

SIMULAÇÃO DO MODELO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA DE GAUTAM E BRAHMA APLICADO A UM SISTEMA ELÉTRICO¹

Fernando Feiten Pinto², Airam Teresa Zago Romcy Sausen³, Maurício de Campos⁴,
Paulo Sérgio Sausen⁵, Emília Damásia de Sousa Xavier⁶

¹ Artigo científico desenvolvido em disciplina do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, desenvolvido na UNIJUÍ;

² Bolsista do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

³ Professora do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁵ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁶ Bolsista do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ.

RESUMO

Neste trabalho é realizada a simulação do modelo de Falta de Alta Impedância (FAI) de Gautam e Brahma no software Matlab/Simulink, um circuito é implementado baseado em uma rede de média tensão da Espanha, que consiste em uma subestação e cinco alimentadores de distribuição com configuração radial. O modelo de FAI é composto por duas resistências variáveis conectadas em série a dois diodos e duas fontes de tensão DC desiguais, inserido no quinto alimentador entre os dois últimos segmentos PI. A rede de distribuição é validada através da comparação de dados reais e o resultado da simulação do modelo de FAI é apresentado.

Palavras-chave: Falta de Alta Impedância. Modelagem Matemática. Rede de Distribuição. Simulação.

ABSTRACT

In this work, the simulation of the High Impedance Fault (HIF) model of Gautam and Brahma is carried out in Matlab/Simulink software, a circuit is implemented based on a medium voltage network in Spain, which consists of a substation and five distribution feeders with radial configuration. The HIF model is composed of two variable resistors connected in series to two diodes and two unequal DC voltage sources, inserted in the fifth feeder between the last two PI segments. The results are validated through the comparison of real data with the values obtained in the simulation of a system operating under FAI condition.

Keywords: High Impedance Fault. Mathematical Modeling. Distribution network. Simulation.

INTRODUÇÃO

A Falta de Alta Impedância (FAI) ocorre devido ao contato entre linhas aéreas deterioradas e objetos de alta impedância como prédios ou árvores, ou quando as linhas aéreas rompem e caem sobre superfícies com alta impedância como asfalto, areia e grama. Esses eventos não são facilmente identificados, em virtude de possuírem baixa magnitude de corrente,



tornando-se um desafio aos sistemas de proteção convencionais das concessionárias de energia elétrica.

Durante a FAI é comum a formação de arcos elétricos, fenômeno que provoca a ocorrência de características assimétricas e não lineares na determinação da sua corrente e tensão (EMANUEL et al., 1990), esses fatores justificam a dificuldade em localizar a incidência desses eventos nas redes elétricas. Em geral, o surgimento desses arcos elétricos acontece em FAIs que contêm folgas de ar entre os condutores quebrados, acrescentados também da presença da alta impedância da superfície de contato. Por consequência, o desenvolvimento desses arcos pode comprometer a qualidade de energia elétrica e proporcionar perigo ao ambiente em que os cabos estão expostos, devido energização dos condutores.

As FAIs ocorrem em níveis de tensão de 15 KV ou abaixo na maior parte dos casos (SARWAR et al., 2020), além de poder levar à óbito qualquer ser vivo que entrar em contato quando os condutores estiverem energizados, incêndios também podem ser provocados com a interação de determinadas superfícies de contato. As consequências podem se estender a setores industriais e comerciais, levando a queima de eletrodomésticos devido à interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Como resultado, a concessionária tem a perda da confiabilidade em relação à segurança de seus serviços perante os consumidores, aumentando custos que podem ir muito além da danificação de seus equipamentos, a exemplo do fato que o consumidor lesado tem direito à indenização mediante a comprovação da existência de danos e suas causas, não precisando necessariamente provar a culpa da concessionária (CAMPOS, 2017).

