

IMPACTO DA MODELAGEM BALANCEADA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DESEQUILIBRADAS NA ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO E ASSIMÉTRICO

*Bruno Pestana Rosa, Bolsista de Iniciação Científica do CNPq/PIBIC
Tatiana Mariano Lessa Assis, Orientadora*

Abstract— In recent years, distributed generation and renewable energy sources have been gaining strength and are developing quickly. Despite the many benefits, a relevant point is the impact of these new energy sources on the protection systems concerning relay settings and fault currents calculation. The most usual method for fault calculations is based on the symmetrical components theory, assuming that the pre-fault system is perfectly balanced. Especially in distribution systems, this approximation can generate errors that compromise the analysis result and, consequently, the correct operation and dimensioning of the protection system. Seen in these terms, the use of phase components based methods, which allow an unbalanced modelling of the network, gains relevance in the current context. This article evaluates the impact of the balanced modelling of unbalanced distribution feeders in the calculation of fault currents. From simulations with the IEEE 4 bus and IEEE 34 bus systems, the errors associated to the use of symmetrical components based and phase components based methods are quantified, showing the importance of an accurate representation of the system's unbalance.

Keywords— Fault calculations, symmetrical components, phase coordinates, distribution feeders

Resumo— Nos últimos anos, a geração distribuída e as fontes de energias renováveis vêm ganhando força e se desenvolvendo rapidamente. Apesar dos diversos benefícios, um ponto relevante é o impacto dessas novas fontes nos sistemas de proteção no que diz respeito aos ajustes dos relés e do cálculo das correntes de curto-circuito. O método atualmente mais utilizado para cálculo de correntes de curto-circuito se baseia na teoria dos componentes simétricos, partindo da premissa que o sistema pré-falta é perfeitamente balanceado. Especialmente em sistemas de distribuição, essa aproximação pode gerar erros que comprometem o resultado das análises e, conseqüentemente, o correto funcionamento e dimensionamento do sistema de proteção. Nesse sentido, o uso de métodos baseados em componentes de fase, que permitem a modelagem desbalanceada da rede, ganha relevância no contexto atual. Este artigo avalia o impacto da modelagem balanceada de redes de distribuição desequilibradas no cálculo das correntes de curto-circuito. A partir de simulações com os sistemas IEEE 4 barras e IEEE 34 barras, são quantificados os erros associados ao uso dos métodos baseados em componentes simétricos e componentes de fase, mostrando a importância da representação precisa do desbalanço do sistema.

Palavras-chave— Cálculo de curto-circuito, componentes simétricos, componentes de fase, redes de distribuição

1 Introdução

Com o objetivo de alavancar as fontes alternativas de energia, descentralizando e diversificando a matriz energética brasileira, a Geração Distribuída (GD) vem ganhando força nos últimos anos. Medidas governamentais, como o PROINFA e a Resolução Normativa n° 482/2012 da ANEEL, que regulamenta o sistema de compensação de energia elétrica no Brasil, impulsionam ainda mais o aumento da GD.

Apesar dos diversos benefícios trazidos pela GD, sua presença na rede de distribuição acarreta problemas a serem enfrentados (Lopes, 2002; Ackermann, 2002). Um dos problemas mais evidentes é o possível impacto nas correntes de curto-circuito, que dependem especialmente da tecnologia de geração adotada. Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), por exemplo, que utilizam máquinas síncronas convencionais, têm contribuição mais evidente para as correntes de curto-circuito. Por outro lado, a contribuição de geradores conectados à rede por conversores eletrônicos dependerá da filosofia de controle adotada (Nimpitiwan, 2007; Su, 2014).

Dessa forma, redes elétricas com a presença de geração distribuída representam um novo paradigma para as empresas distribuidoras de energia, uma vez que a

mudança das correntes de falta pode impactar o dimensionamento e os ajustes do sistema de proteção.

O método mais largamente utilizado hoje para o cálculo de curto-circuito advém da teoria de componentes simétricos e considera o sistema pré-falta perfeitamente equilibrado. Dependendo do grau de desbalanço do sistema, essa aproximação é válida e gera erros insignificantes, como ocorre nos sistemas de transmissão. Por outro lado, a adoção dessa premissa em redes severamente desbalanceadas, como é o caso de algumas redes de distribuição, pode comprometer os resultados. As redes de distribuição podem conter trechos trifásicos desbalanceados, mas também trechos monofásicos ou bifásicos (Castellanos, 2008; Teng, 2005). Junta-se a isso, a possibilidade da existência de GDs também conectadas a apenas uma ou duas fases do sistema.

