

# 配网单相触树接地故障过渡电阻演变特性： 温度和含水率的影响

何建波<sup>1</sup>, 周瑶<sup>1</sup>, 柳明贤<sup>1</sup>, 李祚朋<sup>2</sup>, 彭涛<sup>1</sup>, 和晓华<sup>1</sup>, 沈雪明<sup>2</sup>, 宁文军<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司丽江供电局, 云南 丽江 674100; 2. 四川大学 电气工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 单相触树接地故障 (tree-contact single-phase-to-ground fault, TSF) 会威胁线路的稳定运行, 严重时可能导致山火。温度和含水率是影响 TSF 发展的重要因素, 但它们影响故障的过程及机理尚不明确。文章以自然生长的松树为实验对象, 开展了 TSF 试验研究; 基于实验数据, 分析了温度及含水率对 TSF 过程中树木过渡电阻的影响, 并且建立了一种计及温度和树木含水率的 TSF 过渡电阻等效模型。模型预测结果与实验测量结果的平均相对误差小于 10%, 验证了模型的有效性。结果表明: TSF 的电流加热会导致树枝内部水汽蒸发至树皮与树干之间的夹层, 反过来影响泄漏电流流路径, 并在夹层上形成炭化通道; 电流通道的局部加热和水汽蒸发导致的含水率变化是影响 TSF 泄漏电流及过渡电阻变化的主要因素。改进后的模型降低了对传统经验参数的依赖, 且与实验测量数据的匹配度更高, 为进一步厘清故障发展的机理提供参考依据。

**关键词:** 导线单相触树故障; 过渡电阻; 温度; 含水率

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.011

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)03-0104-10

## Impact of temperature and tree moisture content on evolution characteristics of transition resistance of tree-contact single-phase-to-ground fault in distribution network

HE Jianbo<sup>1</sup>, ZHOU Yao<sup>1</sup>, LIU Mingxian<sup>1</sup>, LI Zuopeng<sup>2</sup>, PENG Tao<sup>1</sup>,

HE Xiaohua<sup>1</sup>, SHEN Xueming<sup>2</sup>, NING Wenjun<sup>2</sup>

(1. Lijiang Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Lijiang 674100, Yunnan, China.

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

**Abstract:** The occurrence of tree-contact single-phase-to-ground fault (TSF) poses a potential threat to the stable operation of power lines, and in severe cases, may result in wild fire. The development of TSF is influenced by crucial factors such as temperature and moisture content; however, the precise process and mechanism through which they impact failure remain unclear. This paper takes naturally growing pine trees as the experimental object and conducts a TSF experimental study. Based on the experimental data, it analyzes the impact of temperature and tree moisture content on the transition resistance of trees during TSF, and establishes an equivalent model of TSF transition resistance that takes into account the temperature and the moisture content of trees. The average relative error between model prediction and experimental measurement is less than 10%, validating the effectiveness of the model. The results show that the current heating of TSF will cause the water vapor inside the branches to evaporate into the interlayer between the bark and the trunk, which in turn affects the leakage current flow path and forms a carbonization channel on the interlayer, the distribution of moisture content caused by local heating and water vapor evaporation in the current channel is the main factor affecting the leakage current and transition resistance changes of TSF. The refined model diminishes its reliance on traditional empirical parameters and boasts enhanced alignment with experimental measurement data, offering valuable insight into the mechanisms underlying fault progression.

**基金项目:** 云南电网有限责任公司丽江供电局科技项目 (YN KJXM20222421)

**Keywords:** tree-contact single-phase-to-ground fault, transition resistance, temperature, moisture content

## 0 引 言

随着经济的不断发展,全社会电能需求的也不断增大,我国的配网建设日渐复杂、规模也日趋庞大<sup>[1]</sup>。配网线路多穿越植被茂盛的林区,加之配网线路架设高度低,极易受外部因素(如大风、雷击等)的影响,导致架空线路和较高的树木树枝接触引发放电,构成单相触树接地故障(tree-contact single-phase-to-ground fault, TSF),对电网的稳定运行造成极大危害<sup>[2-6]</sup>。

针对 TSF 的故障特性,国内外的学者已经进行了相对详尽的研究。文献[7]在 12.5 kV 三相输电线路上用树枝模拟单相触树接地故障,获得故障时的图像、声音、电压梯度和泄漏电流等信息。文献[8]利用稀疏编码技术提取 TSF 中的高频特征可用于故障检测。文献[9]通过分析得到了故障电流随炭化程度增加而增大。文献[10]根据树木的引燃过程,将故障发展分为了电弧形成、炭化通道形成、水分析出、剧烈燃烧四个阶段。文献[11]通过红外成像仪对实验过程中典型阶段的树木截面温度进行了采集,证实了树木温度会影响 TSF 过程中树木电阻率。文献[12]通过观察树线放电实验现象,分析了植被温升机理,并结合实验数据建立 TSF 引燃植被预测模型。

文献[13]测出新鲜树枝与导线的接触电阻在 MΩ 量级,这表明 TSF 早期故障电流较小、电气信号微弱,难以被及时检测并切除<sup>[14-17]</sup>。因此开展 TSF 相关的仿真研究,建立适用性高的 TSF 过渡电阻模型,有助于对不同条件下的树枝在故障发展过程中的特征量进行提取,有助于提高对 TSF 监测与识别的准确率与时效性<sup>[18-22]</sup>。在早期的仿真研究中,多将 TSF 归类于高阻接地故障(HIF, high-impedance fault)进行仿真,大多 HIF 模型也是基于文献[23-25]电弧模型进行构建并修正。除基于电弧的模型外,文献[26]提出了一种基于固体介质击穿原理的非线性电阻模型,使得仿真结果可以较好地模拟出故障发生过程中的电流电压波形。文献[13]建立了 TSF 等效电阻模型,并采用木槿和白蜡树作为实验对象验证了该模型的准确性。

现有研究表明,树木温度和含水率是影响 TSF 发展的重要因素。而现有仿真模型大多从树木自身参数(长度、直径等)和故障的电气特性出发,它们依赖于主观得到的经验参数,忽略了温度尤其是