Destaca-se, assim, a importância de técnicas para identificar e localizar a ocorrência desses incidentes, sendo a eficiência e a velocidade desses métodos atributos essenciais para evitar consequências e danos maiores. Para esses métodos apresentarem bons resultados, inicialmente são testados e validados em simulações computacionais. Um dos elementos fundamentais no desenvolvimento dessas técnicas computacionais, que não são baseadas em dados experimentais, é a escolha de um modelo de falta que representa com boa performance o comportamento de tensão e/ou corrente que ocorre durante uma FAI (MISHRA, PANIGRAHI, 2019).

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é realizar a simulação de um modelo de FAI em um circuito construído no Matlab/Simulink, o qual representa uma rede de distribuição da

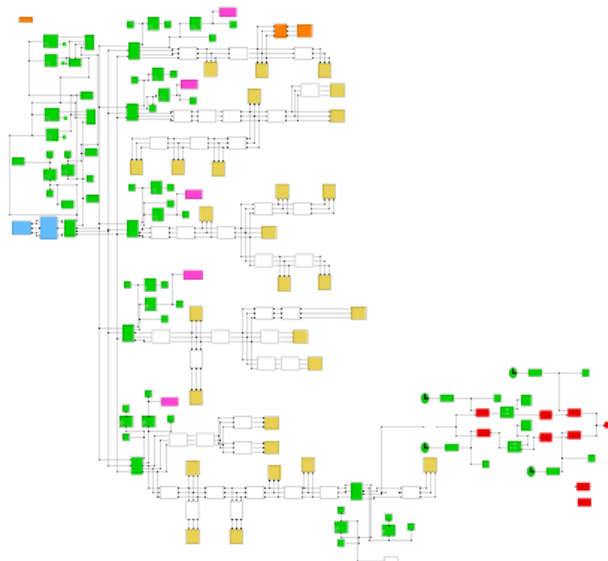


Espanha. O resultado encontrado será comparado com dados de um sistema real operando em condições de FAI. Pode-se concluir que a proposta desse estudo vai ao encontro com o 7º Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), de garantir energia confiável para todos.

METODOLOGIA

O sistema que representa a rede de distribuição foi construído no Matlab/Simulink, baseado em uma rede de média tensão da Espanha que consiste em uma subestação e cinco alimentadores de distribuição com configuração radial (ZAMORA, 2007). Na Figura 1 é apresentado o sistema criado no Simulink, são utilizadas diferentes cores nos blocos para facilitar a compreensão do diagrama, de modo que: os blocos azuis são a fonte e o transformador; os blocos verdes são referentes a parte instrumental (para coletar as medidas de tensão e corrente instantânea e Root Mean Square - RMS); os blocos brancos representam os segmentos PI (i.e., modelo para parâmetros concentrados); os blocos amarelos são as cargas e transformadores (potência ativa e reativa); os blocos rosas transportam os dados RMS de corrente de cada alimentador para a janela principal do Matlab em forma de matrizes; por fim, o modelo de FAI está representado nos blocos de cor vermelha.

Figura 1: Sistema que simula uma rede de distribuição com FAI no Matlab/Simulink.

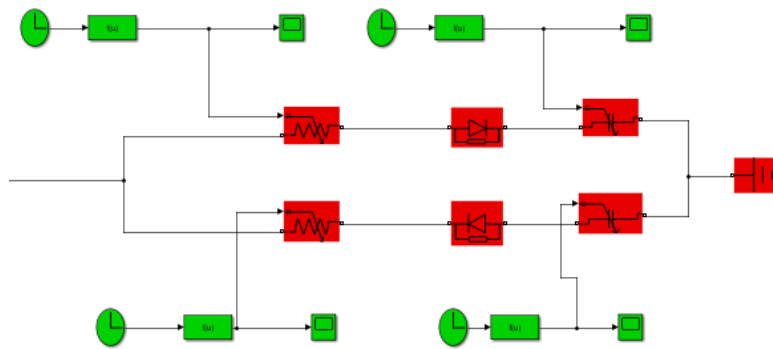


Fonte: O autor.



