalizada de sequência positiva.

O fator de distorção generalizado de sequência positivadiferente dos demais indicadores de desequilíbrio, busca expressar o grau de distorção da componente generalizada de sequência positiva. Este indicador representa a razão entre as componentes simétricas relativas às harmônicas da componente generalizada de sequência positiva em relação a componente simétrica de sequência positiva de Fortescue da frequência fundamental.

6.4 Fator de Desequilíbrio Generalizado de Sequência Zero

O indicador que representa o fator de desequilíbrio generalizado de sequência zero do sistema trifásico não senoidal é definido como em (19).

$$K_G^Z = \frac{F_Z^G}{F_{P1h}} \tag{19}$$

F_Z^G = valor RMS da componente simétrica generalizada de sequência zero.

6.5 Fator de Desequilíbrio Generalizado de Sequência Negativa

O indicador que representa o fator de desequilíbrio generalizado de sequência negativa do sistema trifásico não senoidal é definido como em (20).

$$K_G^N = \frac{F_N^G}{F_{P1h}} \tag{20}$$

F_N^G = valor RMS da componente simétrica generalizada de sequência negativa.

Os fatores de desequilíbrio generalizados de sequência zero e de sequência negativa, expressos respectivamente em (19) e(20), representam o grau de desequilíbrio das componentes simétricas generalizadas de sequência zero e de sequência negativa em relação à componente simétrica de sequência positiva de Fortescue da frequência fundamental.

Todavia, pelas relações encontradas na seção 5.0 - sabe-se que as componentes de sequência positiva e negativa das harmônicas de ordem 3k não são caracterizadas nas componentes generalizadas de sequência positiva, tampouco na componente generalizada de sequência negativa. Os desequilíbrios das harmônicas de ordem 3k estão caracterizados nas componentes generalizadas residuais.

Uma vez que as componentes generalizadas residuais podem ser diferentes para cada uma das três fases, sendo calculadas distintamente para cada uma delas, faz-se necessário que haja três indicadores de desequilíbrio que representem o grau de desequilíbrio residual.

6.6 Fator de Desequilíbrio Generalizado Residual da Fase A

O indicador que representa o fator de desequilíbrio generalizado residual da fase A do sistema trifásico não senoidal édefinido como em (21).

$$K_G^{RA} = \frac{F_{RA}^G}{F_{P1h}} \tag{21}$$

F_{RA}^G = valor RMS da componente simétrica generalizada residual da fase A.

6.7 Fator de Desequilíbrio Generalizado Residual da Fase B

O indicador que representa o fator de desequilíbrio generalizado residual da fase B do sistema trifásico não senoidal é definido como em (22).

$$K_G^{RB} = \frac{F_{RB}^G}{F_{P1h}} \tag{22}$$

F_{RB}^G = valor RMS da componente simétrica generalizada residual da fase B.

6.8 Fator de Desequilíbrio Generalizado Residual da Fase C

O indicador que representa o fator de desequilíbrio generalizado residual da fase C do sistema trifásico não senoidal é definido como em (23).

$$K_G^{RC} = \frac{F_{RC}^G}{F_{P1h}} \tag{23}$$

F_{RC}^G = valor RMS da componente simétrica generalizada residual da fase C.

Devido as componentes generalizadas residuais possuírem diferentes expressões matemáticas para cada uma das três fases, um indicador para cada fase deve ser calculado. O resultado desses indicadores é o grau de desequilíbrio no sistema devido ao desequilíbrio das harmônicas de ordem 3k, visto que, as componentes generalizadas residuais são formadas estritamente pelas componentes de sequência positiva e sequência negativa de Fortescue das harmônicas de ordem 3k.

7.0 - RELAÇÃO ENTRE OS INDICADORES DE DESEQUILÍBRIO E ASSIMETRIA GENERALIZADOS E A DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DHT)

Uma vez estabelecidas relações entre as componentes simétricas de Fortescue e as componentes simétricas generalizadas de um sistema trifásico periódico não senoidal, é possível verificar a relação entre os indicadores de assimetria e desequilíbrio com a distorção harmônica de um sistema trifásico não senoidal.
Sabe-se que a expressão da distorção harmônica total (DHT) pode ser escrita conforme(24).

$$DHT = \frac{F_{harmônicas}}{F_{1h}} = \sqrt{\frac{(F)^2 - (F_{1h})^2}{(F_{1h})^2}} \tag{24}$$

F = valor RMS total de uma das fases do sistema trifásico periódico não senoidal.
$F_{harmônicas}$ = valor RMS das harmônicas de uma das fases do sistema trifásico periódico não senoidal.
F_{1h} = valor RMS da frequência fundamental de uma das fases do sistema trifásico periódico não senoidal.

