

• 电气工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202300675



本刊网刊

## 10 kV 架空线路树线放电发展过程及其特征研究

徐会凯<sup>1</sup>, 黄小龙<sup>2</sup>, 杨淳岚<sup>1</sup>, 陈天翔<sup>1\*</sup>, 杨弄潮<sup>1</sup>, 陈 龙<sup>1</sup>

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

**摘要:**当树木与线路搭接时, 极易产生放电引燃树木进而引起山火, 且线路沿树木剧烈燃弧时极易由于电弧的漂移引发相间燃弧, 因此快速精准地识别和定位树线放电是预防山火及架空线路故障的重要手段。但目前树线放电的发展过程及其特征并不清楚, 因此难以开发快速精准的树线故障监测设备。基于此, 本文搭建10 kV架空线路树线放电实验平台, 通过剖析流经树木的电流、树木的温度及树皮组织的变化, 深入系统地研究从树木接触线路到最终线路对地燃弧的全过程及其特征, 并探究炭化通道在树线放电过程中的成因及其对树线放电过程的影响。研究显示: 树线放电前期的温度变化与水分迁移使得树木内部的电流通道发生变化, 为炭化通道的出现提供了基础条件; 炭化通道出现在树木被点燃前, 其率先在树皮下层形成层处沿着放电路径发展, 是树木内部热效应与电效应共同作用的结果; 炭化通道会降低树木整体接地阻抗, 增大流经树木的电流会加重故障的严重程度, 炭化通道在树木内部的发展贯穿是导致线路沿树木对地剧烈燃弧的关键原因。基于以上结果, 提出一种基于高频信号瞬态强度统计量的故障信号特征提取方法, 通过高频放电能量变化表征树线放电故障特征, 并以实验验证其有效性。研究结果对森林火灾的溯源及树线故障监测设备的研发具有重要意义。

**关键词:**炭化通道; 树线故障; 故障特征; 山火; 配网故障

**中图分类号:** TM862; TM75

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2025)04-0278-12

许多配电线路需跨越森林等多树木地区, 当树木倒伏或风偏时易与线路发生接触进而引发森林火灾<sup>[1-3]</sup>。2014年, 美国德克萨斯州因电力设备老化, 发生了上千起输电线路引发的山火, 其中有多起是由输电线路与树木搭触引发, 该类由树木与线路单相接触引发的电力故障被称为导线触树接地故障(TSF), 简称树线故障。由于树木阻抗较大, 研究人员认为树线故障属于一种高阻接地故障(HIF)<sup>[4-5]</sup>, 但树线放电具有较强的随机性, 其发展过程存疑, 且一般的高阻接地故障检测方法对其并不适用, 因此有必要针对树线放电的发展过程及特征提取方法开展研究。

尽管国外如澳大利亚、美国等国家由于遭受山火灾害较多, 已经较早地开展了相关研究, 但有关TSF故障中树线放电过程的研究相对较少。Butler等<sup>[6]</sup>将线路的一相导线与线路旁一棵树接触, 模拟树

线故障, 获得了树线故障时的图像、声音、电压梯度和漏电流。Wischkaemper等<sup>[7]</sup>用不同类型和直径的树枝来桥接线路与地, 在远处变电站记录该线路的电流与电压, 并获得了有关树线放电故障发展的视频及静态照片, 对树线故障的电气和物理过程进行了初步解释, 指出炭化通道的发展是引起故障程度变化的重要因素。Elkalashy等<sup>[8]</sup>通过树线故障模拟实验提出了树线放电故障模型, 将故障阻抗分为两部分: 线路与树木之间的电弧阻抗、树木自身阻抗, 并发现故障程度越剧烈树木自身阻抗越低的变化特点。Marxsen等<sup>[9]</sup>依托澳大利亚政府的“Powerline Bushfire Safety Program”开展了电力系统引燃树木等一系列相关的实验, 系统分析了影响树线故障发展速度、故障程度等方面的因素并建立了引燃概率模型, 指出炭化通道的桥接是导致树线故障最终发展为剧烈燃弧的关键原因, 树线故障引发山火的风险在炭化

收稿日期: 2023-08-29 修回日期: 2023-09-25 网络出版日期: 2023-10-25

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U19A2080)

作者简介: 徐会凯(1997—), 男, 硕士. 研究方向: 高压绝缘在线监测技术. E-mail: 1423773143@qq.com

\* 通信作者: 陈天翔, 教授, E-mail: 971750808@qq.com

通道出现后急剧上升。Lala等<sup>[10]</sup>依托澳大利亚政府项目公开的数据,采用深度学习手段进行了故障发展特征研究。梁栋<sup>[4-5]</sup>等基于10 kV电压等级下的树线故障模拟实验,建立了单相触树故障模型,并提出了基于树线故障电流时变特性的TSF检测方法。秦际轲等<sup>[11]</sup>分析了高压电场作用下植被的引燃机制,并建立了树线接触模拟实验平台,得到了植被引燃过程中典型的物理特征及电气特征。

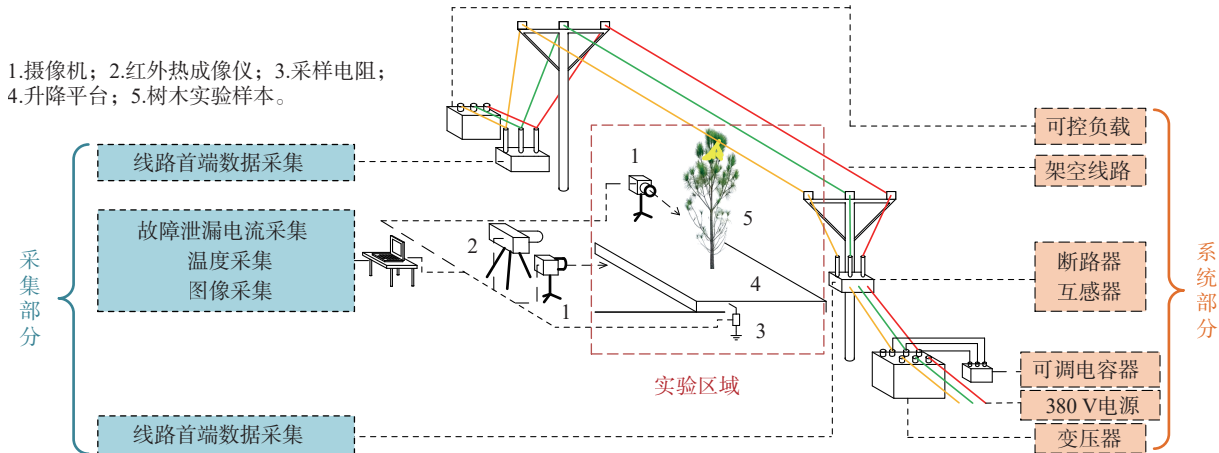
虽然国内外诸多学者对树线故障开展了相关树线放电过程的研究,且实验现象表明碳化通道的发展是导致树线放电故障最终发展为对地燃弧的关键因素,但由于树线放电复现条件较为苛刻,目前还未有学者对树线故障中碳化通道的形成机理及发展过程做深入研究,未发现其可能引起的有效特征。本文基于搭建的10 kV架空线路树线故障模拟实验平台,对树线放电过程进行了分析,并针对其中碳化通道的形

