

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240252

# 基于阻抗渐变特性检测的中压线路树枝碰线故障识别方法

唐瑞<sup>1</sup>, 张文海<sup>1</sup>, 杨淳岚<sup>1,2</sup>, 陈天翔<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 中压配电线路的树枝碰线故障极易诱发森林火灾并造成严重安全事故, 灵敏准确地识别树枝碰线故障对于保障供电安全和公共安全有重要意义。基于澳大利亚“植被引燃测试”的树枝碰线公开实验数据, 针对树枝碰线引起的单相接地故障, 在分析碰线至树枝引燃全物理过程的基础上, 发现95%以上树枝碰线故障在初期存在相似的阻抗渐变过程。树枝阻抗因放电升温呈现双指数衰减特性, 并进一步提出基于双指数曲线拟合的阻抗渐变特性检测识别方法。基于PSCAD/EMTDC仿真数据、公开实验数据集和真型实验测试数据对所提方法进行验证。结果表明, 所提方法可适用于不同中性点接地方式、不同类型树种快速准确识别, 为树枝碰线故障识别提供了新的思路。

**关键词:** 树枝碰线故障; 阻抗渐变特性; 最小二乘拟合; 非线性识别

## Tree-contact single-phase-to-ground fault identification for medium voltage distribution lines based on impedance gradient property detection

TANG Rui<sup>1</sup>, ZHANG Wenhai<sup>1</sup>, YANG Chunlan<sup>1,2</sup>, CHEN Tianxiang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** A tree-to-wire fault (TF) in medium voltage distribution lines can cause wildfires and serious safety accidents. Sensitive and accurate TF identification is of great significance in ensuring power supply and public safety. Based on the publicly available experimental data of the “Vegetation Conduction Ignition Tests” in Australia, for tree-contact single-phase-to-ground fault (TSF), an analysis of the entire physical process from contact to fire ignition reveals that over 95% of TSF exhibit a similar impedance gradient pattern in the initial stage. The tree impedance shows a double exponential decay characteristic due to discharge heating. Also a method for detecting and identifying impedance gradient properties based on double exponential curve fitting is proposed. The proposed method is validated using PSCAD/EMTDC simulation data, public experimental datasets, and real experimental test data. The results show that the proposed method can be quickly and accurately applied to different neutral grounding methods and types of tree species, providing a new approach for identifying TSF.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC0234).

**Key words:** tree-contact single-phase-to-ground faults (TSF); impedance gradient property; least squares fitting; nonlinear identification

## 0 引言

由于中压配电线路分布范围广、体量大、线路杆塔高度低, 与树枝生长高度存在较多重叠区域, 树枝碰线故障时有发生。虽然该类故障不会对供电

连续性产生直接影响, 但极易引起电弧或熔融滴落物诱发森林火灾<sup>[1]</sup>, 造成重大经济损失和人身安全事故。近年来, 因树枝碰线故障引发的森林火灾频发, 造成严重损失: 2009年澳大利亚维多利亚发生“黑色星期六”特大森林火灾, 造成人员伤亡与重大经济损失<sup>[2]</sup>; 2018年美国天堂镇外16 km处一家公用电力公司的一段配电线路与植被接触, 引发“坎普”山火, 过火面积超过620平方公里<sup>[3]</sup>。因此,

**基金项目:** 四川省自然科学基金项目资助(2022NSFSC0234); 国家自然科学基金项目资助(52307125)

灵敏检测识别树枝碰线故障有重要的理论价值和工程意义。

树枝碰线故障通常指经树(枝)构成的接地或相间短路故障,且以单相接地故障为主。本文的研究对象是树枝碰线引起的单相接地故障(tree-contact single-phase-to-ground, TSF),其故障阻抗通常为几十甚至几百千欧,故障电流小、特征弱,传统过流保护无法灵敏检出,被归类于高阻故障(high impedance fault, HIF)。针对高阻故障的检测已有大量研究,现有高阻故障检测方法主要基于电弧畸变检测、暂稳态电路分析、人工智能等方法<sup>[4-6]</sup>,但不能准确识别 TSF。基于卫星监测的方法<sup>[7]</sup>存在时效性差、分辨率低、成本高的缺点。

近年来,国内外多个研究机构针对树枝碰线故障开展了大量实验。澳大利亚维多利亚州政府的电力线森林火灾安全计划(powerline bushfire safety program, PBSP)团队进行了“植被引燃测试”,建立了故障特征数据库,比较了植被的引燃风险,奠定了 TSF 故障检测基础<sup>[8-10]</sup>;文献[11-12]在分析 TSF 故障机理的基础上,建立了实际物理过程的等效模型;文献[13-15]分析了树线放电的发展过程,研究了故障阻抗的暂态变化特性;文献[16-17]从植被温度及含水率预测了明火的出现时间以及故障电流第一峰值,对指导林火防治有重要意义。国内外的大量实验工作为树枝碰线故障的准确识别建立了重要基础,本文研究主要基于澳大利亚 PBSP 团队公开数据集中共 512 个单相接地故障(ph-e)样本展开。

针对树枝碰线故障的检测,现有方法主要基于故障暂态电气量实现检测。文献[18]利用试验数据电压电流,基于随机森林算法提取特征进行训练识别;文献[19]利用电压高频量,基于增强决策树模型进行故障识别,但该方法样本依赖性强,并且对不同类型 TSF 的识别适应性需进一步验证;文献[11]提出基于故障电流的时间越限保护方案,其本质是传统过流保护存在动作时限长的缺点;另外,现有方法容易将瞬时性 HIF 误判为 TSF,影响识别准确性和可靠性。

针对现有方法样本依赖性强、动作时限长、与 HIF 的区分度差的缺陷,本文基于澳大利亚公开的“植被引燃测试”数据集对 TSF 的等效阻抗的渐变特性进行系统分析,从接地介质——树枝的阻抗大小渐变特性出发,提出基于树枝初期阻抗双指数衰减特性实现树枝碰线故障识别,在树枝闪络引燃前及时识别树枝碰线,降低火灾引燃风险。通过仿真模型与真型试验验证了所提方法的正确性,为后续 TSF 检测提供了新的方向。

## 1 树枝碰线故障初期的渐变特性建模

### 1.1 树枝碰线故障物理过程

树枝碰线故障过程物理机理复杂,涉及电、化学、热等多个领域。在故障发生时刻,导线接触树枝表面微小凸起,局部强电场击穿气隙形成微小电弧<sup>[11]</sup>,形成稳定电流通路。凸起处等效电阻极大,使得电流主要经电弧流入树枝,形成导线-电弧-树枝的对地通道。图 1 所示为树枝碰线故障全过程的电流变化,该过程宏观上可根据故障电流幅值的变化趋势、电流的波动性等特性划分为:“I 接触升温”-“II 水分蒸发”-“III 形成炭化通道”-“IV 火焰闪络”4 个阶段<sup>[9,14,20]</sup>。阶段 I 树枝温度升高,树枝电导增大,泄漏电流增大;阶段 II 由于水分的析出,电导开始减小,泄漏电流有所减小;阶段 III 时,树枝水分持续散失,表面开始出现明显炭化通道,电导再次降低,泄漏电流较阶段 I 增长更快,且开始出现波动;随后阶段 IV 树枝断裂或发生闪络被引燃,电流波动明显。受树枝差异性影响,不同树种不同阶段的持续时间有明显差异。

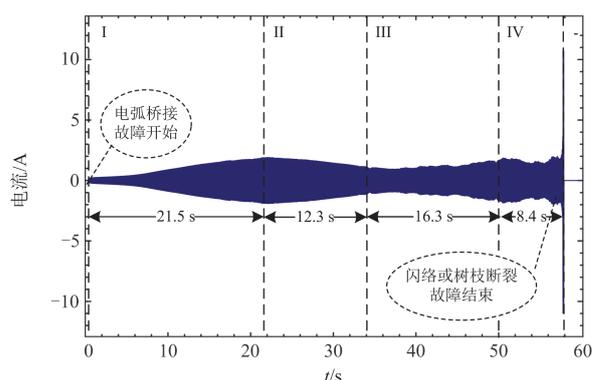


图 1 树枝碰线故障全过程电流变化

Fig. 1 Current variation of TSF process

### 1.2 树枝碰线故障阻抗建模

作为导线与大地通路的一部分,树枝阻抗变化直接影响故障电流变化。因此,需分析树枝内部结构,得到树枝等效电路,以进一步获得树枝阻抗变化特性。

树枝径向由外到内呈现多层结构,各部分性质有较大差异,如图 2 所示。最外层树皮干燥且富含生物碱,有较好的绝缘性;内层的韧皮部富含活跃细胞,具有轴向的筛管,此部分生理性质活跃,故障发生时性质变化较大;最内层的木质部主要由角质化细胞构成,生理性质稳定,等效电阻很大。树皮与韧皮部之间存在很多天然的微孔缺陷,其可近似为均匀空气隙,并等效为电容元件<sup>[15]</sup>。

