

Detecção e Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída

1st Gabriela Nunes Lopes

Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Departamento de Engenharia Elétrica

São Carlos/ Belo Horizonte, Brasil

gabrielanuneslopes@ufmg.br

Abstract—As Faltas de Alta Impedância (FAIs) ocorrem quando um condutor energizado entra em contato com superfícies de alta impedância, gerando arcos de baixa amplitude e longa duração que representam riscos a pessoas e instalações. Com a crescente inserção de Geração Distribuída (GD), o diagnóstico dessas faltas torna-se mais complexo e exige soluções mais robustas. Além de uma revisão crítica da literatura, a tese apresenta um método de detecção baseado em limiar autoadaptativo, com o desenvolvimento e proposição de duas novas métricas. Para localização, foi realizado um trabalho de seleção de atributos, em que avaliou-se correlação entre milhares de combinações de métricas e a localização da falta. Ademais, foi realizada uma análise comparativa de vários algoritmos de aprendizado de máquina baseados em regressão e classificação, no qual os com melhor desempenho foram selecionados para estimar distância e região da falta. Testes em cenários variados de GD, carga, ruído e amostragem mostraram alta acurácia, mesmo em cenários não incluídos nos dados de treinamento, comprovando a aplicabilidade prática das propostas.

Index Terms—component, formatting, style, styling, insert

I. INTRODUÇÃO

As faltas de alta impedância (FAI) respondem por 5–20 % das ocorrências em sistemas de distribuição (SD) e são de difícil detecção devido à baixa corrente e ao comportamento não linear do arco [1]–[3]. Além de provocar interrupções de fornecimento e penalizações regulatórias [4], expõem pessoas e animais a risco de choque e eletrocussão, o que resultou nos mais de 2 892 óbitos no Brasil entre 2008–2018 por este motivo [5]. Relés convencionais não cobrem todos os cenários, especialmente em redes desbalanceadas, e métodos existentes não localizam FAIs em condições de variação de carga ou topologia [6], [7]. A inclusão crescente de geração distribuída (GD) – de 0,48 MW em 2012 para 25,8 GW em 2024 – agrava o desafio, demandando abordagens adaptativas [8], [9].

Tendo em vista a situação narrada, o objetivo geral da tese é desenvolver algoritmos de detecção e localização de FAIs em sistemas de distribuição de média tensão com geração

distribuída (SDMT–GD). Para isso, definiram-se os seguintes objetivos:

- Compreender criticamente técnicas convencionais de detecção e localização de FAIs e o impacto da GD;
- Modelar computacionalmente cenários extensivos (eventos de FAIs, falsos-positivos) para gerar base de dados de teste;
- Propor e avaliar algoritmos de detecção baseados em métricas harmônicas;
- Investigar e desenvolver algoritmos baseados em inteligência computacional para localização de FAIs sob variações de penetração de GD, carga, ruído e amostragem, com a realização prévia de uma análise extensiva de seleção de atributos.

De modo geral, as inovações principais do trabalho são:

- Revisão bibliográfica crítica que orienta futuras metodologias de teste para FAIs;
- Novo método de detecção baseado em energia da componente fundamental e rugosidade da 3^a harmônica, validado em múltiplos cenários, e com desempenho superior à trabalhos correlatos a literatura;
- Estudo investigativo de seleção de atributos que incluiu mais de 10 000 métricas e comparação de algoritmos inteligentes para localização de FAIs;
- Algoritmo de localização que determina distância e região faltosa utilizando algoritmos de aprendizagem de máquinas, facilitando mobilização de equipes de manutenção.

Este trabalho foi realizado pela Dra. Gabriela Nunes Lopes, orientada pelo Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, do departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CRÍTICA

O diagnóstico de FAIs em sistemas de distribuição de média tensão com geração distribuída (SDMT–GD) abrange as características das FAIs e as técnicas de detecção e localização empregadas na literatura. Nesta revisão, discutimos as principais abordagens, suas limitações e lacunas ainda não resolvidas.

A tese foi fomentada pelo processo nº 2020/06935-5, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), e com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

As FAIs ocorrem quando condutores energizados entram em contato com superfícies pouco condutoras (solo, vegetação, asfalto), gerando arcos de baixa amplitude e longa duração com forte distorção harmônica e comportamento aleatório. A escassez de medições em campo levou a maioria dos pesquisadores a simular FAIs em ambientes de simulação, usando modelos estáticos simplificados do evento. Modelos mais recentes incorporam caráter randômico para melhor reproduzir padrões reais do arco elétrico que ocorre durante este tipo de falta.