成与发展过程进行研究,通过零序电压中高频放电相关参量的变化对树线故障进行了特征提取,并探讨了树线放电过程中随机性现象的原因。

### 1 实验平台

#### 1.1 10 kV架空线路树线故障模拟实验平台

本文搭建了10 kV架空线路树线故障模拟实验平台,其整体结构如图1所示。实验平台主要由系统、采集两功能部分组成。系统部分包括10 kV架空线路及其相关的一次设备,采集部分则主要包括实验数据采集设备。其中,系统部分的线路三相电压由10 kV配电变压器将380 V三相电源升压至10 kV提供,由于无法在室内架设与实际长度相当的架空线路,为模拟真实长线路与地之间的电容产生的容性电流,平台配套多组电容器模拟真实长线路对地电容,可实现单相接地电流以1 A级差调节,调节范围0~60 A。



(a) 整体结构



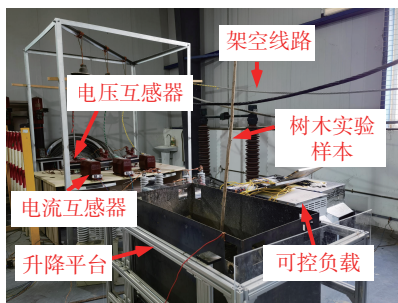
(b) 架空线路与采集部分



(c) 变压器部分



(d) 高压电容器柜



(e) 实验样本设置

图1 10 kV架空线路树线故障模拟实验平台整体结构及各细节部分

Fig. 1 Overall structure and detailed components of 10 kV overhead line tree line fault simulation experiment platform

本平台中采集部分主要采集树线放电过程中的视频、温度、电气信号。电气信号主要包含架空线路中的相电压、相电流、零序电压、零序电流,以及流经树木的电流(即泄漏电流)。线路电压电流均通过互感器二次侧进行测量,泄漏电流则利用电压探头对串联在接地回路中的5 Ω无感电阻两侧电压进行测量。电压电流信号均通过示波器进行记录,实验所用示波器为Pico 6804E,最

高采集频率2 GHz。基于实验中的数据采集设备开发了同步触发系统,该系统可以实现视频、树木温度、线路电气量数据的同步记录,以及树线故障现象与电气信号波形的同步采集,便于研究对比分析。

#### 1.2 树木实验样本的选取

当发生树线故障时,通常为树冠部分接触线路,树木阻抗示意图如图2所示。

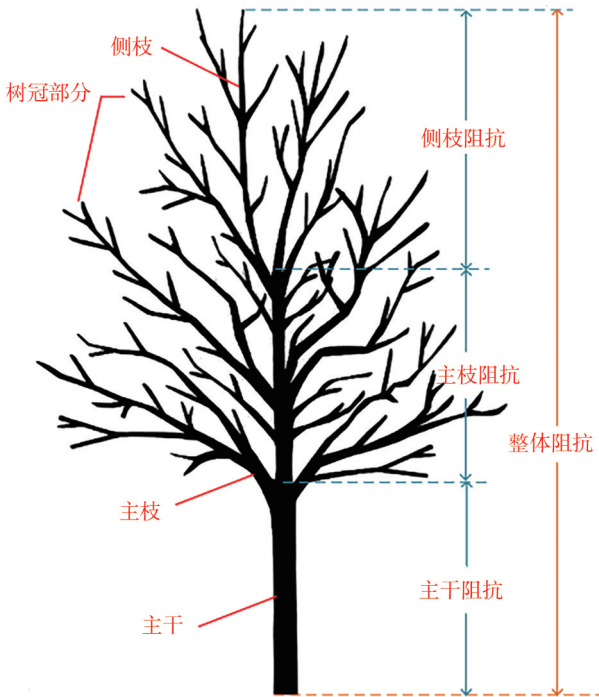


图2 树木阻抗的组成

Fig. 2 Components of tree impedance

树干作为故障路径的一个串联电阻,其阻值比树枝的电阻低得多,根据现有测量结果得到的树木各部位电压梯度可知,树冠处侧枝约占树木接地整体阻抗的91%~96%,实际占比与树木品种、季节及近期降水情况均有关,但占比的变化主要由侧枝部分的阻抗变化引起;树干部分电阻变化范围较小,其主要受温度影响<sup>[6]</sup>。为保证实验模拟与实际故障情况相符,选用生长高度较高、生理结构与大部分树木相同的松树作为主要研究对象,选取长度1.0~1.5 m,直径在0.02~0.03 m的树冠处侧枝前端部分作为实验样本,可以基本反映树线故障中的树木阻抗。

### 1.3 实验方案

在实际环境中,树木的树根根植于土壤之中,即使土壤内部结构含有多种杂质,树根也能完全扎根并充分深入土壤内部吸收营养物质,无论是直根系植物还是须根系植物,其根部与土壤的接触面积都非常大。因此正常生长的树木接地良好,接地电阻极低。为保证实验的准确性,在接地的可升降平台内放入大量湿润土壤,并将树枝插入土壤后进行实验,以此降低树枝接地处的接地电阻。实验中通过控制升降平台的起降,实现树木与线路的搭触或分离。

实验开始时,打开同步触发装置,各数据采集装置开始工作,升降平台开始上升;在树木搭触线路时,泄漏电流出现幅值跳变,该时刻即为故障起始时刻。由于示波器存储深度有限,视具体研究内容分两种采样频率采集实验数据。当采用50 kHz的较低采

样频率时,采样时间为8 min+20 s,信号以工频分量为主,便于记录树线故障长时间变化,进行树线放电过程的研究;当采用30 MHz采样频率时,采样时间为5 s,反复进行采集,使信号细节更丰富,便于分析树线放电过程中的高频信号细节。在树木表面被点燃导致线路沿树木表面对地剧烈燃弧后的5 s内,断开断路器停止实验,保存数据;若树木被烧断则提前终止实验。

### 1.4 炭化通道长度的采集

通过红外热成像仪对树皮上高温炭化通道的发展速度、起始时间进行采集,实际采集的图像如图3所示,通过红外影像可以研究炭化通道长度对故障程度及泄漏电流的影响。

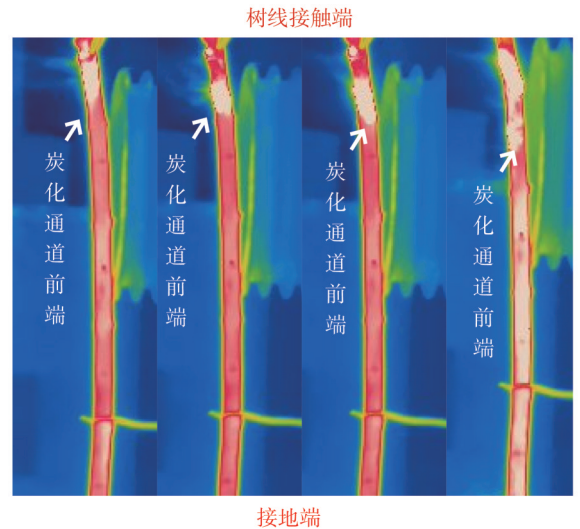


图3 炭化通道红外图像

Fig. 3 Infrared image of the charring channel

## 2 树线放电过程及机理分析

树线放电过程是一个涉及电、热和化学的错综复杂的变化过程,现有研究表明,树线故障发展至线路对地燃弧共经历4个发展阶段。阶段①,接触升温阶段,该阶段树木整体温度上升;阶段②,水分蒸发阶段,该阶段树木温度持续升高且树木外表皮持续喷出水气;阶段③,炭化通道发展阶段,树木外侧出现炭化通道并逐渐由树线接触点向接地端发展延长;阶段④,火焰桥接燃弧阶段,该阶段中树木外侧的炭化通道处出现明显火焰,线路对地沿树木外侧的火焰剧烈燃弧。树线引发的架空线路故障程度主要由泄漏电流幅值决定<sup>[12]</sup>,本研究在实验中复现了树线放电导致线路对地燃弧的全过程,故障过程中泄漏电流的典型变化过程如图4所示,由图4可见,整个故障发展过程中泄漏电流呈现“缓慢增大—缓慢减小—间断式增大—急剧增大”的总体趋势。