树木含水率对 TSF 的影响。现有 TSF 过渡电阻模型对树木含水率考虑的较少,因此建立对应的等效模型,探究树木含水率对故障发展过程的影响是十分必要的。

针对上述问题,以树木自身的物理参数为核心,建立了反应 TSF 过渡电阻变化趋势的等效电阻模型。模型基于故障发展过程中树枝电阻率随温度的变化,考虑了温度和含水率对 TSF 过渡电阻变化过程的影响。同时本文还搭建了 10 kV 架空导线单相触树模拟试验平台,以自然生长的松树为实验对象,开展了 TSF 实验。实验结果和仿真结果拟合效果较好,改进后的模型为进一步厘清故障发展的机理提供参考依据。

## 1 TSF 过渡电阻构成分析

当 TSF 发生时,其涉及的物理和化学反应十分复杂,导致其等效而来的过渡电阻也较为复杂。而对于不同的接地情形,TSF 的过渡电阻模型有所不同。本文主要针对树枝侧面搭靠在线路的故障情形进行讨论,基于现有研究,该情形下 TSF 过渡电阻主要由接触面电阻  $R_s$ 、电弧电阻  $R_{arc}$  和树木电阻  $R_V$  三部分组成<sup>[10,13]</sup>。

### 1.1 接触面电阻 $R_s$

由于树木表面不光滑,和线路接触时会产生接触面电阻。文献[13]测量新鲜树枝的接触面电阻,约为  $10^5 \Omega \sim 10^6 \Omega$ ,由此可见,在故障初期,TSF 的过渡电阻主要为接触面电阻  $R_s$ 。接触面电阻一般可以分为收缩电阻  $R_j$  和表面膜电阻  $R_b$  两部分电阻。

收缩电阻  $R_j$  主要是物体表面本身粗糙,导致物体之间相互接触时表面无法完全贴合,而仅有部分表面相互接触。电流通过这些相互接触的表面流过,这些接触的位置称为“导电斑”。由于电流仅通过“导电斑”流通,等同于电流通过的横截面积发生了收缩,因此称其为收缩电阻<sup>[27]</sup>。

表面膜电阻  $R_b$  一般是指电流流过时在金属表面上会生成一层导电性差的薄膜物质所导致的电阻。对于树木和线路接触的情形,植被表皮本身是一种导电性较差的物质,且在树木表面会覆盖灰尘、污渍等,成分十分复杂,因此 TSF 的接触面电阻中也包含表面膜电阻。

理论上可以通过式(1)计算接触电阻<sup>[10]</sup>:

$$R_s = R_j + R_b = \frac{\rho}{2na_p} + \frac{\sigma}{\pi na_p^2} \quad (1)$$

式中： $\rho$  为材料电导率； $\sigma$  为膜的隧道电阻率； $a_p$  为接触点平均接触半径； $n$  为导电斑点数目。需要指出的是，导电斑点数和平均接触半径较难测量，故难以直接通过式(1)直接计算接触面电阻。而在文献[13]所提出的故障模型中，作者通过引入接触电阻  $R_{con}$  进而忽略了接触面电阻  $R_s$ ，主要原因在于其研究的 TSF 为树木主干与线路直接接触的情形。该情形下，树木直径较大，树干截面远大于电弧接触面，因此引入接触电阻  $R_{con}$ ，用于描述电流由电弧接触位置扩散至均匀分布于整个树干截面的过程。本文主要研究树枝侧面搭接于线路的故障情形，故只考虑接触电阻  $R_{con}$ 。

### 1.2 电弧电阻 $R_{arc}$

随着 TSF 的发展，线路和树枝之间会产生明显的放电现象，此时在线路和树木之间出现电弧通道，电流主要通过电弧进入树枝。此时接触面电阻  $R_s$  可以视为与电弧电阻  $R_{arc}$  并联，由于  $R_s \gg R_{arc}$ ，一般忽略接触面电阻。电弧作为一种复杂的物理现象，关于电弧电阻的模型已有大量相关研究<sup>[27-31]</sup>。对于树线放电的电弧电阻模型，在相关文献中都已经详细介绍，此处不再赘述。

### 1.3 树木电阻 $R_v$

当 TSF 发生时，故障电流经树木入地。树木等效电阻  $R_v$  表征的便是这部分由植被本身等效而来的电阻，它的大小和树木自身的物理参数（长度、直径等）息息相关。一般而言，树枝直径和树木电阻成负相关关系，而树木长度与树木电阻成正相关关系。除此之外，树木电阻  $R_v$  的初始值以及变化速率还受树枝温度、含水率的影响。

## 2 TSF 实验及仿真

### 2.1 TSF 仿真模型设置

由上述分析可知，TSF 过渡电阻可视作由电弧电阻  $R_{arc}$ 、接触电阻  $R_{con}$  以及树木电阻  $R_v$  三部分串联组成。其中树木电阻  $R_v$  可通过式(2)、式(3)计算。其中， $\rho(T)$  为文献[13]通过实验得到的树木等效电阻率随时间变化的函数， $k_m$  为电阻修正系数， $k_A$  为与材料相关的常数。

$$R_v = \rho(T) \cdot h/S \quad (2)$$

$$\rho(T) = \rho_0 (k_m e^{k_A/T - k_A/T_0} + 1 - k_m) \quad (3)$$

接触电阻  $R_{con}$  可通过式(4)计算得到，其中中间值  $M$ 、 $u_e$  和  $E_{bk}$  可通过式(5)~式(7)计算。

$$R_{con} = \frac{\rho_T M}{2\pi \sqrt{1 + \frac{M|u_e|}{E_{bk}}}} - \frac{\rho_T}{2\pi r_i} \quad (4)$$

$$M = \frac{2\pi R_V}{\rho_T} - \frac{1}{r_i} \quad (5)$$

$$u_e = u_s - u_{arc} \quad (6)$$

$$E_{bk} = \begin{cases} E_{bkp}, & u_s > 0 \\ E_{bkn}, & u_s < 0 \end{cases} \quad (7)$$

