

# 山火烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响试验研究

杨弄潮<sup>1</sup>, 杨博闻<sup>1</sup>, 杨淳岚<sup>1</sup>, 张星海<sup>2</sup>, 范松海<sup>2</sup>, 陈天翔<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. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 森林山火事故造成输电线路跳闸时有发生。文中搭建了烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响试验研究平台, 设计了烟雾试验方案, 研究烟雾对 10~35 kV 输电线路空气绝缘特性影响以及烟雾浓度对输电线路单相对地和相间绝缘特性的影响。通过观察电压互感器开口三角电压和相对地泄漏电流大小和变化来判断烟雾对输电线路绝缘特性影响, 研究了不同种类烟雾在不同浓度时对泄漏电流的影响, 发现纯粹的烟雾对输电线路的绝缘特性影响较小。

**关键词:** 山火烟雾; 输电线路; 绝缘影响; 试验研究

中图分类号: TM 852 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)01-0006-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220102

## Experimental Research on Impact of Mountain Fire Smoke on Insulation of 10~35 kV Transmission Lines

YANG Nongchao<sup>1</sup>, YANG Bowen<sup>1</sup>, YANG Chunlan<sup>1</sup>, ZHANG Xinghai<sup>2</sup>, FAN Songhai<sup>2</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1</sup>

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

Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute,

Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The tripping of transmission lines occurred from time to time caused by forest and wildfire accidents. A test research platform on the insulation effect of smoke on 10~35 kV transmission lines is established, and a smoke test scheme is designed. The effects of smoke on the air insulation characteristics of 10~35 kV transmission lines are studied as well as the effects of smoke concentration on the phase-to-earth and interphase insulation characteristics of transmission lines. The influence of smoke on the insulation characteristics of transmission lines is judged by observing the triangular voltage of voltage transformer opening and the size and change of phase-to-earth leakage current. Experiments have investigated the effects of different types of smoke on leakage current under different concentration. And the experimental research shows that pure smoke has less effect on the insulation characteristics of transmission lines.

**Key words:** mountain fire smoke; transmission line; insulation effects; experimental research

## 0 引言

据统计,全世界每年森林大火次数高达 20 万余次<sup>[1]</sup>,对高压输电线路安全运行造成了极大的威胁。国内外在进行山火烟雾试验平台搭建的时候,采用的方法大多相同,并且在选用燃烧物方面基本

上都是甘蔗、木材、树枝或其他易燃物品。因为不同国家地区所种植的树木不同,故应采用最接近实际情况的植被进行研究。国内外研究表明,烟雾会对空气绝缘特性造成影响<sup>[1-17]</sup>。国外对烟雾对输电线路空气绝缘特性的影响进行了大量的试验研究发现:1)发现烟雾中针状颗粒物对线路之间空气绝缘特性造成的影响最大,最高可使其绝缘特性降低 90%<sup>[2]</sup>;2)当山火发生,在其中引入烟雾会使空气绝缘特性下降 20%左右<sup>[3]</sup>;3)击穿电压随着颗粒长

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)

度的增长而下降,认为颗粒能起到短接线路间隙的作用<sup>[4]</sup>;4)空中带电粒子会影响输电线路电场环境,并且地面合成电场会因为烟雾浓度的增大而增大<sup>[4]</sup>。国内对烟雾对输电线路之间空气绝缘特性的影响也进行了研究分析:1)烟雾会引起线路周围电场的畸变,当烟雾浓度不断增大的时候,更容易引起触发放电<sup>[5-7]</sup>;2)森林起火前,产生烟雾的时候会引入不同介电常数的电导率颗粒物,其绝缘性必定会受影响<sup>[8-12]</sup>;3)在产生烟雾的时候,带电粒子也会增多,当带电粒子漂浮在导线附近的时候,带电粒子放电产生颗粒链<sup>[13-16]</sup>,会造成线路间空气绝缘特性的下降<sup>[17-18]</sup>。

下面通过搭建 10~35 kV 试验平台,采用四川省森林地区常见的树叶,模拟在单相导线下方以及输电线路相间产生山火烟雾,通过测量各相电压、开口三角电压变化曲线和对地泄漏电流的变化,探究山火烟雾以及烟雾浓度、温度等对 10~35 kV 输电线路单相对地以及相间绝缘的影响。