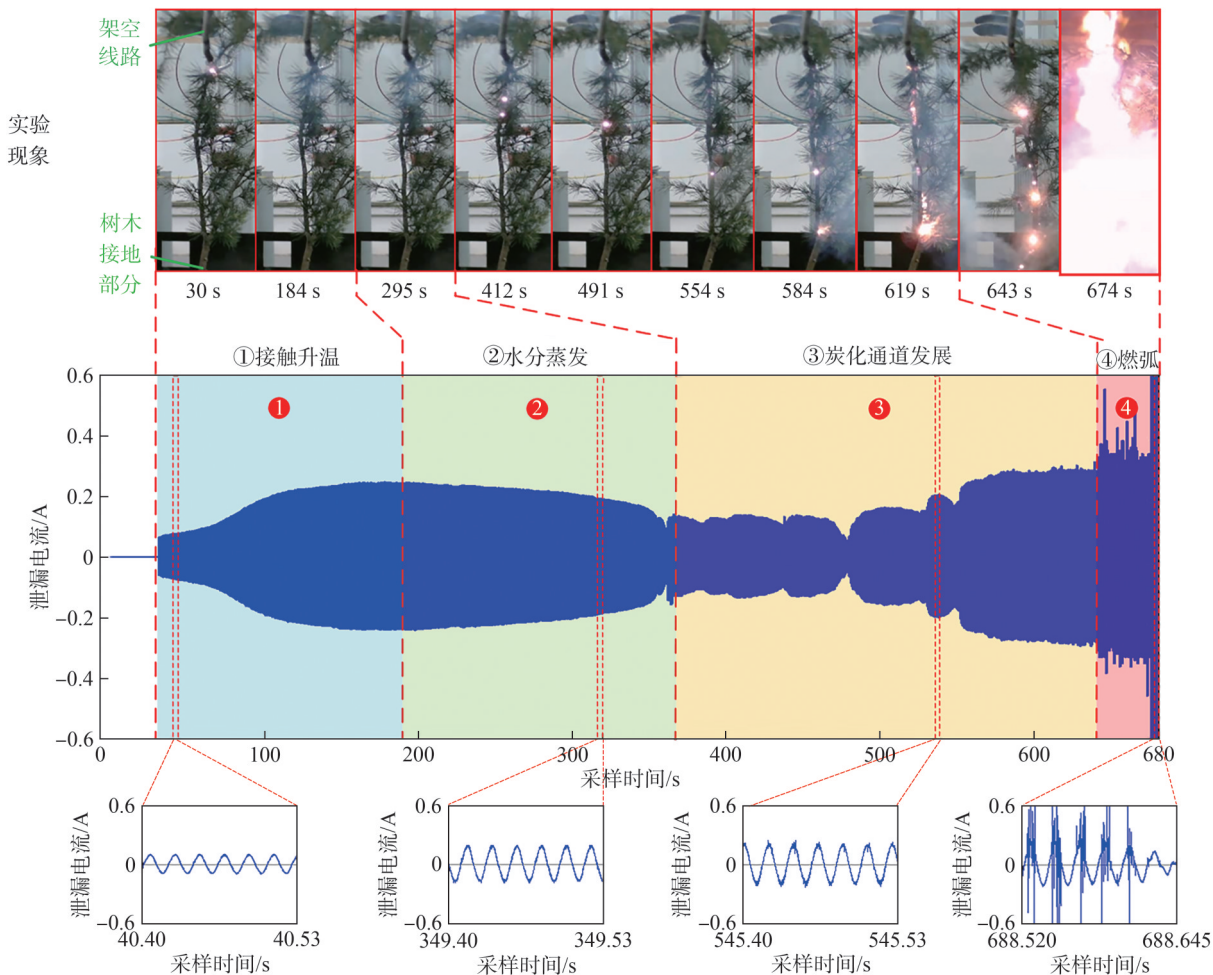


图4 树线放电4个阶段的现象及对应的泄漏电流

Fig. 4 Phenomena of the four stages of tree line discharge and the corresponding leakage current

树木作为树线放电故障中的接地体,其阻抗的变化过程决定了树线放电过程。树木阻抗由树木自身结构决定,树木结构在截面上看由外到内分为:树皮、形成层、边材、心材、髓心共5部分,即树木横向具有明显的层级结构,各层级结构相当于并联在一起的不同接地电阻。图5给出了树木各组织结构及其含水率。

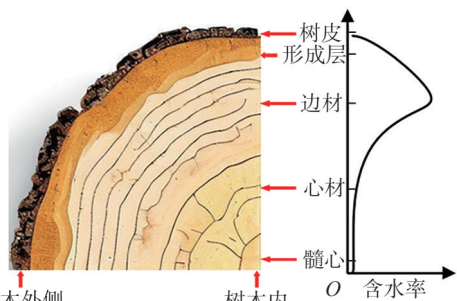


图5 树木组织结构及相应部分含水率

Fig. 5 Tree tissue composition and moisture content of each part

当泄漏电流流经树木时,由于树木横向各组织含水率不同,电流会优先流经含水率最高的“最优通路”,但电流产生的焦耳热会使树木内部水分出现迁

移,进而改变树木内部各组织处的含水率,并使接地回路阻抗发生变化,因此,有必要结合树木组织结构分析树线放电过程,从而分析树木接地阻抗的变化。

树皮外表皮是树木最外部的死组织,其含水率是树木结构中最低的部分;形成层十分薄,是树干的生长部分,生理活动活跃,也是树木输送养料的主要结构部分;边材主要将水分从根部输送到树木各处,其含水率最高,树木根系吸收的水分靠该部分输送,相当于直接与大地相连接,因此其接地电阻最小;心材则为生理功能退化的边材,心材与边材合称为木质部。树木的生理结构决定了树木含水率从树皮到髓心径向方向具有明显的“低—高一低”分布<sup>[13]</sup>,由于树木各部位电阻率的对数与该部位含水率呈直线关系<sup>[14]</sup>,因此,受树木组织结构的决定,树木各层级的电阻由外到内也具有“高一低—高”的分布规律。

### 2.1 接触升温阶段

当正常生长、表皮无破损的树木第1次与线路接触时,其外侧完好的树皮相当于一层电阻较高的“绝缘层”覆盖在通过根系接地的木质部及形成层部外

侧,在电子撞击产生的电流热作用下热解,率先被击穿并形成炭化缺口。树木组织炭化后电阻极低<sup>[7]</sup>,因此,炭化缺口形成层及线路之间提供了稳定的电流通路,电流经过炭化缺口向树木内部扩散。对实验中发展至阶段①的 5 组树木样本进行横向切割,通过红外成像仪对截面温度进行采集,图 6 展示了其中一组树枝的截面温度分布。

