

山火对 10~35 kV 输电线路安全运行影响试验研究

杨佳才¹,任欣悦¹,王 勋¹,张星海²,范松海²,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.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:文中设计搭建了山火对 10 kV、35 kV 输电线路安全运行影响试验研究平台,燃烧松木、稻草和灌木模拟 10 kV、35 kV 输电线路下发生山火,研究了山火条件下输电线路三相电压、导线对地泄漏电流、零序电压变化特性;研究分析了火焰高度、火焰宽度对 10 kV 输电线路绝缘的影响。试验结果表明:山火能引起输电线路单相高阻接地和相间短路;造成单相高阻接地和相间短路是电压等级、对地距离、火焰高度、火焰宽度等多种因素共同作用的结果;火焰是否桥接空气间隙是影响空气绝缘的重要因素。研究了试验过程中出现的输电线路对火焰放电、受火焰影响的某相电压低于其他相电压等现象,得出了山火对 10 kV、35 kV 输电线路影响原因和规律。

关键词:山火;输电线路;运行影响;试验研究

中图分类号:TM 852 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)01-0001-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220101

Experimental Research on Influence of Mountain Fire on Safe Operation of 10~35 kV Transmission Lines

YANG Jiakai¹, REN Xinyue¹, WANG Xun¹, ZHANG Xinghai², FAN Songhai², CHEN Tianxiang¹

(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: An experimental research platform for the impact of mountain fire on safe operation of 10 kV and 35 kV transmission lines is designed and established. Pine, straw and shrubs are burnt to simulate the mountain fire fault of 10 kV and 35 kV transmission lines, and the variation characteristics of three-phase voltage, conductor to ground leakage current and zero-sequence voltage of transmission lines under mountain fire are studied. The effects of flame height and flame width on the insulation of 10 kV transmission line are studied and analyzed too. The test results show that mountain fire can cause single-phase high resistance grounding and phase to phase short circuit of transmission line, which are the results of the joint action of voltage level, distance to ground, flame height, flame width and other factors, and whether the flame bridges the air gap is an important factor affecting air insulation. The phenomena that the transmission line discharges to the flame and the voltage of one phase affected by the flame is lower than that of other phases during the test are studied, and the causes and laws of mountain fire on 10 kV and 35 kV transmission lines are obtained.

Key words: wildfire; transmission line; operation effect; experimental research

0 引言

森林大火不仅破坏环境、威胁人民的生命财产

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)

安全,还对输电线路的安全稳定运行造成极大影响,对整个电网的安全运行造成巨大挑战^[1-3]。从国家电网和南方电网统计的事故案例中能够看到山火导致输电线路跳闸非常频繁^[4]。同时,在中国配电网线路中,10 kV、35 kV 配电网线路作为主要的配电

网线路,承担着城市内与城乡之间的输电任务,在电力传输中起着重要作用。因此,研究山火对 10 kV、35 kV 输电线路安全运行的影响可以更准确地认识森林火灾导致线路跳闸这一故障并找出应对措施,具有重要意义。

为减少山火导致输电线路跳闸故障的发生,国内外学者对输电线路在山火等多种条件下的故障特性进行了一系列的模拟试验研究。国外 Uhm H S 认为火焰中离子对放电的影响类似于流注,能为放电通道注入大量的电荷^[5]。美国电科院对交流导线板间隙在火焰条件下的击穿特性进行了研究,在试验初期泄漏电流主要为 100 μA 的电容电流,随着火焰高度逐渐增高,在临近击穿前,泄漏电流达到了 2.3 mA,这说明火焰中的电子和离子降低了线路间隙的绝缘强度^[5]。国内尤飞、吴田等试验分析了杉树木垛火焰在不同间隙下的工频击穿特性,并分析了火焰条件下间隙的击穿机制,认为导致线路绝缘下降的主要原因有火焰高温、高电导率以及颗粒与灰烬等^[6-7]。黄道春、黎鹏等在植被火条件下进行了导线-板间隙击穿特性的试验,发现击穿电压、泄漏电流都与火焰有关系^[8-10]。