O cálculo das correntes de curto-circuito em redes desbalanceadas pode ser feito de forma mais precisa utilizando a modelagem em componentes de fase. Entretanto, por ser mais trabalhosa, essa técnica tem sido abandonada em muitos casos.

Esse artigo tem como objetivo avaliar o impacto do desequilíbrio de sistemas de distribuição no cálculo de correntes de curto-circuito, comparando o resultado obtido por meio da modelagem do sistema em componentes simétricos e em componentes de fase. Assim, a Seção 2 traz uma breve revisão dos fundamentos teóricos do cálculo de curto-circuito através

do método de componentes simétricos e de componentes de fase. Na Seção 3, a metodologia de comparação utilizada é descrita e os sistemas teste adotados são apresentados. Os resultados obtidos são discutidos na Seção 4 e a Seção 5 mostra as conclusões do trabalho. Por fim temos as referências bibliográficas, o relatório de atividades e a avaliação crítica feita pelo bolsista.

2 Cálculo do Curto-Circuito

A determinação das correntes de curto-circuito é fundamental para o dimensionamento de disjuntores e ajuste do sistema de proteção. Seu cálculo pode ser feito a partir da modelagem do sistema em componentes simétricos ou componentes de fase, conforme resumido nas seções seguintes.

2.1 Curto-Circuito via Componentes Simétricos

O cálculo das correntes de curto-circuito baseado na teoria dos componentes simétricos traz uma série de vantagens desde que a rede, na sua condição pré-falta, possa ser considerada perfeitamente equilibrada. Nesse caso, o método dos componentes simétricos é muito útil para a análise de defeitos simétricos e assimétricos e permite, de forma relativamente simples, a determinação das correntes e das tensões em todas as partes do sistema durante a ocorrência da falta (Stevenson, 1974).

O algoritmo comumente usado consiste nos seguintes passos:

1. Montar os circuitos equivalentes de sequência positiva, negativa e zero;
2. Calcular as condições pré-falta do sistema;
3. Obter a matriz de admitância Y_{barra} e, a partir dela, encontrar a matriz de impedância Z_{barra} ;
4. A partir das impedâncias equivalentes de Thévenin obtidas de Z_{barra} , calcular as correntes de curto-circuito;
5. Aplicar o teorema da superposição para calcular as condições de defeito nos circuitos equivalentes de sequência positiva, negativa e zero;
6. Obter matricialmente os valores de tensão e corrente em componentes de fase.

Esse método considera que o sistema pré-falta é perfeitamente equilibrado, o que faz com que a matriz de impedâncias de uma linha ou carga Z_{012} seja uma matriz diagonal (Saadat, 1999). Isso resulta no desacoplamento entre as sequências, permitindo considerá-las individualmente, facilitando muito o cálculo do curto-circuito.

Em sistemas de transmissão, o erro cometido com a premissa de equilíbrio é, normalmente, irrelevante, especialmente por conta da transposição das linhas de transmissão. Por outro lado, nas redes de distribuição, o desequilíbrio é, geralmente, significativo.

Nesses casos, um método que garante maior precisão é o cálculo do curto-circuito via componentes de fase.

2.2 Curto-Circuito via Componentes de Fase

Quando os desequilíbrios presentes em um sistema de distribuição são considerados, como linhas não transpostas e cargas desequilibradas, a modelagem via componentes simétricos perde sua vantagem, sendo mais conveniente realizar o cálculo diretamente por meio de componentes de fase.

Existem diversas formas propostas para esse cálculo. Laughton (1969), Kersting (1990) e Berman (1998) propuseram métodos baseados na matriz de impedância trifásica. Chen (1992) utiliza a trifatorização da matriz de impedância de barras. Teng (2005) propôs um método de análise sistemática para sistemas de distribuição radiais desequilibrados.

O método utilizado nesse trabalho é descrito detalhadamente por Dash (1972) e consiste em representar matricialmente os elementos de um sistema trifásico (Figura 1) em componentes de fase, seguindo a forma geral (1). Em seguida, o sistema é resolvido utilizando álgebra matricial.

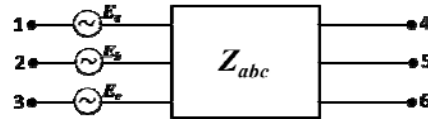


Figura 1. Elemento geral de um sistema trifásico

$$V_{abc} = E_{abc} + Z_{abc} I_{abc} \quad (1)$$

sendo V_{abc} o vetor das quedas de tensão por fase (V_1-V_4), (V_2-V_5) e (V_3-V_6), E_{abc} o vetor das tensões por fase na fonte equivalente, I_{abc} o vetor das correntes de fase entre os nós 1 e 4, 2 e 5, 3 e 6, e Z_{abc} é a matriz que representa a rede trifásica mutualmente acoplada.