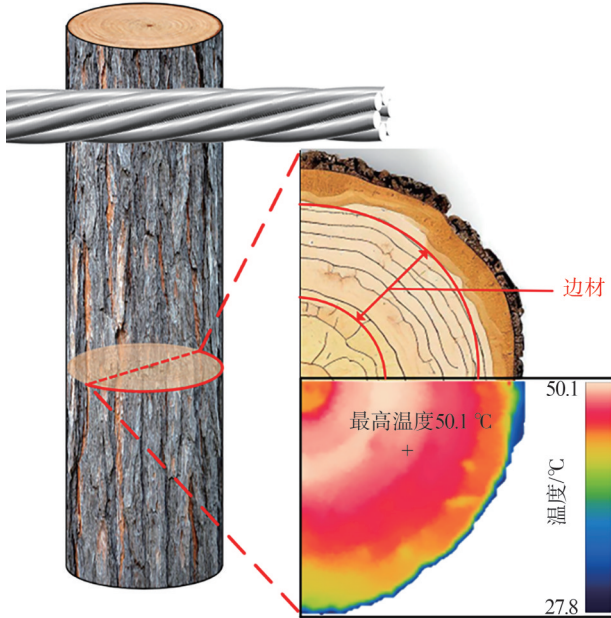


图 6 阶段①树木截面温度最高点位于边材部分

Fig. 6 Highest temperature in the cross-section of the trees in stage ① was located in the sapwood part of the trees

由图 6 可知:由于树木样本的差异及切割时冷却时间造成的误差,截面整体温度略有不同,但温度最高点均位于树木边材部分,该温度分布说明电流主要流经树木的边材,即树木边材部位率先发热,热量向外侧(形成层、树皮侧)及内侧(心材)扩散。温度升高导致树木电阻的降低,此时泄漏电流幅值随温度的升高逐渐增大,如图 4 中阶段①所示。受树木内部中正温度系数电解质的影响<sup>[15-16]</sup>,电导率上升时,树木阻抗呈现正温度特性,即温度升高而树木电导率增加。

## 2.2 水分蒸发阶段

温度的升高会使树木内部水分移动逐渐受温度梯度的主导。在正常干燥过程中,木材的表面温度高于内部温度,对水分向外移动产生了阻碍<sup>[13]</sup>,但树线故障过程中树木内部的边材率先发热,树木内部温度梯度是内高外低,因此温度的升高加速了树木内部水分向外扩散的速度。通过与图 6 一致的采集方式,对实验中发展至阶段②的 5 组树木样本进行截面温度采集,忽略样本间截面整体温度的差异,温度最高点均位于树木形成层部分。图 7 为其中一组树枝的截面温

度分布。由图 7 可以观察到树皮与形成层之间的连接由于内部压力的增大而被破坏,树木组织形变较为明显。

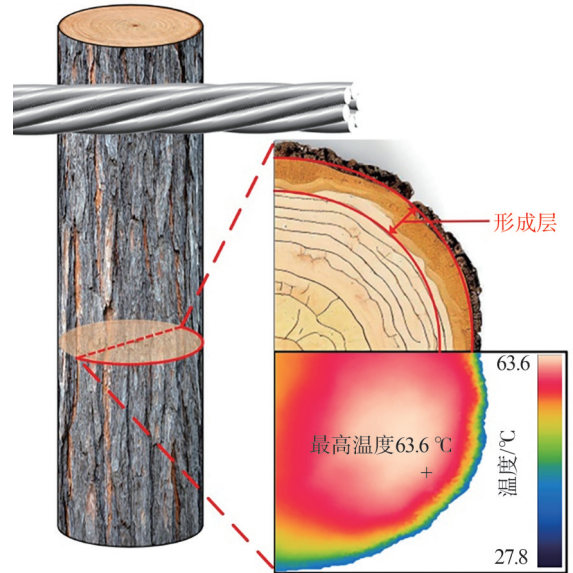


图 7 阶段②树木截面温度最高点位于形成层部分

Fig. 7 Highest temperature point in the cross-section of the trees in stage ② was located in the forming layer

树皮具有隔绝水分和气体的保护作用,因温度升高而向树皮扩散的水分会因树皮的保护作用停留在形成层,增加了形成层的含水率,此时主要电流通路由边材转变到树皮下层组织部分(形成层)。树皮与线路接触部位处形成了水分散失缺口,接地路径中该处含水率快速下降且电阻上升,进一步地促进了电流热作用造成的内部温升;直至温度超过水的沸点后,水分开始以水蒸气的形式从炭化缺口处大量喷出,含水率下降,进而导致电导率降低。此时树木阻抗呈现负温度特性,即温度升高而树木电导率下降。

自树木开始发热,正负温度特性即开始竞争对树木电导率变化的主导权:在水分蒸发的前期,水分几乎无析出,正温度特性占主导,树木整体阻抗呈现下降趋势,泄漏电流幅值逐渐增大;在水分蒸发的后期,水分大量析出,含水率降低速率加快,负温度特性占主导,此时树木整体阻抗呈现上升趋势,泄漏电流幅值逐渐下降,如图 4 中阶段②所示。

## 2.3 炭化通道发展阶段

当树木内水分被蒸发到一定程度后,树皮外侧伴随火焰的出现而产生明显的炭化通道,其具有向接地端发展的特性。该过程中树皮遭炭化或无法承受内部水汽压力出现破损,水分从该处大量析出,造成该处树木阻抗突然大幅上升,泄漏电流波形出现明

显的幅值低谷,之后迅速增大,泄漏电流幅值整体上升趋势变大,如图 4 中阶段③所示。随着炭化通道长度的生长,树线放电现象逐渐剧烈,炭化通道中伴随放电电弧的出现,附件 1 的视频展示了炭化通道的发展过程。

当树线放电进入阶段③时,炭化通道沿树木的径向延伸将导致泄漏电流增加,速率增大,树木组织开始燃烧,并随着灰烬和火焰剥落,引发山火的风险从该阶段开始直线上升<sup>[9]</sup>。图 8 显示了炭化通道沿树木径向发展时前端放电的行进过程。目前的研究中并未

详细分析炭化通道的形成过程,一般认为其为温度升高或受火焰灼烧后树皮炭化的痕迹,但在通过对实际产生炭化通道的树木进行分解研究后发现,炭化通道的发展前端并非在树皮外侧,而是在树皮与木质部之间的形成层,如图 9 所示,形成层处的炭化通道发展速度快于树皮处炭化通道的发展速度,并且炭化通道前端呈现明显的“电树枝”形状。实验中炭化通道的发展在横向上表现为向炭化区域两侧无规则延伸,纵向上则表现为由树线接触部位向接地部分延伸,横向发展速度明显慢于纵向发展速度。