由于接触点附近的高温区域很小且木材的热导率较低，局部的高温难以影响树干其他主体区域，因此仅将树干主体部分的输入热功率  $P_i(t)$  作为流入树木的热功率，可由式(8)计算。

$$P_i(t) = i_r^2(t) R_V(t) \quad (8)$$

当前时刻树线故障的故障电流  $i_r(t)$  可由式(9)、式(10)计算得出。

$$i_r(t) = \frac{u_b(t)}{R_V(t) + R_{con}(t)} \quad (9)$$

$$|u_b| = |u_s| - E_{bk} r_{bk} \quad (10)$$

根据文献[32]得到的木材导热系数的方程，可以通过树木自身的横纹导热系数与径向导热系数计算流出功率  $P_b(t)$ 。

$$P_b(t) = \lambda_r r (T_s - T_c) + \lambda_z h (T_s - T_c) \quad (11)$$

其中，木材导热系数是树木孔隙率  $V_x$  的函数，而  $V_x$  取决于树木的密度与含水率，因此树木的导热系数可以视作树木密度与含水率的二元复合函数，根据式(12)~式(14)计算出树枝导热系数。

$$V_x = 1 - \rho(0.6536 + 0.3464w) \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

$$\lambda_r = 0.0184 + \frac{0.3047}{\sqrt{V_x}} - \frac{0.2902 \cdot \sqrt{V_x}}{1 + 0.3805 \cdot \sqrt{V_x}} \quad (13)$$

$$\lambda_z = 0.1978 - \frac{0.1789 \cdot \sqrt{V_x}}{1 - 1.4547 \cdot \sqrt{V_x} + 0.9047 \cdot V_x} \quad (14)$$

假定环境温度恒定，树干初始温度等于环境温度且树干温度分布均匀。则根据上述计算得到的流入树木的热功率  $P_i(t)$  和流出树木的热功率  $P_b(t)$  通过式(15)就可计算出任意时刻树木的温升速度。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_i(t) - P_b(t)}{C_w \rho_w V_w} \quad (15)$$

模型中，通过比热容  $C_w$  反映不同含水率的树枝在不同温度下的温升速度，文献[32]通过实验得到了木材比热容随温度与含水率变化的方程(16)，本文根据他们的实验结果，在模型中通过比热容  $C_w$  反映不同含水率的树枝在不同温度下的温升速度。其中， $m$  为树木鲜重， $m_c$  为树木干重， $w$  为相对含水率。

$$C_w = \frac{1.271.27 + 6.714(T - 273)}{1 + w} \quad (16)$$

$$w = \frac{(m - m_G)}{m_G} \times 100\% \quad (17)$$

式(2)~式(17)构成了考虑含水率的 TSF 过渡电阻模型,通过不断迭代即可求得任意时刻下的过渡电阻值。

### 2.2 TSF 模拟实验设计

10 kV 配网 TSF 模拟实验平台如图 1 所示。实验平台所用的 10 kV 电压由 380 V 电源进线经升压

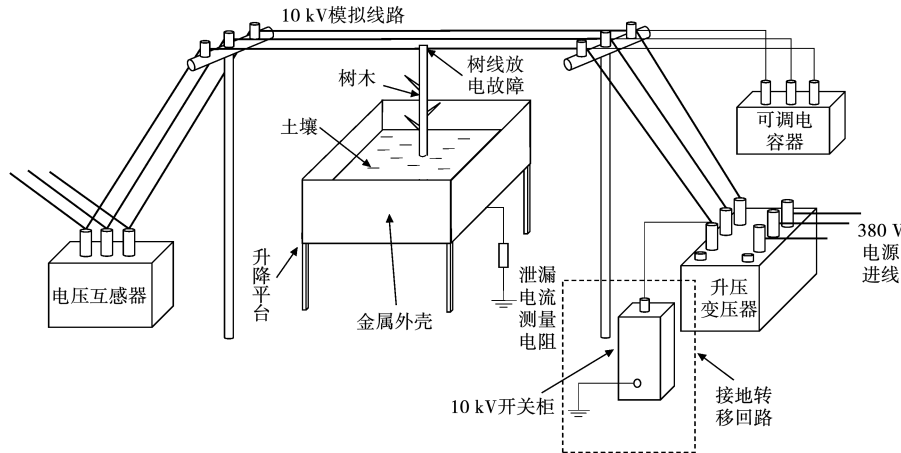


图 1 TSF 模拟实验平台

Fig. 1 TSF simulation experiment platform

实验过程中通过电压互感器得到相电压,故障点泄漏电流经  $1 \Omega$  无感采样电阻入地,通过电压探头测量电压,并将电压信号接入示波器,根据欧姆定律即可得到泄漏电流瞬时值波形,利用式(18)计算即可得到泄漏电流有效值。试验所用示波器为 Pico 4824D,采样频率为 5 kHz。式中采样周期  $T$  为  $0.0002 \text{ s}$ ,  $i(t)$  为泄露电流瞬时值。

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{(t)}^2 dt} \quad (18)$$

实验中树枝的过渡电阻可由式(19)计算得到,式中  $U_p$  表示故障相电压有效值,  $I_f$  表示泄漏电流有效值。树枝的温度采用红外摄像机进行记录。

$$R_{\text{tree}} = \frac{U_p}{I_f} \quad (19)$$

在全国范围内,松树所占森林总面积为 15% 左右,而在云南地区该比例更是高达 30%。因此实验选取不同物理参数的松树树枝作为实验对象,同时为避免树枝枝叶搭接至其他相形成相间短路,且为方便观察,将树枝多余的枝叶剪去。测量得到的实验树枝参数如表 1 所示。搭建好如图 1 所示的实验平台,实验开始前将树枝一端搭接至线路,另一端埋入升降平台的土壤中,接通电源,开始实验,利用

变压器得到,变压器接线方式为 YNyn0 型,中性点悬空。三相配电线路采用型号为 LGJ-120 的钢芯铝绞线。为模拟真实故障情形,将土壤装入升降平台并插入树枝模拟树线放电故障。为模拟实际长距离配电线路的电容电流情况,在线路首端接入可调电容器,通过控制不同电容器的投切,即可控制线路对地容性电流。