3 Metodologia

Essa seção descreve a metodologia utilizada na análise de sistemas de distribuição desbalanceados. Primeiramente, são apresentados os sistemas teste adotados.

3.1 Sistemas Teste

O estudo se iniciou com um sistema de distribuição de pequeno porte, conforme mostra a Figura 2. Trata-se do Sistema IEEE 4 barras, que contém cargas e linhas desbalanceadas e dois níveis de tensão: 12,47kV (lado da fonte) e 24,9kV (lado da rede). Os dados detalhados do sistema podem ser obtidos em Kersting (2001).

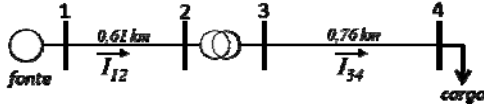


Figura 2. Diagrama do sistema teste IEEE 4 barras

Em seguida, foi estudado um sistema baseado em um de distribuição real localizado no Arizona, com tensão nominal de 24,9kV. Trata-se do sistema IEEE 34 barras, cujo diagrama unifilar está ilustrado na Figura 3. Esse sistema é caracterizado por ser longo (93,6km), com carregamento leve e ter cargas desbalanceadas. Esse sistema possui cinco diferentes configurações de linha, sendo todas desbalanceadas, e três delas monofásicas. Além disso, existe um transformador para reduzir a tensão para 4,16kV para uma parte do alimentador. Os dados detalhados do sistema podem ser obtidos em Kersting (2001).

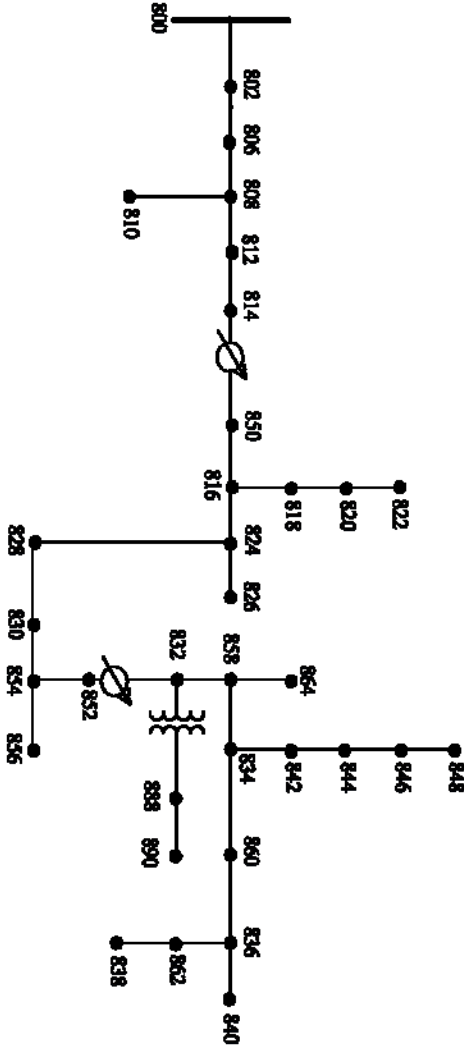


Figura 3. Diagrama do sistema teste IEEE 34 barras

3.2 Metodologia de Comparação

A metodologia de comparação consiste em cinco etapas principais:

1. Cálculo das tensões e correntes de curto-circuito para a rede desbalanceada via componentes de fase;
2. Determinação dos parâmetros da rede equilibrada aproximada;
3. Determinação da carga equilibrada aproximada;
4. Cálculo das tensões e correntes de curto-circuito para a rede equilibrada aproximada via componentes simétricos;
5. Comparação dos valores obtidos nas etapas 1 e 4 com análise dos erros.

A Etapa 2 consiste em uma aproximação, onde a rede desbalanceada é transformada em uma rede equilibrada aproximada de forma a viabilizar o cálculo do curto-circuito via componentes simétricos. Nessa aproximação (Kersting, 2002; Glover, 2008) se propõe modificar a matriz de impedância Z_{abc} de uma linha assimétrica como se fosse uma linha perfeitamente transposta, onde suas impedâncias próprias são iguais entre si, assim como as mútuas.