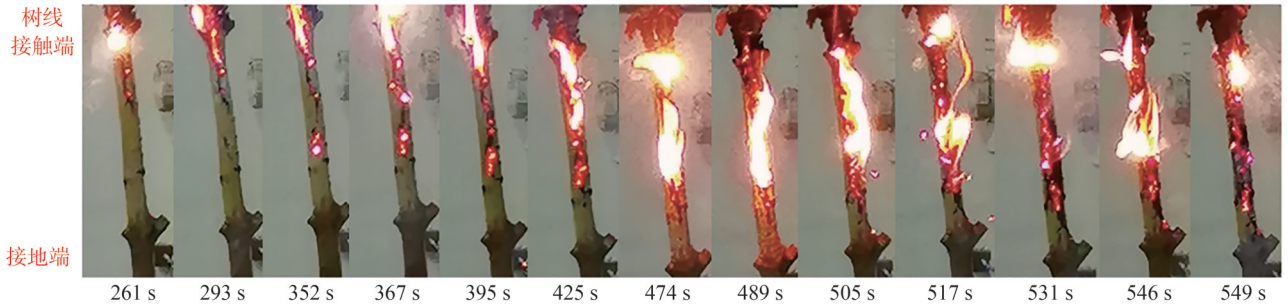


图 8 炭化通道向接地端发展过程

Fig. 8 Process of developing the charring channel towards the ground

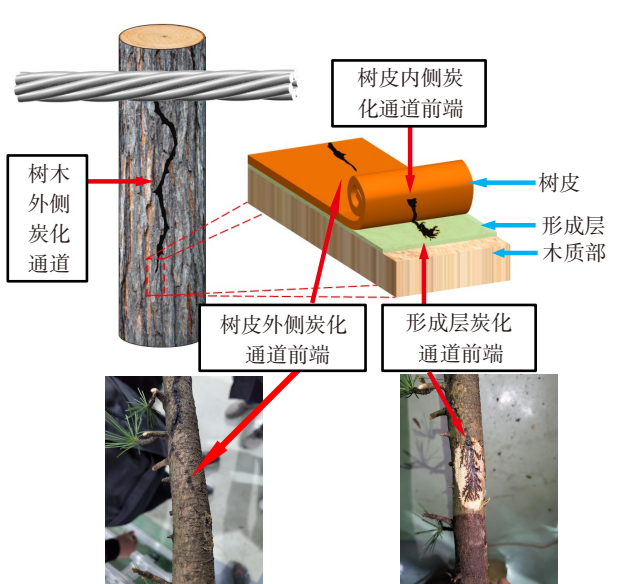


图 9 树木各组织处炭化通道前端所在位置

Fig. 9 Location of the front of the charring channel at each tissue of the tree

泄漏电流的大小取决于树木粗细、成分、含水量等,因此各个部位的泄漏电流密度不同,使得泄漏电流产生的热量对树木的烘干程度是不均匀的。不考虑特殊结构形状或其他偶然因素的影响,树线故障初期的泄漏电流密度与电阻最大的区域在线路与树木的接触区附近,该区域的树木组织在电流焦耳热及电子撞击带来的热量下率先被炭化,是炭化通道发展的起始部位。

经过阶段①、②的温升对树木整体水分迁移的作用后,树木水分聚集在形成层,此时泄漏电流主要流经树木形成层,炭化通道沿形成层表面发展。在炭化通道向前发展时,炭化点造成缺口,使得水分大量析出,靠近炭化通道前端部分率先被烘干,在树木纵向接地路径中形成干燥区(该区域含水率最低,下称干带)。随着干带逐渐干燥,干带两端的电压逐渐增大,此时泄漏电流的幅值减小。当干带两端电压增加到足以被击穿时,干带被局部电弧击穿,出现泄漏电流脉冲,该显微放电过程如图 10 所示。树木纤维素的耐热性差,电弧的出现导致干带在电子撞击产生的热作用下热解,使得干带炭化形成新的炭化通道前端,此时泄漏电流增加。同时,炭化通道内的电效应及热效应会引燃、灼烧外侧的树皮,将树皮由内到外同样地烧蚀出炭化区域。由于炭化区域会破坏树皮的保护作用,使得树木结构出现缺口,大量水分、水汽从炭化区域的缺口附近析出,此时炭化通道附近的电导将进一步降低,使得前端出现新的干带,进而伴随新的放电、炭化过程。以上过程不断重复,导致炭化通道逐渐向接地端发展。

使用红外热成像摄像机实现了对树皮下炭化通道(高温部分)发展情况的采集,其发展过程如图 11 所示。通过图像识别技术对红外图像下炭化通道的长度变化进行测量,炭化通道的长度及泄漏电流幅值的关系如图 12 所示。

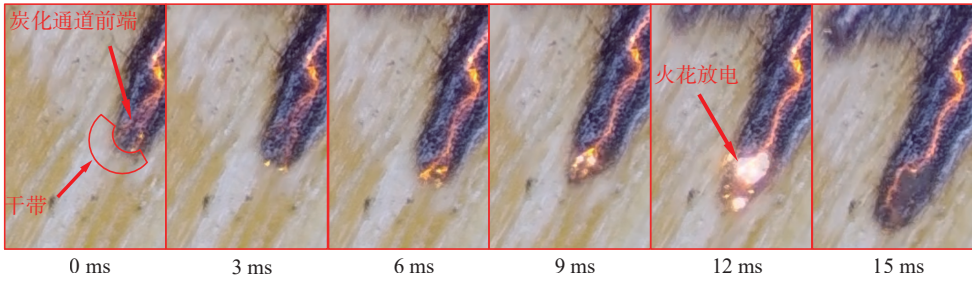


图 10 显微镜下炭化通道前端放电过程

Fig. 10 Microscopic discharge process at the front end of the charring channel

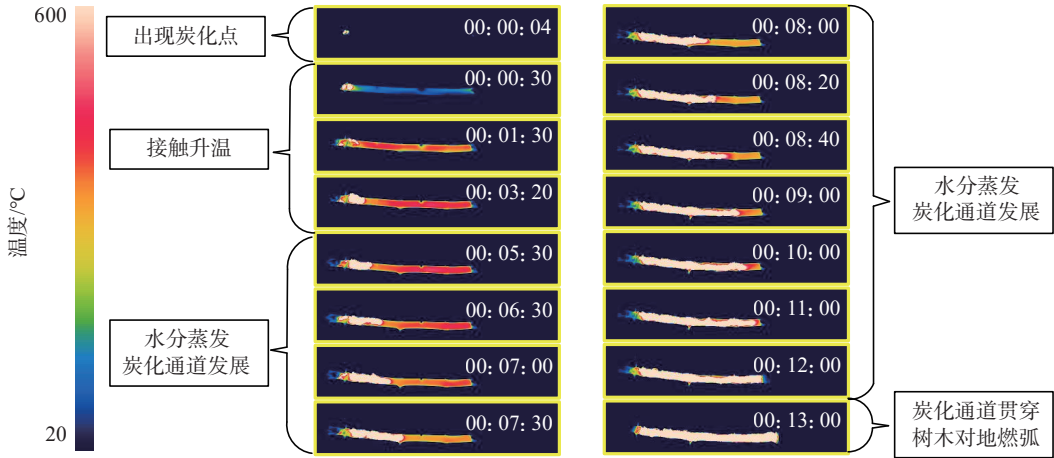


图 11 炭化通道长度变化过程

Fig. 11 Carbonization channel length change process

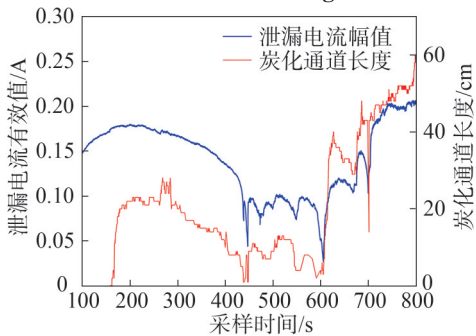


图 12 炭化通道长度与泄漏电流的有效值关系

Fig. 12 Relationship between charring channel length and effective value of leakage current

对比图 12 中炭化通道长度发展过程与泄漏电流发展过程可见,在阶段②即水分蒸发阶段,炭化通道已开始出现并发展,初期速度较慢,此时树木的树皮外侧并

未出现炭化通道的痕迹,其率先出现在树皮内侧的形成层。由图 12 可知,泄漏电流的幅值与炭化通道长度发展趋势一致,即炭化通道越长,泄漏电流越大。

### 2.4 火焰桥接燃弧阶段

由于炭化通道的电阻率较低,随着炭化通道加长,接地回路的电阻逐渐下降。当炭化通道贯穿树线接触点和接地端后,电流进一步增强,高温将树木组织及其热解产生的可燃气体等混合物点燃而出现火焰<sup>[17-19]</sup>,火焰的高温及灰烬有利于电弧在火焰中发展<sup>[20-22]</sup>,炭化通道和火焰桥接最终导致线路对地燃弧,燃弧过程如图 13 所示,燃弧所致的泄漏电流的放电脉冲超出测量范围,如图 4 中阶段④所示。附件 2 的视频展示了炭化通道导通、火焰桥接导致的对地燃弧现象。

