

配电网弧光高阻接地故障仿真与 实测波形差异性分析

林万里 杨耿杰 郭谋发

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要 针对现有配电网弧光高阻接地故障波形多样、仿真所得波形与工程实际差异较大, 导致已有故障识别模型难以泛化等问题, 本文首先分析已有的仿真模型伏安特性, 然后通过试验获取实测伏安特性, 并分析仿真波形与实测波形的差异性, 最后对影响波形的故障非线性、随机性、间歇性、热惯性、零休偏移等特性进行总结, 提出在考虑无功分量的基础上改进建模方法的建议。

关键词: 配电网; 弧光高阻接地故障; 仿真模型; 差异性; 伏安特性

Analysis of the difference between simulation and measured waveforms of arc high impedance fault in distribution network

LIN Wanli YANG Gengjie GUO Moufa

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

Abstract In response to issues such as the diverse waveforms of arc high impedance faults in distribution networks, significant discrepancies between simulated and actual waveforms, which resulting difficulty in generalizing existing fault recognition models, the voltage-current characteristics of existing simulation models are analyzed firstly in this paper. Then experimental data are obtained to examine the actual voltage-current characteristics, and the differences between simulation and measured waveforms are analyzed. Finally, the characteristics influencing waveforms, including nonlinearity, stochasticity, intermittency, thermal inertia, and “shoulder” offset, are summarized, and improvement suggestions are proposed based on the consideration of reactive components.

Keywords: distribution network; arc high impedance fault; simulation model; difference; voltage-current characteristic

0 引言

配电网馈线非预期地经非理想导体(如树木、沙土、绝缘子等)接地放电^[1]称为高阻接地故障(high impedance fault, HIF), 因其与电弧伴生, 又称弧光高阻接地故障(arc high impedance fault, AHIF)。长期存在的弧光高阻接地故障容易诱发山火^[2]、引起人身触电, 发展严重后或导致大规模停电。区别于单相接地故障, 配电网发生 AHIF 后, 故障信号微弱, 难以被传统零序保护检测到。

为规避 AHIF 信号的微弱性, 利用 AHIF 波形特性进行故障检测的算法得到深入研究。这些波形特性包括电弧导致的零序电流零休^[3] (“肩部”特性),

高次谐波及更为全面的时频特性^[4], 以及系统侧电压^[5-6]、电流^[7]的暂态变化特性。

在充分捕捉波形特征后, 采用阈值法或人工智能法^[8]进行故障判别。其中, 阈值法的主观性较强且容易因系统变化而需要重新整定, 人工智能法通用性强但依赖大量的 AHIF 数据进行模型训练^[9]。受限于配电网现有技术, 实际录波的 AHIF 样本极为稀少^[10]; 受限于安全因素与成本, 人工试验建立数据集的方法实施困难。因此, 通过大量不同工况的仿真来建立仿真数据集进行人工智能模型训练, 再利用少量的实测数据验证模型的有效性, 成为最常用的方法。这种方法的缺陷在于: 现有的仿真模型难以模拟工程实际中复杂变化的 AHIF 场景, 实测

波形与仿真波形存在较大差异。图1展示了某馈线发生AHIF后的柱上馈线终端(feeder terminal unit, FTU)录波波形,零序电流呈现出零休偏移、燃弧畸变、升降过程不对称等波形特征。

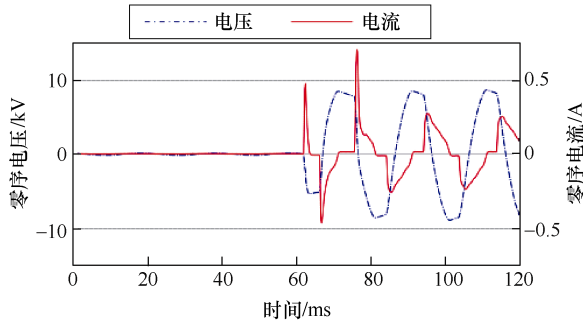


图1 某馈线发生AHIF后的FTU录波波形

文献[11-12]将仿真数据与实测数据混合输入、利用数据增殖模型扩充数据集,得到更接近真实数据特征的生成波形。这种做法虽能解决不均衡小样本问题,然数学构建的增殖模型并不遵循实际的AHIF放电机理,生成波形不具备物理可解释性。

