

山火条件下 35 kV 输电线路故障信号特征试验研究

李唯佳¹, 杨宇航², 杨佳才¹, 张星海³, 范松海³, 陈天翔¹

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:山火灾害有很大概率会引起线路跳闸从而导致停电事故, 威胁电力系统安全稳定运行。为研究山火引发 35 kV 输电线路故障信号特征, 搭建了山火条件下 35 kV 输电线路山火故障模拟试验平台, 进行了山火故障模拟试验, 分别测量并记录了火焰单相导线试验、火焰相间导线试验、烟雾单相导线试验、烟雾相间导线试验的试验波形和试验现象。研究表明, 烟雾对输电线路绝缘的影响很小, 而火焰会对输电线路绝缘产生较大的影响。研究结果对研究防山火事故措施可提供理论支持。

关键词:输电线路; 山火事故; 故障模拟; 信号特征; 试验研究

中图分类号: TM 852 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0010-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220103

Experimental Research on Fault Signal Characteristics of 35 kV Transmission Line under Mountain Fire

LI Weijia¹, YANG Yuhang², YANG Jiakai¹, ZHANG Xinghai³, FAN Songhai³, CHEN Tianxiang¹

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Wildfire disasters have a high probability to cause line trippings, which leads to power outages and threatening the safe and stable operation of power system. In order to study the fault signal characteristics of 35 kV transmission line caused by the wildfire, a mountain fire fault simulation test platform for 35 kV transmission line under the wildfire condition is established, and the wildfire fault simulation test is carried out. The waveforms and phenomena of flame single-phase wire test, flame phase-to-phase wire test, smoke single-phase wire test, and smoke phase-to-phase wire test are measured and recorded. The research shows that smoke has little effect on the insulation of transmission lines, while flames have a greater impact on the insulation of transmission lines. The research results can provide a theoretical support for the study of measures to prevent mountain fire accidents.

Key words: transmission line; wildfire accident; fault simulation; signal characteristics; experimental research

0 引言

随着中国经济发展, 输电线路铺设逐渐密集^[1-2], 当输电线路下方出现山火时, 输电线路的绝缘性能以及电力系统的安全性都会大幅降低, 极大

概率会造成输电线路的跳闸^[3-6], 从而影响相应地区用电的安全性。国内外对山火引发的输电线路故障开展了大量研究, 主要有山火条件下的输电线路故障试验和各种火焰引发的间隙放电试验^[7-15]。但由于山火引发输电线路故障是一个复杂多变的过程, 并且在现有技术条件下是不可控的, 所以, 到目前为止, 国内外搭建的模拟试验平台考虑的影响因素都很少。目前对火焰影响输电线路放电特性的研

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目 (U19A2080)

究尚不多见,在植被燃烧的过程中,火焰的温度和形状时时刻刻都在发生变化,其对间隙绝缘能力的影响容易在研究中忽略。吴田等人通过试验发现间隙在火焰中的放电发展与火焰的电导率有关:在火焰电导率较低条件下为流注放电模式,在高电导率条件下为电弧放电模式^[16]。卢威在试验中发现在火焰桥接的情况下,植被燃烧时会产生剧烈发光、发热的化学反应,产生大量的电子和离子,这些带电粒子与火焰烟气中浮动的固体颗粒相结合促进了流注到电弧发展的速度^[17]。普子恒等人通过试验发现颗粒对电场的畸变作用是烟雾灰尘对输电线路绝缘的主要影响因素^[18]。

下面通过对植被燃烧火灾引发 35 kV 输电线路故障的过程进行有效的模拟,分析火焰和烟雾在山火条件下对输电线路绝缘的影响及信号特征。

1 试验平台设计

1.1 试验平台搭建

在高电压实验室搭建了山火条件下 35 kV 输电线路故障模拟试验平台,如图 1 所示。该试验平台采用了型号为 S7-50/35、连接组别为 Yyn0 的电力变压器以及型号为 JDJJ₂-35、变比为 35 kV/0.1 kV、0.2 级的电压互感器;采用了型号为 LGJ-120、长 5.5 m 的三相导线,通过在三相线路加装并联电容补偿的方法模拟线路长度变化和电容电流变化。导线与燃烧物铁桶距离为 22 cm,燃烧物铁桶接地,在铁桶中放入木材和枯树叶作为燃烧物。试验平台模拟了两种故障模型:

- 1) 线路单相(A相)—空气间隙(火焰或烟雾)—地;
- 2) 线路 A 相—空气间隙(火焰或烟雾)—线路 B 相。

这两个模型分别模拟实际状况下,山火引发线路对地放电和线路相间击穿两种情况。

1.2 试验步骤

山火条件下模拟试验分为 4 组模拟试验:1) 烟雾桥接情况下线路对地单相绝缘试验;2) 烟雾桥接情况下线路相间绝缘试验;3) 火焰桥接情况下线路相间绝缘试验;4) 火焰桥接情况下线路对地单相绝缘试验。

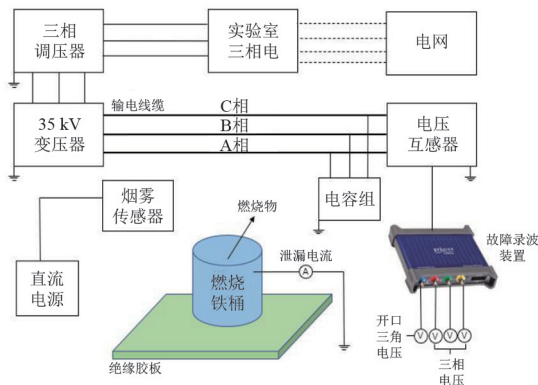


图 1 山火条件下线路故障模拟试验平台

进行烟雾桥接情况下线路对地单相绝缘状况变化的模拟试验时,将燃烧桶放置在 A 相线路正下方,线路与燃烧桶上边缘的距离为 22 cm。将桶内的木材和枯树叶点燃,调节燃烧桶遮盖铁板的位置以控制与外界空气的对流量,直至燃烧桶内升起稳定的浓烟。接通实验室三相电源,通过调压器缓慢升压,将输电线路升至额定线电压 35 kV,通过摄像机和故障录波装置实时观察并记录线路烟雾桥接处的现象、烟雾浓度、对地泄漏电流、开口三角电压和三相线路的相电压。

烟雾桥接情况下线路对地单相绝缘试验结束后,将燃烧桶移至线路 A 相、B 相之间正下方。两相间距为 38 cm,对地距离为 22 cm。在确保烟雾浓度充足后,进行模拟烟雾桥接情况下线路相间绝缘试验,如图 2 所示。



图 2 烟雾试验

模拟火焰桥接情况时将遮盖板去掉,将桶内的木材和枯树叶点燃,使桶内产生火焰,火焰位于 A 相、B 相线路之间,相间间距为 38 cm,线路对地距离为 22 cm。进行火焰桥接情况下线路相间绝缘状况的试验,如图 3 所示。

接下来将燃烧桶放至 A 相线路正下方,进行火焰桥接情况下线路对地单相放电的模拟试验。



图 3 火焰试验

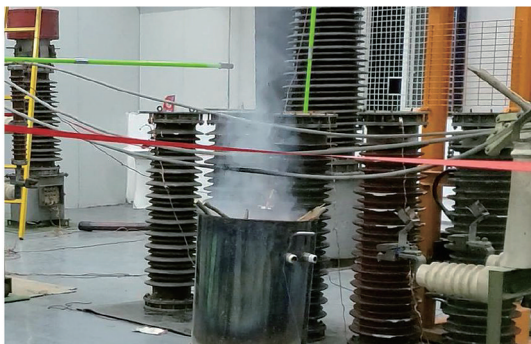


图 5 烟雾单相导线试验

2 试验现象及分析

山火条件下的模拟试验分为 4 组试验,在每组试验过程中都使用故障录波装置和多台录像设备进行记录。正常情况下,电压互感器二次侧每相相电压为 57.74 V,开口三角电压为 0。

2.1 火焰单相导线试验

通过试验发现火焰对 A 相线路进行桥接时,A 相线路与火焰桥接部分有明显的放电现象,发出电晕放电的响声。由于放电程度随火焰的变化而不断变化,火焰与线路桥接的部分不断随机性地有新的纤细的电弧生成和断裂,如图 4 所示。