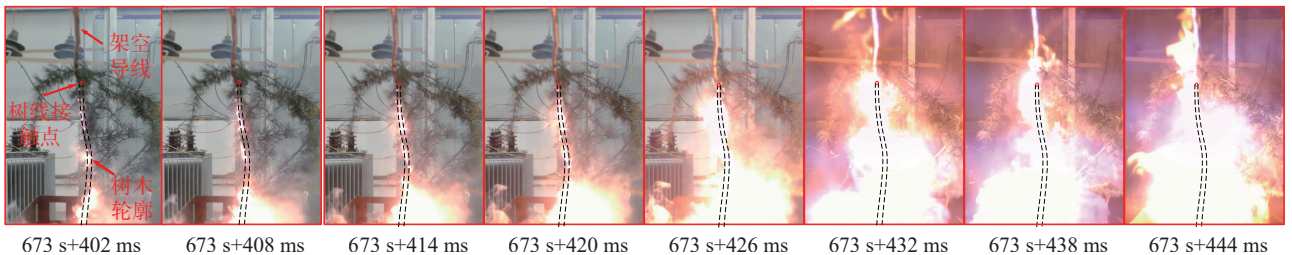


图 13 火焰桥接导致线路对地燃弧的过程

Fig. 13 Process of flame bridging resulting in line-to-ground arcing

### 3 树线放电中高频放电信号变化特征

放电一般包含基频信号、较低频谐波信号与高频信号,其中,高频信号对局部放电等较微弱的高频放电强度具有辨识性<sup>[23-26]</sup>。由第2节树线放电发展过程分析可知,树线放电过程中伴随着具有发展特性的局部放电现象,因此可以放电强度的变化作为树线放电信号的特征。为研究树线放电过程中高频放电的强度,本文采用波动法<sup>[27]</sup>对零序电压信号进行高、低频信号解耦,并对解耦后的高频信号求瞬态强度<sup>[28]</sup>,最终对求得的瞬态强度进行概率分布统计,通过概率分布曲线在不同瞬态强度处的陡峭程度,即可判断不同故障阶段的放电情况,进而实现树线故障的特征提取。

#### 3.1 波动法

波动法具有计算简单、耗时短、可自适应解耦重叠信号、准确反映信号特征等特点,是在保留信号中冲击信号上升与下降时间、最大幅值、峰峰值等关键的信号特征前提下对信号的抽象和提炼<sup>[29]</sup>,该方法最初用于放电信号的降噪、放电脉冲的提取。波动法提取高频信号的效果如图14所示,其可实现对其中高频放电信号的提取。

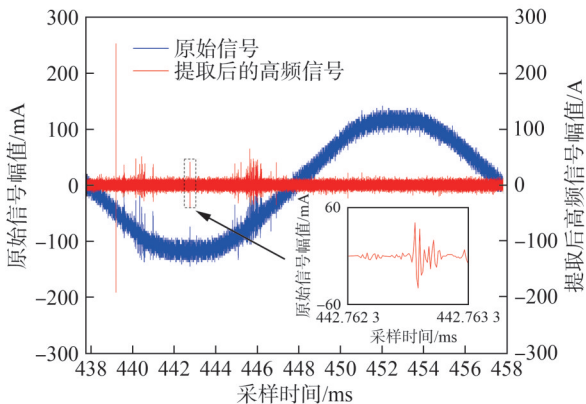


图14 波动法对高频信号的提取效果

Fig. 14 Effects of the fluctuation method on the extraction of high-frequency signals

#### 3.2 放电瞬态强度及其概率分布

瞬态强度  $I_{fx}$  为信号在第  $x$  个波动区间的变化率,其计算式如下:

$$I_{fx} = \frac{A_{fxend} - A_{fxstart}}{t_{fxend} - t_{fxstart}} \quad (1)$$

式中,  $A_{fxstart}$ 、 $t_{fxstart}$ 、 $A_{fxend}$ 、 $t_{fxend}$  分别为第  $x$  个波动起点处的幅值和采样时刻、终点处的幅值和采样时刻。

相较于白噪声信号,放电信号由于可以在短时间内产生高能量,所以具有脉冲形式的波动,其上升时间快,变化梯度大,即具有高瞬态强度。因此可以通过

计算高频信号中的瞬态强度来区分白噪声和放电信号。图15为图14中高频信号的瞬态强度分布。

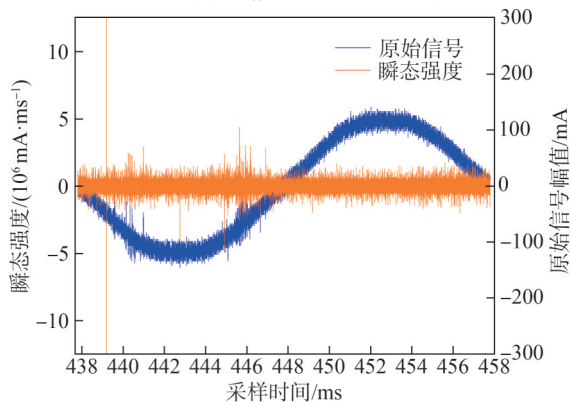


图15 周期内高频信号瞬态强度分布

Fig. 15 Transient intensity distribution of high-frequency signals over the period

#### 3.3 概率分布曲线分析

即使未发生树线故障,由于系统自身设备放电等原因存在大量瞬态强度较大的放电信号,即系统自身的放电信号能量较大,因此,在实际工况中单纯从瞬态强度的大小来判断是否发生树线故障并不可靠。本文通过求取瞬态强度的概率分布曲线分析放电信号的能量集中情况。图16展示了其中一组树木样本实验数据中不同时期10个工频周期内的瞬态强度概率分布曲线。其中:无故障时刻即系统正常运行时的情况,该组实验样本的故障时刻为331.5 ms;阶段①采集时间段为(0 s+527.8 ms)~(0 s+727.8 ms),阶段②采集时间段为(354 s+408.9 ms)~(354 s+608.9 ms),阶段③采集时间段为(660 s+461.9 ms)~(660 s+661.9 ms)。

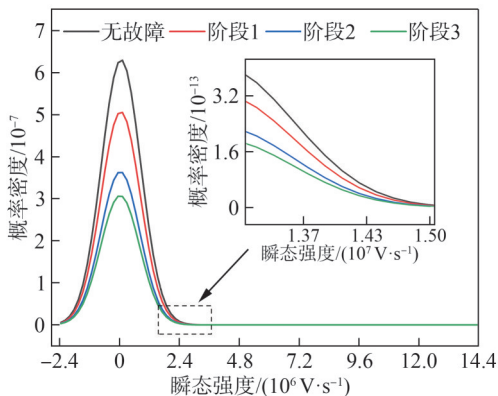


图16 不同故障时期的高频波动瞬态强度概率分布曲线  
Fig. 16 Probability distribution curves of transient intensity of high-frequency fluctuations for different fault periods

由图16可知:当故障未发生时,低瞬态强度处的概率分布曲线比较陡峭;当故障发生后,随着放电阶段的发展,低瞬态强度处的概率分布曲线逐渐变平坦。以上现象说明:

1)当故障发生前,瞬态强度的概率分布在低瞬态强度值附近集中,系统中的波动能量小,波动主要由白噪声引起。

2)故障发生后,低瞬态强度值附近的集中度有所下降,且故障发生的时间越长,低瞬态强度值附近的概率分布曲线越平坦(概率密度越低),周期内出现越来越多的高瞬态强度值,系统中的波动能量越来越大,较大的波动能量由放电引起,即放电现象越来越剧烈。