O modelo de FAI escolhido é composto por duas resistências variáveis (R_p e R_n) conectadas em série com dois diodos (D_p e D_n) e duas fontes de tensão DC desiguais (V_p e V_n). Os elementos do modelo são os blocos da cor vermelha apresentados na Figura 2, que foram construídos através do toolbox Simscape Power Systems. Os valores das componentes como resistências variáveis e fontes de tensão desiguais são apresentados na Tabela 1.

Figura 2: Implementação do modelo de Falta de Alta Impedância no Matlab/Simulink.



Fonte: O autor.

Tabela 1: Parâmetros do Modelo de FAI.

Componente	Valor
V_p	8kV ~ 9kV
V_n	9kV ~ 10kV
R_p	2000Ω ~ 10000Ω
R_n	2000Ω ~ 10000Ω

Fonte: O autor.

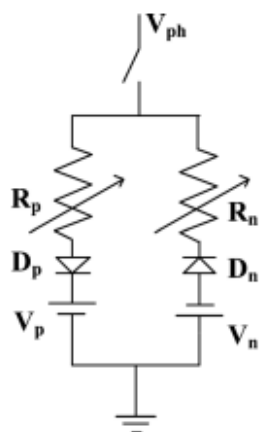
O modelo de FAI é implementado após 1,6s de simulação através de um interruptor que foi inserido no quinto alimentador do sistema, entre os dois últimos segmentos PI. Além disso, destaca-se que os dados técnicos, como o tipo de condutor e seus parâmetros, potência dos transformadores, características dos cabos, entre outras informações, são baseados também no sistema apresentado por Zamora (2007).

MODELO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

Introduzido por Gautam e Brahma (2013), o modelo de FAI (Figura 3) conta com dois diodos (D_p e D_n) ligados a duas fontes de tensão DC (V_p e V_n). As fontes apresentam magnitudes

desiguais e seus valores variam aleatoriamente a cada 0,1ms, modelando a natureza assimétrica da corrente de falta e a característica de intermitência do arco. Além disso, duas resistências variáveis (R_p e R_n) também são conectadas em série com os diodos, variando de forma independente e aleatória a cada 0,1ms, que modelam a resistência de arco dinâmico.

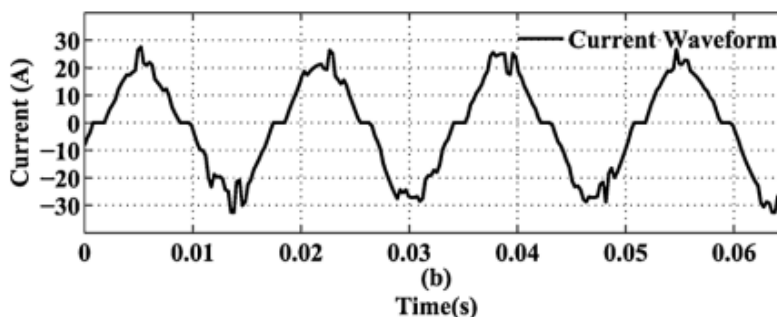
Figura 3: Modelo de FAI proposto por Gautam e Brahma (2013).



Fonte: Gautam e Brahma (2013).

A Figura 4 mostra o comportamento do modelo acima, a forma de onda da corrente durante a ocorrência de uma FAI que foi inserida por Gautam e Brahma (2013) em um alimentador de teste de 13 nós IEEE. Evidencia-se a característica assimétrica e aleatória da corrente em seus picos positivos e negativos, bem como a ocorrência de intermitências temporárias ao passar pelo valor 0 de corrente.

Figura 4: Forma de onda da corrente durante a ocorrência de uma FAI simulada por Gautam e Brahma (2013).