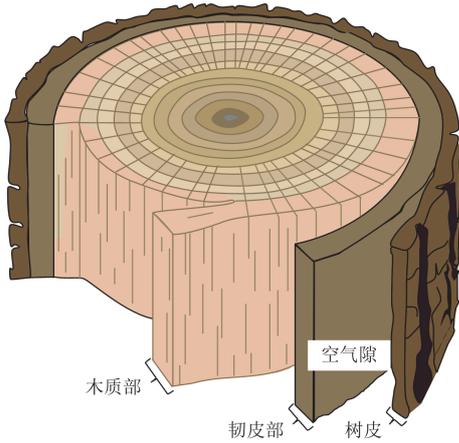


图2 树枝截面图

Fig. 2 Composition of the branch cross section

结合上述分析，电流在流入树枝时首先流过电阻较大的树皮，随后径向经气隙流入韧皮部与木质部，轴向上，电流经筛管流入大地。木质部电阻很大，与韧皮部并联后，电阻大小主要决定于韧皮部，结合现有研究，TSF示意图以及等效电路与电流流向如图3所示。图3中： $R_b$ 为树皮等效电阻，树皮性质稳定，该值较大； $C_a$ 为气隙的等效电容； $R_{i1}$ 为韧皮部轴向筛管的等效电阻； $R_{i2}$ 为韧皮部径向的等效电阻； $R_w$ 为木质部的等效电阻。树枝内部木质部电阻 $R_w$ 与径向韧皮部电阻 $R_{i2}$ 串联，共同与轴向韧皮部筛管电阻 $R_{i1}$ 并联。

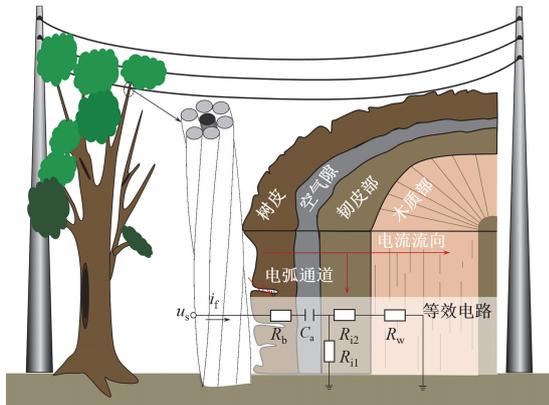


图3 TSF示意图与等效电路

Fig. 3 Schematic diagram and equivalent circuit of TSF

木质部电阻 $R_w$ 远大于轴向筛管电阻 $R_{i1}$ ，并联后大小接近 $R_{i1}$ ，进一步得到TSF简化电路如图4所示。

图4中： $Z_c$ 代表树皮与气隙的阻抗； $Z_i$ 代表韧皮部轴向筛管的阻抗。结合示意图，在故障发生时，树枝的等效阻抗 $Z_t$ 可以表示为

$$Z_t = Z_c + Z_i \quad (1)$$

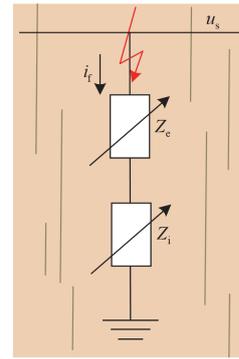


图4 TSF简化电路

Fig. 4 Simplified circuit of TSF

由式(1)可以看出，故障发生后电流主要流过树皮等效阻抗与韧皮部等效阻抗，二者呈串联关系。

### 1.3 树枝碰线故障阻抗的渐变特性

试验数据显示：在导线高压的作用下树枝阻抗发生变化：树枝阻抗大小表现出规律的时变过程；树枝阻抗角极小且存在波动，可将其近似为纯阻性。利用阻抗大小的渐变特性为树枝碰线故障的识别提供重要的理论和实践支撑。考虑检测的及时性与可靠性，本文重点监测故障发生时刻以及阶段I前2s内<sup>[8,21]</sup>的稳定阻抗大小渐变过程。

树枝阻抗 $Z_t$ 的大小与树枝含水量以及树枝当前时刻的温度等多种因素有关。在不同阶段，不同因素占主导：阶段I，树枝平均温度开始由环境温度上升至70℃左右<sup>[20]</sup>，低于水的沸点，水分蒸发并不明显，温度影响占主导。故障初期的渐变特性主要来自等效电路的两部分阻抗变化：

1) 树枝热解炭化击穿导致阻抗下降——在故障发生时刻，强交变电场的电子流反复注入、抽出使得树枝内部微孔极易发生局部放电互联—大量电荷进入间隙内，使得大量碳颗粒在此处聚集，降低树皮的绝缘性，电导率上升，树枝两部分阻抗 $Z_c$ 、 $Z_i$ 减小，电树枝发展。

2) 树枝升温导致阻抗下降——新鲜树枝的温度与其电导率呈正比关系。在故障发生时刻与初期阶段，高温电弧灼烧树枝、大量电子流冲击树枝引起的焦耳热使得树枝温度上升，电导率上升，树枝两部分等效阻抗 $Z_c$ 、 $Z_i$ 减小。

随着温度的升高超过沸点，水汽大量析出，树木表面出现炭化通道，含水率与温度的博弈关系使得电导率变化具有随机波动特性，树枝阻抗波动明显，存在上升、下降交替出现的情况。综合上述分析，在故障发生初期，树枝由于炭化击穿、温度升高导致绝缘性降低、电导率上升。树枝两部分阻抗大小受热解炭化、树枝升温影响呈现时变的衰减过

程, 表达为双指数模型, 模型由两部分构成, 分别反映两部分阻抗的衰减过程, 如式(2)所示。

$$Z_1(t) = Z_{e0}e^{-\alpha_1 t} + Z_{i0}e^{-\alpha_2 t} \quad (2)$$

式中:  $Z_{e0}$  为树皮表面等效阻抗初始值;  $\alpha_1$  为树皮表面等效阻抗的衰减系数;  $Z_{i0}$  为韧皮部等效阻抗初始值;  $\alpha_2$  为韧皮部等效电阻的衰减系数; 相加体现了两部分阻抗串联的关系。树枝碰线故障是典型的高阻接地故障,  $Z_{e0}$  与  $Z_{i0}$  是很大的正数; 基于树枝碰线故障发生初期树枝等效阻抗随时间降低的物理机理, 参数  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  大于 0。由实验数据可知, 树枝阻抗初始值  $Z_{i0}$  最大值可达到 5 M $\Omega$ , 最小的也有 16 k $\Omega$ 。用故障发生时刻附近周波内的树枝阻抗最大值作为基准值, 标幺化处理得到树枝碰线阻抗归一化形式下的数学模型(下标 pu 表示标幺值)如式(3)所示。

$$Z_{1\text{pu}}(t) = Z_{e\text{pu}}e^{-\alpha_1 t} + Z_{i\text{pu}}e^{-\alpha_2 t} \quad (3)$$

充分应用试验数据, 使用最小二乘法拟合数据, 结果显示绝大部分试验组初期体现出相似的衰减趋势, 且保有很高的拟合优度。

图 5 展示了树枝阻抗  $Z_{1\text{pu}}$  分别按照本文所提双指数时变模型与现有较多研究使用的单指数模型 ( $Z = k_1 e^{k_2 t} + k_3$ ) 的标幺拟合效果以及数据集 512 次试验的不同方式拟合优度箱线图。结果表明: 单指数模型反应并不灵敏, 存在拟合方程不收敛的问题; 双指数模型灵敏追踪到树枝碰线故障的渐变过程, 只需少量迭代即可达到预期的拟合精度, 较好地拟合了初期树枝阻抗  $Z_{1\text{pu}}$ 。