现有相关模拟试验研究平台尺度小且考虑的因素较为单一,未考虑实际输配电线路结构参数和环境条件等。下面设计搭建了 10 kV、35 kV 三相输电线路试验研究平台,研究山火条件下 10 kV、35 kV 输电线路三相电压、泄漏电流和零序电压的变化和规律。

1 试验平台与试验对象

为模拟实际输电线路与山火环境,设计搭建如图 1 所示的试验平台。

10 kV 输电线路试验平台主要由型号为 SY11-400/10、连接组别为 YNyn0 的电力变压器,变比为 10/0.1、0.2 级的 10 kV 电压互感器以及长 5 m、型号为 LGJ-120 的三相导线组成,以模拟电压等级为 10 kV 的线路段,通过并联电容器组改变线路电容电流大小。

35 kV 输电线路试验平台主要由型号为 S7-50/35、连接组别为 Yyn0 的电力变压器,变比为 35/0.1、0.2 级的 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,以模拟电压等级为 35 kV 的线路段,通过并联电容器组改变线路电容电流大小。

经调研,四川凉山、甘孜等森林火灾高风险区典型可燃物为松木、灌木、油桉、枯落物等,故使用松木、灌木和稻草(模拟枯落物)作为燃烧材料模拟实际森林火灾。

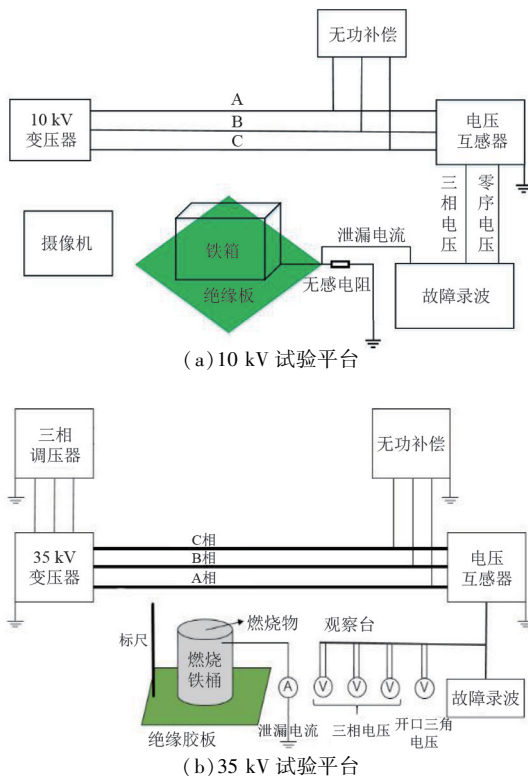


图 1 火焰对 10 kV、35 kV 输电线路影响试验平台

2 山火对 10 kV 输电线路安全运行影响

2.1 模拟火焰对单相导线的影响

将 C 相设为故障相,三相导线相间距离为 60 cm,对地距离为 52 cm。导线对地距离通过遥控燃烧铁桶下的升降平台调整,火焰高度与宽度根据堆放的木垛宽度、高度和层数调整。首先,观察并记录没有火焰时试验平台正常工作波形以作比较,将松木搭成 30 cm×30 cm×20 cm 的木垛放入铁箱中点燃,导线对铁箱距离 52 cm,火焰桥接线路时试验发现监测信号波形与正常运行波形几乎一致;缩短对地距离为 26 cm 后,波形仍无变化。引入绝缘子模拟 10 kV 线路杆塔遭遇火灾情况,绝缘子高 13 cm,火焰桥接燃烧时试验数据仍无变化,后在绝缘子上绑

一接地铁丝且使导线距铁丝 3 cm 时,火势的变化使得导线发生单相放电接地。

所设计试验条件下,火焰使得线路发生单相接地的最长对地距离为 3 cm,将此距离设为临界击穿距离并进行不同材料燃烧试验^[11-12],结果发现 3 种材料燃烧情况下均出现了放电现象和单相接地,如图 2、图 3 所示,但线路对火焰放电还未接地时的零序电压幅值不同(如图 4 所示),说明不同材料燃烧产生的火焰降低空气绝缘程度不同,灌木燃烧时零序电压最大,稻草次之,松木燃烧时零序电压最小。