## 4 关于实验中偶然性现象的讨论

### 4.1 泄漏电流的中断

在对树木样品进行树线放电实验时发现,其中许多树木样本并不会发展至线路对地燃弧,其主要情况有以下两种。

1)在发生燃弧前,树木前端与线路的接触部分基本已经全部炭化并断裂,致使泄漏电流中断,出现此现象的原因是由于采用的树木样品普遍木质较软,密度较低的软木更易被热解、灼烧成灰烬,其在受到热解后机械特性下降明显。

2)实验中还出现了泄漏电流先上升再下降最终降为0的情况,即树木阻抗由高到低再到高,呈现“U型曲线”。通过对产生U型曲线的树木进行分段阻抗测量后发现,这些树木中间某部分呈现极高阻抗,由外观判断在树木生长过程中该处受过外伤,导致其整体组织不均匀,在故障过程中该处水分率先被蒸干,最终成为“绝缘体”,中断泄漏电流。

### 4.2 多条炭化通道

在实验中发现,炭化通道在发展过程中可能会突然停止,并从另一侧重建一条新的炭化通道,最终导致一根树木上会出现多条炭化通道,此现象多出现在较粗的树木上。由于树木组织存在差异,放电具有随机性,在炭化通道形成过程中可能出现炭化通道中部附近的干区被优先击穿的情况,若该干区被击穿,炭化后该方向上的电导率大于炭化通道前端的电导率,则电流优先流经该部位,进一步促进该部位的炭化通道发展,因此,产生了另外一条更优的炭化通道,结构、含水率不均匀的树木样本可能发生多次炭化通道的重建,进而形成多条炭化通道。

### 4.3 树木与线路的距离对树线放电过程的影响

当树木与线路保持一定距离时,树木与线路之间由电弧连接,由于电弧的灼烧、炭化会使得树木原有结构塌陷,进而增大了树木与线路间的距离,使得电弧被拉长,接地回路阻抗增加,泄漏电流下降。若线路电压等级较低,电弧对树木的烧蚀最终可能导致树线放电中断,无法引燃树木。

## 4.4 树木品种不同对树线放电过程的影响

对桉树、构树、羊蹄甲、黄葛树等多种树木也展开了相关实验,实验结果与松木基本一致,因此得出的树线放电过程适用于大部分具有明确层级结构的树种,其中黄葛树的实验结果如图17所示。较特殊的种类是竹类植物,竹子表面炭化通道如图18所示。由于竹子自身结构不具有层级结构且含水率较高,因此炭化通道会在其外侧或中空内侧的表面发展,发展过程与松木皮下发展过程基本一致。



(a) 黄葛树表皮侧炭化通道



(b) 黄葛树皮下炭化通道

图17 黄葛树炭化通道位于树皮下

Fig. 17 Charring channels of the *Ficus virens* Aiton tree are located under the bark of tree



图18 炭化通道在竹子表面发展

Fig. 18 Charring channels develop on the surface of bamboo

## 5 结论

本文通过搭建的10 kV架空线路树线故障模拟实验平台对树线放电故障进行了复现,结合实验结果对树线放电机理进行了深入分析研究,通过红外热成像等手段观察了炭化通道的形成过程,并分析其形成机理,最终基于实验系统采集到的系统电信号对树线放电故障进行了特征提取。主要得到以下结论。

1)炭化通道最先在树线接触部位形成,然后在树木形成层向树木接地端发展。当炭化通道发展到一定程度后,将树皮由内而外烧蚀,进而形成树皮外侧的炭化通道。

2)树线放电前两个阶段为炭化通道的发展提供了条件,炭化通道是热效应与电效应共同作用的结果。随着炭化通道长度的增加,树木内部放电越来越剧烈,放电强度明显增加。

3)基于树线放电发展过程,提出一种基于高频信号瞬态强度概率分布的故障特征提取方法,通过高频放电瞬态强度的概率分布曲线变化实现故障特征的提取。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Yang, Zhang Liang, Li Gengchen. Investigation of 10 kV overhead conductor single-phase contact tree grounding fault fire[J]. Fire Science and Technology, 2022,41(12):1763-1766.[张阳,张良,李耕晨.10 kV 架空导线单相触树接地故障火灾的调查[J].消防科学与技术,2022,41(12):1763-1766.]
- [2] Zhou Jizhou, Liu Xinyu. Design of insulated shelter pipe for preventing tree line contradiction[J]. Electric Engineering, 2022(24):90-91.[周济舟,刘欣宇.一种防止树线矛盾的绝缘遮蔽管设计[J].电工技术,2022(24):90-91.]
- [3] Hao Yibin, Sun Zhengliang, Ma Libo, et al. All-round delicacy management for rectifying tree-line conflicts[J]. Electric Safety Technology, 2022,24(11):23-26.[郝奕斌,孙政樑,马立博,等.治理树线矛盾的全面精细化管理措施[J].电力安全技术,2022,24(11):23-26.]
- [4] Liang Dong, Xu Bingyin, Wang Pengwei. Detection method for tree-contact single-phase-to-ground fault of 10 kV overhead line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14):149-157.[梁栋,徐丙垠,王鹏玮.10 kV 架空导线单相触树接地故障检测方法[J].电力系统自动化,2021,45(14):149-157.]
- [5] 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):5221-5231.[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):5221-5231.]
- [6] Butler K L, Russell B D, Benner C, et al. Characterization of electrical incipient fault signature resulting from tree contact with electric distribution feeders[C]//Proceedings of the 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton: IEEE, 1999: 408-413.
- [7] Wischkaemper J A, Benner C L, Russell B D. Electrical characterization of vegetation faults on distribution feeders[C]//Proceedings of the 11th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008:1-7.
- [8] Elkalahy N I, Lehtonen M, Darwish H A, et al. Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007,14(2):375-383.
- [9] Marxsen T. Vegetation conduction ignition test report[R]. Victoria: Department of Economic Development Powerline Bushfire Safety Program, Jobs, Transport and Resources, 2015.
- [10] Lala H, Karmakar S. Characterization and classification of high impedance arc fault in distribution system involving metallic and nonmetallic surfaces using empirical mode decomposition[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019,29(11):12107.
- [11] 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):1289-1298.[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):1289-1298.]
- [12] Bahador N, Namdari F, Matinfar H R. Modelling and detection of live tree-related high impedance fault in distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018,12(3):756-766.
- [13] Zhou Zheng. Study on wood drying model optimization and intelligent control methods[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.[周正.木材干燥模型优化及智能控制方法研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.]
- [14] Du Hongshuang, Li Rong, Xiu Hongbo, et al. Relations among resistance percentage, temperature and moisture of oak in the seasoning process[J]. Journal of Beihua University(Natural Science), 2002,3(4):349-351.[杜洪双,李荣,修洪波,等.柞木干燥中电阻率与温度和含水率的关系[J].北华大学学报(自然科学版),2002,3(4):349-351.]
- [15] Tang Youlin. Effect of chilling temperature on conductivity,  $K^+$  ion content in water extract and electrical resistance of tropical shade tree leaves[J]. Guihaia, 1984, 4(3): 231-237.[唐友林.零上低温对热带绿化树木叶片电阻、水浸液电导率和  $K^+$  离子含量的影响[J].广西植物,1984,4(3): 231-237.]
- [16] Gao Baoshan, Dong Yannan, Wang Baozhu. Electrical property analysis to tree vitality[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1997,20(1):71-73.[高保山,董燕南,王保柱.树木生命力的电特性分析[J].河北农业大学学报,