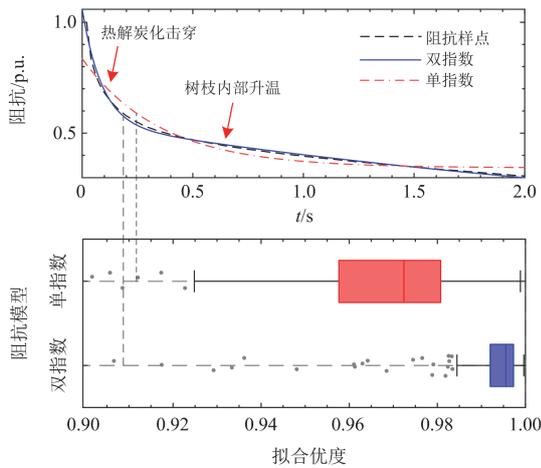


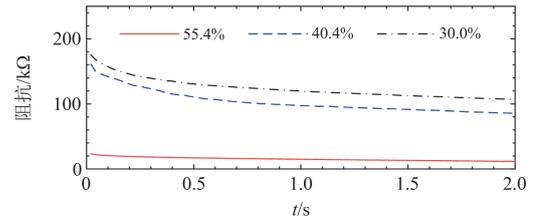
图 5 TSF 故障初期阻抗拟合效果比较

Fig. 5 Comparison of impedance fitting effects at the beginning of TSF

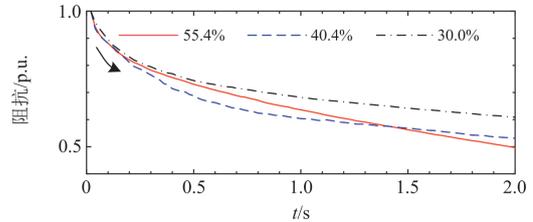
## 2 树枝碰线故障初期渐变特征分析与提取

根据试验结果, 发现约有 98.6%(505/512)的试验组在初期经历了相似的渐变过程。图 6 所示为不同含水量的桉树在故障初期 2 s 内阻抗有效值的标准化与标幺化曲线。

由图 6(a)看出: 故障发生时刻, 树枝阻抗  $Z_1$  范围约为几十千欧到几百千欧。含水量越高, 树枝阻抗  $Z_1$  越小, 树枝接触导线后反应越剧烈。数据标幺化处理结果如图 6(b)所示, 故障后较短时间内走势几乎相同, 后由于内部含水量等自身因素导致衰减速度有所差异。由于在故障时刻的热解炭化击穿引起的短暂强放电过程使得电子大量聚集, 该时刻等效阻抗下降最快, 泄漏电流增量最大, 如图 6(b)中箭头所指处; 随着故障的发展, 暂态过程趋于稳定, 稳定电弧灼烧树枝, 等效阻抗的下降趋缓, 斜率逐渐趋向 0。随后树枝温度高于沸点, 含水量对树枝阻抗的影响占主导, 大量的水分蒸发使树枝阻抗缓慢上升, 阻抗斜率由负变为正。



(a) 含水量不同树种TSF初期阻抗曲线



(b) 阻抗标幺曲线

图 6 不同含水量树枝阻抗曲线

Fig. 6 Impedance curves of trees with different water content

综合上述分析及试验结果, 得到如下结论:

1) 含水量差异较大的树枝在故障发生初期仍有相似的稳定渐变过程, 区别在于渐变过程初期的持续时间有差异;

2) 在稳定的初期渐变过程中, 树枝阻抗  $Z_1$  总体呈现下降趋势。故障开始时刻发生热解炭化击穿, 阻抗下降最快, 斜率最大, 随后通道趋于稳定, 阻抗下降趋势减缓, 斜率逐渐过 0, 直到阶段 II, 阻抗开始上升。总体来看, 初期阻抗的时变曲线是一个凹的衰减曲线, 即: 初期的树枝阻抗一阶数值差分小于 0, 二阶数值差分大于 0, 这是检测算法的重要构

成依据。

树枝阻抗曲线及一阶、二阶导数如图 7 所示，对离散阻抗样点按照双指数模型非线性拟合处理后，阻抗波形平滑，展现出良好的连续变化过程，拟合参数应满足拟合函数的一阶导数小于 0，二阶导数大于 0，即式(4)。

$$\begin{cases} Z'_{t\text{pu}}(t) = -Z_{e\text{pu}}\alpha_1 e^{\alpha_1 t} - Z_{i\text{pu}}\alpha_2 e^{\alpha_2 t} < 0 \\ Z''_{t\text{pu}}(t) = Z_{e\text{pu}}\alpha_1^2 e^{\alpha_1 t} + Z_{i\text{pu}}\alpha_2^2 e^{\alpha_2 t} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

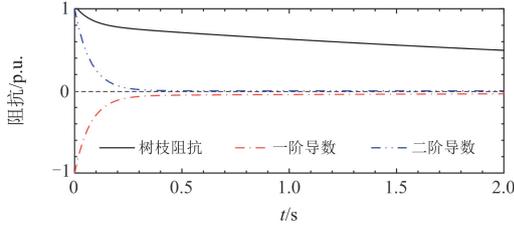


图 7 树枝阻抗曲线及一阶、二阶导数

Fig. 7 Tree impedance curve and first, second order derivatives of impedance

### 3 树枝碰线故障的识别算法

#### 3.1 识别算法原理

本文所提算法的关键在于快速识别树枝阻抗渐变特性，通过电压电流波形数据计算等效阻抗变化规律，判断是否符合上节所提规律以判断是否是 TSF。采用对称分量法分解计算，零序等效网络如图 8 所示。

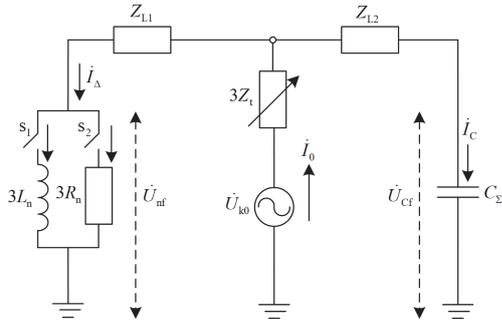


图 8 树枝碰线故障零序等效网络

Fig. 8 Schematic diagram of zero sequence circuit for TSF

图 8 中： $\dot{U}_{k0}$  为故障零序虚拟电压源； $s_1$ 、 $s_2$  为中性点接地方式选择开关； $L_n$ 、 $R_n$  分别为中性点接地电感与电阻； $\dot{U}_{nf}$ 、 $\dot{U}_{cf}$  分别为母线零序电压与等效对地电容电压； $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_C$  分别为流经中性点与流经电容支路电流； $\dot{I}_0$  为故障点零序电流； $Z_{L1}$ 、 $Z_{L2}$  分别为故障点两端的线路等效阻抗； $C_2$  为系统所有线路对地分布电容并联值。规定正常工作的电流为

正方向，不同接地方式故障时零序网络方程通式如式(5)所示。

$$-\dot{U}_{k0} = -(\dot{I}_A + \dot{I}_C)3Z_f - \dot{U}_{cf} = -\dot{I}_0 3Z_f - \dot{U}_{cf} \quad (5)$$