针对仿真与实测波形的差异性,本文利用试验重现多种故障场景,获取时变的阶段性AHIF波形数据;通过伏安特性,完成仿真波形与实测波形的差异性比对,并充分指出差异原因;对AHIF波形的仿真、实测特性进行总结。

1 AHIF 仿真分析

现有常用的AHIF模型主要包括Mayr电弧串接固定电阻模型^[13]、Cassie电弧串接固定电阻模型^[14]、Emanuel电路模型^[15]、改进Emanuel电路模型^[16]、对数(或称指数)电弧模型^[17-18]和修正对数电弧模型^[19-20]。其中,Mayr电弧串接固定电阻模型、Cassie电弧串接固定电阻模型基于能量平衡推导得到,部分文献在此基础上结合经验公式得到改进模型,如畸变可控(distortion-controllable, DIST-C)模型^[21],但仍未脱离基础模型,因此本文不予讨论;Emanuel电路模型、改进Emanuel电路模型为早期基于实测伏安特性推导的电路模型;对数电弧模型、修正对数电弧模型通过汤逊放电理论推导得到,并进行了一定修正。以上模型均为静态模型,现有的针对具体场景(如触树^[22]、污闪^[23])的动态模型主要面向长时幅值变化,对波形细节的模拟效果差,因此不在本文的讨论范围内。

1.1 AHIF 仿真模型

1) Mayr 电弧串接固定电阻模型。基本假设为

单位长度弧柱损耗功率为一常数,包括固定电阻部分与电弧部分。固定电阻包括接地高阻介质的等效电阻和大地导电等效球壳电阻,电弧部分基本形式为

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{t_m} \left(\frac{Ei}{P_m} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: t 为时间; g 为电弧电导率; t_m 为Mayr热惯性时间常数; P_m 为单位长度电弧能量损耗常数; E 为电弧电场强度; i 为电弧电流即故障支路电流。

2) Cassie 电弧串接固定电阻模型。与Mayr模型几乎一致,但基本假设改为单位体积弧柱损耗功率为一常数。电弧部分基本形式为

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{t_c} \left(\frac{E^2}{E_c^2} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: t_c 为Cassie热惯性时间常数; E_c 为弧柱静态电场强度。

3) Emanuel 电路模型。拓扑如图2所示,由两组理想二极管VD、电压源 V 、电阻 R 组成。当正/反向电压超过 V 时,正/反向二极管导通,电流流过电阻 R ;正/反向电压未超过 V 时,支路完全不导通。

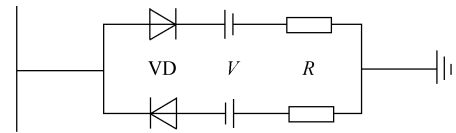


图2 Emanuel 电路模型

4) 改进 Emanuel 电路模型。拓扑如图3所示,在支路中串联电感 L 以模拟热惯性无功分量。

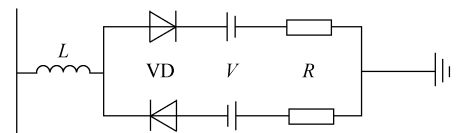


图3 改进 Emanuel 电路模型

5) 对数电弧模型。基本形式为

$$u = \text{sgn}(i) \cdot U_T \ln \left(\left| \frac{i}{I_s} \right| + 1 \right) \quad (3)$$

式中: u 为故障点电压; U_T 和 I_s 分别为电压、电流常数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