Para capturar essas faltas, medem-se correntes de fase, de neutro ou tensões, e até sinais de campo magnético. As taxas de amostragem variam de 12 a mais de 256 pontos por ciclo: frequências mais altas permitem monitorar harmônicos elevados, mas encarecem o sistema e obrigam ruído de medição em torno de 45–60 dB de relação sinal-ruído, raramente testado além de 30 dB em muitos trabalhos.

A extração de atributos para serem usados nos algoritmos recorre a três domínios principais: (i) frequência, via FFT/TDF para harmônicos e interharmônicos; (ii) tempo-escala, com DWT/MODWT para coeficientes de detalhes em faixas típicas de arco; e (iii) tempo-frequência, usando STFT ou Stockwell para seguir energia e fase harmônica ao longo de ciclos. A decisão em geral se apoia em limiares — fixos ou autoadaptativos — aplicados a amplitude, energia ou desvios de harmônicos. Métodos de aprendizado de máquina (redes neurais, SVM, árvores e ensembles) complementam os limiares, testados contra eventos transitórios (chaveamentos, partidas de cargas, energização de fornos ou desconexão de GD) para evitar falsos positivos.

A localização de FAIs combina técnicas analíticas (impedância, fluxo de potência, sequência zero) e inteligência artificial (regressão por processo gaussiano, ensemble trees, redes neurais), relatando erros médios de distância abaixo de 3% do comprimento da rede e acurácia de região acima de 90%. Ao avaliar os trabalhos existentes, verifica-se que ainda faltam validações em redes reais com alta penetração de GD, topologias complexas e níveis elevados de ruído. São necessárias soluções de baixo custo, que empreguem métricas robustas e limiares autoadaptativos, e que incorporem módulos para reduzir múltiplas estimações do ponto faltoso. Ademais, nos trabalhos existentes, há poucas análises em relação aos atributos usados, ou quais seriam as melhores modelagens de métodos baseados em IA para este propósito. Este trabalho avança nessas frentes, oferecendo base sólida para diagnósticos de FAIs em redes modernas com GD.

III. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a estratégia geral da tese e a construção da base de dados que sustentou a validação dos dois algoritmos desenvolvidos para diagnóstico de faltas de alta impedância em redes com geração distribuída.

Primeiramente, trataremos da elaboração do método de detecção de FAIs, baseado em limiar adaptativo. Em seguida, desenvolveu-se o algoritmo de localização de FAIs baseado em IA, com uma análise ampla de métricas aplicáveis para a

localização de FAIs. É importante destacar que, na literatura, há uma quantidade alta de novos métodos de detecção de FAIs publicadas todos os anos. No entanto, a localização de FAIs é um campo de pesquisa recente, que tem poucas referências publicadas, muitas delas simplificadas e com base de dados escassa.

Para que os algoritmos de diagnóstico de FAIs sejam testados em cenários próximos aos reais, foi construída uma base de dados extensa. Para tal, adotou-se o sistema IEEE de 34 barras, naturalmente desbalanceado, com cargas, capacitores, reguladores e transformadores. Injetaram-se 33 sinais reais de FAI e 10 sintetizados por modelo Cassie–Mayr randômico no ATPDraw, além de simular eventos transitórios típicos (chaveamentos, energização de fornos, partidas de motores) para avaliar falsos-positivos. A combinação de níveis de carga, GD, ruído e amostragem resultou em mais de 400 000 cenários de FAI e cerca de 7 000 de eventos não-FAI, gerados e processados automaticamente via scripts MATLAB–ATPDraw.

IV. MÉTODO DE DETECÇÃO DE FAIS

A. Sinal de Entrada e Métricas

Nesta pesquisa, o sinal escolhido para detecção de FAIs foi a corrente de neutro medida no transformador da subestação do sistema de distribuição de média tensão com GD. Em condições normais de operação, essa corrente apresenta amplitude muito baixa e variações suaves, o que facilita a identificação de mudanças bruscas causadas pelo rompimento de um condutor e pelo subsequente arco. Para capturar esses eventos, recorreu-se à Transformada de Stockwell, que fornece simultaneamente informações de tempo e frequência de forma robusta a ruído.