图 2 导线对火焰放电

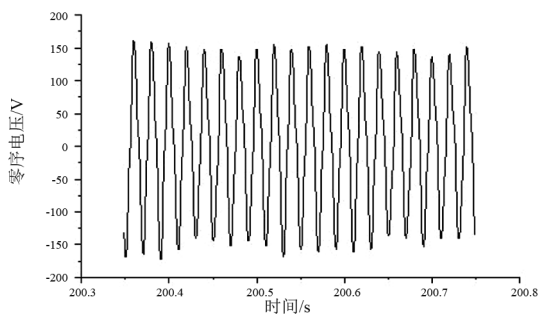


图 3 导线与铁丝 3 cm 间隙被击穿造成单相接地

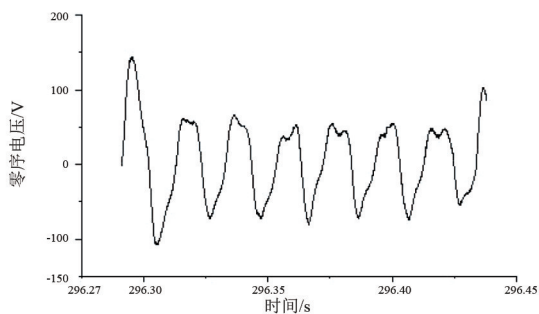
通过摄像机记录的火势变化趋势如图 5 所示。与故障录波仪记录的泄漏电流波形进行比对发现:泄漏电流随火势的变化(即火焰桥接空气间隙的情况)而变化^[13],通常在火焰全部桥接空气间隙时有明显的放电现象,故泄漏电流呈现脉冲状(如图 6 所示);3 种燃烧材料下泄漏电流峰值均在 1.0~1.2 A,受制于试验平台模拟线路本身的对地电容电流。

试验平台正常工作时二次侧三相电压峰值为 81.6 V,通常受火焰影响的故障相电压降低,其他两相电压升高^[14-15];但也能看到故障相电压有时会出现比正常运行电压高(如图 7 所示)的情况或故

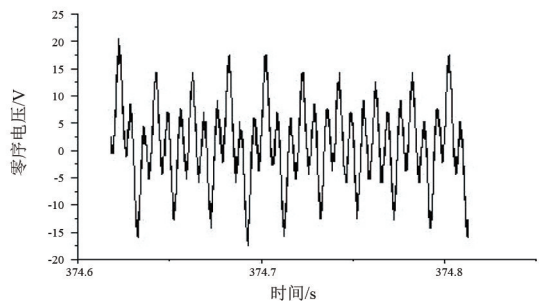
障相电压幅值并非最低的现象(如图 8 所示),说明火势的不确定性会导致线路故障相的识别比较困难。