故障录波设备记录线路三相电压和零序电流。在出现明火前停止实验,单次试验时长不超过 50 s。试验结束后,重新选取树枝,保持实验条件不变,重复上述步骤。

表 1 实验树枝参数

Tab. 1 Experimental branch parameters

编号	种类	长度/m	直径/mm	干重/g	鲜重/g	含水率/%
1	松树	0.95	26.04	9.47	15.86	40.29
2	松树	0.83	24.33	7.61	12.95	41.24
3	松树	0.72	17.16	2.67	5.78	53.81
4	松树	0.75	22.34	9.20	16.46	44.11
5	松树	0.72	26.54	8.74	15.58	43.90
6	松树	0.72	11.70	2.85	5.09	44.01

### 3 结果与分析

#### 3.1 典型实验结果

首先,不失一般性,选取树枝 4 作为参考案例,说明配网单相触树故障的基本物理过程。实验中的典型实验现象如图 2(a)所示。由图可知,在树线搭接初期,未观察到明显的实验现象,到第 9 s 左右,搭接位置开始产生稀薄的烟雾;当搭接时间到 12 s 时,能够观察到树线接触位置有零星的火花,烟雾增多;此后一直到 40 s 左右,这个过程中烟雾逐

渐变得浓密,并且能够观察到部分水汽以喷射状的形态从树干中喷出,伴随“滋滋”声响;烟雾浓度在 40 s 附近达到峰值,随后逐渐消散;到 49 s 时,树线接触位置出现持续性的明火,意味着树枝已经被放电点燃。

触树故障演变过程中的泄漏电流和过渡电阻的波形如图 3 所示。在实验初期,泄漏电流(有效值)约为 0.08 A,此时树木还保持良好的绝缘(过渡电阻 70 k $\Omega$ ),泄漏电流主要通过树枝中的水通道传播;但此时,由于树木纤维的阻挡和隔断,电流通道比较少,因此泄漏电流幅值低。随着搭接时间增加,电流的热效应累积,树干中包含的大量水分被

蒸发,向蒸气压较低的树干表层(即树干与树皮的夹层)、以及组织疏松的树皮等位置运输<sup>[10]</sup>;虽然部分水汽会以图 2 所示的喷射形式离开树枝,但仍有水汽会凝结在树干表层上,从而在表层上形成电流通道,导致泄漏电流增加(最高至 0.42 A)、过渡电阻降低(17 k $\Omega$ )。我们认为电流主要通过树干表层传播的一个证据是,树枝表面会出现由搭接处指向接地方向的炭化通道,该炭化通道只存在于表层和树皮部分,如图 2 所示。由于树皮的结构疏松、含水量低,传导电流的能力有限,但着火点要低于树干,因此可以合理推断:是表层的电流热效应导致表层和树皮出现了炭化现象。

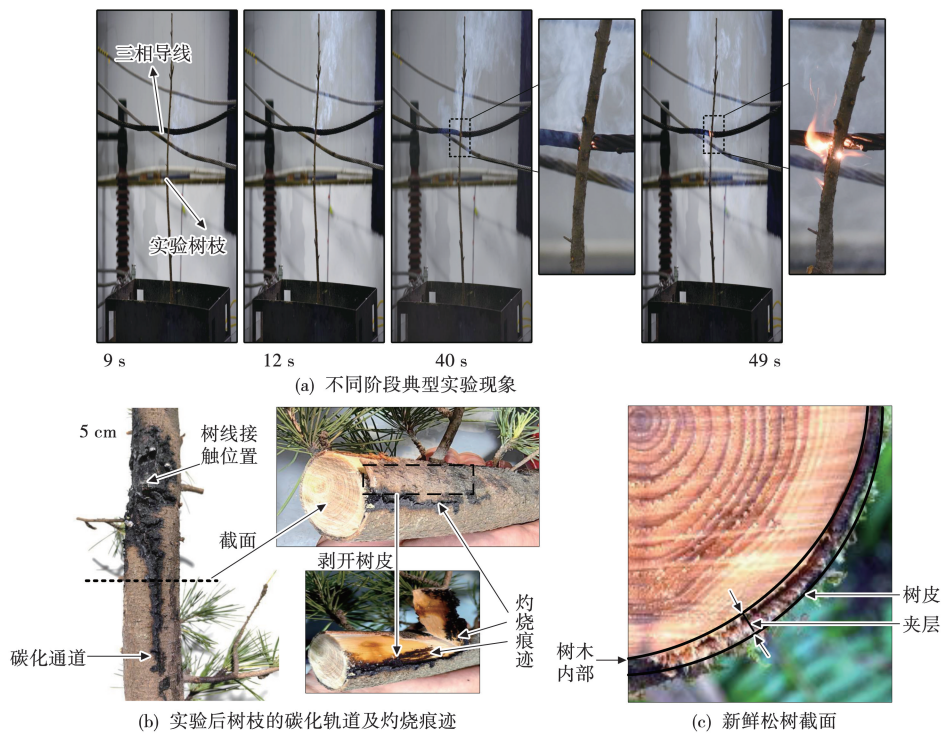


图 2 TSF 典型实验现象  
Fig. 2 Typical experimental phenomena of TSF

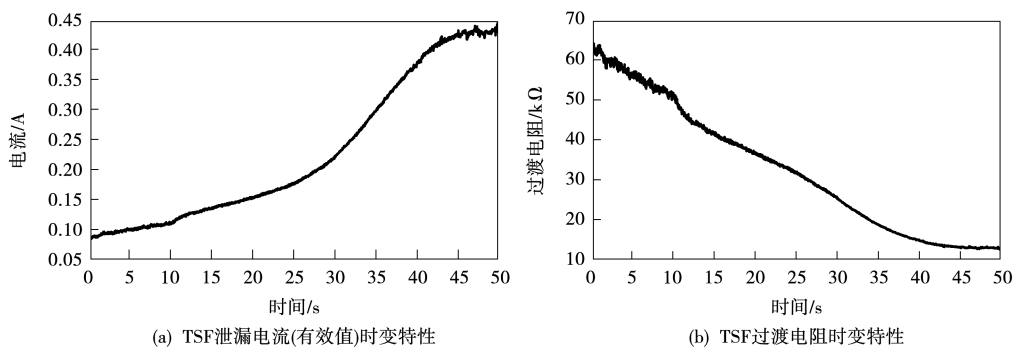


图 3 TSF 发展过程中泄漏电流和过渡电阻的时变特性

Fig. 3 Time-varying characteristics of leakage current and transition resistance in the process of TSF development