O método consiste em aproximar a impedância própria como a média das impedâncias próprias das três fases, assim como aproximar a impedância mútua como a média das impedâncias mútuas entre as fases. Dessa forma, partindo de (2),

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

sendo os valores da diagonal as impedâncias próprias das fases a, b e c (Z_{aa} , Z_{bb} e Z_{cc} , respectivamente); e os valores fora da diagonal as impedâncias mútuas entre as fases a-b, b-c e c-a (Z_{ab} , Z_{bc} e Z_{ca} , respectivamente), faz-se as aproximações (3) e (4),

$$Z_P = \frac{1}{3}(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) \quad (3)$$

$$Z_M = \frac{1}{3}(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}) \quad (4)$$

obtendo-se (5),

$$\bar{Z}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix} \quad (5)$$

sendo Z_P e Z_M as impedâncias própria e mútua da rede equilibrada aproximada.

A aplicação da transformação em componentes simétricos em (5) garante a obtenção de uma matriz Z_{012} diagonal, viabilizando a análise do curto-circuito por meio da teoria de componentes simétricos (Etapa 4). Na Etapa 3, um processo similar é feito a fim de tornar as cargas perfeitamente equilibradas, dividindo igualmente a carga total de cada barra entre as fases. Um exemplo de como essa aproximação foi feita pode ser visto para a matriz de impedâncias da Tabela 1, que corresponde a um dos trechos do alimentador do sistema IEEE 34 barras. Note-se que a matriz original (desequilibrada) é utilizada no cálculo das correntes de curto-circuito por meio das componentes de fase, enquanto que a matriz aproximada (equilibrada) é utilizada no cálculo por meio dos componentes simétricos.

Tabela 1. Matriz de Impedâncias

Matriz de impedâncias desequilibrada		
Z (R+jX) em ohms/milha		
Fase a	Fase b	Fase c
1,3368	0,2101	0,2130
1,3343	0,5779	0,5015
	1,3238	0,2066
	1,3569	0,4591
		1,3294
		1,3471
Aproximação como matriz equilibrada		
Z (R+jX) em ohms/milha		
Fase a	Fase b	Fase c
1,3300	0,2099	0,2099
1,3461	0,5128	0,5128
	1,3300	0,2099
	1,3461	0,5128
		1,3300
		1,3461
Matriz de componentes simétricos resultante		
Z (R+jX) em ohms/milha		
Sequência (0)	Sequência (+)	Sequência (-)
1,7498	0,0000	0,0000
2,3717	0,0000	0,0000
	1,1201	0,0000
	0,8333	0,0000
		1,1201
		0,8333

Os cálculos abaixo ilustram a obtenção das componentes próprias e mútuas da rede aproximada para o exemplo da Tabela 1, onde todos os valores indicados estão em Ω /milha.

$$R_p = \frac{1}{3}(1,3368 + 1,3238 + 1,3294) = 1,3300$$

$$X_p = \frac{1}{3}(1,3343 + 1,3569 + 1,3471) = 1,3461$$

$$Z_p = 1,3300 + j1,3461$$

$$R_M = \frac{1}{3}(0,2101 + 0,2066 + 0,2130) = 0,2099$$

$$X_M = \frac{1}{3}(0,5779 + 0,4591 + 0,5015) = 0,5128$$

$$Z_M = 0,2099 + j0,5128$$

4 Resultados

O programa utilizado para realizar a simulação do curto-circuito foi o Simulight (Taranto, 2012). Essa ferramenta, desenvolvida em C++, tem como foco principal a análise de redes elétricas com geração distribuída, sendo possível a modelagem equilibrada e desequilibrada da rede.

4.1 Sistema IEEE 4 Barras

Primeiramente foram estudados quatro tipos de curto-circuito franco para o sistema IEEE 4 barras: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásico.

Na Figura 4 são apresentados, para o curto-circuito fase-terra, o erro máximo e médio da tensão de curto-circuito e o erro máximo e médio da corrente de curto-circuito, respectivamente. Os erros foram calculados da seguinte forma: foi aplicado curto-circuito em cada uma das barras do sistema (Figura 2) e foi computado o erro absoluto máximo e médio de todas as tensões e correntes calculadas das três fases. Acima do erro absoluto máximo, entre parênteses, é mostrado o valor percentual do erro, usando como referência os valores obtidos via componentes de fase (valor exato).