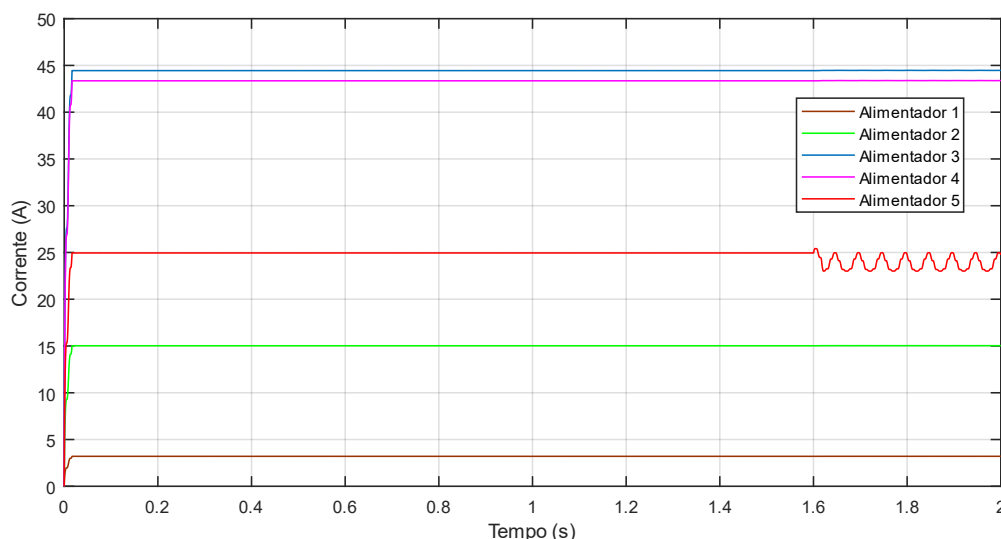
Fonte: Gautam e Brahma (2013).



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a apresentação dos resultados obtidos, transportou-se os dados RMS (Root Mean Square) de tensão e corrente apurados no Simulink para a janela principal do Matlab pelo bloco To Workspace em forma de matrizes. Na Figura 5 é apresentado o comportamento da corrente durante os 2 segundos de simulação em cada um dos cinco alimentadores, percebe-se que os valores das correntes encontram seus períodos transientes aproximadamente em 0,4 segundos de simulação, com exceção do quinto alimentador em que é inserido o modelo de FAI após 1,6 segundos.

Figura 5: Resultado da corrente simulada nos cinco alimentadores.



Fonte: O autor.

É comum a ocorrência de outros eventos normais em sistemas da rede elétrica com comportamentos semelhantes aos de FAI e que podem ser confundidos, gerando assim os falsos positivos em métodos de detecção. Algumas situações comuns de falsos positivos são a energização de um banco capacitores, ou ainda a energização de transformadores (CAMPOS, 2017). Uma maneira de identificar esses eventos é através da análise de seus períodos transientes, pois a FAI apresenta um período transiente mais curto ao comparar com outros eventos (ALI et al., 2018) e a sua corrente aumenta até atingir um overshoot (i.e., o seu valor máximo) sem mergulho, tal qual podemos identificar nas simulações realizadas.

Com intuito de validar o modelo de FAI simulado nesse trabalho, os resultados de corrente e tensão das simulações são comparados após encontrarem seus períodos transientes

com valores reais de uma rede de distribuição operando em condição de FAI apresentados em Zamora (2007). Na Tabela 2 é apresentada essa comparação, nota-se que os resultados obtidos de corrente e tensão simulados são muito próximos aos dados reais em todos os alimentadores, a exceção da corrente presente no quinto alimentador que possui uma maior diferença entre o valor real e o valor simulado.