6) 修正对数电弧模型。为解释实测数据的电压、电流相位差,通过数学方法将对数电弧模型数据进行一定变换,使伏安特性呈现出一定容性面积。值

得一提的是,文献[19]将实测数据存在相位差解释为热惯性,而热惯性是因弧柱温度变化相对滞后导致的电流滞后于电压,应呈现为感性,但其实测数据与对数电弧模型修正结果却呈现容性。

1.2 AHIF 仿真模型伏安特性分析

AHIF 的过渡电阻较高,不容易引起故障相电压变化,文献[24]指出,故障相电压幅值略微降低,形状几乎呈正弦。为充分结合电压、电流,并反映一定的 AHIF 介质性质,本文以伏安特性而非仅支路电流的形式呈现 AHIF 的形状特性。

通过 Matlab 及数值仿真,获取 6 种仿真模型的伏安特性,如图 4 所示,呈现出各具特色的扭曲“S”形,这是电弧导致过渡电阻非线性变化的体现。其中,除了 Emanuel 电路模型外,其他模型的波形过渡均较为平滑,无突变;Mayr 电弧串接固定电阻模型、Cassie 电弧串接固定电阻模型、改进 Emanuel 电路模型和修正对数电弧模型的波形呈现出滞回特点,导致电流的升降过程不对称,也导致 AHIF 具有一定无功分量。

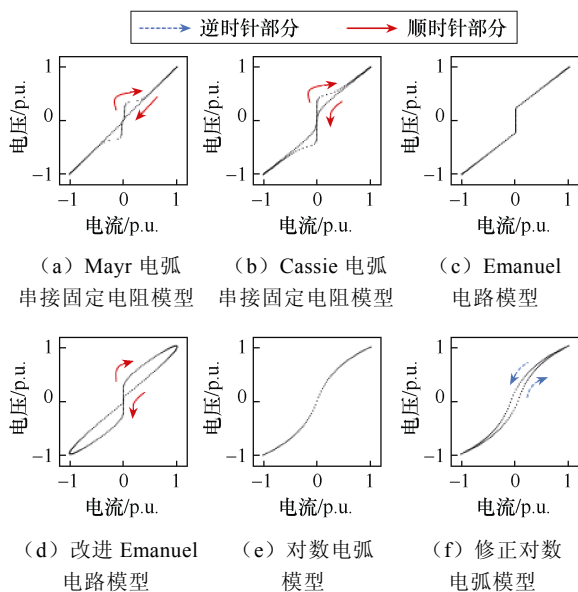


图 4 AHIF 仿真模型伏安特性

2 AHIF 试验分析

2.1 试验平台与试验设计

试验在一座 10kV 配电网真型试验系统进行,由 380V 电压经过升压变得到 10kV 三相电,系统包括 4 条不同馈线(含电缆、架空线)、消弧线圈、台区变等配电网设备,设备参数参照实际配电网。试验系统拓扑如图 5 所示。

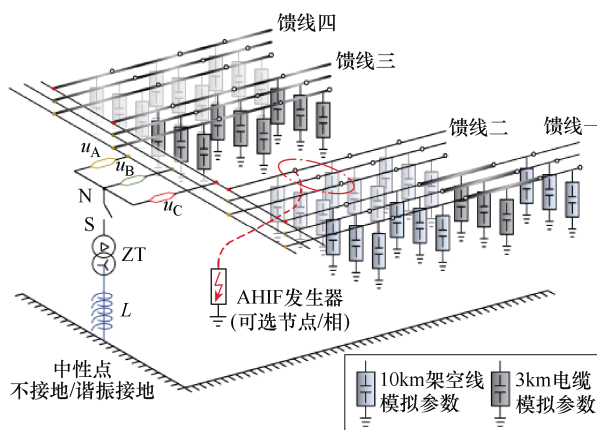


图 5 试验系统拓扑

通过位于馈线节点的引出线与 AHIF 发生器相连实现可控的 AHIF 投入/切除。AHIF 发生器原理如图 6 所示,可利用伺服电动机控制钢芯铝绞线与介质进行持续性/间歇性的触碰,从而模拟实际配电网发生异物接触架空线的情况;也可接入污秽绝缘子,与断路器配合模拟污秽绝缘子闪络。