Duas métricas complementares foram desenvolvidas: (i) a energia da componente fundamental, que evidencia o aumento repentino de desequilíbrio entre as fases no instante em que o condutor se rompe; e (ii) a rugosidade da terceira harmônica, que quantifica as oscilações rápidas e irregulares geradas pelo arco elétrico. A combinação dessas métricas permite discriminar claramente o estágio inicial da ruptura do condutor do estágio posterior de arco, mesmo quando os sinais apresentam ruído de até 50 dB.

B. Estrutura do Algoritmo

O método foi organizado em três etapas principais, descritas a seguir de forma integrada. Inicialmente, em cada ciclo do sinal de neutro extrai-se o conteúdo harmônico relevante, resultando em uma série temporal para a energia da componente fundamental e outra para a rugosidade da terceira harmônica. Durante o regime permanente, são calculados limiares autoadaptativos que acompanham mudanças de carga, penetração de GD e nível de ruído: o limiar de ruptura baseia-se na mediana e desvio-padrão da energia fundamental, e o limiar de arco usa o valor máximo histórico somado ao desvio-padrão da rugosidade. Quando a energia fundamental supera seu limiar por alguns ciclos, sinaliza-se a provável ruptura do condutor; após um atraso que simula o tempo de queda até o solo, a confirmação da FAI ocorre apenas se a rugosidade da terceira

harmônica permanecer acima do seu limiar por um número mínimo de ciclos. Esse atraso em dois estágios evita falsos alarmes devido a transitórios curtos e garante sensibilidade aos arcos genuínos.

C. Resultados e Discussão

O método foi validado em uma extensa base de testes, incluindo sinais reais de FAI e modelos sintéticos com comportamento aleatório, cenários de falta próximos e distantes da subestação, variação de carregamento entre 30% e 100%, injeção de GD de 33% a 100% da capacidade nominal, níveis de ruído de 30 a 50 dB e taxas de amostragem de 64 a 256 pontos por ciclo. Em todos os casos, a taxa de detecção superou 97% e o tempo médio de alerta ficou abaixo de 0,5 s após o início do arco. Testes com eventos transitórios de curta e longa duração – chaveamentos de capacitores, cargas, transformadores, fornos a arco e retificadores – não geraram falsos positivos. A robustez a ruído e variações de cenário superou métodos existentes, demonstrando que a corrente de neutro, aliada a limiares autoadaptativos e às métricas propostas, oferece solução confiável e de baixo custo para detecção de FAIs em redes modernas com GD.

V. MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FAIS

Este capítulo apresenta de forma integrada a proposta de localização de FAIs em sistemas de distribuição com presença de GD. Inicialmente, descrevemos a metodologia empregada para identificar as grandezas de entrada e as métricas mais promissoras para alimentar algoritmos inteligentes, e em seguida detalhamos o desenvolvimento e a avaliação dos modelos de aprendizado de máquina dedicados à determinação da distância e da região faltosa.

A fase preliminar consistiu em extrair parâmetros de sinais de corrente e tensão simulados em um sistema teste de 34 barras com diferentes cenários de GD, variações de carregamento, níveis de ruído e frequências de amostragem. Foram avaliadas diversas estatísticas — como valor médio, máximo, desvio padrão, variância e amplitude — calculadas sobre as ordens harmônicas obtidas pela Transformada de Stockwell. A análise de correlação de Pearson revelou que as estatísticas de amplitude, valor máximo e desvio padrão dos harmônicos de 12ª a 16ª ordem, computadas como razão entre medições esparsas e a medição na subestação, apresentaram forte correlação com a localização da FAI.

Com as métricas definidas, procedeu-se à comparação de sete algoritmos de regressão (incluindo Árvores de Decisão, Redes Neurais, Regressão Linear, Ensemble Trees, Gaussian Kernel Regression, Máquinas de Vetores de Suporte e Regressão por Processo Gaussiano) para estimar a distância até o ponto faltoso. Cada modelo foi ajustado por otimização Bayesiana de hiperparâmetros e validado via k-fold. Os resultados indicaram que métodos baseados em Processo Gaussiano e Ensemble Trees alcançaram os menores erros médios em toda a gama de condições simuladas.

Para tratar a múltipla estimação do ponto faltoso, também foi proposto um algoritmo de classificação em árvore Ensem-

ble para identificar a região afetada. O sistema foi dividido em quatro zonas, incluindo ramais laterais, e o mesmo conjunto de métricas alimentou o classificador. Novamente, a otimização Bayesiana e validação cruzada garantiram robustez, e os resultados mostraram acurácia superior a 95% mesmo em presença de ruído e variações de cenário.