需要特别指出的是,由于实验平台的安全防护措施,文章的实验在出现明火后即停止,因此泄漏电流呈现出单调递增的趋势;但实际上,随着电流持续加热导致水汽蒸发和树木炭化,最终泄漏电流将降低、而过渡电阻回升。

为了进一步探究 TSF 的物理过程,用红外摄影仪拍摄了树枝和导线的表面温度,在两个典型时刻(12 s 和 40 s,对应于图 2 中 TSF 的两个发展阶段)的温度分布如图 4 所示。12 s 时,树线接触位置附近温度最高,最高温度约为 65 °C,树皮在大量电荷的作用下逐渐热解变成细小的固体颗粒、焦油和气体,一部分凝聚成气溶胶即实验中观察到的白色烟雾<sup>[33]</sup>;40 s 时,树线接触位置附近温度最高,最高温度约为 346 °C,该温度已达树枝燃点,树线接触位置处有不稳定的燃烧现象,树枝各部位温度大都在 80 °C 以上,接近水的沸点,树枝温度的升高加速了树枝内部水分沸腾变成水蒸气的进程。

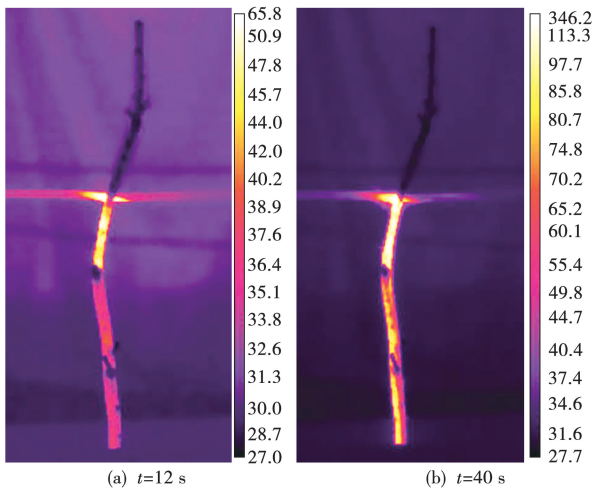


图 4 TSF 过程中典型时刻红外图像  
Fig. 4 Infrared images at typical moments during the TSF process

为了进一步探究 TSF 发展过程中树枝的整体加热情况,计算了树枝轴向的平均温度,其计算方式和时变结果如图 5 所示。由图可知,树枝平均温度先增大后减小,实验开始树枝的初始平均温度约为 23 °C,到 40 s 时平均温度达到最大值 120 °C 左右,随后开始下降。结合前文分析可知,0 ~ 40 s 这个过程中由于电流热效应积攒的热量储存在树枝内部和表皮,导致测量到的树枝温度逐渐升高;而 40 s 之后树枝平均温度超过了水的沸点,树枝内部的水分会大量蒸发。40 s 之后树枝平均温度下降的原因可能是水分大量蒸发从炭化缺口喷出带走树

枝大量热量导致的。

从上述实验现象不难看出,受到电流热效应的影响,树枝内部的含水率会发生变化。又由于泄漏电流流经树木时会优先选择含水率最高的路径,则由树枝温度升高导致的树枝内部含水率变化会影响泄漏电流流路径,进而会导致树木过渡电阻的变化<sup>[11]</sup>。因此,在建立 TSF 模型时考虑含水率的影响是十分有必要的。

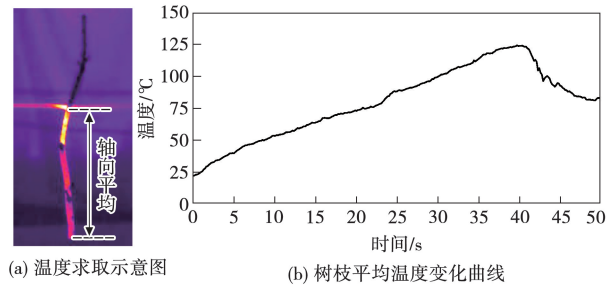


图 5 TSF 过程中树枝平均温度

Fig. 5 Average branch temperature during TSF process

### 3.2 仿真结果

TSF 过程中树木过渡电阻实验与仿真拟合曲线及相对误差曲线如图 6 所示,其中相对误差利用式(20)计算得到。

$$E = \frac{|R_{\text{实验}} - R_{\text{仿真}}|}{R_{\text{实验}}} \times 100\% \quad (20)$$

由图 6 可知,设计的 TSF 仿真模型与实验所得的过渡电阻匹配度整体比较高,其最大相对误差为 25%,相对误差平均值在 10% 左右。在整个实验过程中,模型与实验的匹配度实现了两次先降低又升高的变化趋势。其原因是:实验初期(0 ~ 12 s)随着放电的进行,树皮在电荷的作用下逐渐热解形成炭化缺口,大量电荷通过缺口注入树枝内部、以树枝中的水通道进行传播,进而逐渐形成稳定的电流通路,泄漏电流增大,过渡电阻逐渐下降,下降过程中模型匹配度有所降低,相对误差逐渐升高达到最大值 14% 后迅速下降到 7%。反映到实验过渡电阻曲线上,过渡电阻在该时刻(9 s 左右)急剧下降,可能从该时刻开始泄漏电流的通路开始发生变化。随着实验的进行(12 s ~ 40 s),过渡电阻继续下降,模型匹配度先缓慢降低后急剧升高然后再急剧降低,相对误差从 7% 缓慢升高到 10% 而后快速下降到 0,然后快速升高到最大值 25%。这个过程中泄露电流以树干表层为主要通路,在电流热效应的作用下,树干表层炭化通道逐渐形成,过渡电阻急剧下