式中， $Z_f$  为故障阻抗。

故障线路出口电压近似全部降落在树枝支路，方程简化为

$$\dot{U}_{k0} \approx \dot{I}_0 3Z_f \quad (6)$$

对式(6)中各量均取有效值：

$$U_{k0} \approx I_0 3Z_f \quad (7)$$

用电压电流有效值之比作为故障阻抗大小，即

$$Z_f \approx \frac{U_{k0}}{3I_0} \quad (8)$$

同时，故障虚拟等效电压源  $U_{k0}$  大小近似等于故障相电压  $U_{fph}$ ，得到故障阻抗  $Z_f$  的计算公式如式(9)所示。

$$Z_f \approx \frac{U_{fph}}{3I_0} \quad (9)$$

即由出线互感器测量电压电流值，可实时计算得到故障阻抗  $Z_f$ 。

当发生单相接地故障时，通过式(9)计算得到时域下的故障阻抗序列  $Z_f[n]$ 。选取故障时刻后 3 个周波内的最大值作为基准值  $Z_B$  进行标么：

$$Z_B = \max(Z_f[1], Z_f[2], Z_f[3]) \quad (10)$$

$$Z_{fpu}[n] = \frac{Z_f[n]}{Z_B} \quad (11)$$

使用最小二乘法按照预设模型进行拟合，由结果判断是否发生树枝碰线故障。由于忽略了系统线路、接地阻抗大小，上述方法计算得到的故障阻抗  $Z_f$  较实际值稍大。另外，拟合时间的选取与识别的速动性与可靠性直接相关：拟合时间过短会导致误判来自系统的未知扰动；拟合时间过长会漏判初期渐变过程较短的 TSF。综合考虑，本文选取 0.3 s(15 个周波)为一次计算周期，在保证可靠性的同时又兼顾了速动性。

#### 3.2 故障识别算法

检测树枝碰线接地故障，主要利用零序电流反映流过树枝的泄漏电流以设计算法。考虑实际运行的环境以及设备，为算法设定相关阈值。为了提升检测成功率，设计检测方法为循环体，具体流程可分为以下 3 部分。

1) 故障算法启动阈值：以系统长期正常工作(如一周)的零序电流幅值作为系统正常运行不平衡分量  $I_u$ 。实时监测系统零序电流，记录每个周期零序电流幅值  $I_{0m}$ ，当零序电流幅值  $I_{0m}$  与系统正常运行

不平衡分量  $I_u$  之差超过设定阈值  $I_{th}$  时, 算法启动。

2) 数据处理部分: 算法启动后, 判断故障相, 基于低通滤波保留基频分量, 利用快速傅里叶变换计算电压电流基频的相位差  $\Delta\varphi / \text{rad}$ , 按式(12)进行移相处理。

$$u_{\text{iph}_a}[n] = u_{\text{iph}} \left[ n + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} N \right] \quad (12)$$

式中:  $u_{\text{iph}}[n]$  为故障相电压瞬时值序列的第  $n$  个信号;  $u_{\text{iph}_a}[n]$  为故障相电压移位修正后的瞬时值序列的第  $n$  个信号;  $N = S/f$ , 其中  $S$  是采样率,  $f$  是电源频率。计算窗口为一个周波, 滑动步长为一个周波, 按照移位后的数据计算 15 个工频周期内故障相电压有效值  $U_{\text{ph}}$  与零序电流  $I_0$  的有效值。按照式(9)计算得到算法启动后 0.3 s 内的故障阻抗有效值序列  $Z_r[n]$ 。标幺处理后依照式(3), 按式(13)给定的参数范围对该阻抗序列采用最小二乘法拟合。

$$\begin{cases} 0 < Z_{\text{cpu}}, Z_{\text{ipu}} < 1 \\ 0 < \alpha_1, \alpha_2 < \infty \end{cases} \quad (13)$$

获得决定系数  $R_s$  与参数  $Z_{\text{cpu}}, Z_{\text{ipu}}, \alpha_1, \alpha_2$ 。

3) 故障识别部分: 故障识别流程主要由两个判据构成。判据一: 判断  $Z_B > Z_s$  是否成立。  $Z_s$  是疑似树枝阻抗的整定值, 一般取 5 k $\Omega$  及以上; 若判据一成立, 判断决定系数  $R_s$  是否大于 0.74。决定系数大于 0.74 说明所提拟合模型在一定程度上追踪故障阻抗  $Z_r$  方差, 预测故障阻抗  $Z_r$  走势, 若不能满足则返回起点。该步骤用于筛选与预期走势有明显差异的数据组。当决定系数  $R_s$  满足要求进入判据二: 判断式(4)是否成立。判据均成立说明故障阻抗  $Z_r$  具有树枝阻抗  $Z_t$  的特点, 判定为 TSF 输出。

该方法利用了树枝阻抗在故障初期的负温度系数特性, 物理意义明确。但需要注意: 算法利用连续 15 周波电压电流信号均方根进行数据处理, 未特别利用高频信号, 对于数据采集设备采样率要求不高; 但需要保证设备在故障后 2 s 内<sup>[8]</sup>灵敏启动并处理数据的能力。该方法由馈线出口处零序 CT 测量突变量启动。TSF 初始阶段故障电流范围为 20~700 mA, 经测算, 要求零序 CT 有 mA 级别的量测精度。完整的故障识别流程图如图 9 所示。

#### 4 仿真分析

本文算法在接地故障发生时, 利用测量的电压电流信号计算得到故障阻抗以实现检测, 测量电压电流将由故障参数以及网络参数共同决定, 对于不同配置、不同运行方式的系统有不同的结果<sup>[4]</sup>。例

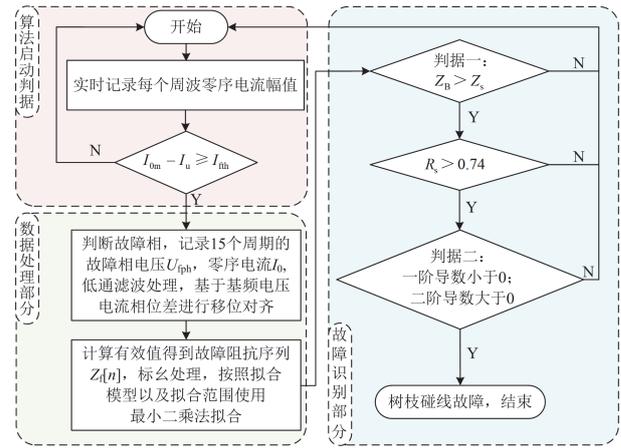


图 9 TSF 故障识别流程图

Fig. 9 Flow chart of proposed TSF identification method

如大电流接地方式与小电流接地方式其故障零序电流差异较大, 相间电压变化差异也较大。同时, 由于接地方式的不同, 过流保护的电流整定值也有较大的差异, 需要分别验证。

基于 PSCAD/EMTDC 搭建如图 10 所示 10 kV 配电网模型, 以验证本文所述方法的正确性与可靠性。  $s_1, s_2$  为中性点接地方式选择开关; 出线端设置电压电流测量点, 线路 L1 由 5.6 km 电缆线路与 1.3 km 架空线构成; 线路 L2 由 1.3 km 架空线—3.2 km 电缆—5.9 km 架空线构成; 线路 L3 是长度为 7 km 的架空线。线路参数来自文献<sup>[22]</sup>: 架空线单位正序阻抗为  $(0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$ , 单位零序阻抗为  $(0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$ , 单位对地正序容抗为  $0.328 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ , 单位对地零序容抗为  $0.531 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ ; 电缆导线单位正序阻抗为  $(0.08 + j0.12) \Omega/\text{km}$ , 单位零序阻抗为  $(0.23 + j0.08) \Omega/\text{km}$ , 单位对地正序容抗为  $0.01 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ , 单位对地零序容抗为  $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ 。

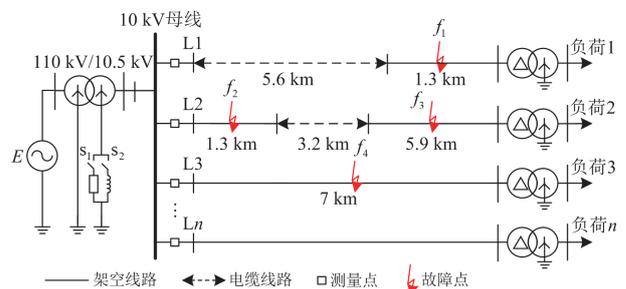


图 10 10 kV 配电网拓扑图

Fig. 10 Topology of 10 kV distribution system

故障点设置在线路的首端(线路全长 10%处)、中端(线路全长 50%处)与末端(线路全长 90%处); 故障初相角设定为  $0^\circ, 5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  与  $90^\circ$ 。在负荷端模拟大型电机启动、大电容投切(3600 kvar,