(a) 灌木



(b) 稻草



(c) 松木

图 4 线路对火焰放电时零序电压

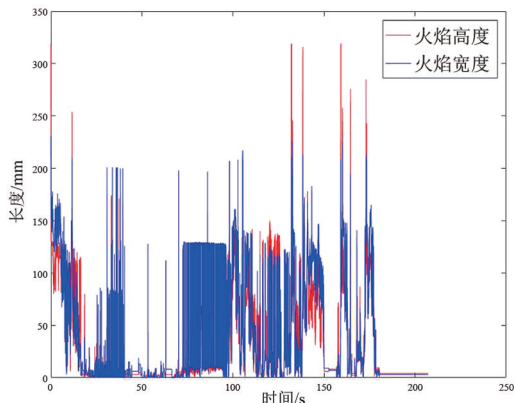


图 5 火势变化趋势

2.2 模拟火焰对两相导线的影响

将 B、C 两相设为故障相,为模拟实际导线风偏

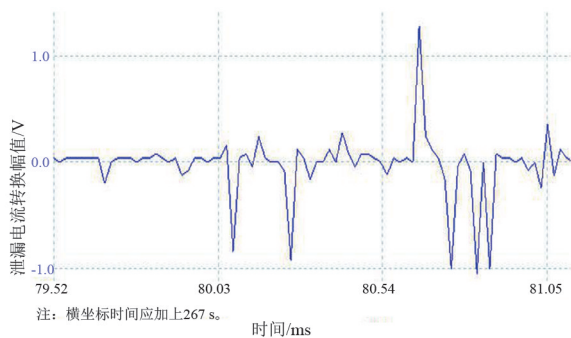


图 6 单相导线对地泄漏电流变化波形

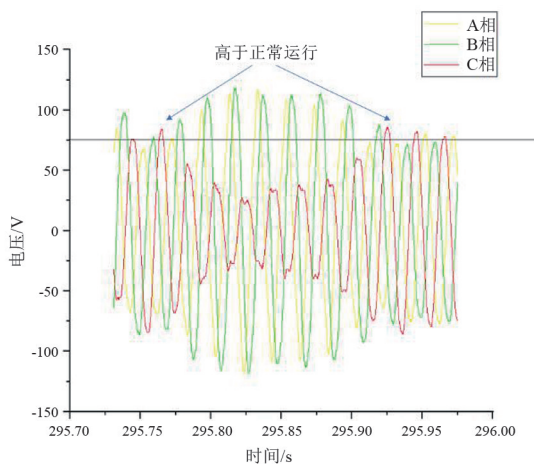


图 7 故障时 C 相电压比正常运行时 C 相电压高

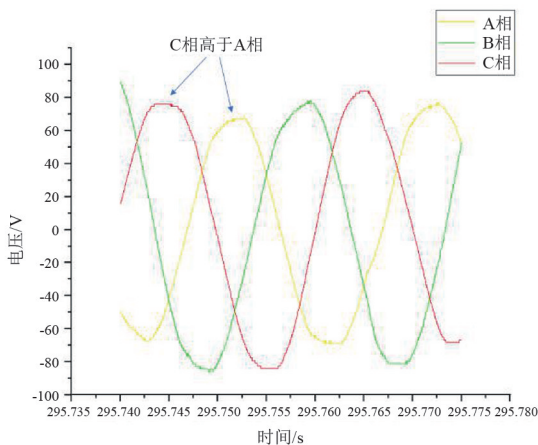


图 8 故障相 C 相电压高于正常相 A 相电压

情况,将正常运行下三相导线相间距离 60 cm 缩短为 30 cm,研究极端情况下火焰对相间的影响。导线对地距离通过升降平台调整,火焰高度与宽度根据堆放的木垛层数和宽度调整。首先,观察并记录没有火焰时本试验平台正常工作波形以作比较,再将 130 cm×50 cm×13 cm 的稻草置于 B、C 两相间,结果发现大面积稻草燃烧产生的火

焰并没有造成相间短接,对相间空气绝缘的影响不大,可能是由于 30 cm 的相间距离太大不足以造成其击穿。

3 山火对 35 kV 输电线路安全运行影响

3.1 模拟火焰对单相导线的影响

将 A 相设为故障相,通过升降平台调整对地距离,在对地距离为 20 cm、相间距离为 38 cm 时发生明显的单相接地(如图 9 所示),泄漏电流小于三相导线对地电容电流之和,从故障录波图(如图 10 所示)中可以看到 A 相电压并没有降为 0,与金属接地有明显区别,说明火焰具有比较高的阻抗。