降。实验进行到后期(40 s ~ 50 s),过渡电阻几乎保持不变,模型匹配度增大,相对误差减小。原因可能是该过程中树枝水分大量蒸发导致的树枝电导率下降和炭化通道发展导致的电导率升高达到短暂的平衡,进而导致过渡电阻几乎保持不变<sup>[10]</sup>。

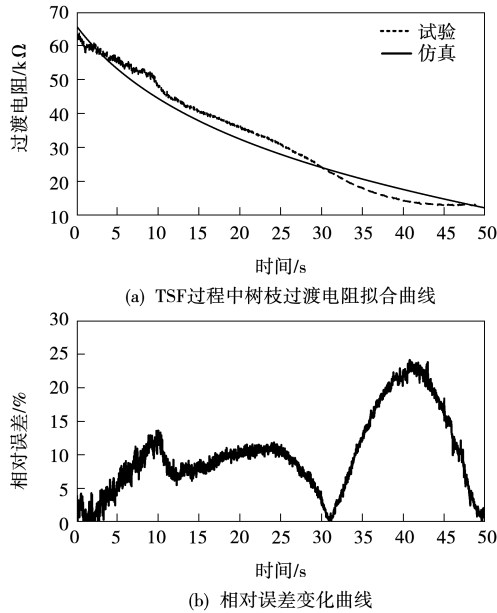


图 6 TSF 过程中树枝过渡电阻实验与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental and simulation results of branch transition resistance in TSF process

### 3.3 树枝温度对 TSF 过渡电阻的影响

由前文分析可知,树枝温度在 TSF 过程中扮演着至关重要的角色,它和故障过程中过渡电阻的变化息息相关。

为了进一步探明树枝温度的变化对过渡电阻的影响,如图 7 展示了树枝 2 平均温度和过渡电阻变化关系。相较于树枝 4,在实验过程中树枝 2 的温度一直呈现出上升趋势,并没有出现与树枝 4 类似的情形-即温度升高到一定值后开始下降。反映到过渡电阻曲线上,树枝 2 的过渡电阻一直呈现出平滑下降的趋势。而树枝 4 的温度在 40 s 左右到达最大值后开始下降,其过渡电阻对应的出现了平台期,下降速率显著减缓。产生上述现象的原因可能是树枝 4 的故障发展更快,树枝 2 在 50 s 时过渡电阻下降到 25 kΩ 左右,树枝平均温度为 55 °C 左右,而树枝 4 在 25 s 左右过渡电阻即达到上述水平,对应树枝平均温度为 75 °C。推测如果树枝 2 故障继续发展,其树枝过渡电阻和平均温度的变化趋势会与树枝 4 类似。由此可见,树枝温度的变化不

仅是 TSF 发展的结果,反过来又影响着故障发展的进程。

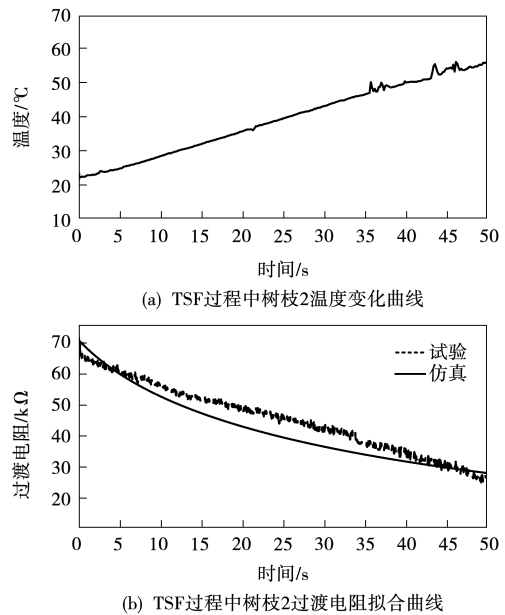


图 7 TSF 过程中树枝 2 实验结果

Fig. 7 Results of branch 2 experiment in TSF process

在整个过程中,故障初期树枝温度低,模型匹配度高,随着 TSF 的发展,树枝温度逐渐升高,树枝内部含水率开始改变,泄漏电流通路发生变化,过渡电阻迅速下降,模型匹配度有所降低;随着后续 TSF 的发展,树枝温度继续升高,树枝炭化通道逐步发展,过渡电阻继续下降,模型的匹配度有所提高。以树枝 2 为例,在实验初期相对误差较小,随后故障迅速发展,模型的匹配度先降低后升高。

### 3.4 含水率对 TSF 过渡电阻的影响

如图 8 展示了不同树枝过渡电阻实验与仿真结果及过渡电阻变化率。结合图 6(a)和图 7(b)可知,不同树枝初始过渡电阻的大小略有不同。具体而言,树枝 1、树枝 2、树枝 4 的初始过渡电阻分别为 85 kΩ、70 kΩ、70 kΩ,差距并不大;而树枝 3 的初始过渡电阻为 120 kΩ,比前面三根树枝的初始过渡电阻大得多。产生上述差异的原因主要是由于树枝直径的不同。即便不同树枝的初始过渡电阻存在着差异,但是它们过渡电阻的整体变化趋势都类似—呈单调下降趋势。

为进一步探明树枝含水率对 TSF 过程中树枝过渡电阻的影响,现分析不同树枝故障发展过程中过渡电阻变化的剧烈程度。为便于分析,本文计算了 TSF 过程中不同树枝过渡电阻的变化率。对比图 8(c)中树枝 4 和树枝 6 过渡电阻变化率曲线可

知,当树枝含水率和长度接近时,树枝过渡电阻变化率曲线十分接近,说明树枝半径的改变几乎不影响过渡电阻变化率;对比图 8(c)中树枝 1 和树枝 5 过渡电阻变化率曲线可知,在树枝含水率和半径接近时,树枝过渡电阻变化率曲线差异很小,说明树枝长度的变化对过渡电阻变化率的影响很小;对比图 8(c)中树枝 1、树枝 3 和树枝 4 过渡电阻变化率曲线可知,当树枝含水率升高时,过渡电阻变化率的绝对值越大,过渡电阻变化越快。