4800 kvar)、负荷投切(0.5 MW、1.5 MW、2.5 MW)、励磁涌流等常见扰动。电弧模型来自 Kizilcay<sup>[23]</sup>, 可以用参数  $[r_{st}, u_{st}, \tau]$  模拟表示。无电弧典型高阻故障, 过渡电阻大小  $R_G$  设定为 0.5 k $\Omega$ 、5 k $\Omega$ 、10 k $\Omega$ 、20 k $\Omega$  与 100 k $\Omega$ , 共 360 个样本; 弧光高阻接地故障, 过渡电阻大小  $R_G$  设定为 0.1 k $\Omega$ 、0.5 k $\Omega$ 、1 k $\Omega$  与 5 k $\Omega$ 。电弧参数取值设定:  $r_{st}$  为 0.005  $\Omega$ ;  $u_{st}$  为 1000~6000 V, 仿真步长为 550 V, 共 10 个值;  $\tau$  为 0.05~0.35 ms, 仿真步长为 0.3 ms, 共 2 个值, 共 5760 个样本。用数学模型拟合树枝阻抗(近似认为树枝纯阻性), 并将其与弧光高阻接地故障的电弧电阻串联作为故障阻抗  $Z_f$  接入系统模拟 TSF, 如图 11 所示。仿真过程采样率设置为 10 kHz。

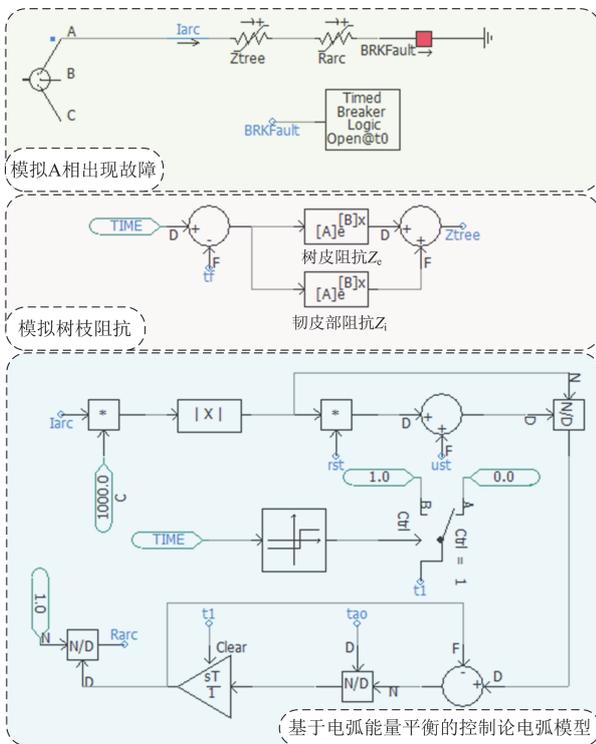


图 11 模拟树枝碰线阻抗

Fig. 11 Simulation impedance model of TSF

具体树枝模型拟合参数如表 1 所示。

表 1 投入仿真的树枝模型拟合参数

Table 1 TSF model fitting parameters for simulation

树枝	含水量/%	$Z_c/\Omega$	$\alpha_1$	$Z_l/\Omega$	$\alpha_2$
桉树 1	47.1	57 051	-0.3454	8897	-17.5436
桉树 2	44.0	119 337	-0.4964	33 723	-26.2490
桉树 3	46.7	117 247	-0.3717	28 562	-25.8596
乔木 1	28.9	533 748	-0.1562	53 948	-32.6087
乔木 2	32.3	185 953	-0.3183	55 087	-40.7902
柳属 1	34.3	469 042	-0.1707	27 372	-31.8143
柳属 2	35.2	301 625	-0.1657	32 618	-25.1303

正常工况下的扰动, 如负荷投切、电机启动等在不同故障初相角、变压器剩磁等情况下, 由于没有引起严重的对地不平衡, 零序电流不会超过设定的故障电流阈值, 算法不会启动; 在系统发生单相接地故障时, 零序电流超过设定不平衡阈值  $I_{th}$ , 故障算法启动, 计算故障阻抗序列  $Z_f[n]$ 。

图 12—图 14 展示了系统不同接地方式在不同故障情况下的故障相出口电压电流以及有效值处理计算得到的阻抗序列波形。故障初相角为  $0^\circ$ , 故障位置为  $f_1$  首端, 故障时刻为  $t_f = 0.02$  s。其中图 12 为系统不同接地方式下桉树 3 发生 TSF 故障情况; 图 13 为系统不同接地方式下, 过渡电阻  $R_G = 100 \Omega$ 、电弧参数  $[r_{st}, u_{st}, \tau] = [0.005 \Omega, 1000 \text{ V}, 0.05 \text{ ms}]$  的弧光接地故障情况; 图 14 为过渡电阻  $R_G = 500 \Omega$  的无电弧高阻接地故障情况。

#### 4.1 中性点不接地系统

针对低压配电网最常见的中性点不接地系统, 在图 10 所示系统中断开开关  $s_1$ 、 $s_2$ , 分析验证所提方法的正确性与可靠性。不接地系统属于小电流接地系统, 发生单相接地短路故障时, 故障电流由衰减的直流分量以及稳态交流共同组成, 在过渡电阻  $R_G$  较大时衰减系数较小, 暂态持续过程较长。结果显示: 常见的永久性(如图 13(a)、图 14(a))高阻故障, 故障暂态过程电压电流呈现较稳定的线性伏安特性, 不存在明显的渐变过程, 与 TSF 有明显区别; 而在 TSF 发生时, 故障阻抗体现出典型的树枝阻抗渐变过程如图 12(a)所示, 应用算法可在一个标准计算周期(0.3 s)内识别故障, 检测速度满足及时检测的要求, 填补了系统由于耐电阻能力不足而埋下火灾隐患这一空白。

#### 4.2 消弧线圈接地系统

分析验证所提方法在消弧线圈系统的正确性与可靠性, 在图 10 所示系统中闭合  $s_2$ , 断开  $s_1$ 。系统电容电流大小约为 30 A, 计算得到过补偿度为 10%的消弧线圈大小为 0.5569 H。由于消弧线圈的补偿作用, 系统的工频电气量不再具备典型时域特征, 同时有较长的暂态过程。在发生永久性高阻故障(如图 13(b)、图 14(b))时, 补偿作用带来的暂态过程使故障阻抗  $Z_f$  呈现非预期的变化过程, 补偿的故障电流也使得计算出的故障阻抗  $Z_f$  偏离理论值, 但由于树枝阻抗  $Z_f$  数十千欧及以上, 近似为纯阻性, 同时电容/线圈的容抗/感抗百欧姆量级, 一次线路上的零序电压不足 50 V, 此时容性电流小, 消弧线圈相应补偿的感性电流也很小, 线圈补偿作用不明显, 对于零序电流的测量影响可以忽略。TSF 发生时, 树枝阻抗曲线走势仍呈典型故障特征, 不过相较于不接地系统其衰减幅度更大<sup>[26]</sup>, 应用算法可在

一个标准计算周期(0.3 s)内识别故障, 检测速度满足快速检测的要求。

#### 4.3 中性点经小电阻接地系统

分析验证所提方法在小电阻接地的正确性与可靠性, 断开  $s_2$ , 闭合  $s_1$ , 在副边绕组接入大小为  $10 \Omega$  的小电阻。小电阻接地系统的暂态时间常数短, 暂态过程引起的故障阻抗  $Z_f$  波动最小。观察结果, 小电阻接地系统故障出口波形与中性点不接地系统类似, 电压电流体现出典型的故障特征: 由于最短的

暂态时间, HIF 在该系统下计算出的故障阻抗符合理论值, 如图 13(c)、图 14(c), 明显区别于 TSF; TSF 情况下树枝阻抗体现出所期望的衰减趋势, 如图 12(c), 可在一个标准计算周期(0.3 s)内识别故障, 满足快速检测的要求。