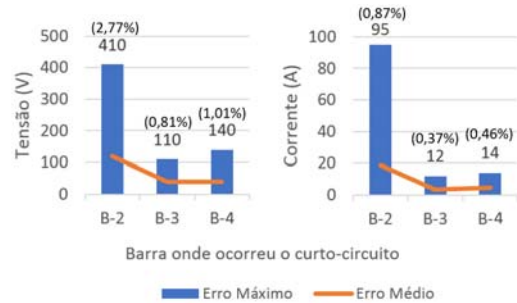


Figura 4. Erro na tensão e corrente para curto-circuito monofásico – Sistema IEEE 4 barras

As Figuras 5, 6 e 7 representam o mesmo gráfico, mas para os defeitos bifásico-terra, bifásico e trifásico, respectivamente. A partir dos gráficos, é possível perceber que, para todos os tipos de defeito, o erro aumenta quando o ponto de defeito está mais próximo do gerador.

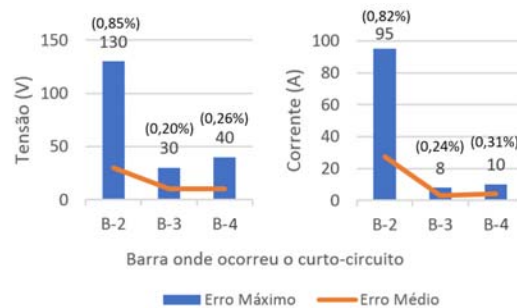


Figura 5. Erro na tensão e corrente para curto-circuito bifásico-terra – Sistema IEEE 4 barras

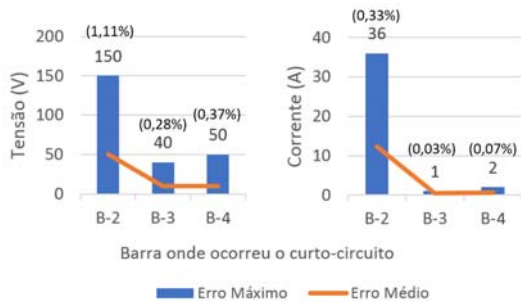


Figura 6. Erro na tensão e corrente para curto-circuito bifásico – Sistema IEEE 4 barras

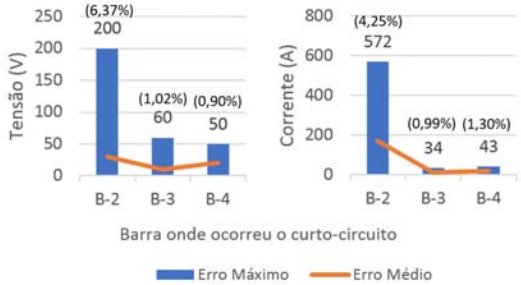


Figura 7. Erro na tensão e corrente para curto-circuito trifásico – Sistema IEEE 4 barras

4.2 Sistema IEEE 34 Barras

As análises foram estendidas para o sistema IEEE 34 barras. Assim como no sistema IEEE 4 barras, os resultados mostraram que, quanto mais longe do gerador estiver a barra que sofreu o curto-circuito, menor será o erro gerado pela aproximação do sistema como perfeitamente equilibrado. Para curtos-circuitos nas barras mais distantes do gerador (a partir da barra 832), o erro médio e o erro máximo para a tensão de falta variaram conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Erro na tensão de curto-circuito para barras distantes do gerador

Tipo de Defeito	Erro Máximo (V)	Erro Médio (V)
Monofásico	575 a 600	250 a 260
Bifásico-terra	650 a 690	200 a 210
Bifásico	925 a 960	365 a 385
Trifásico	450 a 480	70 a 75

Já a corrente de falta apresentou erros máximo e médio para barras distantes do gerador segundo a Tabela 3.

Tabela 3. Erro na corrente de curto-circuito para barras distantes do gerador

Tipo de Defeito	Erro Máximo (A)	Erro Médio (A)
Monofásico	5	1,5 a 1,6
Bifásico-terra	10	1,7 a 1,8
Bifásico	9	2,1 a 2,3
Trifásico	12	2,4 a 3

Os erros indicados nas Tabelas 2 e 3 são relativamente baixos. No entanto, à medida que o defeito se aproxima do gerador, esses números aumentam rapidamente. Nas Figuras 8 e 9 estão apresentados o erro máximo e médio da tensão de curto-circuito e o erro máximo e médio da corrente de curto-circuito, respectivamente, assim como o erro relativo representado pelo erro máximo. Esses gráficos seguem o mesmo modelo dos apresentados para o sistema IEEE 4 barras.

Nota-se um erro significativo no cálculo do curto-circuito na barra 808, provavelmente porque o trecho 808-810 (Figura 3) é de natureza monofásica.

Nas Figuras 10 e 11 o mesmo resultado é exibido para um curto-circuito bifásico-terra.