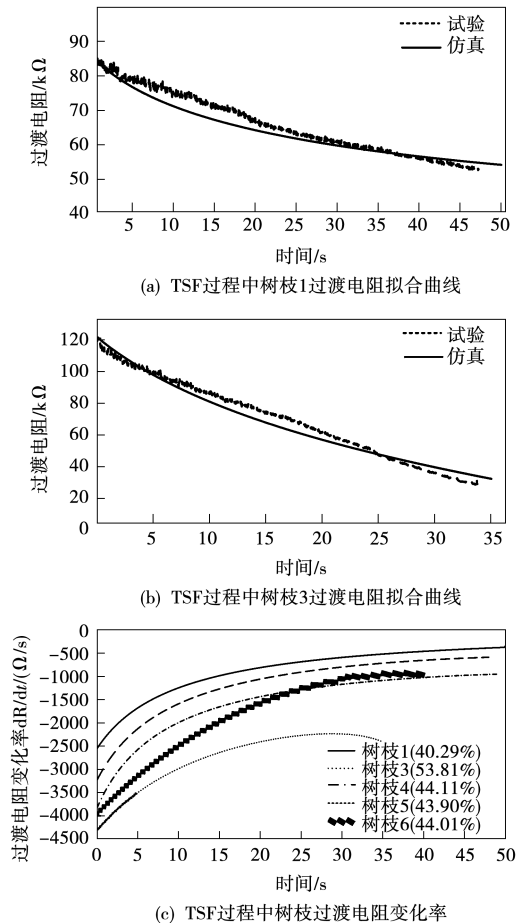


图 8 不同树枝实验与仿真结果

Fig. 8 Experimental and simulation results of different branches

基于上述分析可以得出:树枝的长度和半径几乎不影响过渡电阻变化的速度;而树枝含水率越高,树枝过渡电阻变化越快,故障发展的越剧烈。导致上述现象的原因可能是含水率较高时,树枝内部电流通道越多,内部放电更加剧烈,故障发展更加迅速,过渡电阻下降的更快;而当含水率较低时,导致植被电导率低,放电电流小,故障发展缓慢,过渡电阻下降的更慢。

#### 4 结 论

探究了不同物理参数下树枝 TSF 的发展过程,通过 TSF 模拟实验研究了故障初期泄漏电流以及树枝平均温度变化过程,得到了过渡电阻随故障发展的变化曲线。另外结合树枝等效电阻率随温度的变化方程,最终建立了计及含水率的 TSF 过渡电阻变化模型,得到了以下结论:

1) 考虑了树枝温度和含水率的 TSF 过渡电阻模型仿真结果与实验结果最大相对误差为 25%、平均相对误差小于 10%,对于不同条件下的树枝均能实现较好的匹配效果,为进一步厘清 TSF 发展机理提供了理论基础;

2) 树枝温度变化是 TSF 发展的结果,电流热效应导致树枝升温从而影响树枝内部含水率的分布,反过来影响泄漏电流流通过程,进而影响炭化通道的形成;

3) TSF 过程中的电流热效应和炭化通道发展是导致 TSF 过程中树枝过渡电阻变化的主要原因,其过渡电阻可由初始的 100 kΩ 量级下降到 10 kΩ 量级;

4) 树木含水率是影响 TSF 发展的重要因素。含水率较高时(如 53.81%),树木内部放电更易进行,故障发展更加迅速;降低含水率导致树木电导率降低,放电电流小,故障发展缓慢。

#### 参 考 文 献

[1] 吴勇军, 薛禹胜, 陆佳政, 等. 山火灾害对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 14-20.  
WU Yongjun, XU Yusheng, LU Jiazheng, et al. Space-time impact of forest fire on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 14-20.

[2] 梁海平, 石皓岩, 王铁强, 等. 考虑韧性提升的输电网灾前预防检修多目标多阶段优化[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 130-137.  
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Tieqiang, et al. Multi-objective and multi-stage optimization of pre-disaster preventive maintenance of transmission network considering resilience improvement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 130-137.

[3] 王晖南, 高强, 胡非, 等. 基于高斯过程回归的中压配电网雷击过电压预测方法[J]. 电瓷避雷器, 2024(1): 19-28.  
WANG Huinan, GAO Qiang, HU Fei, et al. Prediction method of lightning overvoltage in medium voltagedistribution network based on gaussian process regression[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1): 19-28.