#### 4.4 不同系统结果分析

根据仿真试验结果, 得到 3 种系统下算法对非 TSF 判断的准确性与树枝碰线故障识别的及时性, 结果如表 2 所示。

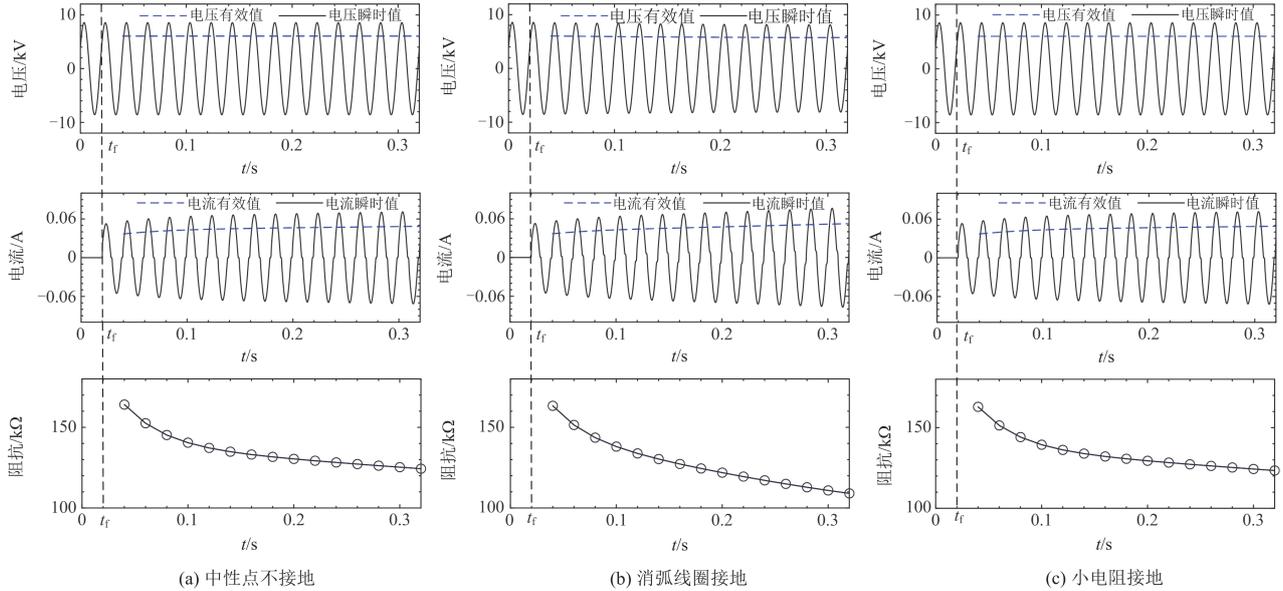


图 12 不同接地方式树枝碰线故障波形

Fig. 12 Waveforms of TSF under different grounding modes

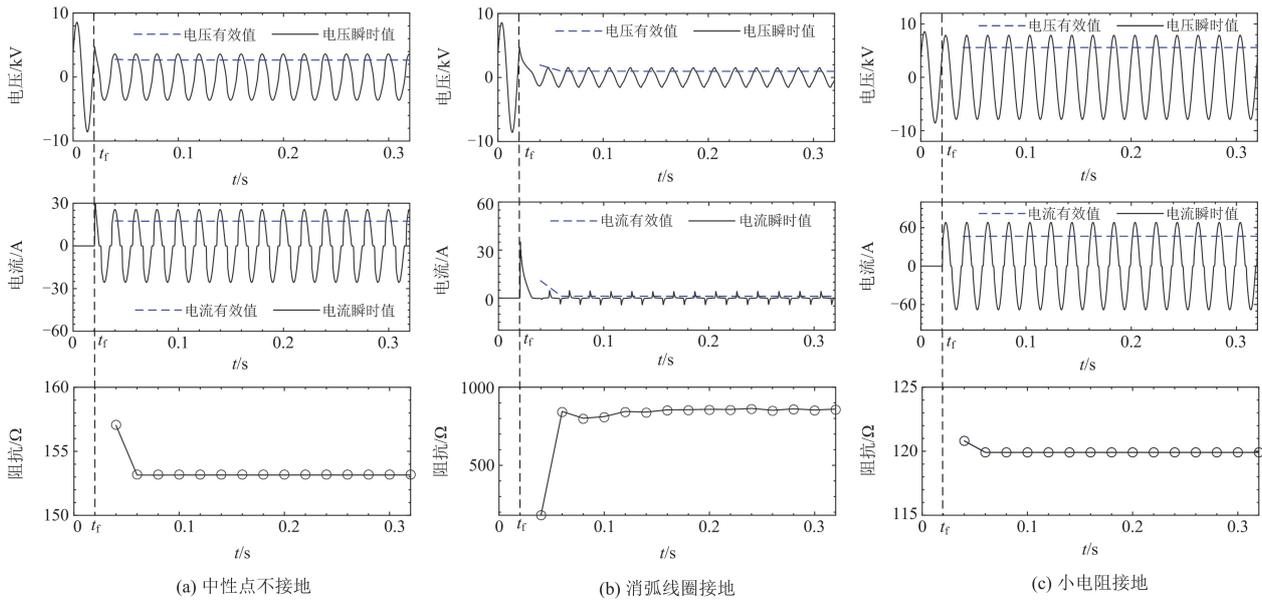


图 13 不同接地方式弧光高阻故障波形

Fig. 13 Waveforms of arc grounding with high impedance fault under different grounding modes

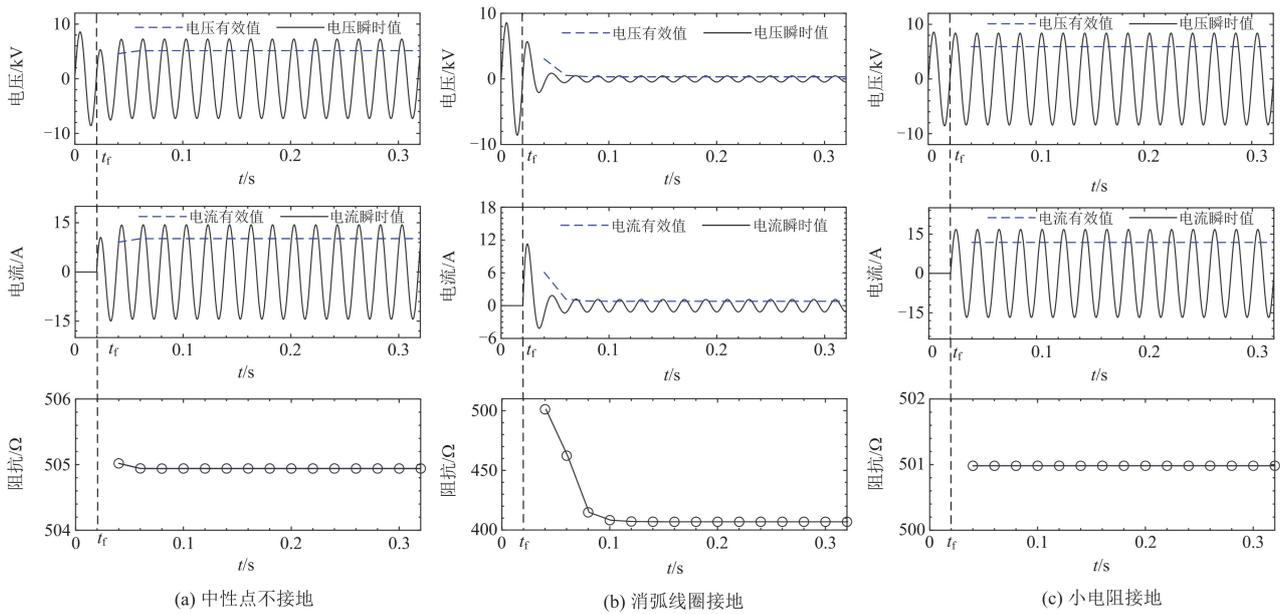


图 14 不同接地方式高阻接地故障波形

Fig. 14 Waveforms of high impedance fault under different grounding modes

表 2 不同系统下样本仿真结果

Table 2 Simulation results of samples under different systems

故障类型	中性点不接地系统				消弧线圈接地系统				小电阻接地系统			
	算例个数	检出次数	识别成功率/%	识别时间/s	算例个数	检出次数	识别成功率/%	识别时间/s	算例个数	检出次数	识别成功率/%	识别时间/s
高阻接地	360	1	—	—	360	1	—	—	360	0	—	—
弧光接地	5760	12	—	—	5760	12	—	—	5760	12	—	—
树枝碰线	6300	6300	100	0.3173	6300	6300	100	0.3167	6300	6300	100	0.3166

