

植被火焰全桥接线-板间隙击穿机理

曾毅¹, 王政¹, 杨皓涵¹, 陈天翔¹, 王孟¹, 邵千秋²

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川成都 610059;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都 610041)

摘要:近年来,随着跨林区输配电线日益增多,由山火引发的输电线路跳闸事故也频繁发生,严重影响电网安全稳定运行。目前,针对山火导致高压输电线路对地空气绝缘强度降低的问题,已开展较多实验研究,但未考虑火焰燃烧蔓延至杆塔时,线路绝缘子可能存在的最短绝缘距离问题。为研究植被火焰全桥接线-板短间隙条件下的空气击穿机理,文中开展不同植被燃烧条件下线-板间隙击穿特性实验,分析火焰中泄漏电流和击穿电压之间的相位差,并探讨植被火焰条件下间隙的击穿机理。实验测量了不同植被火焰间隙的击穿电压和平均击穿场强。结果表明:增大间隙距离可降低火焰中的感性成分,使整个线-板间隙呈现电容性;植被火焰条件下的线-板间隙击穿过程是多种放电形式共同作用的结果,且击穿时电弧通道的持续时长差别较大;击穿电压与间隙距离呈线性关系。由于稻草植被灰分含量高、结构松散,燃烧时产生的长灰烬颗粒对间隙电场具有较强桥接与畸变作用,导致间隙在稻草火焰条件下的平均击穿场强最小。

关键词:山火;绝缘距离;空气间隙;相位差;击穿机理;击穿电压

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)06-0193-09

0 引言

近年来,随着跨林区输配电线日益增多,山火引发的输电线路跳闸事故也频繁发生,严重威胁电网的安全运行^[1-5]。当山火发生在输电线路下方时,会显著降低输电线路周围空气的绝缘强度,导致线路跳闸、大规模停电甚至电网瘫痪等一系列灾难性事件。统计数据显示,人为因素(如焚烧垃圾、上坟祭祀)以及极端天气(如高温、干旱)是导致输电线路走廊山火频发的主要原因^[6-12]。2023年美国夏威夷州遭受了有史以来最严重的山火灾害,火灾烧毁超过2 000 英亩土地,重建成本估计高达55.2亿美元^[13]。在由野火引起的跳闸事故中,高温、强热、烟尘颗粒和漂浮灰烬等因素被视为线路空气间隙绝缘性能急剧下降和闪络的主要原因^[14-16]。根据线路配置和电压等级,跳闸故障类型可分为两大类:相对地放电和相间放电,其中相对地放电约占总跳闸故障的90%^[17]。

为研究跳闸事故发生原因、减少线路跳闸事故发生概率,国内外学者对由山火引发的输电线路跳闸特性进行了大量模拟实验。美国电力研究所对木架(3.0 m×3.0 m×4.9 m)火焰引起的495 kV输电线路闪络进行系统实验,结果表明,当火焰靠近或位于输电线路正下方时,线路会发生闪络^[18]。单纯的烟雾颗粒对输电线路绝缘特性影响较小,通常不

会导致闪络^[19]。ROBLEDO-MARTINEZA等人研究了70 kV输电线路在5种不同植被火作用下受到的影响,提出温度、电离和灰烬流动是导致击穿电压降低的主要原因^[20]。FONSECA J R等人通过甘蔗叶火焰条件下1 m线-线电极和线-板电极间隙的耐受电压实验,提出适用于138~500 kV输电线路在甘蔗火焰条件下的绝缘设计建议^[21]。LANOIE R等人研究450 kV输电线路在桉树火焰条件下的击穿特性,并发现考虑和不考虑桉树高度时,输电线路的平均击穿强度分别为32.8 kV/m和58.4 kV/m^[22]。王振华等人设计了纯乙醇火焰在3种不同间隙条件下的击穿实验,结果表明高温火焰是影响间隙击穿的最主要因素^[23]。以上研究大多基于植被类型或大型实验平台开展,而实际山火条件下输电线路的绝缘特性受到诸多因素影响,情况更为复杂。在山火条件下的间隙放电模型方面,文献[24-26]提出颗粒触发闪络模型、热游离模型、空气密度下降模型和电导率模型等。文献[27-30]提出综合考虑温度、电导率、颗粒与灰烬的三因素放电模型。此外,还有研究探讨海拔高度^[31]、加压方式^[32]、环境风速和坡度梯度^[33]、火焰分区等^[34]因素对放电特性的影响。

综上,尽管已有诸多研究探讨山火条件下输电线路的击穿特性,但大多聚焦于70 kV以上高压线路,分析山火对线路与地面之间空气长间隙绝缘性能的影响,而未考虑火焰燃烧蔓延至杆塔时,线路

绝缘子与接地部分之间存在的最短绝缘距离。实际上,架空线路中最短空气间隙出现在线路绝缘子处。以 10 kV 配电线路常用的柱式绝缘子为例,其绝缘距离为 12.5 cm^[35]。因此,研究短间隙放电特性及其在不同植被火焰环境下的变化规律,对于预防因山火而引发的线路跳闸事故,提升输电线路下方山火早期预警能力,具有重要的实际意义。

1 模拟植被火焰全桥接间隙击穿特性实验

1.1 实验设备及布置

植被火焰全桥接间隙击穿电压特性的实验接线如图 1 所示。实验系统主要包括:模拟山火的植被燃烧平台、导线-板电极、试验变压器(15 kV·A/50 kV)、工频耐压控制平台、耐火燃烧平台、高速摄像机及 pico 故障录波器。