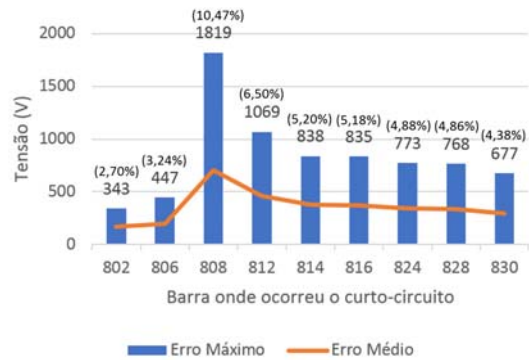


Figura 8. Erro na tensão para curto-circuito monofásico – Sistema IEEE 34 barras

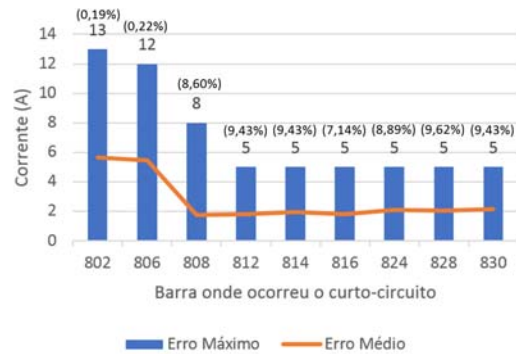


Figura 9. Erro na corrente para curto-circuito monofásico – Sistema IEEE 34 barras

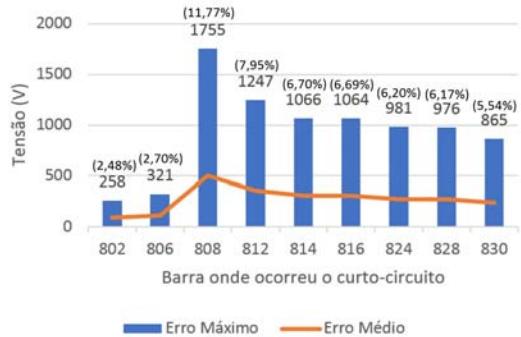


Figura 10. Erro na tensão para curto-circuito bifásico-terra – Sistema IEEE 34 barras

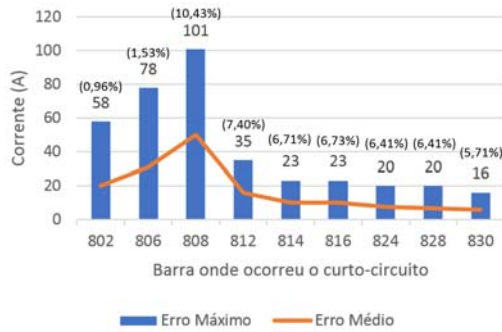


Figura 11. Erro na corrente para curto-circuito bifásico-terra – Sistema IEEE 34 barras

Para o curto-circuito bifásico, os resultados são mostrados nas Figuras 12 e 13. Por fim, nas Figuras 14 e 15 têm-se os resultados para o defeito trifásico.

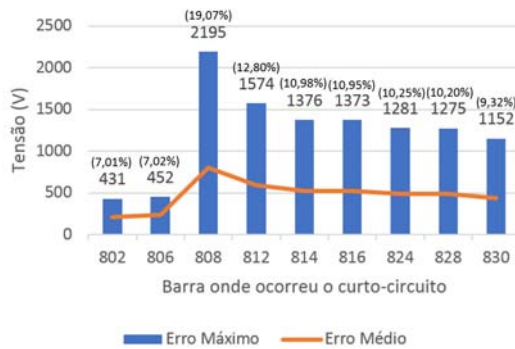


Figura 12. Erro na tensão para curto-circuito bifásico – Sistema IEEE 34 barras

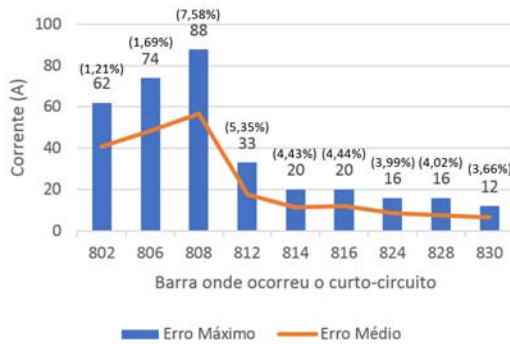


Figura 13. Erro na corrente para curto-circuito bifásico – Sistema IEEE 34 barras