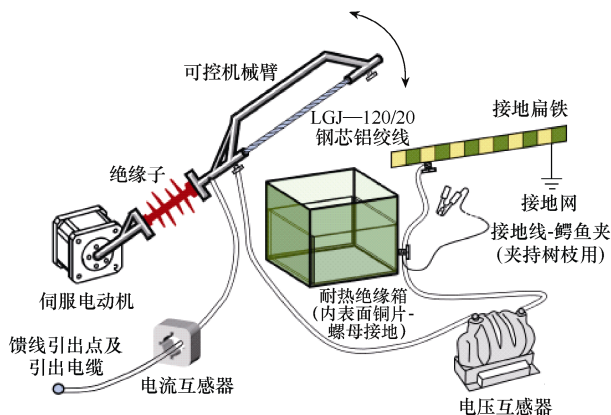


图 6 AHIF 发生器原理

为获取高分辨率的伏安特性,在 AHIF 发生器附近装设电压互感器(电压比 10kV:100V,准确度等级 0.2)和电流互感器(电流比 50A:5A,准确度等级 0.2S),并配备法拉第笼。

模拟场景包括风致线路触树、架空线接触地面介质、盐雾污秽绝缘子闪络等。试验耗材包括杨树树枝、毛竹段、沙土箱、砖块、碎石及 ZSW—110/10 户外支柱绝缘子等。

已有大量文献针对单一 AHIF 场景试验过程中的现象进行归纳,如触树的 4 个典型阶段、绝缘子的动态变化等,本文不再重复介绍,仅从伏安特性角度对 AHIF 进行分析。

2.2 AHIF 实测伏安特性分析

不同场景/不同阶段下, 试验伏安特性曲线差异较大。图 7 展示了具有一定试验次数支撑的典型 AHIF 实测伏安特性, 其中图 7 (a) ~图 7 (c) 为触树故障演化不同阶段的伏安特性, 图 7 (d) ~图 7 (f) 为沙土介质的试验伏安特性, 图 7 (g) ~图 7 (i) 为污秽绝缘子闪络中的伏安特性。以正半周为例, 用红色实线箭头标注随时间围成顺时针面积的部分 (感性), 用蓝色虚线箭头标注随时间围成逆时针面积的部分 (容性)。可以证实, 在电压为正弦的条件下, 伏安特性曲线面积与该周期的 2π 倍无功功率接近^[25-26]。下面给出证明过程。