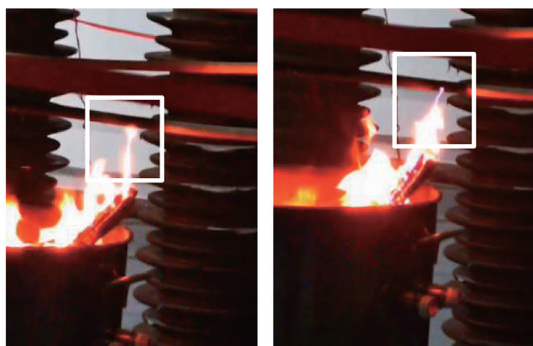


图 4 火焰单相导线试验

2.2 烟雾单相导线试验

烟雾对 A 相线路进行桥接,如图 5 所示。通过观察烟雾浓度和开口三角电压发现,当烟雾浓度在 9.999‰ 以上时,开口三角电压没有变化;随着浓度继续升高,通过观察录波波形,A 相互感器电压在 [57.8 V, 58.4 V] 区间内波动,与正常时相比没有变化。

2.3 火焰相间导线试验

火焰桥接 A、B 相之间的间隙,当相间距离为 38 cm 时,没有观察到三相电压及开口三角电压明显变化,也没有观察到放电现象。将相间距离缩短

至 19 cm 进行火焰相间导线试验时发现:有相间击穿线路立即跳闸的现象;也有相间击穿形成粗亮的电弧、桥接线路不跳闸现象,该电弧会在火焰热空气的作用下,上升形成向上拱的弧形,直至被拉断,如图 6 所示。



图 6 火焰相间导线试验

2.4 烟雾相间导线试验

烟雾桥接 A、B 相之间的间隙,相间距离为 38 cm。通过观察,当烟雾浓度超过测试仪最大量程(9.999‰)时,三相电压仍然处于平衡状态,没有放电现象,如图 7 所示。

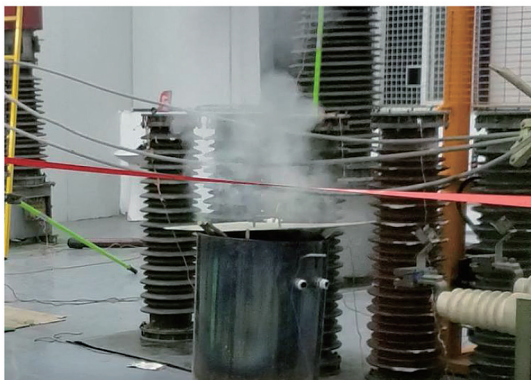


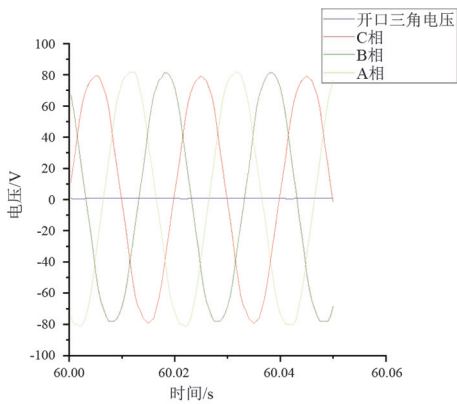
图 7 烟雾相间导线试验

3 山火条件下模拟试验分析

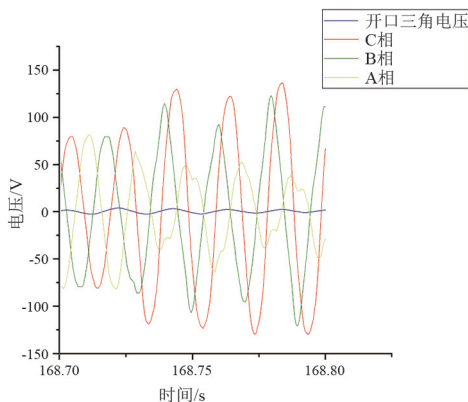
3.1 单相对地故障信号特征分析

当烟雾桥接线路时,三相电压仍然处于平衡状态,输电线路没有发生故障;当火焰桥接 A 相线路时,相当于输电线路单相高阻接地故障,A 相电压会随间隙的温度、气压、火焰桥接程度、火焰烟气中颗粒浓度等众多随机因素的变化而变化。截取三相电压及开口三角电压的电压波形,如图 8 所示。从图 8(b)可观察到,故障相 A 相的电压幅值比 B、C 两相的电压幅值低,而从图 8(c)可观察到故障相 A 相的电压幅值比非故障相 B 相的电压幅值高,故障相 A 相电压并非最低电压。