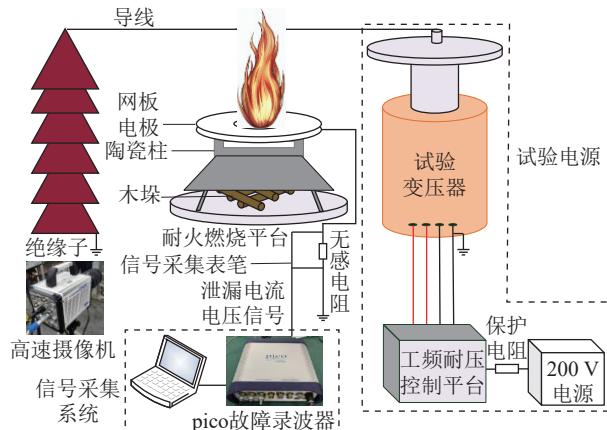


图 1 实验接线
Fig.1 Experimental wiring

试验电源由工频耐压控制平台及试验变压器组成,通过限流保护电阻(20 kΩ)与导线连接,用于限制短路电流,实现系统保护。泄漏电流采集装置由无感电阻(14.7 Ω)和信号采集表笔构成。信号采集系统由故障录波器(采样率 2 GS/s, 带宽 100 MHz)和 pico 软件系统组成,用于实时采集泄漏电流、击穿电压等信号。图 2 为部分实验设备实物。



图 2 部分实验设备实物

Fig.2 Photographs of selected experimental equipment

1.2 电极间距

图 3 为山火燃烧条件下杆塔与导线间最短接地距离的模拟示意。针对火焰引发的输电线路单

相接地短路问题,通过文献研究以及通用规范^[36]可知,当火焰燃烧蔓延到杆塔附近时,线路绝缘子与接地部分之间形成相对地的最短绝缘距离。根据《10 kV~110 kV 交流线路柱式复合绝缘子及棒形悬式复合绝缘子通用技术规范》,10~110 kV 柱式复合绝缘子的最小绝缘距离为 12.5 cm;而 10~35 kV 棒形悬式复合绝缘子的最小绝缘距离为 17.5 cm。文中围绕植被火焰桥接导线与杆塔之间空气间隙的击穿特性开展实验研究,以 5 cm 为间隔设置不同间隙距离,开展不同植被火焰全桥接间隙时的击穿电压特性实验,分析不同植被火焰对击穿特性的影响,并建立间隙距离与击穿电压之间的拟合函数关系。

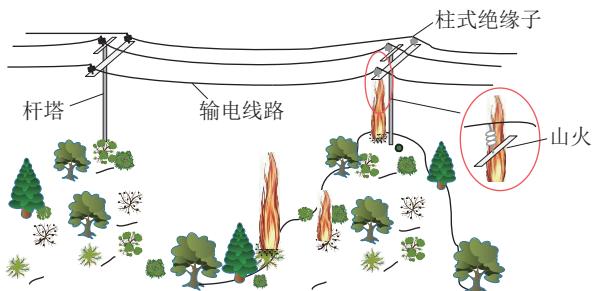


图 3 山火燃烧蔓延至杆塔时线路绝缘子与接地部分之间的最短绝缘距离

Fig.3 Minimum insulation distance between line insulators and grounded components when wildfire spreads to the transmission tower

1.3 实验步骤

为保证实验稳定性和可重复性,稻草、竹子、松树 3 种植被均采用方型垛布置方式^[37],如图 4 所示,且方型垛的尺寸(8 cm×12 cm×12 cm)和初始重量保持一致。

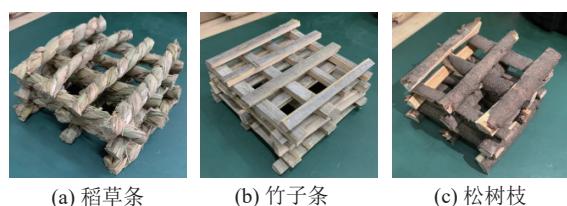


图 4 实验植被布置实物

Fig.4 Photographs of the experimental vegetation arrangement

根据图 1 搭建的实验平台,将燃烧材料按图 4 所示布置于耐火燃烧平台上,线-板电极间距依次设置为 7.5、12.5、17.5、22.5、27.5 cm。图 5 为实验过程中火焰全桥接整个线-板电极间隙示意。当火焰完全桥接间隙时,其内部粒子密度分布趋于均匀,导电性相对一致^[38-39]。为更贴近实际运行工况,文中采用图 5 中的线-板电极结构。使用丁烷喷枪点

燃植被以模拟山火火焰,待火焰全桥接整个间隙后,采用均匀升压法对线-板间隙施加电压,直至间隙发生击穿。火焰形态和放电过程由高速摄像机记录,击穿电压和泄漏电流数据通过故障录波器采集。每组实验重复8次,最终结果取平均值。

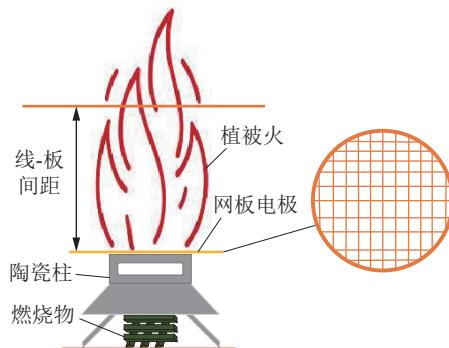


图5 火焰全桥接线-板电极示意

Fig.5 Schematic diagram of the line-to-plate electrode configuration fully bridged by flame

2 实验结果及分析

2.1 击穿电压与泄漏电流相位特征实验

针对不同植被火焰,在不同间距下分别开展间隙击穿实验,每次实验均保持火焰全桥接间隙,并记录泄漏电流和击穿电压的波形,对击穿前的泄漏电流和击穿电压进行相位分析。图6为稻草火焰条件下典型时刻的泄漏电流与故障相电压波形。第1阶段为泄漏电流相位超前故障相电压;第2阶段为泄漏电流相位从超前到滞后故障相电压的发展阶段;第3阶段为泄漏电流相位滞后故障相电压。泄漏电流与故障相电压相位差值为:

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta t \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi$ 为相位差值; f 为波形的频率; Δt 为两个波形之间的时间差。计算得到,第1阶段空气间隙呈现感性时,泄漏电流与故障相电压之间的最大相位差为 50.12° ;第3阶段空气间隙呈现容性时,最大相位差为 47.69° 。

稻草火焰下泄漏电流与击穿电压的相位差值如图7所示。图7(a)展示了在稻草火焰条件下,间隙距离为 7.5 cm 时,泄漏电流与击穿电压之间的相位差值,即电流超前电压相位值。由于植被燃烧时火焰中存在各种带电粒子,泄漏电流和击穿电压之间相位差值并非恒定,而是呈现上下波动现象。尽管如此,其总体趋势仍能反映间隙击穿前的绝缘介质阻抗特性。

图7中,第1阶段,开始施加电压时,由于电压较低,间隙电场强度较小,线-板间隙中并未立即出现泄漏电流。此时带电粒子运动受温度影响更大,

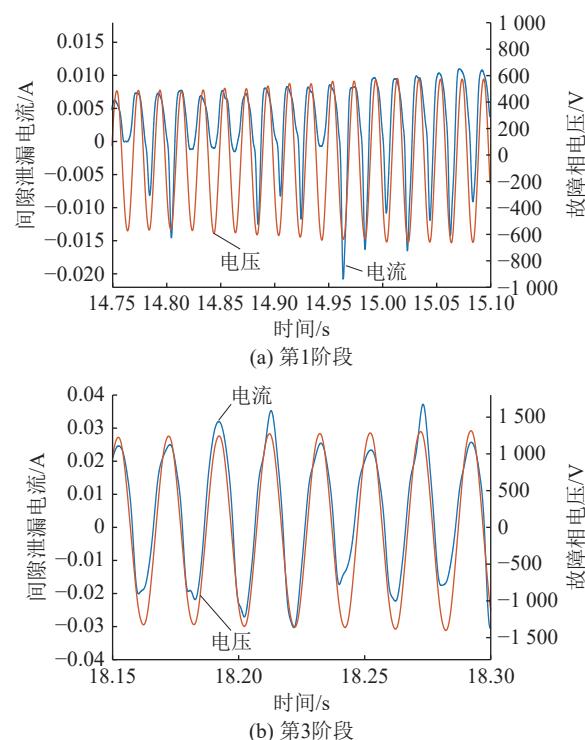
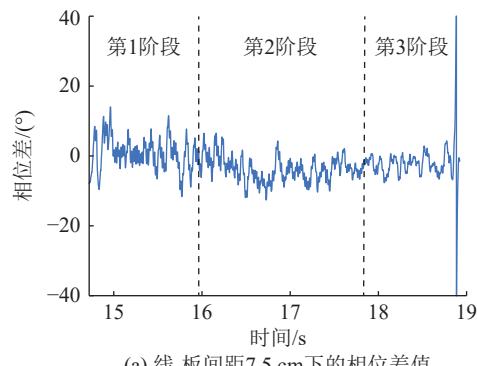
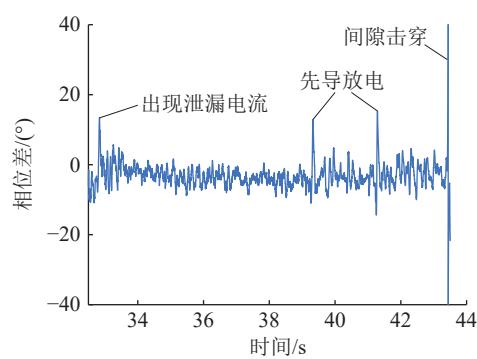


图6 稻草火焰下典型时刻泄漏电流与故障相电压波形

Fig.6 Leakage current and fault phase voltage waveforms at typical time under straw flame



(a) 线-板间距 7.5 cm 下的相位差值



(b) 线-板间距 27.5 cm 下的相位差值

图7 稻草火焰下泄漏电流与击穿电压的相位差值

Fig.7 Phase difference between leakage current and breakdown voltage under straw flame

线-板间隙总体呈现弱感性。第2阶段,随着施加电压逐渐增大,间隙中带电粒子受到热浮力、电场力和离子风等多种因素影响,使得整个线-板间隙从弱

感性逐渐转为弱容性。如图8所示,此阶段泄漏电流数值较大,并呈现缓慢上升趋势,同时在导线和网状板上均能观察到明显的火花放电现象。第3阶段,此阶段临近击穿,线-板间隙继续呈现弱容性,但间隙中出现的不稳定电弧放电,导致间隙出现短暂的感性。当电弧桥接整个间隙,即间隙击穿时,线-板间隙的等效电路中同时存在感性分量和阻性分量^[40]。

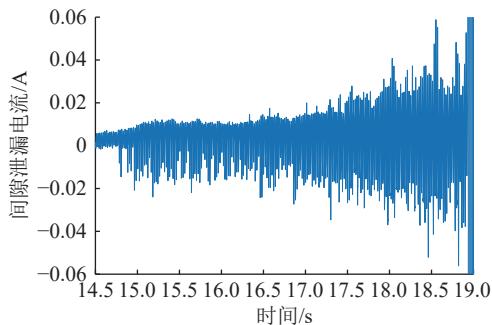


图8 稻草火焰下泄漏电流波形

Fig.8 Leakage current waveform under straw flame

图7(b)展示了在稻草火焰条件下,间隙距离为27.5 cm时,泄漏电流与击穿电压之间相位差值。随着线-板间距增大,从施加电压至间隙击穿,间隙整体呈现感性,说明增大间隙距离能够降低间隙中的阻性成分占比。在泄漏电流出现、先导放电发展和间隙击穿过程中,均可观测到明显的感性特征。此外,增加间隙距离会延长间隙击穿时间。在稻草火焰条件下,当间隙距离分别为7.5 cm和27.5 cm时,击穿间隙所需要时间分别为4.26 s和9.38 s。