## 1 试验方案

模拟山火烟雾产生在 A 相导线下方以及输电线路 A、B 相间,探究山火烟雾对 A 相以及 A、B 相间绝缘的影响,试验接线如图 1 所示。

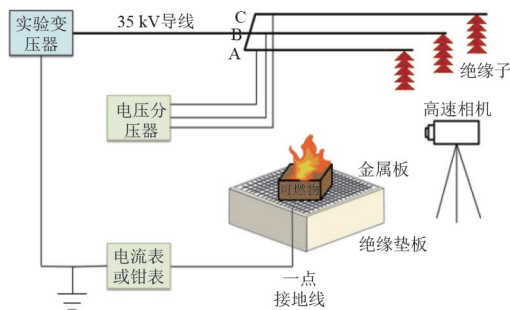


图 1 试验接线

试验平台由型号为 S7-50/35 的 Yyn0 电力变压器、变比为 35/0.1 的 0.2 级 35 kV 电压互感器以及长 5.5 m、型号为 LGJ-120 的三相导线组成<sup>[19-20]</sup>。线路两相间距为 1 m,相对地间距为 1.5 m<sup>[21]</sup>。

为便于观测烟雾浓度的情况,在导线上方 1 m 处安置了一台烟雾传感器观察烟雾浓度,通过调节实验室排风扇投切控制烟雾浓度,利用钳形电流表对泄漏电流进行测量,采用故障录波装置采集三相电压以及开口三角电压波形以观察烟雾浓度引起的

各相电压变化。

## 2 试验现象及分析

试验模拟了山火烟雾不同浓度对单相以及相间的影响。试验观察了各相电压变化以及泄漏电流的变化。各相电压随烟雾浓度变化曲线如图 2 所示。烟雾桥接单相时的开口三角电压,简称单相烟雾开口三角电压;烟雾桥接两相之间的开口三角电压,简称相间烟雾开口三角电压。试验相电压均为 20.2 kV。

