

Estudo sobre a Identificação da Responsabilidade das VTCDs com base em Indicadores de Desequilíbrios.

Marcos Fillipe Silva Souza¹ (IC), Arthur Costa de Souza (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira

Palavras-chave: Desequilíbrios. Qualidade de Energia. Variações de Tensão de Curta Duração

Introdução

Dentre os distintos indicadores que determinam as referências para a qualidade de energia, ressalta-se a Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD), fenômeno que acarreta grandes prejuízos para o setor industrial, mesmo ocorrendo em um curto período de tempo [1]. De acordo com a norma do PRODIST – Módulo 8, as VTCDs são definidas como desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão em um intervalo de tempo inferior a três minutos [2].

Tais variações de tensão de curta duração mostram-se danosas para as unidades consumidoras, tanto comerciais quanto industriais. Com o avanço da tecnologia, essas unidades tornaram-se mais dependentes de aparelhos eletrônicos, conseqüentemente, requerendo maior qualidade da energia a fim de evitar prejuízos financeiros [3].

Caso ocorra uma VTCD, devido a curtos-circuitos no sistema elétrico, torna-se necessário investigar a responsabilidade por esse fenômeno, com o intuito de identificar o causador da perturbação. Este estudo tem como objetivo apresentar um método simples, eficaz e aplicável em campo para identificar a responsabilidade por meio do indicador de desequilíbrio, considerando aspectos como a natureza das VTCDs e as conexões dos enrolamentos do transformador. A fim de avaliar distintos cenários de atuação desse fenômeno, foi implementada uma simulação no MATLAB-SIMULINK.

Metodologia

A metodologia proposta por [4] foi desenvolvida a partir da análise de ocorrências de VTCD, podendo-se observar que tais fenômenos ocorrem em sistemas trifásicos em sua grande maioria por faltas assimétricas. Dessa forma, surge a necessidade de aplicar o teorema de Fortescue, visto que sua utilização se mostra necessária para calcular valores de correntes e/ou tensões trifásicas desequilibradas, que podem ser representadas como componentes equilibradas, linearmente dependentes, denominadas componentes simétricas.

A Figura 1 ilustra o procedimento aplicado, no qual se expõe as componentes de seqüência positiva,

negativa e zero respectivamente. Conseqüentemente exemplificando a composição fasorial de fase e posteriormente mostra-se a reconstituição do desequilíbrio original.

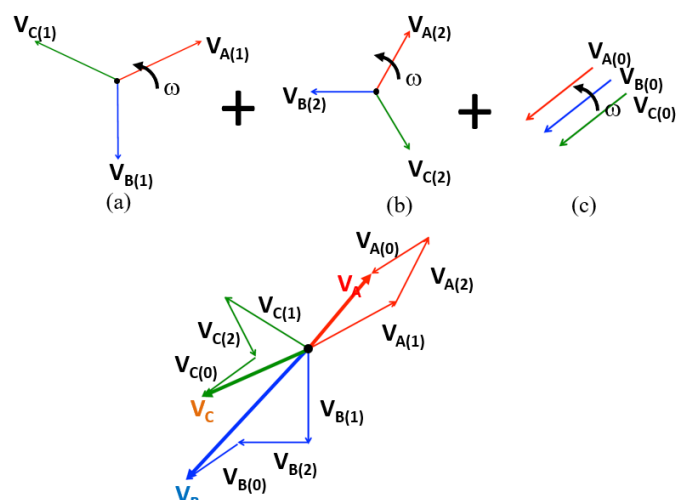


Figura 1 – Componentes de seqüência (a) positiva, (b) negativa e (c) zero e (d) sua composição fasorial.

Foi aplicado o método das componentes simétricas aos indicadores de tensão e correntes, afim de associar as grandezas de fase, sendo $\alpha = 1 \angle 120^\circ$, conforme demonstra a equação (1).

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (1)$$

De acordo com os documentos normativos PRODIST – Módulo 8 [2], a expressão que identifica o nível de desequilíbrios para valores de tensão e corrente.

$$FD_2\% = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \quad (2)$$

De forma semelhante dispõe-se da mesma expressão aplicada para a seqüência zero.

$$FD_0\% = \frac{V_0}{V_1} \cdot 100 \quad (3)$$

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Com o intuito de atribuir a responsabilidade das VTCDs, será apresentado a estratégia metodológica visando identificar a responsabilidade do evento e estabelecer as premissas dos estudos avaliativos. A partir do cálculo dos indicadores de desequilíbrio do lado primário e secundário do transformador, destaca-se a sua viabilidade em campo pela utilização de medidores trifásicos, capazes de determinar os fatores de sequência positiva e negativa de tensões e correntes nos enrolamentos primário e secundário. A Figura 2 apresenta, em fluxograma, as etapas do processo de análise [4].