识别时间由数据窗口(0.3 s)与计算时间组成。算法直接利用电压电流信号计算均方根, 测试计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i7-11800H @ 2.30 GHz 及 16 GB RAM, 算法程序在 Matlab 2021(a)环境下编写, 平均计算时间约为 0.016 274 s, 算法周期满足“2 s 关断故障以降低火险”<sup>[8]</sup>要求。结果显示, 所提方法能及时有效识别 TSF。所提方法数据处理简单, 对数据有效值处理不易受初相角、故障位置等因素的影响, 由于树枝阻抗远大于线路其他参数, 算法适用性并不受配电网中性点接地方式的影响。利用时域下 TSF 引起树枝升温、阻抗衰减这一特点, 利用视在电压电流有效值的比值作为故障阻抗  $Z_f$ , 监测其变化过程, 在不同接地系统可有效识别。然而, 所提方法的启动整定阈值决定了算法的耐过渡电阻能力及规避扰动的成功率。由于非理想工况, 例如不对称冲击负荷波动引起的未知暂态过程, 误判仍

会发生, 因此为了精准识别 TSF, 可在所提算法基础上添加循环时间越限检测, 或者配合更短时间尺度的暂态分量, 例如通过判断暂态无功功率方向等方法协助判断。

## 5 真型试验分析

考虑所提方法在实际系统中的可行性与准确性, 在成都理工大学真型试验平台下进行 TSF 真型试验, 平台整体架构如图 15 所示。为了模拟长距离线路的电容电流, 平台设有电容柜模拟系统对地分布电容, 电容电流调节范围在 0~60 A。精密升降平台调整树枝与线路的间距模拟 TSF, 试验平台具备在线路下方模拟火灾的条件。分别对松树、羊蹄甲、阴香等常见植被进行树枝碰线试验, 图 16 为试验组羊蹄甲 1 触线后 0.3 s 内电压电流及阻抗波形。具体真型试验结果如表 3 所示。

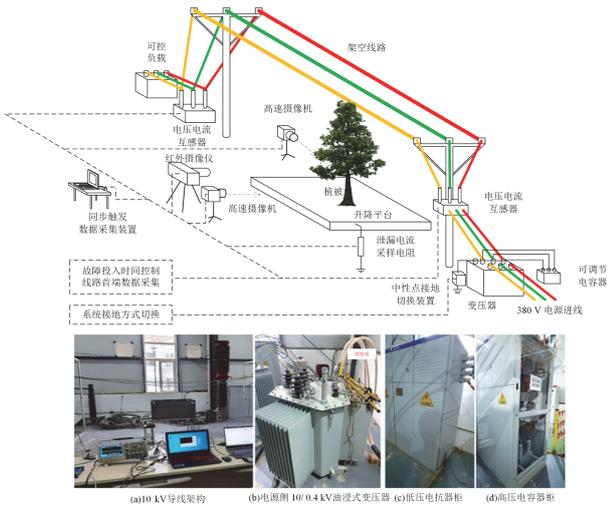


图 15 10 kV 架空线 TSF 真型试验平台架构

Fig. 15 Overall structure of 10 kV overhead line real field platform of TSF

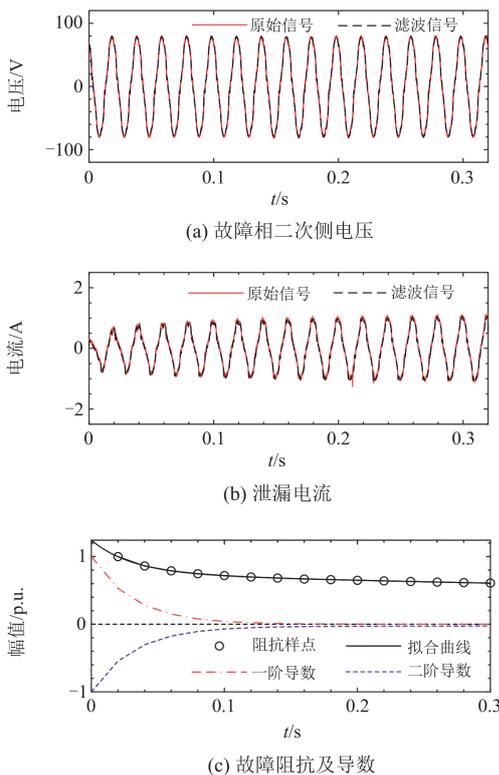


图 16 羊蹄甲 1 电压电流与阻抗波形

Fig. 16 Waveforms of leaked current and fault phase voltage and impedance for Bauhinia 1

考虑到电压等级的差异,由真型试验结果看出:不同类属的树枝,对 10 kV 架空线的反应剧烈程度有明显差异,主要体现在渐变特性的出现时间。所提渐变特性预测追踪部分树种接触架空线后短期

表 3 真型试验识别结果

Table 3 Detection results of real field tests

树枝	判据一	判据二	识别时间/s
羊蹄甲 1		√	0.4747
羊蹄甲 2		√	0.4484
阴香 3		√	0.4487
阴香 4		√	0.4612
松树 5	√	√	6.1884
松树 6		√	0.4580
松树 7		√	44.9308
阴香 9		×	—
羊蹄甲 10		√	0.4407

内的阻抗曲线走势,另一部分(松树 5 最终于第 19 个计算周期被识别;松树 7 最终于第 139 个计算周期被识别)在接触时刻树枝保持高阻状态,电流毛刺不稳定,故障缓慢发展最终击穿形成稳定电通道,呈现时域渐变过程;另有一些树种并未击穿造成故障发展(阴香 9),炭化通道未形成并最终引燃,如图 17 所示。

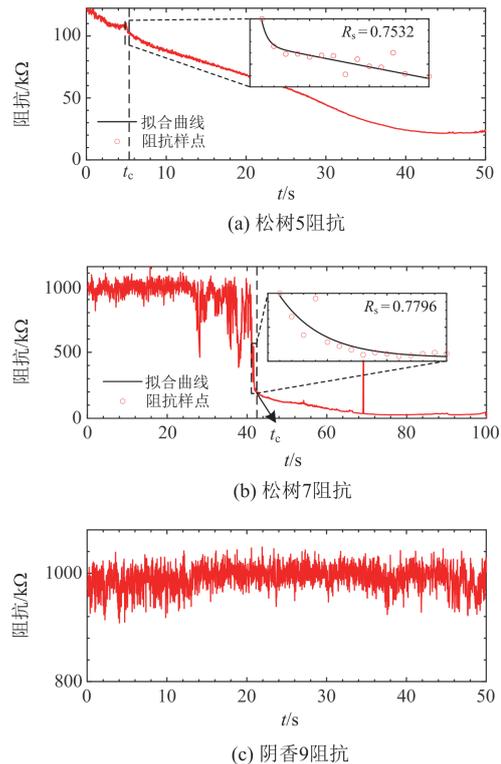


图 17 部分渐变特性不明显试验组

Fig. 17 Part of TSF tests without evident gradient properties

上述表面耐压等级高的树枝搭接导线时刻电流小、毛刺大、波动明显,检测不到期望衰减特征趋势,同时并不存在较高的火灾风险<sup>[10,21]</sup>。利用算法循环识别,保持信息监测,在故障发展后第一时间

检出。所提方法数据处理方式简单,利用大部分树枝受高压升温而引起的阻抗衰减过程为TSF提供了一条新的识别方向。但是,仅用目前配备的保护类CT,测量误差达不到要求,识别可靠性得不到保障<sup>[27]</sup>。下一步将结合现场CT使用情况、主流硬件计算能力等因素,定制加装更精准的CT,以细化检验本文所提出的监测TSF故障初期微弱电流以计算阻抗变化趋势的方法的适用性,以期能解决TSF的及时检测问题。