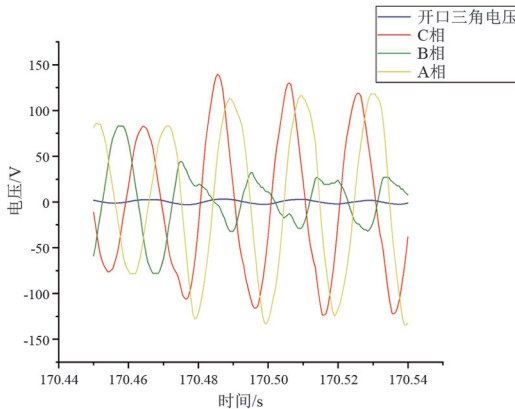
在正常状态时,A 相电压峰值经互感器测量为 81.6 V。电压峰值从正常电压过渡到较低的放电电压,再从放电电压过渡到正常电压所需的时间称之为电弧刷新时间。通过故障波形发现,烟雾条件下,A 相电压峰值为 81.67 V,没有电弧产生;火焰条件下,A 相电压峰值在 [10 V, 130 V] 的区间内变化,电弧刷新时间在 0.2~0.3 s 范围内。



(a) 烟雾单相对地故障试验电压波形



(b) 火焰单相对地故障试验电压波形 1



(c) 火焰单相对地故障试验电压波形 2

图 8 单相试验电压波形

通过图 8 比较分析,火焰条件下相电压的变化范围比烟雾条件下变化范围大,这是由于火焰温度比烟雾高,导致火焰中的带电粒子的不规则热运动比烟雾中颗粒的热运动更剧烈,使火焰中放电粒子形成的放电通道具有较大的随机性,造成火焰条件下电压变化范围大。并且正是因为火焰中粒子热运动剧烈,火焰中放电通道组建和断裂的频率快,所以火焰条件下电弧的刷新时间很短。

3.2 相间烟雾火焰故障信号特征分析

烟雾桥接 A、B 相线路时,即使烟雾浓度已经超过测量仪最大量程(9.999‰),三相电压波形仍然呈现出高度平衡的状态,如图 9 所示。经过分析,对于所产生的烟雾浓度而言,烟雾中的颗粒虽然会使导线周围的电场发生畸变^[19],但 35 kV 电压等级下的相间距离过大,不足以使相间击穿放电。

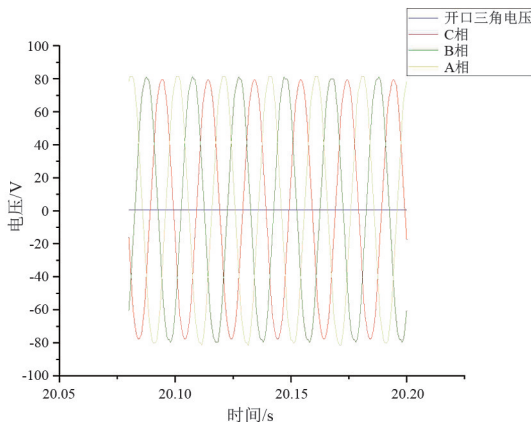


图 9 烟雾桥接相间时各电压波形

用火焰桥接 A、B 相线路时,为得到明显的现象,将相间距离缩短为 19 cm。经过多次试验,现象分为两种:1) 线路立即跳闸,电弧还未拉长就已经

熄灭;2) A、B 相击穿形成粗亮的电弧桥接间隙、并随着火焰的热气流上升形成向上拱的弧形,直至被拉断,又接着会在下方形成新的电弧,一直循环此过程,如图 10 所示。