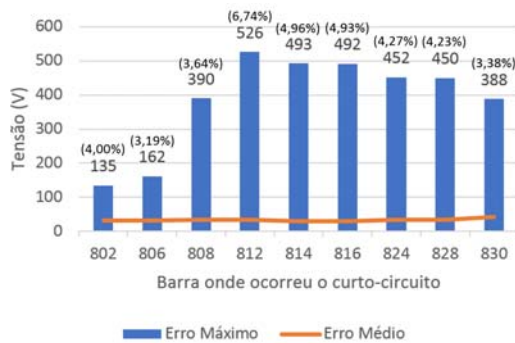


Figura 14. Erro na tensão para curto-circuito trifásico – Sistema IEEE 34 barras

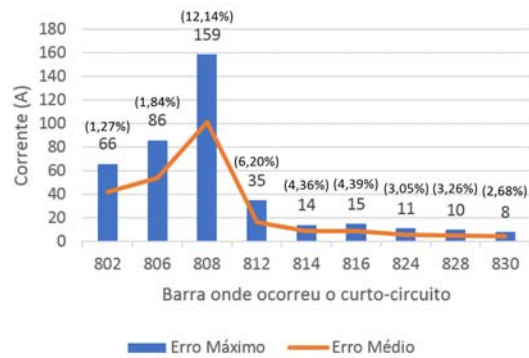


Figura 15. Erro na corrente para curto-circuito trifásico – Sistema IEEE 34 barras

É importante ressaltar que esses resultados foram obtidos para curtos-circuitos aplicados apenas em barras trifásicas do sistema IEEE 34 barras. Para defeitos aplicados em barras de trechos monofásicos, os erros foram consideravelmente maiores, como ilustram as Figuras 16 e 17. Os gráficos seguem o mesmo modelo já apresentado.

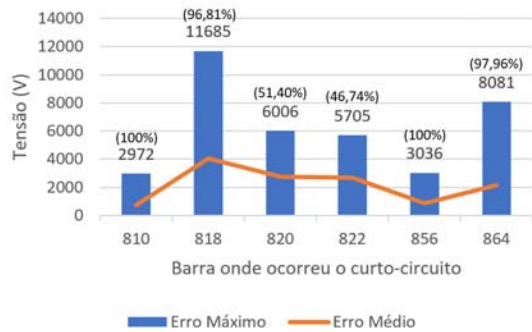


Figura 16. Erro na tensão para curto-circuito monofásico em trecho monofásico – Sistema IEEE 34 barras

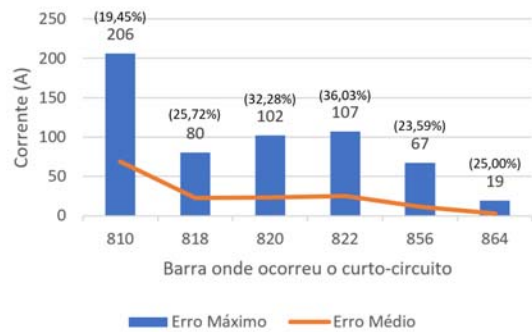


Figura 17. Erro na corrente para curto-circuito monofásico em trecho monofásico – Sistema IEEE 34 barras

5 Conclusões

Com o aumento da geração distribuída, o cálculo do curto-circuito em redes de distribuição torna-se ainda mais relevante para as concessionárias no que diz respeito ao planejamento e operação dos sistemas de proteção. Tradicionalmente, as análises de curto-

circuito são realizadas com base na teoria dos componentes simétricos, onde a condição pré-falta é considerada perfeitamente balanceada.

Nesse trabalho, o método baseado em componentes simétricos foi comparado com o método baseado em componentes de fase, considerando uma rede de distribuição desbalanceada. No caso do método que utiliza os componentes simétricos, a rede desbalanceada foi substituída por uma rede equilibrada aproximada.

Os resultados mostraram a importância da modelagem desbalanceada da rede no cálculo das tensões e correntes de curto-circuito. A aproximação de uma rede desequilibrada por um equivalente perfeitamente simétrico pode produzir resultados bastante imprecisos.

No caso do sistema IEEE 34 barras, que se baseia em uma rede de distribuição real, os erros no cálculo da tensão de falta, para um defeito no trecho trifásico da rede, chegaram a aproximadamente 10% para os curtos-circuitos monofásico e bifásico-terra, 20% para o bifásico e 7% para o trifásico. Já os erros da corrente de curto-circuito, para um defeito no trecho trifásico da rede, chegaram a aproximadamente 10% para o curto-circuito monofásico e bifásico-terra, 8% para o bifásico e 12% para o trifásico.

Analisando defeitos aplicados nos trechos monofásicos, o erro da tensão de curto-circuito chegou a até 100%, enquanto o erro da corrente de curto-circuito chegou a valores entre 20% e 40%.