## 6 结论

本文基于“植被引燃测试”数据集,在分析树枝碰线单相接地故障(TSF)阻抗动态模型基础上,提出了基于阻抗大小渐变特性的树枝碰线故障识别方法,结论如下所述。

1) TSF故障电流微弱,约为20~700 mA。根据数据集,超过95%的树枝阻抗初期有明显且相似的渐变趋势:故障发生瞬间由电弧桥接成电通道,造成树皮击穿,温度升高,树枝阻抗快速衰减,随后衰减趋缓。

2) 树枝阻抗主要由树皮阻抗和韧皮部阻抗组成,两部分阻抗的变化主导了树枝碰线故障初期的等效阻抗变化,双指数函数能较好地反映两部分阻抗初期的变化规律,其4个参数分别对应了树干体电阻的不同组成部分。

3) 阻抗渐变特性是树枝碰线故障区别于其他故障类型的重要物理特性,基于双指数曲线拟合故障阻抗 $Z_f$ 的变化规律可实现对树枝碰线故障的快速、准确识别,对于降低火灾风险有积极意义。

## 参考文献

- [1] 梁栋,王鹏玮,徐丙垠,等.面向森林电气火灾防治的配电线路继电保护方案[J].供用电,2021,38(12):15-20.  
LIANG Dong, WANG Pengwei, XU Bingyin, et al. Relay protection scheme of distribution lines for electrical forest fire prevention[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12): 15-20.
- [2] CRUZ M G, SULLIVAN A L, GOULD J S, et al. Anatomy of a catastrophic wildfire: the black saturday kilmore east fire in victoria, australia[J]. Forest Ecology & Management, 2012, 284: 269-285.
- [3] ALEJANDRA R. California's camp fire was the costliest global disaster last year[EB/OL]. Insurance Report Shows, 2020.
- [4] 王宾,崔鑫,董新洲.配电网弧光高阻故障检测技术综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):96-107,377.  
WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou, et al. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107, 377.
- [5] 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.  
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(16): 85-91.
- [6] 柯亮,李波,廖凯,等.基于XGBoost的配电网高阻接地故障检测方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(6):88-98.  
KE Liang, LI Bo, LIAO Kai, et al. High impedance fault detection method in a distribution network based on XGBoost[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 88-98.
- [7] 王开正,付一桐,钱国超,等.基于时空上下文的输电线路山火自动识别算法[J].电力系统保护与控制,2022,50(18):83-91.  
WANG Kaizheng, FU Yitong, QIAN Guochao, et al. An automatic identification algorithm for wildfire occurrences near transmission line corridors based on spatio-temporal context[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 83-91.
- [8] MARXSEN T. Vegetation conduction ignition tests[R]. Victoria: Powerline Bushfire Safety Program, 2015.
- [9] OZANSOY C. VeHIF current arcing, volatility and vegetation ignition development: an EMD based volatility analysis for earth-fault classification[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2023, 48: 101561.
- [10] OZANSOY C, SIANAKI O A. Fire probability risk ranking of vegetation species in vegetation high impedance faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 157: 109804.
- [11] 梁栋,徐丙垠,唐毅,等.10 kV 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.  
LIANG Dong, XU Bingyin, TANG Yi, et al. Model and detection method for tree-contact single-phase-to-ground faults on 10 kV overhead lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5221-5232.
- [12] 王连辉,梁栋,徐丙垠,等.10 kV 架空导线触树故障碳化路径发展机理[J].供用电,2024,41(1):74-82.  
WANG Lianhui, LIANG Dong, XU Bingyin, et al. Carbonization path development mechanism of tree-to-wire fault on 10 kV overhead power lines[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(1): 74-82.
- [13] 杨淳岚,陈天翔,杨博闻,等.中压线路树木接地故障放电特性试验[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):38-44.  
YANG Chunlan, CHEN Tianxiang, YANG Bowen, et al. Discharge characteristic test of tree grounding fault of medium voltage line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 38-44.
- [14] 徐会凯,黄小龙,杨淳岚,等.10 kV 架空线路树线放电

- 发展过程及其特征研究[J/OL]. 工程科学与技术: 1-16 [2024-01-20]. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300675>. XU Huikai, HUANG Xiaolong, YANG Chunlan, et al. Development process and characteristics study of tree line discharge in 10 kV overhead power lines[J/OL]. *Advanced Engineering Sciences*: 1-16[2024-01-20]. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300675>.
- [15] 赵燊元, 陈天翔, 徐会凯, 等. 10 kV 树线故障树木暂态阻抗变化特性试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(2): 393-406.  
ZHAO Shenyuan, CHEN Tianxiang, XU Huikai, et al. Experimental research on transient impedance variation characteristics of 10 kV tree line faulted trees[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2023, 48(2): 393-406.
- [16] 尹一卓, 王军, 宁鑫, 等. 植被含水率对导线触树单相接地故障特性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 119-127.  
YIN Yizhuo, WANG Jun, NING Xin, et al. Effect analysis of vegetation moisture content on a tree-contact single-phase-to-ground fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 119-127.
- [17] 宁鑫, 胡馨月, 张华, 等. 配电线路单相触树接地故障特征分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(7): 137-143.  
NING Xin, HU Xinyue, ZHANG Hua, et al. Characteristic analysis of tree-contact single-phase-to-ground fault in power distribution lines[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(7): 137-143.
- [18] KANDANAARACHCHI S, ANANTHARAMA N, MUNOZ M A. Early detection of vegetation ignition due to powerline faults[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(3): 1324-1334.
- [19] GOMES D P S, OZANSOY C, ULHAQ A. High-sensitivity vegetation high-impedance fault detection based on signal's high-frequency contents[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(3): 1398-1407.
- [20] 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.  
QIN Jike, NING Xin, FAN Songhai, et al. Discharge ignition mechanism of tree-contacting single-phase-to-ground faults of overhead lines[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(3): 1289-1299.
- [21] ZIA M, NAZARIPOUYA H. Detection of fire-ignition electrical faults for preventing electrical wildfires[C] // 2023 North American Power Symposium (NAPS), October 15-17, 2023, Asheville, NC, USA: 1-5.
- [22] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [23] KIZILCAY M, PNIOK T. Digital simulation of fault arcs in power systems[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 1991, 1(1): 55-60.
- [24] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.  
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(7): 57-64.
- [25] 刘琨, 崔鑫, 王宾, 等. 配电线路经生物体高阻接地故障特性对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 67-74.  
LIU Kun, CUI Xin, WANG Bin, et al. Comparative analysis of high impedance grounding fault characteristics via an organism in distribution lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 67-74.
- [26] 张文海, 肖先勇, 杨景岗, 等. 基于衰减振荡信号特征参数和伪阻抗的电路参数计算方法[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 397-408.  
ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, YANG Jinggang, et al. Circuit parameter calculation based on characteristic parameters and pseudo-impedance of damped oscillation signal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 397-408.
- [27] 王鹏玮, 徐丙垠, 陈恒, 等. 零序电流互感器误差对小电流高阻接地保护影响及选型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 154-162.  
WANG Pengwei, XU Bingyin, CHEN Heng, et al. Influence of error of zero-sequence current transformer on small-current high-resistance grounding protection and type selection[J]. *Automation of Electric Power System*, 2023, 47(12): 154-162.
- [28] 欧阳帆, 余笑龙, 徐彪, 等. 基于多指标综合评价的配电网接地故障山火风险等级划分[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 10-19.  
OUYANG Fan, SHE Xiaolong, XU Biao, et al. A method for dividing the forest fire risk levels caused by a ground fault risk levels on distribution lines based on multiple index comprehensive evaluation[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 10-19.
- [29] WISCHKAEMPER J A, BENNER C L, RUSSEL B D. Electrical characterization of vegetation contacts with distribution conductors-investigation of progressive fault behavior[C] // 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, IL, USA: 1-8.
- [30] MILLER C, PLUCINSKI M, SULLIVAN A, et al. Electrically caused wildfires in Victoria, Australia are over-represented when fire danger is elevated[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2017, 167: 267-274.

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-07-17

作者简介:

唐 瑞(2003—), 男, 本科, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1376958347@qq.com

张文海(1989—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为配电网故障诊断与电力扰动分析。E-mail: zhangwh2079@scu.edu.cn

(编辑 魏小丽)