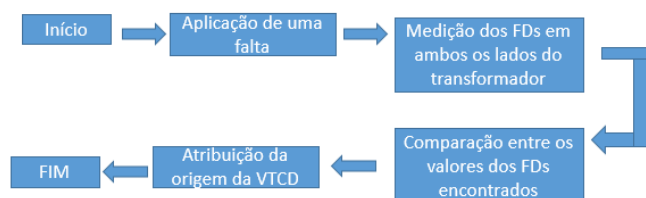


Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada para atribuição de responsabilidade sobre eventos de VTCD.

Para a caracterização e parametrização do sistema elétrico foi utilizado o *software* Matlab-Simulink, aplicando os parâmetros descritos na Tabela 1. Foi empregado blocos como fonte, cargas trifásicas, medidores de tensão e corrente. Para compor a carga industrial foi utilizado cargas como motores, além da inclusão de cargas de potência constante e impedância constante. Com o objetivo de simular uma situação mais representativa das condições operacionais reais.

Tabela 1 – Valores da corrente em relação a corrente base

Equivalente da Concessionária	
Fonte	
<ul style="list-style-type: none"> Tensão de Alimentação: 34,5 kV; X/R: 7 Ω; Nível de Curto Circuito (Scc): 102,55 MVA; 	
Cabos	
<ul style="list-style-type: none"> R = 0,09 L = 0,42 mH; 	
Ponto de Análise	
Transformador (T1):	
<ul style="list-style-type: none"> Potência: 7,5 MVA; Tensões: 34,5 kV / 13,8 kV; R%: 0,5% e X%: 3% (Δ/Yn - Solidamente aterrado); 	
Cargas Industriais	
Cabos	
<ul style="list-style-type: none"> R = 0,09 L = 0,42 mH; 	
Transformador (T2)	

<ul style="list-style-type: none"> Potência = 1,5 MVA; Tensões: = 13,8 kV/0,38 kV; R = 0,7% X = 3,5% (Δ/Yn - Solidamente aterrado);
Cargas Ligadas a T2
<ul style="list-style-type: none"> Conjunto de 3 motores = 200 kVA; Carga de Potência Constante = 800 kVA;
Transformador (T3)
<ul style="list-style-type: none"> Potência = 5 MVA; Tensões: = 13,8 kV/0,44 kV; R = 0,5% X = 3,5% (Δ/Yn - Solidamente aterrado);
Cargas Ligadas a T3
<ul style="list-style-type: none"> Potência = 2 MVA; Fp = 0,95; Potência constante; Potência: = 2 MVA; Fp = 0,95; Impedância Constante;

As VTCDs manifestam-se em campo em maior frequência nos seguintes tipos de falta, dentre eles Fase-Fase, Fase-Fase-Terra e Fase-Terra, tanto no primário quanto no lado secundário do transformador. Tais informações cruciais para a elaboração do modelo a serem analisado na presente pesquisa. Sendo assim, foi realizada a simulação para os seguintes cenários, primeiramente para o lado do enrolamento primário:

- Caso 1 – Falta Fase-Terra no primário do transformador, dividindo em 3 subcasos: (A) Δ-Yn, (B) Y-Δ e (C) Yn - Yn.
- Caso 2 – Falta Fase-Fase-Terra no primário do transformador, dividindo em 3 subcasos: (A) Δ-Yn, (B) Y-Δ e (C) Yn - Yn.
- Caso 3 – Falta Fase-Fase no primário do transformador, dividindo em 3 subcasos (A) Δ-Yn, (B) Y-Δ e (C) Yn - Yn.

Em seguida foi analisado os efeitos da incidência das VTCD no lado do enrolamento secundário:

- Caso 4 – Falta Fase-Terra no primário do transformador, dividindo em 3 subcasos: (A) Δ-Yn, (B) Y-Δ e (C) Yn - Yn.
- Caso 5 – Falta Fase-Fase-Terra no primário do transformador, dividindo em 3 subcasos: (A) Δ-Yn, (B) Y-Δ e (C) Yn - Yn.
- Caso 6 – Falta Fase-Fase no primário do transformador, dividindo em 3 subcasos (A) Δ-Yn, (B) Y-Δ e (C) Yn - Yn.