2.2 植被火焰下间隙击穿机理特性

为研究植被火焰条件下间隙放电的击穿机理,文中使用高速摄像机记录植被火焰全桥接条件下的间隙放电击穿过程,如图9所示。

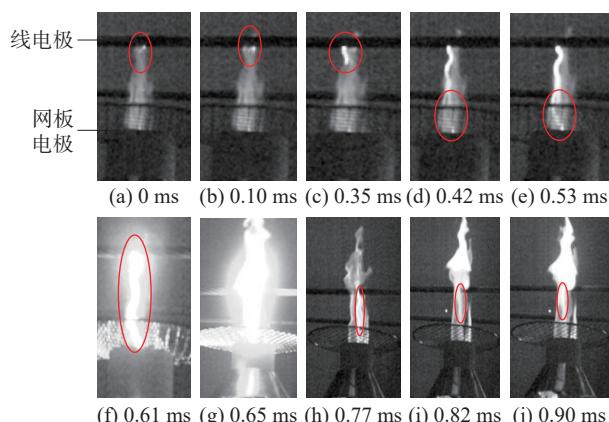


图9 植被火焰下间隙击穿过程

Fig.9 Breakdown process of the line-to-plate gap under vegetation flame

以植被火焰条件下线-板电极间隙距离为12.5 cm

为例进行分析。当施加电压逐渐升高至15 kV时,在火焰中化学电离、光电离、热电离、碰撞电离、碱金属蒸汽与高温线电极接触等共同作用下^[41-42],线电极下方区域的电离程度增强,出现明显的电晕放电现象,如图9(a)、(b)所示。随着电压升高至27.6 kV,电晕放电发展为先导放电,并向网板电极方向延伸,如图9(c)所示。该现象表明在火焰通道中,电压主要集中在靠近线电极的区域,此处火焰电导率相对较低,电场强度较高,有利于放电发展,先导前端伴随有流注放电。在经历短暂的休止期后,发生二次先导放电过程,电弧的亮度和通道宽度显著增加,电弧长度接近贯通整个间隙的临界状态,如图9(d)、(e)所示。当电压升至30.63 kV时,电弧贯通整个间隙,发生植被火焰条件下的间隙击穿。在此阶段,间隙电导率达到峰值,电弧的亮度和宽度也达到峰值。说明火焰中带电粒子数量明显增加,且在多种电离机制的促进下,光电离明显增强,使得电弧亮度增强,如图9(f)所示。电弧的消退过程是自下而上,由网板电极向线电极逐渐变短消退,如图9(g)—(j)所示。在间隙未发生击穿前,火焰在热浮力、重力及电场力的作用下,呈现无规律的小幅度上下振荡。当临近击穿时,离子风效应在这些作用力中占主导地位,导致火焰整体高度下降,并显示火焰被线电极吸附的现象。同时,火焰的振荡频率和幅度增加。间隙击穿后线路跳闸,施加电压降为0,火焰高度恢复到击穿前的状态。随着燃烧强度逐渐减弱,火焰高度也逐渐下降。但在火焰刚击穿时火焰亮度有所增加,这说明施加电压促进了火焰中带电粒子的电离过程,增加了光电子的数量。此外,电弧的发展路径是单一且明确的,由导线起始,向板电极方向发展,并最终沿同一路径消退。

图10展示了3种植被火焰条件下,线-板间隙距离为12.5 cm时的典型电压波形。整个过程可分为临近击穿、火焰击穿和过流保护跳闸3个阶段。在临近击穿阶段,火焰中的化学电离、热电离和碰撞电离共同作用,生成大量带电粒子。这些高浓度的带电粒子显著加快了流注放电向电弧放电的发展速度。当带电粒子浓度接近间隙击穿阈值时,线-板电极间绝缘强度大幅下降,导致电压波形呈周期性的正弦波动。在火焰击穿阶段,一方面,在高温、高电压和离子风效应等多重因素作用下,线-板电极间隙中的带电粒子浓度达到阈值;另一方面,由于电场力和热浮力的影响,大量颗粒、灰烬以及炭黑涌入间隙,并吸附间隙中的电荷从而引发放电。这些颗粒通过电弧形成“电桥”,桥接极短间隙部分,

进一步畸变电场并降低间隙的绝缘强度。在上述多种因素的共同作用下,电弧最终贯通整个间隙,导致线-板电极间隙发生击穿,随后引发线路过流保护跳闸,电压迅速下降至0。稻草、竹子和松树3种植被火焰下的电弧通道持续时间分别为50.12、68.39、53.67 ms。造成这种差异的主要原因是不同植被燃烧时产生的电导率不同。由于3种不同植被所含的碱金属及碱土金属盐、灰分无机物、纤维素以及植物结构的不同,其燃烧时火焰中产生的带电粒子、颗粒物和灰烬特性差异较大,这些因素共同影响了线-板电极间的电导率。