É importante enfatizar que os erros nos valores de correntes provenientes da aproximação da rede podem levar a diferentes problemas associados ao planejamento dos sistemas de proteção. Entre eles, estão os ajustes inadequados de relés de sobrecorrente, o mau dimensionamento de disjuntores e a indicação indevida de equipamentos superados. Por outro lado, os erros nos valores de tensão podem levar a conclusões equivocadas a respeito da qualidade de energia no tocante aos fundamentos de tensão de curta duração.

Agradecimentos

Esse trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, CAPES e FAPERJ

Referências Bibliográficas

Ackermann, T. and Knyazkin, V. (2002). Interaction between Distributed Generation and the Distribution Network: Operation Aspects. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Vol. 2, pp. 1357-1362.

Berman, A. and Xu, W. (1998). Analysis of Faulted Power Systems by Phase Coordinates. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 587-595.

Castellanos, F. and Dillah, R. (2008). Short Circuit Analysis in the Phase Domain for Distribution Networks, 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America.

Chen, T. H; Chen, M. S; Lee, W. J; Kotas, P. and Olinda, P. V. (1992). Distribution System Short Circuit Analysis - a Rigid Approach. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 444-450.

Dash, P. K. (1972). Analysis of Power System Faults by Phase Impedance Matrix Method: I – General Fault Analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, No. 2, pp. 592-600.

Glover, J. D; Sarma, M. S. and Overbye, T. J. (2008). Power System Analysis and Design. Thomson, Toronto – Ontario.

Kersting, W. H. and Phillips, W. H. (1990). Distribution System Short Circuit Analysis. Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 1, pp. 310-315.

Kersting, W. H. (2001). Radial Distribution Test Feeders. 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 908-912.

Kersting, W. H. (2002). Distribution System Modeling and Analysis. CRC Press, Boca Raton – Florida.

Laughton, M. A. (1969). Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates. Part 2: Fault Analysis. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 116, No. 5, pp. 857-865.

Lopes, J. A. P. (2002). Integration of Dispersed Generation on Distribution Networks – Impact Studies. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 323-328.

Nimpitiwan, N; Heydt, G. T; Ayyinar, R. and Suryanarayanan, S. (2007). Fault Current Contribution from Synchronous Machine and Inverter Based Distributed Generators. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 634-641.

Saadat, H. (1999). Power System Analysis. McGraw-Hill, New York – New York.

Taranto, G. N; Marinho, J. M. T; Falcao, D. M; Assis, T. M. L; Escalante, S. L; Rodriguez, J. I. R. and Pontes, C. E. V. (2012). Simulador de Redes de Distribuição Ativas com Modelagem Monofásica/Trifásica. XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro. Anais do XII SEPOPE, 2012.

Stevenson, W. D. (1974). Elementos de Análise de Sistemas de Potência. McGraw-Hill, São Paulo – SP.

Su, C; Liu, Z; Chen, Z. and Hu, Y. (2014). Short Circuit Analysis of Distribution System with

Integration of DG. 2014 International Conference on Power System Technology, pp. 2921-2926.

Teng, J. H. (2005). Systematic Short-Circuit Analysis Method for Unbalanced Distribution Systems. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 4, pp. 549-555.

6 Relatório de Atividades

Depois de determinada a natureza do trabalho, a primeira atividade realizada foi o estudo da teoria de curto-circuito e da ferramenta Simulight, incluindo a pesquisa de artigos que tratavam de temas similares ou relacionados. Em seguida, veio a pesquisa por sistemas teste de distribuição desequilibrados para a comparação. O estudo então se iniciou em um pequeno sistema (IEEE 4 barras), sendo escalado para um sistema maior em seguida (IEEE 34 barras). O estudo consistiu na construção do sistema desequilibrado e do sistema equilibrado aproximado no Simulight, realização de simulação de curtos-circuitos e comparação dos resultados com análise de erros.

7 Avaliação das Atividades

A pesquisa foi muito importante como parte da minha formação acadêmica, na medida que reforçou minha escolha profissional na área de Sistemas de Potência, a área de interesse desse trabalho, e aprofundou meus conhecimentos a respeito. Ela proporcionou a aprendizagem de técnicas e de métodos científicos, que normalmente não são ensinadas em sala de aula, além de mostrar como a teoria funciona em um sistema real. Também ficou clara a importância do pensamento científico e criativo para resolver problemas que surgem quando estudando situações reais, fora do ambiente da sala de aula. Foi um desafio que estimulou meu interesse na área acadêmica e de pesquisa.