- 1997,20(1):71-73.]
- [17] Pu Ziheng, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Study on DC voltage breakdown characteristics of gap under fire conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 453-459. [普子恒, 阮江军, 黄道春, 等. 火焰条件下间隙的直流电压击穿特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 453-459.]
- [18] Chen Xiaoming, Li Peng, Ruan Ling, et al. Insulation characteristics measurement and analysis of the typical vegetations in the corridor of the transmission lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(20): 89-95. [陈孝明, 黎鹏, 阮羚, 等. 输电线路走廊典型植被火焰绝缘特性测量与分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(20): 89-95.]
- [19] Wu Tian, Liu Kai, Liu Ting, et al. Effects of forest fires on transmission line equipments and external insulation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(3): 83-89. [吴田, 刘凯, 刘庭, 等. 山火对输电线路设备及外绝缘影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(3): 83-89.]
- [20] Wu Tian, Hu Yi, Ruan Jiangjun, et al. Air gap breakdown mechanism of model AC transmission line under forest fires[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1115-1122. [吴田, 胡毅, 阮江军, 等. 交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1115-1122.]
- [21] Huang Daochun, Li Peng, Ruan Jiangjun, et al. Review on discharge mechanism and breakdown characteristics of transmission line gap under forest fire condition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 622-632. [黄道春, 黎鹏, 阮江军, 等. 山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 622-632.]
- [22] Li Peng, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Influence factors analysis of the conductor-plane gap breakdown characteristic under simulation forest fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 195-201. [黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 模拟山火条件下导线-板间隙击穿特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 195-201.]
- [23] Xie Min, Zhou Kai, Huang Yonglu, et al. A white noise suppression method for partial discharge based on short time singular value decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 915-922. [谢敏, 周凯, 黄永禄, 等. 一种基于短时奇异值分解的局部放电白噪声抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 915-922.]
- [24] Lv Tiancheng, Jin Song, Wang Yu, et al. Research on denoising of partial discharge signal based on wavelet trace method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 20-25. [吕天成, 靳松, 王瑜, 等. 基于小波迹方法的局部放电信号消噪研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(6): 20-25.]
- [25] Zhang Zhanlong, Xiao Rui, Wu Yongye, et al. Research on multi-level feature extraction model of converter transformer vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7093-7104. [张占龙, 肖睿, 武雍焯, 等. 换流变压器振动信号多层次特征提取模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7093-7104.]
- [26] Qi Peng, Fan Yugang, Li Kui. A study on fault diagnosis method based on transient feature extraction of SVD and VPMCD[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2016, 38(2): 211-218. [齐鹏, 范玉刚, 李葵. 基于SVD突变信息特征提取和VPMCD的故障诊断方法研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 211-218.]
- [27] Ye Bin, Zhou Kai, Huang Yonglu, et al. A white noise suppression method for partial discharge based on AWM and OSVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3978-3986. [叶彬, 周凯, 黄永禄, 等. 基于AWM和OSVD的局部放电白噪声抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3978-3986.]
- [28] Seo J, Ma Hui, Saha Tapan. A novel signal extraction technique for online partial discharge(PD) measurement of transformers[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(5): 1032-1048.
- [29] Xiao Jun. Research on real-time analysis method of the partial discharge of generator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. [肖俊. 发电机局部放电信号特征实时分析方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.]

## Development Process and Characteristics Study of Tree Line Discharge in 10 kV Overhead Power Lines

XU Huikai<sup>1</sup>, HUANG Xiaolong<sup>2</sup>, YANG Chunlan<sup>1</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1\*</sup>, YANG Nongchao<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

### Abstract:

**Objective** This study focuses on the development process and mechanism of tree line discharge. It examines the development characteristics of 10 kV overhead line tree line discharge, investigates variations in temperature and water content across different stages of discharge, proposes the development mechanism of the charring channel, and introduces a feature extraction method based on these findings.

**Methods** Based on the characteristics of a 10 kV three-phase ungrounded distribution network system during single-phase ground faults, an ex-

perimental platform for 10 kV overhead line tree discharges was constructed. Voltage transformers and sampling resistors were employed to collect voltages and currents. A typical species of pine tree was selected as the main object of study, and the tree samples were inserted into moist soil to ensure effective grounding. The entire tree discharge process was monitored through a synchronized acquisition system, and changes in temperature and electrical signals were recorded. An analysis of the temperature and water content changes across various cortical tissues of the tree was conducted to examine the progression of the discharge process triggered by contact between the tree and the power line. Infrared thermography was employed to observe the complete development of the charring channel under the tree epidermis. The mechanism of charring channel development under the tree epidermis was proposed, and its accuracy was verified using microscope images. Based on the observed characteristics of the tree discharge process, feature extraction was performed using high-frequency signals that contained detailed information on high-frequency discharges. The effectiveness of this method was verified using experimental data.

**Results and Discussions** Based on the overall change in leakage current during tree line discharge, the process was divided into four stages: the contact and warming stage, the water evaporation stage, the charring channel development stage, and the flame bridging and arc ignition stage. The moisture distribution within the tree affected the development of current channels. During the transition from the contact and warming stage to the water evaporation stage, the passage of electric current through the tree shifted from the sapwood to the vascular cambium due to a temperature increase that enabled water migration from the tree. The rise in temperature and the reduction in water content initially caused an increase in leakage current, followed by a decrease, during the first two stages, both of which simultaneously created favorable conditions for the development of charring channels. The localized drying, breakdown, and charring within the tree, resulting from the temperature rise and moisture loss in the early stages, repeatedly occurred to form a forward-progressing charring channel. Microscopic observation of the discharge process at the front end of the charring channel confirmed this conclusion. The charring channel acted as a series resistor in the fault path, exhibiting low resistance, which led to a reduction in ground impedance as the channel developed. The correlation between the charring channel and the leakage current amplitude further validates the changes in tree impedance due to the formation of the charring channel. As the charring channel crosses the tree, the larger leakage current further ignites the tree, and the resulting surface flames cause a rapid drop in ground impedance, resulting in line-to-ground arcing along the tree. Based on these findings and analyses, a fault signal feature extraction method was proposed using high-frequency signal transient intensity statistics. Regions of higher energy concentration were identified by analyzing the statistical distribution of transient intensity, enabling effective differentiation between tree line discharge signals and background noise. The results demonstrated that the transient intensity probability distribution curve progressively flattens as the fault develops, further indicating that the development of tree line discharge is accompanied by changes in high-frequency discharge energy. The described tree line discharge development process and the proposed feature extraction method provide a foundation for forest fire traceability and the development of tree line discharge monitoring devices.

**Conclusions** This study shows the high-frequency discharge details during the tree line discharge process. Existing tree line discharge models do not consider the high-frequency details, which can result in the neglect of significant features within the high-frequency signals of tree line discharges. These features can be manifested in electrical signals, as well as in ultrasonic and ground waves. The effectiveness of both ultrasonic and ground waves for high-frequency feature extraction was validated through experimental results. In addition, several issues emerged during the experimental process that differ from conventional single-phase grounding faults. For instance, the voltage amplitude of the faulted phase is not the lowest, and the zero-sequence voltage, which is typically expected to increase upon fault occurrence, instead exhibits a decrease in amplitude. The above phenomena can lead to misinterpretation by existing fault detection equipment. Therefore, investigating the underlying mechanisms of these phenomena is essential for a deeper understanding of tree line discharge faults.

**Key words:** charring channel; tree line fault; fault characteristic; wildfire; distribution network fault

(编辑 赵 婧)

引用格式: Xu Huikai, Huang Xiaolong, Yang Chunlan, et al. Development process and characteristics study of tree line discharge in 10 kV overhead power lines[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 278–289. [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]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 278–289.]