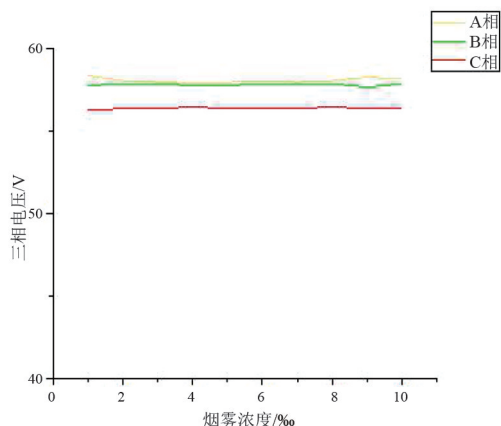


图 2 各相电位随烟雾浓度变化曲线

单相烟雾试验时开口三角电压随烟雾浓度变化曲线如图 3 所示,A 相对地泄漏电流的变化曲线如图 4 所示,单相烟雾试验时故障录波波形如图 5 所示。

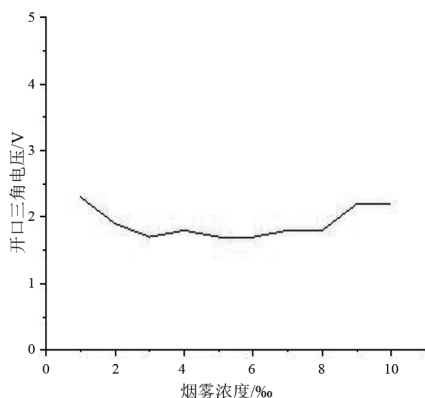


图 3 单相开口三角电压变化曲线

相间烟雾试验时,开口三角电压随烟雾浓度变化曲线如图 6 所示,单相对地泄漏电流随烟雾浓度变化曲线如图 7 所示,相间烟雾试验时故障录波波形如图 8 所示。

据图 2—图 8 可知,随着烟雾浓度的增大,线路的三相电压变化并不明显,单相和相间烟雾试验的

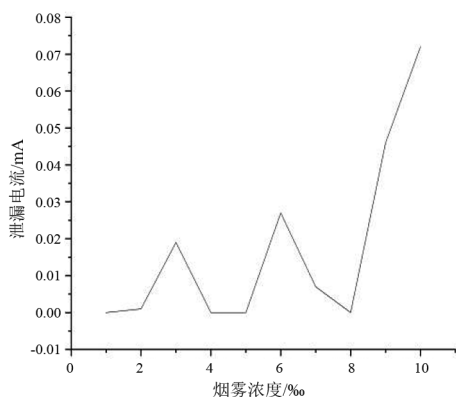


图 4 单相烟雾试验泄漏电流变化曲线

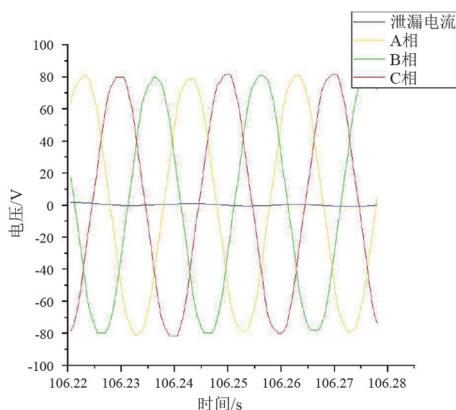


图 5 单相烟雾试验时故障录波波形

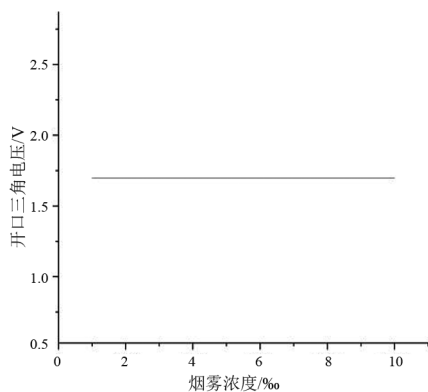


图 6 相间烟雾开口三角电压变化曲线

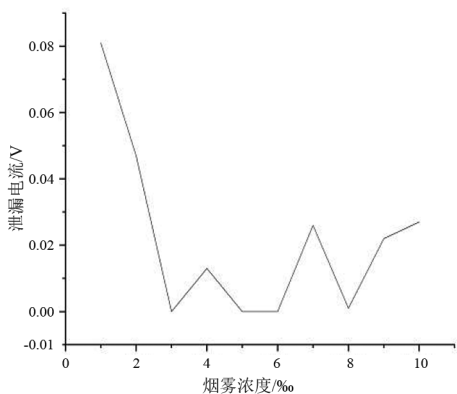


图 7 相间烟雾试验, 泄漏电流变化曲线

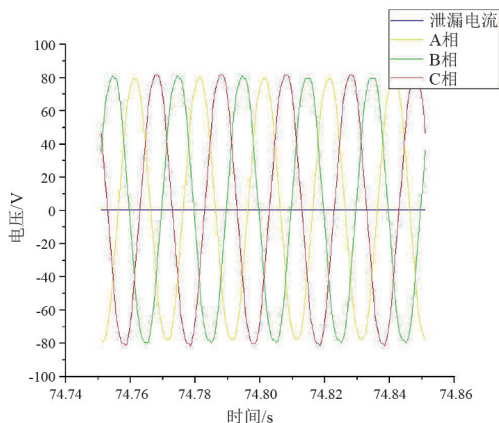


图 8 相间烟雾试验时故障录波波形

开口三角电压曲线波动很小。尽管泄漏电流会产生变化,但变化幅度很小,最高仅为 0.08 mA。故可认为烟雾的单独作用并不会使 35 kV 线路的绝缘特性下降。

### 3 山火烟雾对 10 kV 输电线路绝缘影响试验

为了进一步证明烟雾对输电线路的影响,在 10 kV 输电线路进行了极端烟雾浓度下对输电线路的影响试验。搭建的 10 kV 试验平台如图 9 所示,平台由 SY11-400/10 的 YNyn0 电力变压器、变比为 10/0.1 的电压互感器、型号为 LGJ-120 的三相输电导线、6 组 10 kV 电容器开关组等组成。通过控制不同电容器组的投切,模拟线路对地电容电流值,可调整电容电流最小级差为 1 A,可模拟最大单相接地电容电流值为 60 A。电压互感器接在模拟线路的末端,测量模拟线路的相电压和开口三角电压值。在烟雾生成装置底部接入钳形电流表测量对地泄漏电流。