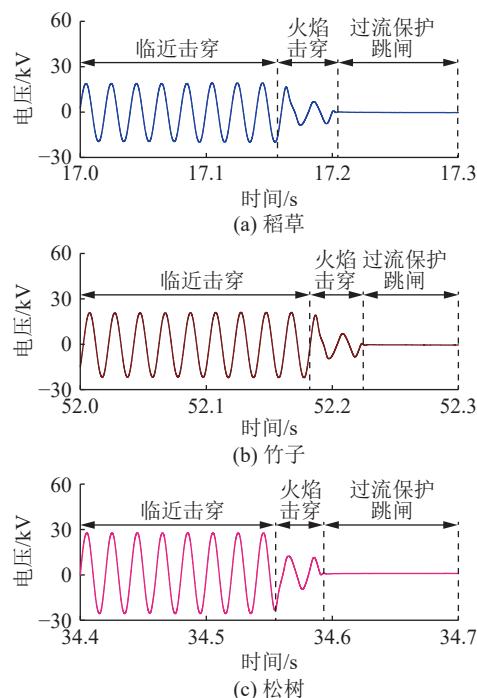


图 10 3 种植被火焰条件下间隙距离为 12.5 cm 的电压波形

Fig.10 Voltage waveforms of 12.5 cm gap distance under three kinds of vegetation flame

图 11 展示了在稻草火焰条件下,间隙距离为 7.5 cm 时的电压波形。在该条件下,火焰击穿后并未触发线路保护跳闸,电弧通道持续桥接整个间隙。以此间隙距离为例,间隙击穿后电压的有效值从 14.45 kV 降为 9.24 kV,并稳定在击穿电压的 75% 左右。这一现象可能归因于稻草较其他两种植被灰分含量较高,且其自身结构较为松散,燃烧时容易产生灰烬和细长粒子悬浮在间隙中。这些灰烬和细长粒子在击穿过程中吸附电荷,导致间隙电场的严重畸变。此外,这些颗粒进入间隙不仅增加了等效电阻,还使得回路泄漏电流无法达到过流保护继电器的动作阈值,从而未能触发保护机制。

2.3 电极间距对击穿特性影响

图 12 为稻草火焰在不同间隙距离下击穿电压

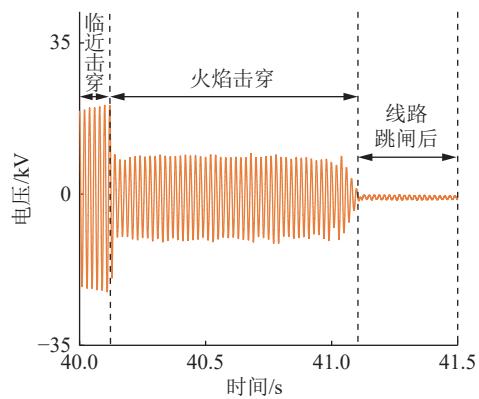


图 11 稻草火焰下间隙距离为 7.5 cm 的电压波形

Fig.11 Voltage waveform of 7.5 cm gap distance under straw flame

的波动情况。图 13 为稻草、竹子和松树 3 种不同植被火焰下击穿电压与电极间距的关系。

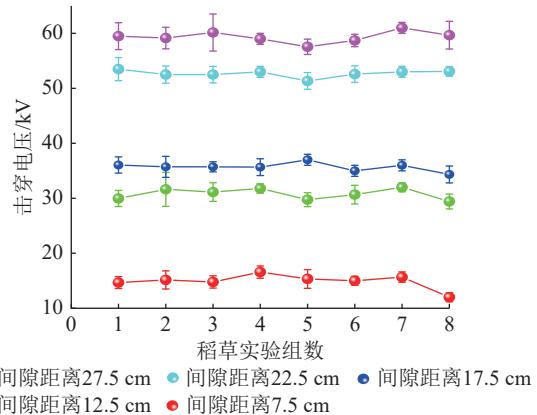


图 12 稻草火焰下间隙击穿电压波形

Fig.12 Voltage waveforms during gap breakdown under straw flame

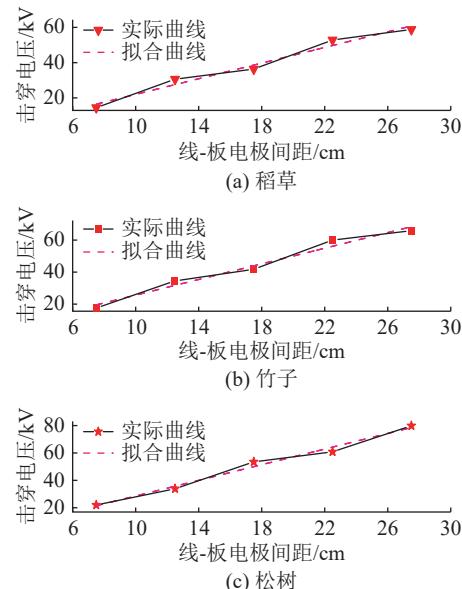


图 13 不同植被火焰下击穿电压和电极间距的关系

Fig.13 Relationship between breakdown voltage and electrode distance under different vegetation flame

可以看出,3 种植被火焰下间隙的击穿电压随

线-板电极间距的增加而增大,且呈现一定线性关系。

为进一步明确击穿电压与间隙距离的定量关系,利用最小二乘法对3种植被火焰下间隙的击穿电压与电极间距进行曲线拟合,得到式(2)所示关系。

$$V_b = \begin{cases} 2.22S_{l-p} + 13.93 & R^2 = 0.96 \\ 2.44S_{l-p} + 14.21 & R^2 = 0.97 \\ 2.86S_{l-p} + 19.75 & R^2 = 0.98 \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_b 为击穿电压值; S_{l-p} 为线-板电极之间的距离; R^2 为拟合相关系数,其中稻草、竹子和松树的 R^2 分别为 0.96、0.97 和 0.98。这些高 R^2 值证明线性拟合结果良好,并且松树火焰条件下的击穿电压增长最为显著。

