

模拟鸟粪条件下 110 kV 绝缘引流线闪络特性研究

刁志文¹, 金海峰¹, 张永鑫¹, 李晓双¹, 邓润坤², 毕茂强²

(1. 国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司, 宁夏 吴忠 751100;

2. 重庆理工大学 电气与电子工程学院, 重庆 400054)

摘要:通过对宁夏地区鸟害事故和引流线故障的统计,分析了鸟粪引起引流线故障的原因。采用金属导体模拟鸟粪,在工频条件下研究了不同结构参数对绝缘引流线闪络特性的影响,并结合仿真分析,获取了绝缘引流线绝缘层厚度、导体直径、端部形状等参数对绝缘引流线闪络特性的影响规律。结果表明:相较于导体直径,绝缘层厚度对绝缘引流线闪络特性的影响更大,且在一定范围内,绝缘层厚度越大,闪络电压越大;绝缘引流线沿面闪络电压与沿面距离的增加并非一直呈正相关关系,而是在一定范围内,随沿面距离 d 的增加而升高,之后趋于平稳而接近于某峰值;加装终端头可增加绝缘引流线的沿面爬电距离,能有效提高绝缘引流线的闪络电压,而且还能有效阻碍沿面电弧的发展,对于绝缘引流线沿面闪络现象发生具有明显的改善作用。

关键词:工频;击穿;闪络;鸟粪;引流线

中图分类号:TM206 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.08.016

Study on flashover characteristics of 110 kV insulation drainage line under simulated bird dropping

DIAO Zhiwen¹, JING Haifeng¹, ZHANG Yongxin¹, LI Xiaoshuang¹, DENG Runkun², BI Maoqiang²

(1. Wuzhong Power Supply Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Wuzhong 751100, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology,

Chongqing 400054, China)

Abstract: On the basis of the statistics of bird damage accidents and drainage line faults in Ningxia, the causes of drainage line faults caused by bird dropping were analyzed. The metal conductor was used to simulate bird dropping. Under the condition of power frequency, the flashover characteristics of insulated drainage lines with different structural parameters were studied. Combined with simulation analysis, the influence of insulation thickness, conductor diameter, end shape and other parameters on the flashover characteristics of insulated drainage lines was obtained. The results show that compared with the diameter of conductor, the thickness of insulation layer has big effect on the flashover characteristics of the insulation drainage line, and within a certain range, the greater the thickness of insulation layer, the greater the flashover voltage. The flashover voltage along the insulation drainage line is not always positively correlated with the increase of surface distance. Within a certain range, the flashover voltage increases with the increase of surface distance d and then tends to stable and close to a peak value. The installation of terminal head can increase the creepage distance along the surface of insulation drainage line, effectively improve the flashover voltage of the insulation drainage line, and effectively hinder the development of surface arc, which has a significant improvement on the surface flashover of insulation drainage line.

Key words: power frequency; breakdown; flashover; bird dropping; drainage line

0 引言

近年来,随着生态环境的改善,宁夏地区鸟类数量增多,鸟类活动区域与活动频次随之增加,导致输电线路的跳闸故障时有发生^[1-2],目前已严重威胁到宁夏地区输电线路的安全运行。据宁夏电网

相关统计表明^[3],因鸟害引起的输电线路故障占比仅次于外力破坏,其中鸟粪闪络占鸟害事故的90%以上。即使相关部门采取了大量的防鸟措施,如加装防鸟刺、防鸟挡板、风车式驱鸟器、大辅助伞裙等,仍然不能有效杜绝鸟害故障的频繁发生^[4-5]。