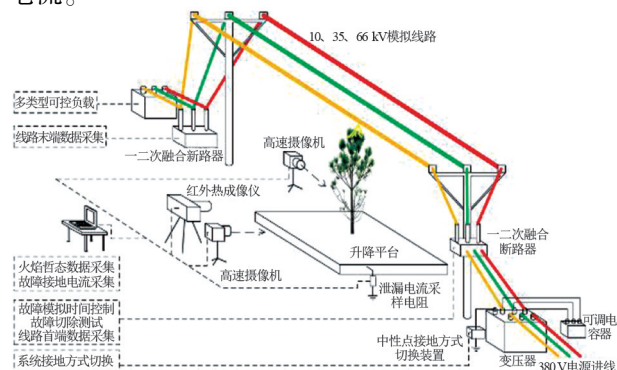


图 9 10 kV 试验平台

经查阅,凉山、甘孜发生森林大火时,周围最多的树木是松树。山火烟雾多是由周围湿润的落叶生成的,且部分区域输电线路周围有工业生产所产生的烟雾,故选用松木、树叶模拟山火烟雾,用焦炭模拟部分工业烟雾。所设计试验基于最大烟雾浓度的情况下,采用松木、树叶、焦炭 3 种不同燃烧物,分别探究不同燃烧物对输电线路的影响。图 10—图 12 分别对应树叶、松木、焦炭所产生的烟雾对三相电压、泄漏电流的故障录波波形,其中蓝色曲线代表泄漏电流。

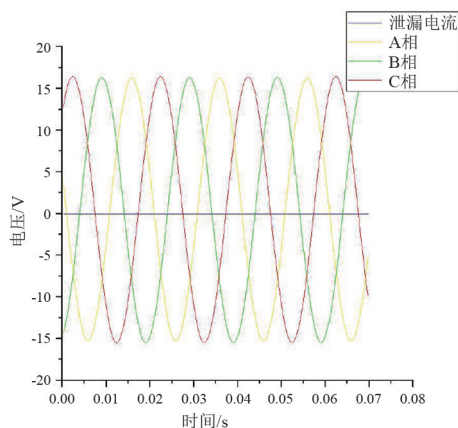


图 10 树叶烟雾对空气绝缘特性的影响

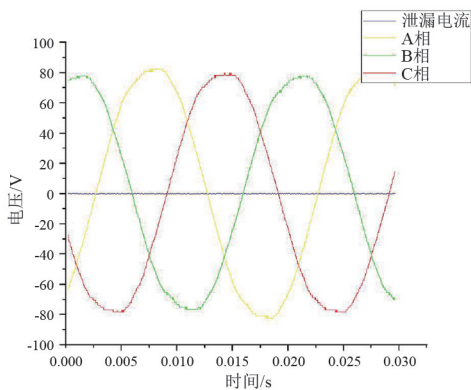


图 11 松木烟雾对空气绝缘特性的影响

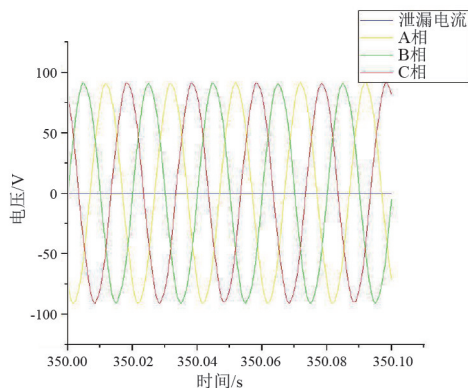


图 12 焦炭烟雾对空气绝缘特性的影响

观察相电压和对地泄漏电流的变化,在 10 kV 输电线路下,初步得出结论:3 种不同燃烧物产生的烟雾对线路的相电压和对地泄漏电流造成的影响很小,对 10 kV 线路绝缘的影响也很小。

## 4 结 论

1) 上面主要对山火前期产生的烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响进行了试验研究,通过观察烟雾情况下对地泄漏电流的变化,发现烟雾在浓度高的情况下会引起细微的泄漏电流变化。

2) 在 10 kV 输电线路中,通过对比观察 3 种不同燃烧物烟雾在浓度超出 9.999‰ 情况下三相电压和泄漏电流波形的变化,发现对 10 kV 输电线路,不同燃烧物烟雾对泄漏电流的波动影响极小,即不同物质的烟雾对空气绝缘的影响微小。

3) 国内外山火烟雾试验还做得不够多,对山火烟雾导致输电线路跳闸机理还处于初级认识阶段,对于预防山火烟雾导致输电线路跳闸的安全措施方面还存在不足,目前还没有研究给出精确的烟雾浓度、温度、火焰和电场之间的耦合关系。在后续的研究中应该考虑三者的共同作用,还需要更精细化的山火试验模拟平台。