图 9 单相接地

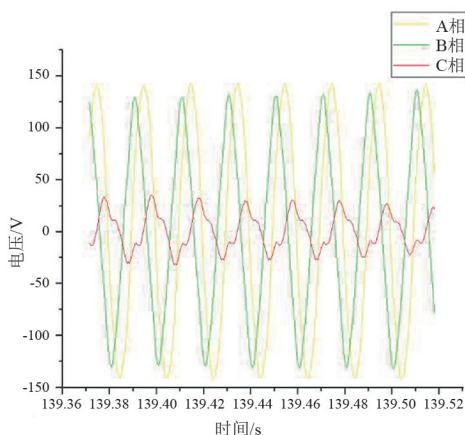


图 10 单相导线对火焰持续放电故障录波

3.2 模拟火焰对两相导线的影响

将 A、B 两相设为故障相,通过升降平台调整对地距离,在对地距离为 20 cm、相间距离为 19 cm 时发生明显的相间短路(如图 11 所示),电弧随着火焰的抬升形成通路,三相电源保护开关并未跳闸。从故障录波图(如图 12 所示)也可看到 A、B 两相电压并未重合,同样说明火焰具有比较高的阻抗。

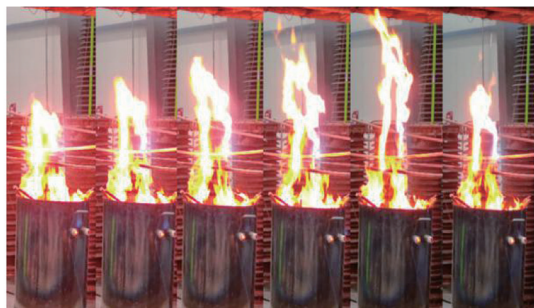


图 11 相间短路

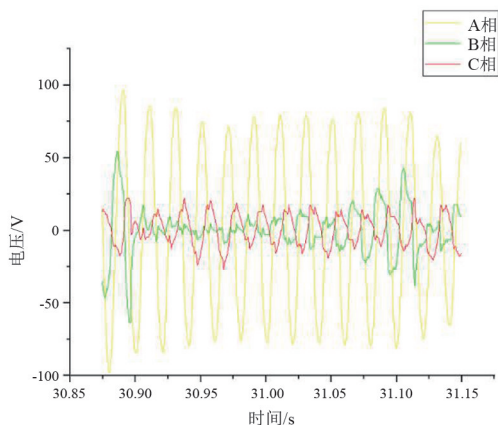


图 12 相间短路时的故障录波

4 结 论

1) 所设计试验平台下火焰引发单相接地和相间短路的发生,与电压等级、对地距离、火焰高度、火焰宽度等多种因素有关。

2) 火焰情况下单相接地时故障相电压并未降为 0 且泄漏电流小于三相导线对地电容电流,与金属接地比较,说明火焰具有高阻抗的特性。

3) 火焰影响单相导线时会出现故障相电压高于正常运行时故障相电压的情况或故障相电压并非最低的现象,从而导致发生山火时难以识别故障相。

4) 3 种不同材料燃烧时零序电压幅值不同,说明不同材料燃烧产生的火焰降低空气绝缘的程度不同,灌木燃烧时开口三角电压最大,稻草次之,松木燃烧时开口三角电压最小。以上现象是由于植物种类的影响还是火焰内在的温度等因素的影响还需要深入研究。

参考文献

[1] 牟国龙.森林火灾对林区输电线路的危害及设计对策[J].内蒙古电力技术,2013,31(4):97-99.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 吴田,阮江军,胡毅,等.500 kV 输电线路的山火击穿特性及机制研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):163-170.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] 张云,尤飞,陈海翔,等.山火条件下高压输电线路放电特性[J].消防科学与技术,2012,31(1):1-5.
- [13] 陈孝明,魏晗,阮玲,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.
- [14] LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Study on the dielectric characteristics of simulation transmission line gap under fire conditions[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), Ann Arbor, MI, 2015:233-236.
- [15] E I Koufakis, P T Tsarabaris, J S Katsanis, et al. A Wildfire Model for the Estimation of the Temperature Rise of an Overhead Line Conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2):1077-1082.

作者简介:

杨佳才(1999),男,在读硕士研究生,研究方向为高电压试验技术。

(收稿日期:2021-10-30)