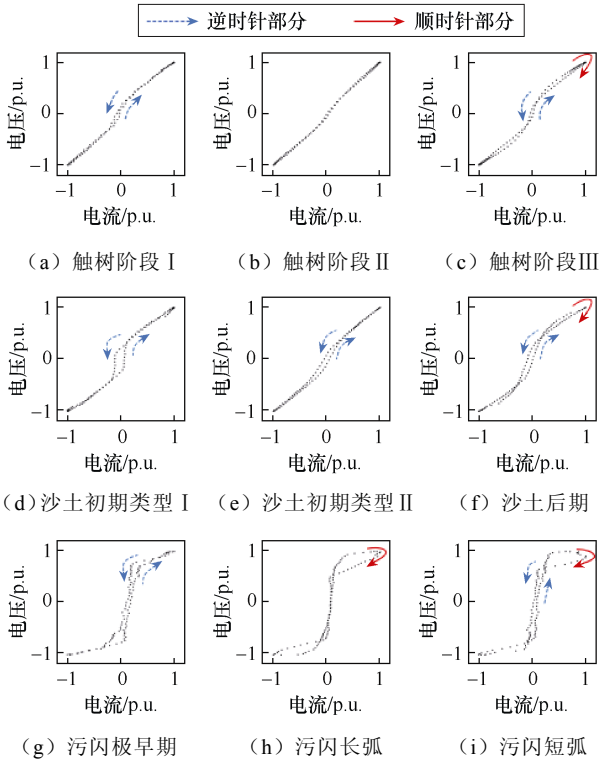


图 7 AHIF 实测伏安特性
故障相电压与故障支路电流可分别记为

$$u(t) = \sum_h^H \sqrt{2} U_h \sin(h\omega t - \phi_h) \quad (4)$$

$$i(t) = \sum_h^H \sqrt{2} I_h \sin(h\omega t - \phi_h - \varphi_h) \quad (5)$$

式中: h 为谐波次数; H 为总谐波次数; U_h 和 I_h 为对应 h 次谐波电压和电流幅值; ϕ_h 为对应 h 次谐波的电压相位; φ_h 为对应 h 次谐波电压与电流的相位差; ω 为工频角频率。

伏安曲线的有向面积可以计算为

$$A = \int_{i(0)}^{i(T)} u(t) di(t) = \int_0^T u(t) \cdot \frac{di(t)}{dt} dt \quad (6)$$

式中, T 为基波周期。

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (6) 得

$$A = \int_0^T \left(\sum_h^H \sqrt{2} U_h \sin(h\omega t - \phi_h) \right) \cdot \left(\sum_h^H (h\omega) \sqrt{2} I_h \cos(h\omega t - \phi_h - \varphi_h) \right) dt \quad (7)$$

将式 (7) 展开, 进行和差化积并消去积分为 0 的部分后可得

$$A = \int_0^T \sum_h^H h\omega U_h I_h \sin \varphi_h dt = \sum_h^H 2\pi h U_h I_h \sin \varphi_h \quad (8)$$

由于故障相电压接近正弦, 所含谐波分量可以忽略, 有

$$u(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \phi_1) \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (8) 可得

$$\frac{A}{2\pi} = U_1 I_1 \sin \varphi_1 = Q \quad (10)$$

由此证明在电压为正弦的情况下, 单周期伏安特性曲线面积恰是该周期无功功率的 2π 倍。

需要注意的是, 这里的无功功率指 Budeanu 功率理论中的位移无功功率。伏安特性曲线有向面积在考虑方向时, 沿时间方向左边取负、右边取正, 此时所求得面积方向恰符合容性无功为负、感性无功为正。

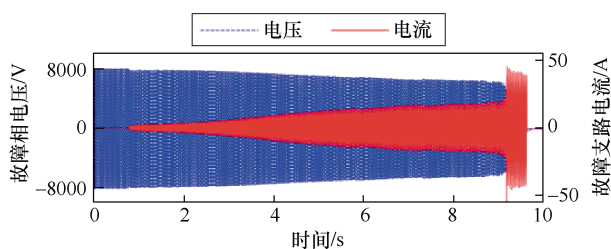
不难发现: 在 3 类故障中, 触树故障的非线性程度最低, 阶段 II 甚至呈现近似直线; 多数伏安特性均出现容性面积, 容性多集中在过零处 (零休期间), 推测为接触点气隙的电容^[27]效应/介质电容^[28]的作用或电弧产生前的势垒电场所致; 感性部分均在故障中后期才出现, 说明热惯性需要故障充分演化与离子的积累。

2.3 仿真与实测波形差异性分析

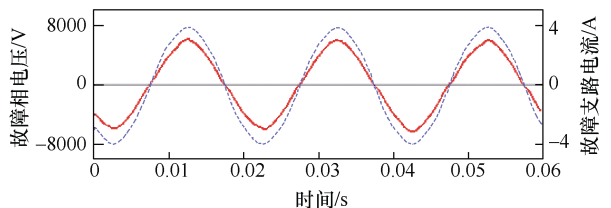
实际接地电弧两端的电压、电弧电流难以直接测量, 部分仿真模型通过将断路器电弧研究^[29]迁移后与电阻串联而得, 以此得到的 AHIF 模型的波形细节并不准确。图 4 展示模型多是针对电弧的热惯性和零休现象进行建模, 仿真模型并不能充分解