A Figura 3 apresenta o estudo de caso implementado no *software* Simulink/MATLAB®, onde os blocos azuis representam os medidores trifásicos e os blocos em laranja a estratégia do método de Fortescue.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

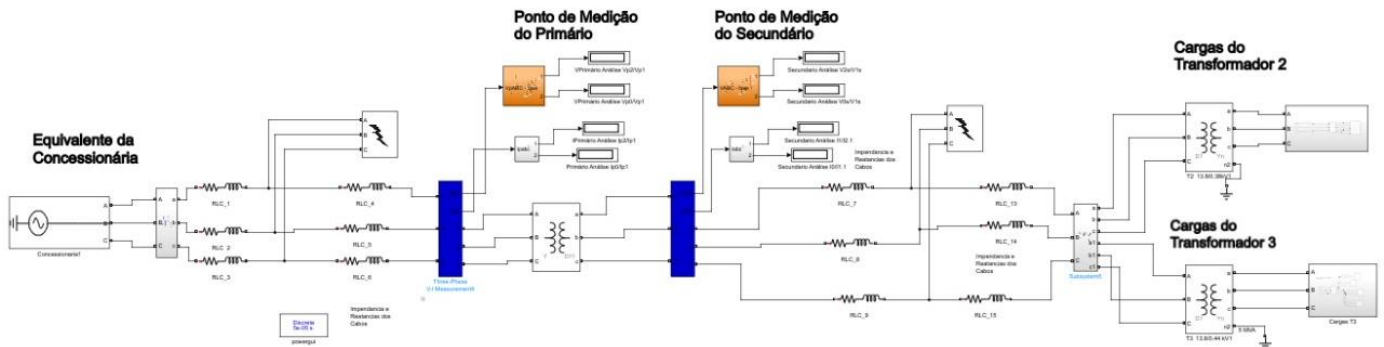


Figura 3 – Simulação realizada no MATLAB-SIMULINK para a realização dos estudos.

Resultados e discussão

Após a realização da simulação, foram obtidos os valores de desequilíbrios de tensão nos lados primário e secundário do transformador, considerando os cenários já mencionados, conforme ilustra as Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Resultados Referentes aos Fatores de Desequilíbrio para falta no Primário do Trafo resultados da tensão

Faltas no Enrolamento Primário para valores de Tensão						
Falta Fase - Terra						
			V2p/V1p	V2s/V1s	V0p/V1p	V0s/V1s
Caso 1	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0,0348	0
	B	$Y - \Delta$	1	1	0,2043	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,03557	0,03629
Falta Fase - Fase - Terra						
			V2p/V1p	V2s/V1s	V0p/V1p	V0p/V1p
Caso 2	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0,8387	0
	B	$Y - \Delta$	1	1	0,8332	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,8378	0,8372
Falta Fase - Fase						
			V2p/V1p	V2s/V1s	V0p/V1p	V0p/V1p
Caso 3	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0,0027	0
	B	$Y - \Delta$	1	1	0	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,0028	0,0028

Tabela 3 – Resultados Referentes aos Fatores de Desequilíbrio para falta no Primário do Trafo resultados da tensão

Faltas no Enrolamento Secundário para valores de Tensão						
Falta Fase - Terra						
			V2p/V1p	V2s/V1s	V0p/V1p	V0s/V1s
Caso 4	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0,0042	0,5495
	B	$Y - \Delta$	1	1	0,002356	1,7040
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,479	1,9920
Falta Fase - Fase - Terra						
			V2p/V1p	V2s/V1s	V0p/V1p	V0p/V1p
Caso 5	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0,08042	0,5748
	B	$Y - \Delta$	1	1	0,0292	3,8880
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,0514	1,3500
Falta Fase - Fase						
			V2p/V1p	V2s/V1s	V0p/V1p	V0p/V1p
Caso 6	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0,0324	0,5927
	B	$Y - \Delta$	1	1	0,0292	3,8880
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,0059	0,4916

A seguir, as Tabelas 4 e 5 apresentam os valores de desequilíbrios de corrente nos lados primário e secundário do transformador, de acordo com os cenários previamente definidos.

Tabela 4 – Resultados Referentes aos Fatores de Desequilíbrio para falta no Primário do Trafo resultados da corrente

Faltas no Primário						
Falta Fase - Terra						
			I2p/I1p	I2s/I1s	I0p/I1p	I0s/I1s
Caso 1	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0	0
	B	$Y - \Delta$	1	1	0	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,5396	0
Falta Fase - Fase - Terra						
			I2p/I1p	I2s/I1s	I0p/I1p	I0s/I1s
Caso 2	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0	0
	B	$Y - \Delta$	1	1	0	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,3725	0
Falta Fase - Fase						
			I2p/I1p	I2s/I1s	I0p/I1p	I0s/I1s
Caso 3	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0	0
	B	$Y - \Delta$	1	1	0	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,0001	0

Tabela 5 – Resultados Referentes aos Fatores de Desequilíbrio para falta no Primário do Trafo resultados da corrente