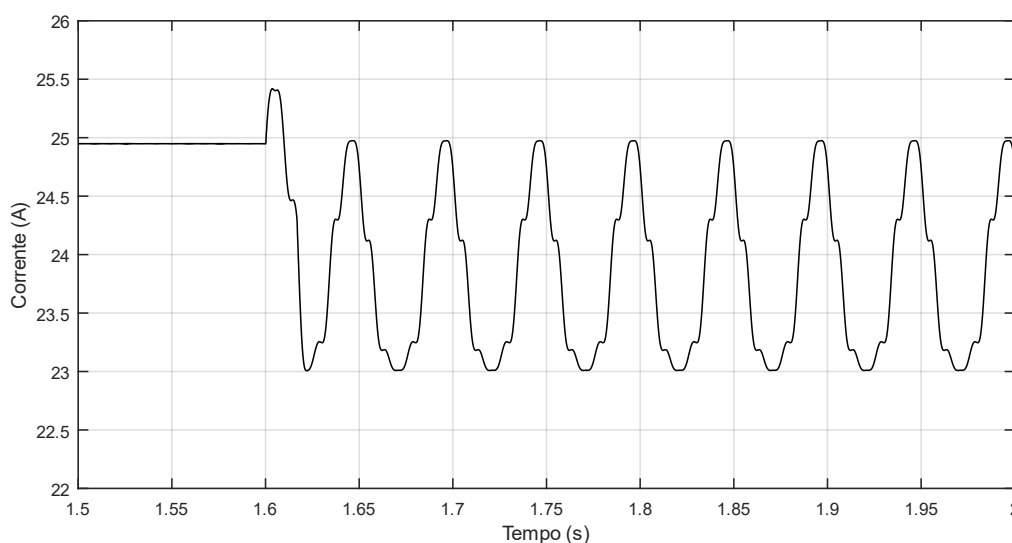
Tabela 2: Comparação do Sistema Real e Simulado.

Alimentador	Corrente (A)		Tensão (kV)	
	Real	Simulada	Real	Simulada
1	3.3	3.08	13.73	13.55
2	15.42	15.03	13.73	13.55
3	45.47	44.45	13.73	13.55
4	44.66	43.36	13.73	13.55
5	28.49	24.95	13.73	13.55

Fonte: O autor (2022).

Na Figura 6 é ampliado o trecho em que ocorre a FAI apresentada no quinto alimentador, percebe-se a interrupção do período transiente em que a corrente se encontrava após 1,6 segundos de simulação, momento em que o interruptor insere o modelo de FAI ao sistema. O modelo de FAI reproduz algumas das características esperadas como intermitências e assimetria em seus ciclos.

Figura 6: Trecho ampliado em que é inserido o modelo de FAI.



Fonte: O autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse artigo é simulado o modelo de FAI de Gautam e Brahma que foi inserido no quinto alimentador de uma rede de distribuição e apresentado seu resultado. A simulação demonstrou no período transiente as características de uma rede operando em condições de FAI, a qual possui um período transiente curto e tem o aumento de sua corrente até atingir um overshoot (i.e., o seu valor máximo) sem mergulho.

Os resultados são validados através da comparação entre os valores de corrente e tensão obtidos na simulação com dados reais de um sistema operando em condição de FAI, visto que apresentaram um desempenho muito próximo dos dados reais. Por fim, é destacado o momento em que o modelo de FAI é inserido no sistema, permitindo identificar algumas das características como assimetria e intermitência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI M. S., BAKAR A. H. A., CHIAKWANG T., AROF H. and MOKHLIS H. **High Impedance Fault Detection and Identification Based on Pattern Recognition of Phase Displacement Computation**. IEEJ Transaction On Electrical And Electronic Engineering 13.4 (2018), pp. 549–560. doi: <https://doi.org/10.1002/tee.22600>.

CAMPOS, M. **Proposição de uma nova técnica de detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica**. Eletrônica de Potência, SOBRAEP, v. 21, p. 138–147, mar./jun. 2016.

EMANUEL, A. E. et al. **High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kv distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum**. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 5, p. 676–686, apr. 1990.

GAUTAM, S.; BRAHMA, S. M. **Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1226–1234, 2013.

MISHRA, M.; PANIGRAHI, R. R. **Taxonomy of high impedance fault detection algorithm**. Measurement, v. 148, p. 106955, 2019. ISSN 0263-2241.

SARWAR, M. et al. **High impedance fault detection and isolation in power distribution networks using support vector machines**. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, v. 32, n. 8, p. 524–535, 2020. ISSN 1018-3639.

ZAMORA, I. et al. **New method for detecting low current faults in electrical distribution systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 4, p. 2072–2079, 2007.