Além de testar o desempenho sob treinamento e teste no mesmo cenário, explorou-se a abordagem de treinar os modelos apenas em configurações extremas (combinações máximas e mínimas de GD e carregamento) e testá-los em configurações intermediárias. Essa estratégia permitiu reduzir a necessidade de amostragem exaustiva de cenários e ainda manter erros médios de distância abaixo de 3% do comprimento total do sistema e acurácia de região acima de 90%.

Por fim, discutem-se as principais implicações práticas: janelas de 20 ciclos e taxas de amostragem de 256 pontos por ciclo foram indicadas como preferíveis para máxima precisão, embora janelas menores e frequências mais baixas ainda mantenham desempenho aceitável. Assim, conclui-se que a combinação de métricas harmônicas específicas com algoritmos inteligentes otimizados oferece uma solução promissora para localização de FAIs em sistemas modernos de distribuição, alinhada ao estado da arte e preparada para desafios de aplicação no campo.

VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho iniciou-se com uma revisão crítica que revelou lacunas na detecção e localização de FAIs em redes de média tensão com geração distribuída. Para suprir essas deficiências, montou-se uma base de dados extensa no sistema IEEE de 34 barras, incorporando sinais reais e simulados sob diversos níveis de carga, injeção de GD, ruído e amostragem.

Na detecção, propôs-se um algoritmo de limiar autoadaptativo baseado na corrente de neutro da subestação, apoiado em duas métricas inovadoras: energia da componente fundamental para sinalizar a ruptura do condutor e rugosidade da terceira harmônica para confirmação do arco. Testes exaustivos demonstraram alta robustez a variações de cenário e ausência de falsos positivos em eventos transitórios.

Para localização, avaliou-se mais de dez mil combinações de atributos e sete modelos de aprendizado de máquina, identificando como entradas ideais as estatísticas de amplitude, máximo e desvio padrão das ordens harmônicas de 12ª a 16ª, normalizadas pela razão entre medições esparsas e subestação. Os métodos de Regressão por Processo Gaussiano e Árvores Ensemble alcançaram erro médio inferior a 3% do comprimento da rede. Um classificador Ensemble adicional delimitou corretamente a região faltosa em até 97% dos casos. A análise indicou que janelas de 20 ciclos e 256 pontos por ciclo oferecem o melhor equilíbrio entre precisão e custo computacional, embora configurações mais modestas também sejam viáveis. Essas soluções representam avanços significativos para a prática em sistemas modernos com geração distribuída.

REFERENCES

- [1] S. Hossain, H. Zhu, and T. Overbye, "Distribution high impedance fault location using localized voltage magnitude measurements," in *2014 North American Power Symposium (NAPS)*, Pullman, WA, USA, 2014, pp. 1–6.
- [2] W. C. Santos, F. V. Lopes, N. S. D. Brito, and B. A. Souza, "High-impedance fault identification on distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 23–32, 2017.
- [3] É. M. Lima, N. S. D. Brito, B. A. d. Souza, W. C. d. Santos, and L. M. d. A. Fortunato, "Analysis of the influence of the window used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault detection." Belo Horizonte, Brazil: IEEE, Oct. 2016, pp. 350–355.
- [4] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST, Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica*, ANEEL, Revisão 8 - Resolução Normativa nº 728/2016, 2017.
- [5] Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor, *Pesquisa do Idec denuncia alto número de acidentes de choque em fios elétricos no Brasil*, <https://idec.org.br/release/pesquisa-do-idec-denuncia-alto-numero-de-acidentes-de-choque-em-fios-eletricos-no-brasil>, 2020, (acessado em 27/01/2022).
- [6] D. Gomes and C. Ozansoy, "High-impedance faults in power distribution systems: A narrative of the field's developments," *ISA Transactions*, 2021.
- [7] J. J. G. Ledesma, K. B. do Nascimento, L. R. de Araujo, and D. R. R. Penido, "A two-level ann-based method using synchronized measurements to locate high-impedance fault in distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 188, p. 106576, 2020.
- [8] ANEEL. (2022) Relação de empreendimentos de geração distribuída. Acesso em 09/03/2022. [Online]. Available: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida>
- [9] A. S. Bretas, M. Moreto, R. H. Salim, and L. O. Pires, "A novel high impedance fault location for distribution systems considering distributed generation," in *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. Caracas, Venezuela: IEEE, 2006, pp. 1–6.