释 2.2 节中实测数据的特征。本文认为, 排除静态仿真模型的局限性外, 已有 AHIF 仿真模型并未充分考虑零休期间的电容效应。图 1 中电力系统 AHIF 录波波形出现了“高低肩”特点, 这充分证明了上述观点。

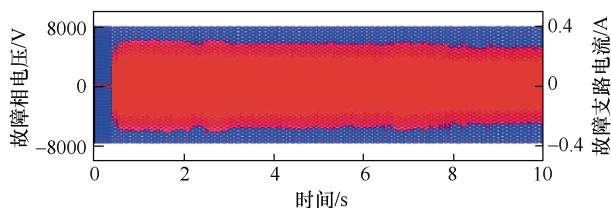
图 8 为试验所得典型波形。其中, 图 8 (a) 反映了线路触树过程的演化特性, 图 8 (b) 说明触树过程中零休现象不明显; 图 8 (c) 体现了沙土试验中电流较小且逐渐减弱的特点, 图 8 (d) 表明电流



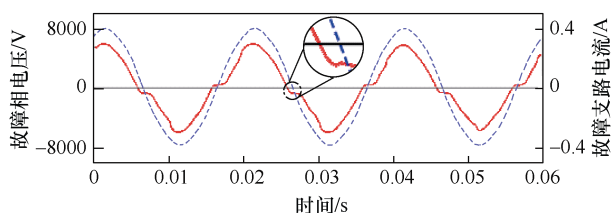
(a) 线路触树试验波形



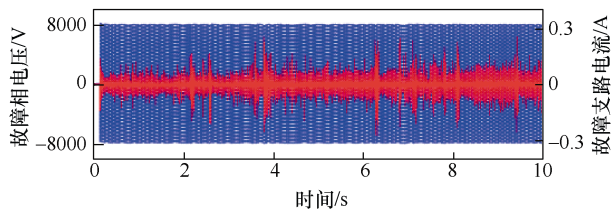
(b) 线路触树试验波形 (局部)



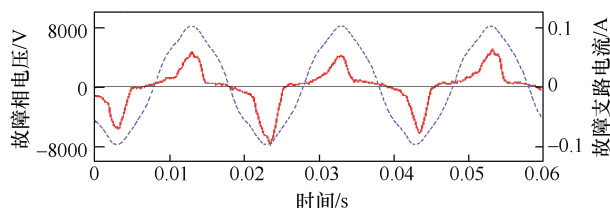
(c) 沙土试验波形



(d) 沙土试验波形 (局部)



(e) 污秽绝缘子闪络试验波形



(f) 污秽绝缘子闪络试验波形 (局部)

图 8 试验典型波形

先于电压过零, 并且零休期间电流仍不为零的特征; 图 8 (e) 反映了污闪现象的随机性, 图 8 (f) 表明电流的显著不对称性, 可能受罗氏线圈零漂影响。

3 AHIF 波形特性总结

根据前文描述, AHIF 波形的特性包括单周期 (静态) 特性和长期 (动态) 特性。静态特性包括非线性、热惯性、零休偏移 (容性过零), 动态特性包括随机性、间歇性、电流连续性^[30]、特定场景下的故障演化特性。

非线性: 因交流电弧特性导致的过渡电阻周期性变化, 电弧熄灭期间电接触等效电阻高, 电弧燃烧期间电弧成为主要导电通道使等效电阻大幅降低。在波形中体现为: 电流的零休 (“肩部”), 伏安特性出现 “S” 形。

热惯性: 指电弧在热动态过程中的热响应滞后特性, 主要描述电弧温度或导电特性随输入能量变化的迟滞性。在波形中体现为: 电流峰值滞后电压峰值, 电流缓慢上升但快速下降 (“头” 右偏), 伏安特性出现外围感性面积。