## 参考文献

- [1] REN Xianda, LIU Jiaqiong, TANG Zhen, et al. Experimental Analysis of Fatigue Performance in Transmission Lines at Different Annealing Temperatures[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019.
- [2] 黎鹏,黄道春,阮江军,等. Gap discharge characteristic test platform influenced by multiple factors under simulated mountain fire condition [P]. 2015-02-18.
- [3] SU Haohui, SUN Meng, SHANG Jianing. Research on Stereoscopic Monitoring and Positioning Technology of Mountain Fire in EHV Transmission Lines [C]. IEEE, 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2019.
- [4] 贺政. 基于输电线路的山火监测系统 [P]. CN201620230399.7. 2016.
- [5] 王祥祥. 山火引起超高压输电线路跳闸的机理及防范分析[J]. 企业科技与发展, 2018(2): 207-209.
- [6] 祝贺, 刘程. 山火导致输电线路间隙击穿特性的研究现状[J]. 电瓷避雷器, 2018(4): 150-159.



浓度对击穿电压的影响较小。当烟雾浓度达到 9.999% 以上水平时,与单纯温度因素影响相比,枯木树叶产生的烟雾使击穿电压有所降低但不明显,说明枯木树叶产生的烟雾对击穿电压影响较小,远低于温度的影响。

3) 当酒精火焰高度升高但未桥接间隙时,击穿电压降低,与同阶段单纯温度因素影响下的变化幅度基本一致;当酒精火焰和间隙临界桥接时,击穿电压持续下降且下降明显;当酒精火焰完全桥接间隙时,击穿电压变化幅度与同阶段单纯温度因素影响下的变化幅度基本一致。当气隙温度稳定时,击穿电压随酒精火焰高度的变化幅度较小,说明在酒精火焰完全桥接间隙时,温度为影响间隙击穿特性的决定性因素。同时,当酒精火焰完全桥接间隙且气隙温度稳定时,击穿电压的变化幅度较小,所获得的击穿电压可视为最低击穿电压。

#### 参考文献

- [1] 张文亮,陆家榆,鞠勇,等.±800 kV 直流输电线路的导线选型研究[J].中国电机工程学报,2007,27(27):1-6.
- [2] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [3] 舒印彪.中国直流输电的现状与展望[J].高电压技术,2004,30(11):1-2.
- [7] 蒋文权.山火对输电线路流注放电的影响机理[D].长沙:湖南大学,2019.
- [8] 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.
- [9] 何诚,舒立福,刘柯珍,等.广西地区山火引起高压线路跳闸环境特征研究[J].消防科学与技术,2020,39(12):1626-1629.
- [10] 邵尤国,李辉,赵洁,等.山火条件下的特高压输电线路击穿概率模型研究与分析[J].电测与仪表,2018,55(21):31-35.
- [11] 王强.超特高压输电线路防山火管理分析与研究[J].中国战略新兴产业,2020(10):15.
- [12] 刘士嘉,段泽龙.高压输电线路山火跳闸原因分析及对策[J].消防界(电子版),2019,5(8):51.
- [13] 周志宇.山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [14] 刘丛洋.超高压架空输电线路的山火灾害防控探究[J].科技与创新,2016(4):103-104.
- [15] 王振华.模拟山火条件下典型高压输电线路闪络和受

- [4] 舒印彪,张文亮.特高压输电若干关键技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.
- [5] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 叶立平,陈锡阳,何子兰,等.山火预警技术在输电线路的应用现状[J].电力系统保护与控制,2014,42(6):145-153.
- [9] 祝贺,刘程.山火导致输电线路间隙击穿特性的研究现状[J].电瓷避雷器,2018(4):150-159.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

#### 作者简介:

刘 磊(1996),男,硕士研究生,主要研究方向为高电压试验技术。

(收稿日期:2021-10-28)

(上接第 9 页)

- 损特性及机理分析[D].南京:南京工业大学,2016.
- [16] 李斌,杜卫,朱海波,等.山区地带发生的山火对超高压输电线路的影响[J].工程技术(全文版),2016:210.
- [17] 万能,庄严,马超.高压输电线路山火跳闸机理分析及防范措施探讨[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2016,21(1):70-72.
- [18] 刘程,孔祥美.山火条件下±800 kV 输电线路合成电场仿真研究[J].黑龙江电力,2020,42(5):416-420.
- [19] 于晓翔.一起全密封 35 kV 变压器故障分析[J].电气技术,2020,21(6):91-94.
- [20] 电力设备预防性试验规程:DL/T 596—1996[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [21] 电力安全工作规程 高压试验室部分:GB 26861—2011[S].北京:中国电力出版社,2012.

#### 作者简介:

杨弄潮(1999),男,在读硕士研究生,研究方向为高压电试验技术。

(收稿日期:2021-10-29)