图 10 相间击穿电弧发展过程

对线路出现立即跳闸现象的故障波形(如图 11 所示)进行分析,发现跳闸瞬间 A、B 相电压波形重合,造成相间短路故障,并且观察到 A、B 两相之间出现极短暂的弧光,导致系统中产生较大的电流,使保护动作。图 11(a)和图 11(b)分别为截取的两个时间段波形。

对未跳闸并且产生明显电弧现象的两组故障相波形(如图 12 所示)进行分析。图 12(a)和图 12(b)分别为截取的两个时间段波形。

在相间放电击穿后, A、B 相间贯穿粗亮的电弧造成相间短路,整个系统构成相间高阻短路故障。两相间隙中产生了温度极高的粗亮电弧,由于电弧是一束游离的气体,质量极轻,容易变形,在下方火焰热空气的作用下,电弧迅速向上移动,从而形成向上拱的形状。与线路跳闸 A、B 两相电压重合的情

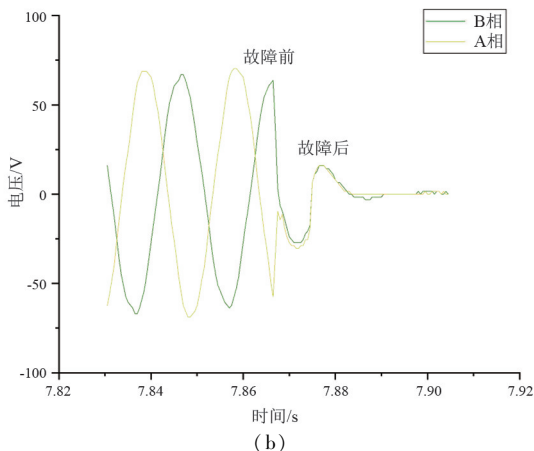
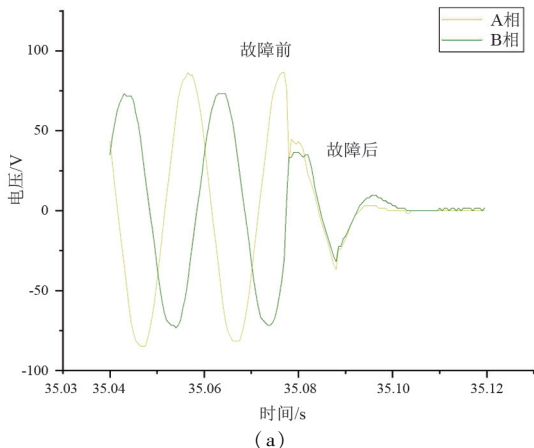


图 11 相间短路跳闸时故障相电压波形

况不同,此过程中 A、B 两相存在电压差和相位差,放电通道被拉长,通道阻抗增大,系统不会有很大的电流,所以不会导致实验室三相电源保护跳闸。

A、B 相之间的电弧属于交流电弧,当放电通道被拉长至一定阻抗时,介质的恢复强度大于电压的恢复强度,交流电弧在此放电通道上熄灭,而原放电通道下方区域满足间隙击穿条件,从而形成新的电弧,循环往复,将此过程命名为断弧重连,如图 12 所示。通过图像可以看出,故障后当 B 相电压幅值有

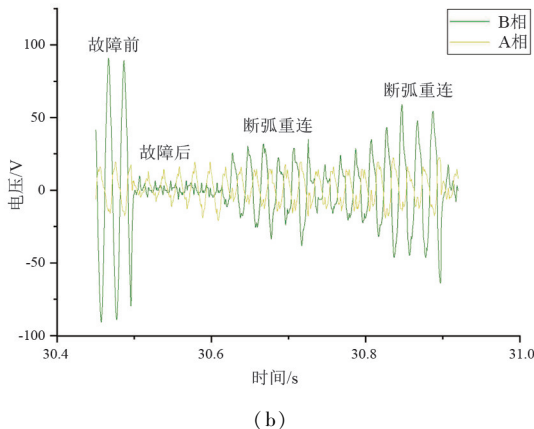
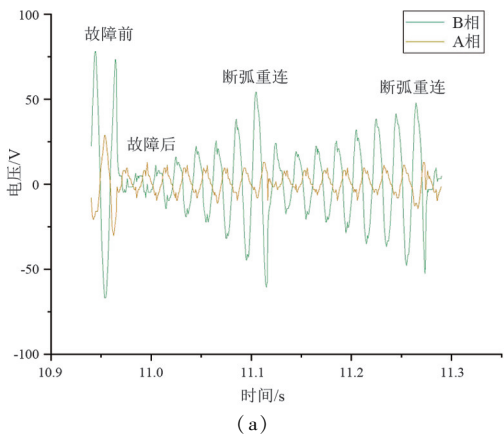