零休偏移: 指由于电接触气隙电容的影响, 零休期间气隙两端的电势逐渐积累。在波形中体现为: 零休期间电流不为零且几乎不变, 电流先于电压过零 (电流 “高低肩”), 伏安特性出现中心容性面积。

随机性: 因介质干湿不均动态变化导致的周期间电流幅值突变。常见于架空线接触高阻地面后期和轻度的污秽绝缘子闪络。污秽绝缘子闪络中的电流随机性如图 9 所示。

间歇性: 空气不稳定击穿导致故障时而发生、时而消失。常见于电缆破损和绝缘子早期故障。另外, 因风力强弱导致树木-架空线不稳定接触的特性, 称作风致间歇性。

电流连续性: 风致间歇性触树中, 树木的持续破坏不可逆, 导致树木-架空线发生脱离-再接触, 两次故障间故障电流幅值/有效值几乎连续, 称为电流连续性。

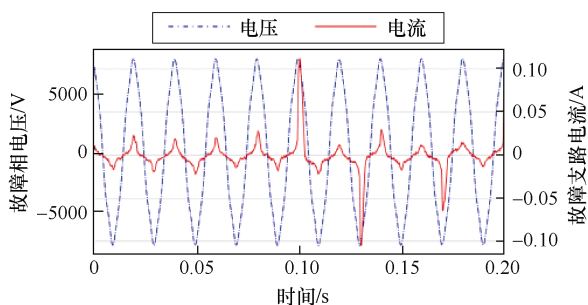


图9 污秽绝缘子闪络中的电流随机性

演化特性：特定场景（如触树）下的 AHIF 具有相似的演化规律。利用物理参数对触树故障过渡电阻变化进行数值计算，可为故障溯源提供参考^[31]。

4 结论

配电网发生弧光高阻接地故障的潜在危害大，现有人工智能方法无法从仿真数据中获取弧光高阻接地故障除零休外的其他特征，本文针对这一问题进行试验研究，得到以下结论：

1) 已有仿真模型仅针对弧光高阻接地故障的非线性和热惯性提出，忽略了实际弧光高阻接地故障的复杂特征。

2) 实际弧光高阻接地故障的伏安特性与故障场景和进程高度相关，热惯性和零休偏移等现象不能被忽略，二者充分反映了故障的无功分量。

3) 弧光高阻接地故障具有非线性、热惯性、零休偏移、随机性、间歇性、电流连续性、演化特性等复杂特征。

深入研究弧光高阻接地故障的动态特性，有利于在检测到故障后进一步实现故障的成因辨识、状态感知，辅助决策及人工排查，侧面解决故障定位的“最后一公里”问题。

参考文献

[1] TENG D J, WESTFALL R, STEPHAN K, et al. High impedance fault detection technology[EB/OL]. [2025-03-11]. <https://grouper.ieee.org/groups/td/dist/documents/highz.pdf>.

[2] 姚福星, 苗世洪, 涂青宇, 等. 考虑强对流天气的乡镇配电网树线矛盾风险预警及优化处理[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6188-6203.

[3] 耿建昭, 王宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.

[4] 王康, 高伟, 杨耿杰. 基于高频分量的配电网高阻

接地故障识别[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 61-66, 87.