[4] 杨明浩, 胡上茂, 姜志鹏, 等. 考虑全雷击过程架空配

- 电线路防雷性能计算分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(2): 19-26.
- YANG Minghao, HU Shangmao, JIANG Zhipeng, et al. Calculation and analysis of lightning protection performance of overhead distribution lines considering full lightning strike process[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2): 19-26.
- [5] 张刚, 戴建强, 谢强, 等. 服役输电线路风致响应及寿命预测分析[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 200-209.
- ZHANG Gang, DAI Jianqiang, XIE Qiang, et al. Wind induced responses and life prediction analysis of transmission line in service[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 200-209.
- [6] 曾超, 喻锟, 曾祥君, 等. 并联阻谐振接地系统对地参数测量与高阻故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 67-76.
- ZENG Chao, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A new method for measuring ground parameters and selecting high resistance fault lines in parallel damping resonant grounding systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 52(4): 67-76.
- [7] BUTLER K, RUSSELL B, 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 Conference Proceedings (Cat No 99CH36364), F, 1999.
- [8] GOMES D P S, OZANSOY C, ULHAQ A. Vegetation high-impedance faults' high-frequency signatures via sparse coding[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 5233-5242.
- [9] WISCHKAEMPER J A, BENNER C L, RUSSELL 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: 1-8.
- [10] 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.
- [11] 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[2024-04-02].
- 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[2024-04-02].
- [12] 宁鑫, 何鑫, 王军, 等. 单相触树接地故障引燃特性及模型分析[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(8): 1046-1051.
- NING Xin, HE Xin, WANG Jun, et al. Ignition characteristics and model analysis of single-phase tree-contact grounding faults[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(8): 1046-1051.
- [13] 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 10kv overhead lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5221-5232.
- [14] 廖德辉, 金鑫, 田君杨, 等. 灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 90-97.
- LIAO Dehui, JIN Xin, TIAN Junyang, et al. Analysis of the entire process characteristics of single phase-to-ground faults in flexible grounded distribution networks[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 90-97.
- [15] 徐延海. 基于 GAN 的通信网络故障检测与诊断方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(4): 67-70, 146.
- XU Yanhai. Fault detection and diagnosis method of communication network based on GAN[J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(4): 67-70, 146.
- [16] 黄见虹, 翟博龙, 宋福海, 等. 基于故障时刻自同步的波形比较式多端配电网快速保护方案[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 79-86, 100.
- HUANG Jianhong, ZHAI Bolong, SONG Fuhai, et al. Waveform comparison-based fast protection scheme for multi-terminal distribution network based on self-synchronization with fault moments[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 79-86, 100.
- [17] 王晓卫, 岳阳, 郭亮, 等. 注入电流分布特性辨识的配电网故障选线方法[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 78-89.
- WANG Xiaowei, YUE Yang, GUO Liang, et al. Injection current distribution characteristics identification based distributionlevel fault line selection[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 78-89.
- [18] 张龙, 沈飞, 李林林, 等. 基于神经网络自适应滤波器的数字化电能计量故障检测方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(4): 47-50, 176.
- ZHANG Long, SHEN Fei, LI Linlin, et al. Fault detection method of digital electric energy metering based on neural network adaptive filter[J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(4): 47-50, 176.
- [19] 袁兆祥, 张翼, 聂铭, 等. 分布式新能源接入的 10 kV 配电网保护适应性分析[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 49-57.
- YUAN Zhaoxiang, ZHANG Yi, LIE Min, et al. Protection adaptability analysis of distributed generation connected to 10 kv distribution network[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 49-57.
- [20] 马继洋, 蔡永翔, 唐巍, 等. 考虑 EV 参与韧性提升的配电网状态平滑切换控制策略[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 90-97.
- MA Jiyang, CAI Yongxiang, TANG Wei, et al. EV partic-

- ipates in the state smooth switching strategy of distribution network with improved toughness[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 90-97.
- [21] 胡满琳, 李楠, 李一鸣, 等. 基于负序分量的含光伏电站配电网故障区段定位方法[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 188-199.
- HU Manlin, LI Nan, LI Yiming, et al. Fault location method for distribution network with photovoltaic power based on negative sequence component[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 188-199.
- [22] 黄代雄, 汪志军, 袁俑斌, 等. 考虑多源协同的主动配电网故障恢复策略[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 210-215, 222.
- HUANG Daixiong, WANG Zhijun, YUAN Yongbin, et al. Fault recovery strategy considering multi-source collaborative active distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 210-215, 222.
- [23] MAYR O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens[J]. Archiv für Elektrotechnik, 1943(37): 588-608.
- [24] 梅广, 季天瑶, 陈嘉伟, 等. 基于数学形态学和沃尔什变换的配电网高阻接地故障检测[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 10-23.
- MEI Guang, JI Tianyao, CHEN Jiawei, et al. High impedance grounding fault detection for distribution network based on mathematical morphology and walsh transform[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 10-23.
- [25] 许守东, 欧阳金鑫, 陈宇捷, 等. 基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 51-60.
- WEI Mingjie, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Identification of arcing ground faults in distribution networks based on harmonic energy and waveform distortion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 148-154.
- [26] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 基于介质击穿原理的配电网线路高阻接地故障精确建模[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 62-67, 106.
- WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou, et al. High-impedance fault modeling based on solid dielectric breakdown theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 62-67, 106.
- [27] 孙海峰, 沈颖, 王亚楠. 基于遗传算法优化BP神经网络的接触电阻预测[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 77-83.
- SUN Haifeng, SHEN Ying, WANG Yanan. Prediction of contact resistance based on optimized BP neural network of genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 77-83.
- [28] 岳嵩, 常伟, 李畅, 等. 考虑接触电阻的耐张线夹引流板发热故障检测[J]. 电力电子技术, 2022, 56(2): 59-61, 96.
- YUE Song, CHANG Wei, LI Chang, et al. Heating fault detection of strain clamp drainage plate considering contact resistance[J]. Power Electronics, 2022, 56(2): 59-61, 96.
- [29] 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 single-phase grounding arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [30] 郭敏, 郭小璇, 吴宁, 等. 基于多特征融合和随机森林的串联电弧故障检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 104-112.
- GUO Min, GUO Xiaoxuan, WU Ning, et al. Series arc fault detection method based on multi-feature fusion and random forest[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 104-112.
- [31] 郭敏, 吴宁, 郭小璇, 等. 基于多特征融合和SVM的串联电弧故障检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 137-149.
- GUO Min, WU Ning, GUO Xiaoxuan, et al. Series arc fault detection method based on multi-feature fusion and SVM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 137-149.
- [32] 林铭, 谢拥群, 饶久平, 等. 木材横纹导热系数一种新的表达式的推导及与实测值比较[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 108-112.
- LIN Ming, XIE Yongqun, RAO Jiuping, et al. Derivation of a new expressions for wood transverse thermal conductivity and comparison to experimental value[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(2): 108-112.
- [33] MARTINEZ-CANALES J F, ALVAREZ C, VALERO J V. A review of the incidence of medium and high voltage overhead electric power lines in causing forest fires[C]. Proceedings of the 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Birmingham: IET, 1997: 27/1-27/5.

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-08-06

作者简介:

何建波(1992—),男,工程师,研究方向为配电网线路防灾减灾、智能配电、数字配电在线监测技术。

E-mail:18895899212@163.com

周瑶(1993—),女,工程师,研究方向为数字配电在线监测技术、配电自动化技术。E-mail:18213291295@163.com

宁文军(1987—),男,通信作者,博士,副研究员,博士生导师,研究方向为气体放电低温等离子体、电气设备状态监测与故障诊断。E-mail:ningwj@scu.edu.cn

(编辑 杜景飞)