不同植被火焰条件下的间隙击穿电压及平均击穿场强如表 1 所示。击穿电压的大小顺序为:松树、竹子、稻草,说明松树火焰对间隙绝缘性能的削弱程度最小。这一差异主要源于植被成分和燃烧特性的不同。稻草的灰分含量最高,竹子次之,松树最低;同时,稻草结构较为松散,燃烧时易产生大量细长的灰烬颗粒,这些颗粒易悬浮于间隙中并桥接空气间隙,导致电场严重畸变,从而显著降低击穿电压。此外,对于稻草、竹子和松树火焰,当最大间隙为 27.5 cm 时,其击穿电压分别为 7.5 cm 时的 4.1、3.8 和 3.6 倍。可见不同类型植被火焰下的间隙击穿特性差异较大。

表 1 不同植被火焰下间隙击穿电压及平均击穿场强
Table 1 Gap breakdown voltage and average breakdown field strength under different vegetation flame

电极 间距/cm	击穿电压/kV			平均击穿场强/(kV·cm ⁻¹)				
	空气	稻草	竹子	空气	稻草	竹子		
7.5	32.72	14.45	17.55	21.95	4.36	1.92	2.34	2.92
12.5	35.86	30.63	34.49	33.85	2.86	2.45	2.75	2.70
17.5	65.10	36.39	41.74	53.47	3.72	2.07	2.38	3.05
22.5	91.12	52.83	59.98	60.82	4.05	2.34	2.66	2.70
27.5	97.35	58.82	65.84	79.88	3.54	2.13	2.39	2.90

图 14 展示了 3 种不同植被火焰条件下间隙的平均击穿场强。随着间隙距离的增大,平均击穿场强的变化趋势并不明显。说明火焰高温和植被燃烧产生的灰烬与颗粒能明显降低间隙击穿电压。同时,大量颗粒及带电粒子进入间隙,使得原本不均匀的电场变得均匀连续。平均击穿场强主要受间隙中带电粒子和灰烬颗粒的影响,而受线-板电极间距的影响相对较弱。

在稻草、竹子和松树火焰条件下,间隙的平均击穿场强大小顺序为:松树、竹子、稻草。3种植被火焰的平均击穿场强分别在 2.0、2.5、3.0 kV/cm 附

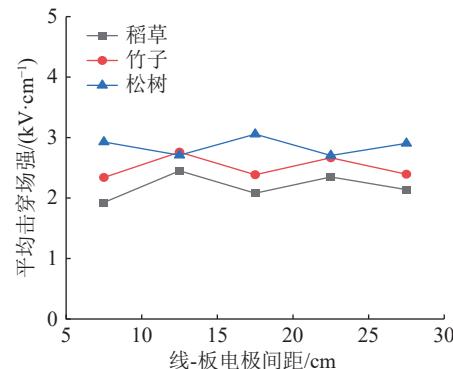


图 14 平均击穿场强与电极间距的关系

Fig.14 Relationship between average breakdown field strength and electrode distance

近波动。可见电极间距对间隙击穿电压的影响程度大于其对平均击穿场强的影响。

3 结论

文中以稻草、竹子和松树 3 种植被为研究对象,在火焰全桥接线-板间隙条件下开展击穿特性实验。研究结果对识别接地故障特征以及预警山火对输电线路的影响具有重要意义。

(1) 间隙距离对植被火焰全桥接条件下的阻抗特性影响显著。与 7.5 cm 间隙距离相比,27.5 cm 间隙的阻性成分增加,感性成分减少,电弧呈感性特征,且电弧通道具有随机性。随着间隙距离增加,击穿所需时长增加。

(2) 植被火焰全桥接条件下的线-板间隙的击穿过程较为复杂,涉及电晕放电、火花放电、电弧放电和二次先导放电等多种形式。间隙击穿过程中能明显观察到离子风现象,导致火焰体和电弧通道重合,表现为火焰被导线电极吸附,火焰高度降低。

(3) 间隙击穿过程的电压波形可分为 3 个阶段,即临近击穿、火焰击穿和过流保护跳闸。不同植被火焰对电弧通道的持续时间影响较大。在间隙距离为 12.5 cm 时,3 种植被火焰对应的电弧通道持续时间由长到短依次为:竹子、松树、稻草。

(4) 线性回归分析表明,击穿电压和间隙距离之间具有较为明显的线性关系,可通过绝缘子长度对输电线路的最低击穿电压进行预测。不同植被火焰条件下的平均击穿场强变化趋势不明显,从高到低依次为:松树、竹子、稻草。

参考文献:

[1] 周远翔,陈健宁,张灵,等.“双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J].高电压技术,2021,47(7): 2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Oppor-

tunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(7): 2396-2408.

[2] 孙文成, 李健, 彭宇辉, 等. 基于样本不均衡和特征优选多源融合的输电线路故障类型辨识[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(12): 79-89.

SUN Wencheng, LI Jian, PENG Yuhui, et al. Transmission line fault type identification based on the sample imbalance and feature preferred multi-source fusion[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(12): 79-89.

[3] 李稳, 李化旭, 杨力, 等. 超高压输电线路复合绝缘子不同位置缺陷下发热特性研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(5): 246-252.

LI Wen, LI Huaxu, YANG Li, et al. Study on heating characteristics of composite insulators in EHV transmission lines under different position defects[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(5): 246-252.

[4] 赵松燕, 曲朝阳, 郭晓利, 等. 基于 Map Reduce 的输电监测数据智能检索模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 177-187.

ZHAO Songyan, QU Zhaoyang, GUO Xiaoli, et al. Intelligent retrieval model of power transmission monitoring data based on Map Reduce[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 177-187.

[5] 赵启, 王建, 林丰恺, 等. 基于格拉姆角场与 ResNet 的输电线路故障辨识方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(10): 95-104.

ZHAO Qi, WANG Jian, LIN Fengkai, et al. Transmission line fault identification method based on Gramian angular field and ResNet[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(10): 95-104.