- [5] GAO Jianhong, GUO Moufa, LIN Shuyue, et al. Application of semantic segmentation in high-impedance fault diagnosis combined signal envelope and Hilbert marginal spectrum for resonant distribution networks[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 231: 120631.
- [6] 李宽宏, 林金树, 江捷, 等. 基于信号包络与希尔伯特边缘谱的高阻接地故障检测方法[J]. 电气技术, 2024, 25(6): 39-46, 55.
- [7] WEI Xiangxiang, WANG Xiaowei, GAO Jie, et al. High impedance fault detection based on arc changing tendency and nonlinear least squares for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(6): 8572-8584.
- [8] GUO Moufa, ZENG Xiaodan, CHEN Duanyu, et al. Deep-learning-based earth fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1291-1300.
- [9] 和敬涵, 罗国敏, 程梦晓, 等. 新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5506-5516.
- [10] 詹惠瑜, 刘科研, 盛万兴, 等. 有源配电网故障诊断与定位方法综述及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 660-671.
- [11] 高伟, 何文秀, 郭谋发, 等. 基于实测不平衡小样本的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1135-1144.
- [12] GUO Moufa, LIU Wenli, GAO Jianhong, et al. A data-enhanced high impedance fault detection method under imbalanced sample scenarios in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(4): 4720-4733.
- [13] MAYR O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens[J]. Archiv Für Elektrotechnik, 1943, 37(12): 588-608.
- [14] CASSIE A M. Arc rupture and circuit severity: a new theory[R]. Paris, France: CIGRE Report No. 102, 1939.
- [15] EMANUEL A E, CYGANSKI D, ORR J A, et al. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 676-686.

- [16] NZAMANAN N, SYKULSKI J. The evolution of high impedance fault modeling[C]//2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, Romania, 2014: 77-81.
- [17] 钟逸涵, 邓丰, 史鸿飞, 等. 基于动态电阻串联的高阻接地故障精确建模[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2046-2059.
- [18] 孙月琴, 倪江, 王宾, 等. 应用于输电线路单端测距的高阻接地故障电弧模型分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 86-92.
- [19] 梁晨光, 王宾, 李凤婷, 等. 高压线路单相弧光接地对数仿真模型数据修正算法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 126-131.
- [20] 邵庆祝, 崔鑫, 谢民, 等. 弧光高阻接地故障建模及数据修正算法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 120-125.
- [21] WEI Mingjie, LIU Weisheng, SHI Fang, et al. Distortion-controllable arc modeling for high impedance arc fault in the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 52-63.
- [22] 梁栋, 徐丙垠, 唐毅, 等. 10kV 架空导线单相触树接地故障模型及其检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5221-5232.
- [23] 余颖, 刘亚东, 李维, 等. 配电线路针式绝缘子早期故障动态特性研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 71-82.
- [24] 韦明杰. 基于宽频同步测量的配电网高阻故障诊断技术与应用[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [25] 伍家驹, 冯上贤, 徐杰, 等. 电阻负载单相全波整流电路无功分量的一种图解方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1505-1516.
- [26] IZADI M, MOHSENIAN-RAD H. Characterizing synchronized Lissajous curves to scrutinize power distribution synchro-waveform measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4880-4883.
- [27] 任万滨, 金建炳, 郭继峰, 等. 碳电极交流电弧伏安特性的实验研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 18-22, 30.
- [28] 梁军, 屈智巍, 贾秀贞, 等. 树体电容的生理学研究[J]. 林业科学, 2006, 42(1): 90-95.
- [29] 王仁甫. 电弧现象模型的发展[J]. 高压电器, 1991, 33(4): 39-46.
- [30] 秦际轲, 宁鑫, 范松海, 等. 架空导线单相触树接地故障的放电引燃机制研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1289-1299.
- [31] 贾曜霆, 王军, 王棣生, 等. 配电线路单相触树接地故障建模分析与仿真[J/OL]. 电网技术, 1-10 [2025-03-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20241204.1550.009.html>.

收稿日期: 2025-01-20

修回日期: 2025-02-18

作者简介

林万里(2000—), 男, 福建泉州人, 硕士, 主要研究方向为配电网及其自动化技术。

(上接第37页)

mable convolutional networks[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy, 2017: 764-773.

[22] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.

[23] KOWOL K, ROTTMANN M, BRACKE S, et al. Yodar: uncertainty-based sensor fusion for vehicle detection

with camera and radar sensors[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2010.03320v2>.

收稿日期: 2025-01-09

修回日期: 2025-02-25

作者简介

范程涛(1999—), 男, 福建省三明市人, 硕士研究生, 主要从事多模态信号输电线路探鸟驱鸟技术研究工作。