图 12 相间短路未跳闸时故障相电压波形

增大趋势时,经过6~9个周期,为0.12~0.18 s,产生断弧重连现象。

4 结 论

上面搭建了山火条件下线路击穿模拟试验平台,模拟了烟雾、火焰单相导线试验以及烟雾、火焰相间导线试验,得到了以下结论:

1)模拟烟雾条件下单相和相间导线故障试验时,当烟雾浓度为9.999‰时,开口三角电压和故障相互感器电压都没有明显变化。因此,烟雾对输电线路绝缘性能的影响很小。

2)模拟火焰单相导线试验时,由于放电程度随火焰的变化而不断变化,火焰与线路桥接的部分不断随机性地有新的纤细的电弧生成和断裂,电弧刷新时间很短。火焰与输电线路之间产生电弧会降低导线附近空气绝缘程度,导致出现单相高阻抗接地故障。

3)模拟火焰相间导线试验时,出现了相间阻抗短路故障,生成的相间交流电弧会在火焰热空气的作用下向上抬升直至拉断,又在下方生成新的放电通道,再被不断抬升拉断,以此循环。经测量,此状态下交流电弧产生和拉断时间间隔为0.12~0.18 s。因此火焰在相间距离较短的情况下,会使两相导线出现相间短路故障的现象,导致导线相间绝缘性能下降。

4)当输电线路出现单相接地故障时,故障相电压幅值并非一直最低,健全相电压幅值会出现最低电压的现象。

参考文献

- [1] 赵敏.浅析35 kV 架空线路设计的要点[J].建材与装饰,2017(47):221-222.
- [2] 朱洪志.35 kV 架空输电线路防鸟类筑巢的研究[J].上海节能,2018(11):897-900.
- [3] 陆佳政,刘毓,吴传平,等.输电线路山火卫星监测与告警算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5511-5519.
- [4] J R Fonseca, A L Tan, R P Silva, et al. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 687-694.
- [5] A Sukhmandan, D A Hoch. Fire induced flashovers of transmission lines: theoretical models[J]. IEEE AFRI-

CON 6th Africon Conference in Africa, George, South Africa, 2002.

- [6] A Robledo-Martinez, E Guzman, J L Hernandez. Dielectric characteristics of a model transmission line in the presence of fire[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 776-782.
- [7] 徐华杰.山火灾害对输电线路稳定运行的影响[J].通信电源技术,2020,37(2):214-215.
- [8] 周恩泽,胡思雨,张录军,等.电网山火灾害特征及风险预警技术[J].电力工程技术,2020,39(3):58-64.
- [9] Aroon Sukhmandan. A Theoretical and Experimental Investigation into Fire Induced Flashover of High Voltage Transmission Lines[D]. South Africa: University of KwaZulu Natal, 2004.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张雷.华北电网输电线路受山火影响特征分析[J].山东电力技术,2019,46(9):18-22.
- [15] 申元,孟见刚,徐肖伟,等.输电线路山火跳闸预估技术研究[J].云南电力技术,2017,45(4):54-57.
- [16] 吴田,刘凯,胡毅,等.植被火焰的电导率特性及其对导线-板间隙的绝缘的影响[C]//湖北省电工技术学会、武汉电工技术学会2013年度学术年会、第五届“智能电网”暨“电机能效提升”发展论坛论文集.武汉:湖北省电工技术学会,武汉电工技术学会,2013:251-259.
- [17] 卢威.模拟高风险植被火焰条件下间隙击穿特性试验研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [18] 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.
- [19] 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.

作者简介:

李唯佳(1998),女,硕士研究生,研究方向为高电压试验技术。(收稿日期:2021-10-30)