[6] 杨淳岚, 宁鑫, 徐会凯, 等. 电网山火监测及风险预警技术研究综述[J]. *电网技术*, 2023, 47(11): 4765-4777.

YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(11): 4765-4777.

[7] 周志宇, 艾欣, 陆佳政, 等. 山火灾害引发的输电线路跳闸风险实时分析方法及应用[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(18): 5321-5330, 5531.

ZHOU Zhiyu, AI Xin, LU Jiazheng, et al. A real-time analysis approach and its application for transmission-line trip risk due to wildfire disaster[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(18): 5321-5330, 5531.

[8] 杨博闻, 陈天翔, 魏玉文, 等. 10 kV 线路下方森林火灾成因分析及试验研究[J]. *消防科学与技术*, 2024, 43(2): 271-277.

YANG Bowen, CHEN Tianxiang, WEI Yuwen, et al. Analysis and experimental study on the causes of forest fires under 10 kV lines[J]. *Fire Science and Technology*, 2024, 43(2): 271-277.

[9] 周鹤良. 电力强国崛起: 中国特高压输电技术开发应用国际领先[J]. *电气时代*, 2019(2): 10-12, 17.

ZHOU Heliang. The rise of power power: China leads the world in the development and application of UHV transmission technology[J]. *Electric Age*, 2019(2): 10-12, 17.

[10] 张云, 尤飞, 陈海翔, 等. 山火引发输电线路跳闸事故的统计与分析[J]. *消防科学与技术*, 2011, 30(12): 1177-1180.

ZHANG Yun, YOU Fei, CHEN Haixiang, et al. Statistical analysis of wildfire accidents inducing flashover of transmission lines[J]. *Fire Science and Technology*, 2011, 30(12): 1177-1180.

[11] 王建, 熊张恣, 南东亮, 等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 16-26.

WANG Jian, XIONG Zhangmin, NAN Dongliang, et al. Short-time risk assessment of a power grid in weather disasters considering the coupled faults of primary and secondary equipment[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 16-26.

[12] 王津宇, 李哲, 梁允, 等. 计及气象因素的输电线路安全性评估[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 210-217.

WANG Jinyu, LI Zhe, LIANG Yun, et al. Safety evaluation of transmission lines considering meteorological factors[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 210-217.

[13] 吴田, 阮江军, 张云, 等. 输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(10): 138-143, 148.

WU Tian, RUAN Jiangjun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistic characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(10): 138-143, 148.

[14] 霍锋, 卢威, 黄道春, 等. 特高压交流输电线路跨越 500 kV 塔顶带电作业电场特性及安全防护研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 349-355.

HO Feng, LU Wei, HUANG Daochun, et al. Study on electric field distribution characteristics of live-working and protection for crossing project of 1 000 kV-over-500 kV AC transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 349-355.

[15] 罗昊, 杨琪, 王炜宇, 等. 基于 XGBoost 的输电线路火灾风险等级评估方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(6): 132-141.

LUO Hao, YANG Qi, WANG Weiyu, et al. XGBoost-based assessment method for fire risk levels of transmission lines[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(6): 132-141.

[16] 郭伯森, 李天友, 王连辉, 等. 基于层次分析法的中压配电线森林火灾故障预警辨识模型[J]. *供用电*, 2023, 40(3): 55-62.

GUO Bosen, LI Tianyou, WANG Lianhui, et al. An early warning evaluation model for forest fire faults in medium-voltage distribution lines based on analytic hierarchy process[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(3): 55-62.

[17] 周春天, 张文锋, 林敢, 等. 考虑多因素影响的大理密集输电线路绕击跳闸率计算方法[J/OL]. *高压电器*, 2024: 1-9. (2024-03-02) [2025-02-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20240229.1109.002.html>.

ZHOU Chuntian, ZHANG Wenfeng, LIN Gan, et al. Calcula-

tion method of shielding failure trip-out rate of Dali dense transmission channels considering multiple factors[J/OL]. High Voltage Apparatus, 2024: 1-9. (2024-03-02)[2025-02-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20240229.1109.002.html>.

[18] LaForest J J. Transmission-line reference book: 345 kV and above[M]. 2nd ed. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute, 1982.

[19] 杨弄潮, 杨博闻, 杨淳岚, 等. 山火烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响试验研究[J]. 四川电力技术, 2022, 45(1): 6-9, 20. YANG Nongchao, YANG Bowen, YANG Chunlan, et al. Experimental research on impact of mountain fire smoke on insulation of 10-35 kV transmission lines[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(1): 6-9, 20.

[20] ROBLEDO-MARTINEZ A, GUZMAN E, HERNANDEZ J L. Dielectric characteristics of a model transmission line in the presence of fire[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 776-782.

[21] FONSECA J R, TAN A L, SILVA R P, et al. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 687-694.

[22] LANOIE R, MERCURE H P. Influence of forest fires on power line insulation[C] // Proc. 6th Int. Symp. High Volt. Eng, 1989.

[23] WANG Z H, SHUI K, HUANGFU W H, et al. Breakdown characteristics of rod-plane gap in an ethanol flame[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(1): 206-214.

[24] 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. 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.

[25] 周恩泽, 饶章权, 刘琦, 等. 典型高风险植被火条件下导线-板间隙击穿特性[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 179-185. ZHOU Enze, RAO Zhangquan, LIU Qi, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane gap under typical high risk vegetation fire condition[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179-185.

[26] 龙明洋, 黄道春, 黎鹏, 等. 典型植被灰烬颗粒对导线-板间隙放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 627-633. LONG Mingyang, HUANG Daochun, LI Peng, et al. Influence of the typical vegetation ashes/particles on the discharge characteristics of conductor-plane air gap[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 627-633.