Faltas no Secundário						
Falta Fase - Terra						
			I2p/I1p	I2s/I1s	I0p/I1p	I0s/I1s
Caso 4	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0	0,9866
	B	$Y - \Delta$	1	1	0,0023	1,7040
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	1,0280	1,0510
Falta Fase - Fase - Terra						
			I2p/I1p	I2s/I1s	I0p/I1p	I0s/I1s
Caso 5	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0	1,8050
	B	$Y - \Delta$	1	1	0	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0,4678	0,3679
Falta Fase - Fase						
			I2p/I1p	I2s/I1s	I0p/I1p	I0s/I1s
Caso 6	A	$\Delta - Y_n$	1	1	0	0
	B	$Y - \Delta$	1	1	0	0
	C	$Y_n - Y_n$	1	1	0	0

Vale ressaltar que o subíndice “p” refere-se ao lado primário e o subíndice “s” indica o lado secundário.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Evidencia-se que para os cenários, no qual, são analisadas ligações distintas, isto é, Δ -Yn e Yn - Δ , o indicador de tensão (V_0/V_1) se mostra eficaz, pois nessas ligações os valores deram acima de zero, evidenciando assim, a existência do curto circuito. Contudo, caso seja analisado a ligação igual, ou seja, Yn - Yn, entre o lado primário e secundário do transformador, o método apresentado se mostra ineficiente, pois ambos indicadores do lado primário e secundário apresentaram valores acima de zero. Em relação ao indicador da relação de tensão de sequência negativa pela positiva, isto é (V_2/V_1), o mesmo não se mostrou efetivo em apontar o lado em que surgiu o curto-circuito, pois ambos lados, o indicador teve como resposta um valor unitário.

Para a análise referente ao indicador de corrente de sequência zero pela positiva, ou seja (I_0/I_1), a metodologia se mostra satisfatória para o cenário analisado de ligação igual (Yn - Yn) e faltas ocorridas no lado primário do transformador, conseqüentemente, podendo então ser utilizado como um complemento ao indicador de tensão (V_0/V_1). Além disso, deve-se salientar que o método se mostra eficaz somente no que tange a faltas que apresentam a terra, isto é, a falta fase - terra e fase -fase - terra. Já em relação as faltas do lado secundário do transformador (consumidor), o indicador de desequilíbrio (I_0/I_1), não se mostrou eficiente para o cenário de ligação igual (Yn - Yn), contrariando o resultado encontrado para a falta no lado primário.

Para a condição de falta fase-fase, isto é, na ausência do aterramento no curto, nenhum dos indicadores foram confiáveis na determinação da origem da falta, o método analisado demonstrou-se ineficaz. Tanto o indicador de tensão de sequência zero em relação à positiva (V_0/V_1) quanto o indicador de corrente de sequência zero em relação à positiva (I_0/I_1) apresentaram, em ambos os lados do transformador, primário e secundário, valores iguais, que ora foram nulos, ora muito próximo de zero (com exceção do indicador V_0/V_1 com a falta no secundário), o que evidencia a limitação do método para este tipo específico de ocorrência.

Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que o indicador de tensão de sequência zero em relação a positiva (V_0/V_1) apresenta desempenho satisfatório para cenários com ligações distintos como Δ -Yn e Yn- Δ , permitindo identificar a presença do curto-circuito. Todavia, para cenários de ligação igual (Yn - Yn), o

método se mostra ineficaz, visto que os indicadores de ambos os lados assumem valores semelhantes, impedindo a determinação da origem da falta.

No que tange ao indicador de corrente de sequência zero pela positiva (I_0/I_1), observa-se que pode atuar como complemento do indicador de tensão (V_0/V_1) em cenários de ligação igual (Yn - Yn). Entretanto, sua aplicação não contempla de forma uniforme para todas as ligações, sobretudo para ocorrências de falta no lado secundário, em que sua aplicabilidade não é recomendada. Além disso, ressalta-se que o método demonstra eficácia apenas em faltas envolvendo o terra, como fase terra e fase-fase-terra.

Por fim, verifica-se que na condição de falta fase-fase, sem a presença do terra no curto-circuito, o método é ineficiente. Tanto o indicador de desequilíbrio de tensão (V_0/V_1) quanto ao de corrente (I_0/I_1) demonstraram limitações.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à UNIFEI pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento acadêmico e ao meu professor orientador, pelo acompanhamento e dedicação passados ao longo desta pesquisa.

Referências

- [1] - BOLLEN, Math H. J. Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions. New York, IEEE Press (IEEE Press series on power engineering, vol. 5), outubro de 1999.
- [2] - ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. [S.l.]: ANEEL, [s.d.].
- [3] - DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. Electrical Power Systems Quality, Third Edition. McGraw-Hill, janeiro de 2012.
- [4] FERREIRA, Adrian Ribeiro; OLIVEIRA, José Carlos de; REZENDE, Paulo Henrique Oliveira. Uma proposta para a identificação da responsabilidade das VTCDs através da transferência dos indicadores de desequilíbrios nos transformadores de conexão. CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 14., 2021, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: SBQEE, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130566>.