Considerando-se os desenvolvimentos anteriores, os elementos da expressão(24)podem ser representados em função dos indicadores de desequilíbrio e assimetria generalizados, resultando em (25) e (26).

$$\frac{\sqrt{(F_{1h})^2}}{F_{P1h}} = \sqrt{1 + \left(K_{1h}^{N}\right)^2 + \left(K_{1h}^{Z}\right)^2} \tag{25}$$

$$\frac{\sqrt{(F)^2 - (F_{1h})^2}}{F_{P1h}} = \sqrt{\left(K_G^P\right)^2 + \left(K_G^N\right)^2 + \left(K_G^Z\right)^2 + \left(K_G^R\right)^2 - \left(K_{1h}^N\right)^2 - \left(K_{1h}^Z\right)^2} \tag{26}$$

Substituindo as expressões matemáticas (25) e (26) na função do DHT apresentada em (24), tem-se a expressão (27).

$$DHT = \sqrt{\frac{\left(K_G^P\right)^2 + \left(K_G^N\right)^2 + \left(K_G^Z\right)^2 + \left(K_G^R\right)^2 - \left(K_{1h}^N\right)^2 - \left(K_{1h}^Z\right)^2}{1 + \left(K_{1h}^N\right)^2 + \left(K_{1h}^Z\right)^2}} \tag{27}$$

A função apresentada em (27) representa a distorção harmônica total de uma das fases do sistema trifásico periódico não senoidal em função dos indicadores de desequilíbrio e assimetria generalizados.
É importante ressaltar que a expressão do DHT, vista em (27),corresponde ao índice de distorção harmônica total de cada uma das fases do sistema trifásico não senoidal, de forma que se deve utilizar o fator de desequilíbrio residual respectivo àcada fase em (27).

8.0 - CONCLUSÃO

As componentes simétricas generalizadas mostraram-se uma ferramenta interessante para a análise de sistemas trifásicos periódicos não senoidais, uma vez que não necessário que este seja decomposto através da série de Fourier.
Foi possível esclarecer que existe uma relação matemática entre as componentes simétricas generalizadas e as componentes simétricas de Fortescue, aplicadas a sistemas trifásicos não senoidais. Por meio dessa relação matemática, observa-se que todas as componentes de sequência de Fortescue da frequência fundamental e das respectivas harmônicas do sistema trifásico não senoidal, estão englobadas nas quatro componentes simétricas generalizadas.
Uma vez conhecida a relação entre ambos os teoremas de componentes simétricas, foram propostos indicadores de desequilíbrio e assimetria baseados nas componentes simétricas generalizadas. Tais indicadores preservam as informações de desequilíbrio e assimetria da frequência fundamental equivalente aos indicadores de desequilíbrio clássicos baseados nas componentes de sequência de Fortescue de um sistema trifásico puramente senoidal. Entretanto, introduz a informação de desequilíbrio e assimetria do sistema trifásico não senoidal, englobando também as harmônicas desse sistema por meio dos indicadores baseados nas componentes simétricas generalizadas.
Por fim, demonstrou-se que existe uma relação entre os indicadores de desequilíbrio e assimetria generalizados com a distorção harmônica total de cada fase do sistema trifásico periódico não senoidal. Assim, foi apresentada a expressão para a distorção harmônica total, de cada uma das fases, em função dos indicadores generalizados.Dessa forma, através da relação existente entre os indicadores de desequilíbrio e assimetria generalizados e a distorção harmônica total, é possível calcular a distorção harmônica de cada uma das fases do sistema partindo-se simplesmente das componentes simétricas generalizadas e das componentes simétricas de Fortescue da frequência fundamental.
Trabalhos futuros dos autores deverão apresentar análise de casos, através de simulações e resultados experimentais, de forma a demonstrar possíveis aplicações dos indicadores propostos.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) FORTESCUE, C. L.Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. AIEE Transaction, 37:1027-1140, 1918.

(2) TENTI, P., WILLEMS, J. L., MATTAVELLI, P., TEDESCHI, E.Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals. Seventh International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Cagliari, July 10-12, 2006.

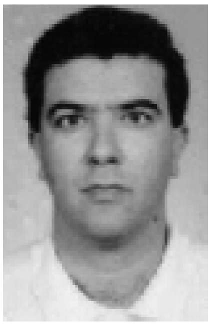
(3) COSTA, L. L. H. Um Estudo Das Componentes Simétricas Generalizadas Em Sistemas Trifásicos Não Senoidais. Dissertação de mestrado. UNESP - Bauru, 2012.

(4) COSTA, L. L. H., SERNI, P. J. A., MARAFÃO, F. P.An Analysis Of Generalized Symmetrical Components In Non Sinusoidal Three Phase Systems.CongressoBrasileiro De Eletrônica De Potência - XI COBEP, Natal, 2011.

(5) COSTA, L. L. H., SERNI, P. J. A., MARAFÃO, F. P. Uma Análise Das Componentes Simétricas Generalizadas Em Sistemas Trifásicos Não Senoidais.Conferência Brasileira Sobre Qualidade Da Energia Elétrica - IX CBQEE, Cuiabá, 2011.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Leandro Luiz Húngaro Costa, nascido em, 1987 em Bauru. É graduado engenheiro eletricista (2009) e mestre (2012) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). É engenheiro de propostas técnicas de hidrogeradores na Andritz Hydro Inepar desde 01/2012.



Paulo José Amaral Serni, nascido em, 1957 em Botucatu. É graduado engenheiro eletricista (1987) pela Faculdade de Engenharia e Tecnologia de Bauru; mestre (1992) e doutor (1999) pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Foi professor do Departamento de Engenharia Elétrica do Campus de Bauru da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de 1987 a 2011. Desde 2012, é professor no curso de Engenharia de Controle e Automação do Campus de Sorocaba da Universidade Estadual Paulista (UNESP). É membro da SOBRAEP.

Fernando PinhabelMarafão, nascido em 1975, em José Bonifácio. É graduado engenheiro eletricista (1998) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP); mestre (2000) e doutor (2004) pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Desde 2005, é professor do curso de Engenharia de Controle e Automação do Campus de Sorocaba da Universidade Estadual Paulista (UNESP). É membro da SOBRAEP, SBA e do IEEE.