[27] 黄道春, 卢威, 姚涛, 等. 植被火条件下导线-板短空气间隙泄漏电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3487-3493. HUANG Daochun, LU Wei, YAO Tao, et al. Study on leakage current characteristics of conductor-plane short air gap under vegetation fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3487-3493.

[28] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 典型植被火焰下导线-板间隙击穿特性及放电模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 4001-4011. LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on breakdown characteristic and discharge model of conductor-plane gap under typical vegetation flame[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 4001-4011.

[29] 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. 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.

[30] 陈孝明, 魏晗, 阮羚, 等. 火焰高度对输电线路间隙击穿特性的影响[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 134-138. CHEN Xiaoming, WEI Han, RUAN Ling, et al. Study on the influence of flame height on gap breakdown characteristics of transmission lines[J]. Electric Power, 2015, 48(7): 134-138.

[31] 周恩泽, 樊灵孟, 黄道春, 等. 2013 m 海拔高度植被火条件下导线-板间隙击穿特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4316-4322. ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Daochun, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane gap under vegetation fire at the altitude of 2013 m[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4316-4322.

[32] 黎鹏, 黄道春, 阮江军, 等. 加压方式对山火条件下间隙交流击穿特性的影响研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1576-1581. LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Study of influence of voltage application modes on AC gap breakdown characteristic under fire conditions[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1576-1581.

[33] 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. 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.

[34] 黄道春, 陈鑫, 周恩泽, 等. 考虑火焰分区的植被火条件下导线-板间隙击穿电压研究[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3467-3474. HUANG Daochun, CHEN Xin, ZHOU Enze, et al. Breakdown voltage of conductor-plane gap under vegetation fire condition considering division of flames[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3467-3474.

[35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 标称电压高于 1 000 V 的架空线路用复合绝缘子串元件 第 2 部分: 尺寸与特性: GB/T 21421.2—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Composite string insulator units for overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V: part 2: dimensions and characteristics: GB/T 21421.2-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

[36] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 标称电压高于1000V的架空线路用复合绝缘子串元件 第1部分: 标准强度等级和端部装配件: GB/T 21421.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Composite string insulator units for overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V: part 1: standard strength classes and end fittings: GB/T 21421.1-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[37] 尤飞, 陈海翔, 张林鹤, 等. 木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 192-197.

YOU Fei, CHEN Haixiang, ZHANG Linhe, et al. Experimental study on flashover of high-voltage transmission lines induced by wood crib fire[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 192-197.

[38] 陈孝明, 黎鹏, 阮羚, 等. 输电线路走廊典型植被绝缘特性测量与分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(20): 89-95.

CHEN Xiaoming, LI Peng, RUAN Ling, et al. Insulation characteristics measurement and analysis of the typical vegetation in the corridor of the transmission lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(20): 89-95.

[39] 普子恒, 阮江军, 吴田, 等. 火焰中颗粒对间隙放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 103-110.

PU Ziheng, RUAN Jiangjun, WU Tian, et al. Influence of parti-

cles in flame on the characteristics of gap discharge[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 103-110.

[40] 刘晓鹏, 赵贤根, 马御棠, 等. 空气间隙击穿后电弧通道的特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5302-5311.

LIU Xiaopeng, ZHAO Xiangen, MA Yutang, et al. Characteristics of the arc channel during the post-discharge stage in air gap[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5302-5311.

[41] 周恩泽, 王磊, 王彤, 等. 植被火条件下考虑导线不均匀温升的弧垂计算[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6074-6080.

ZHOU Enze, WANG Lei, WANG Tong, et al. Sag calculation considering conductor's nonuniform temperature rise under vegetation fire condition[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 6074-6080.

[42] MPHALE K, HERON M. Wildfire plume electrical conductivity[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2022, 59(4): 766.

作者简介:



曾毅

曾毅(1999),男,硕士在读,研究方向为高电压及绝缘技术(E-mail: 2111712859@qq.com);
王政(1999),男,硕士在读,研究方向为高电压及绝缘技术;
杨皓涵(1999),男,硕士在读,研究方向为高电压及绝缘技术。

Breakdown mechanism of a line-to-plate gap fully bridged by vegetation flames

ZENG Yi¹, WANG Zheng¹, YANG Haohan¹, CHEN Tianxiang¹, WANG Meng¹, SHAO Qianqiu²

(1. The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: In recent years, the growing number of transmission and distribution lines traversing forested areas have led to an increasing frequency of line tripping incidents caused by wildfires, seriously threatening the safe and stable operation of power grids. Although numerous experimental studies have been conducted on the reduction of air insulation strength in high-voltage transmission lines to ground under wildfire conditions, little attention has been paid to the potential reduction in insulation distance when flames reach the transmission tower, particularly around line insulators. To investigate the air breakdown mechanism under conditions where vegetation flames fully bridged the short gap between a conductor and a grounded plate, experiments on the breakdown characteristics of line-to-plate gaps under various vegetation combustion conditions are conducted. The phase difference between leakage current through the flame and applied breakdown voltage is analyzed, and the breakdown mechanism under vegetation flame conditions is discussed. The breakdown voltages and average breakdown field strengths of the gaps under different vegetation flame conditions are experimentally investigated. The results show that: increasing the gap distance reduces the inductive component within the flame, causing the overall line-to-plate gap to exhibit capacitive behavior; the breakdown process under vegetation flame conditions involves multiple discharge mechanisms, and the duration of the arc channel varies significantly during breakdown; the breakdown voltage increases linearly with gap distance. Due to its high ash content and loose structure, straw vegetation produces long ash particles during combustion, which strongly bridge the gap and distort the electric field. As a result, the average breakdown field strength under straw flame conditions is the lowest among the tested vegetation types.

Keywords: wildfire; insulation distance; air gap; phase difference; breakdown mechanism; breakdown voltage

(编辑 吴昊)