因防鸟设施的装设齐全,加之鸟类对环境的较强适应性,愈渐增多的鸟类选择在杆塔的地线及其

附近活动。由于引流线挂于地线横担下方,挂串点塔材又由较长的角钢组成,其上方横担便成为鸟类落脚栖息、排便的极佳位置^[6],故与引流线相关的鸟粪闪络故障日渐上升。据宁夏地区不完全统计,在2015—2020年期间发生的8次与引流线相关的鸟害故障中,就有5次被确定为与鸟粪闪络相关,其中属鸟粪直接短接引流线及绝缘子金具造成线路跳闸的故障最为突出。如固原地区1A6-型转角塔已多次发生鸟粪短接引流线的跳闸故障,因其部分耐张或转角塔杆塔水平面与导线走向不平行,引流线横担无法与导线走向一致,加之一侧横担偏高,与地线距离又较为接近,导致空间电气间隙距离不足,鸟类在此情况下的排便常引起线路单相接地,造成线路跳闸^[7]。

目前,许多学者对于输电线路鸟害跳闸故障十分关注,并提出了许多有效的绝缘防护措施,但对于引流线绝缘化改造方面的研究却鲜有报道。总体来看,输电线路上一一般采用对导线、金具等添加绝缘护套等方式来增强其电气绝缘性能,以降低鸟粪闪络故障发生的概率^[8-9]。如刘世涛等^[10]采用绝缘包覆的方法对复合绝缘子均压环进行了绝缘化改造,并通过试验测试证明,在同等条件下,均压环经绝缘包覆后与普通均压环的均压效果基本一致,在一定程度上不仅能降低绝缘子表面的最大场强,还可以显著提高复合绝缘子的鸟粪闪络电压,从而降低鸟粪闪络发生的概率。梅红伟等^[11]开展了针对复合绝缘子高压端输电导线安装绝缘护套的研究,并通过理论证明绝缘护套可以等效成绝缘子电容和护套电容相串联的物理模型,通过安装绝缘护套可使得金具及均压环的电位呈悬浮电位,使得均压环电位低于导线电压,从而降低鸟粪闪络的概率。马奎等^[12]通过仿真与试验对绝缘护套良好的防鸟粪闪络效果进行了验证,并提出只有当绝缘护套厚度足够的情况下,才能有效阻止鸟粪闪络事故的发生,但并没有明确对护套厚度、长度的合理选择。张清文^[13]通过人工模拟鸟粪闪络试验,研究了绝缘护套对220 kV输电线路鸟粪闪络特性的影响,试验现象发现当鸟粪下落时,绝缘护套表面容易产生剧烈的放电现象,而鸟粪与金具间只能产生局部电弧,难以形成完整的闪络,但作者并未对该现象产生的具体原因进行详细的分析。

近年来,部分学者提出同样可以对引流线加装绝缘护套以降低鸟粪闪络故障发生的概率^[14],但从现场施工角度看,绝缘护套的安装过程较为复杂,且在加装过程中导线部分还易发生弯曲,使其表面

护套层与导线本体产生不同程度的位移,容易形成细微间隙,致使其电气绝缘性能下降^[15],较难达到预期的防鸟效果。宁夏吴忠供电公司对原有的引流线进行了一体化绝缘化改造,以提高引流线与地线或铁塔的绝缘水平,减低鸟粪闪络概率,并在某110 kV线路进行了试挂网运行,其应用现场如图1所示。



图1 绝缘引流线应用现场

Fig.1 Application site of insulation drainage line

本文以该110 kV绝缘引流线为样品,通过搭建人工模拟鸟粪闪络平台,测试并研究绝缘引流线绝缘层厚度、导体直径、端部形状等参数对绝缘引流线闪络特性的影响,以期对引流线的绝缘化改造、设计提供参考。

1 试验样品及平台

1.1 试验样品

本文采用的绝缘引流线样品参照GB 51302—2018《架空绝缘配电线路设计标准》制定^[16],其由内部金属导体 d_2 、外部绝缘层(XLPE) d_1 、半导体层(厚度约为0.6 mm)组成,绝缘引流线截面结构如图2所示,表1为6种样品的详细结构参数,其中A、B、C、D、E为绝缘引流线,F为裸导线。

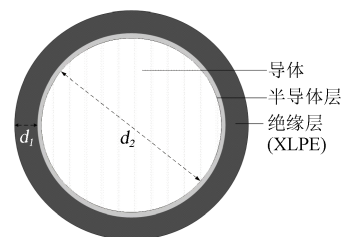


图2 绝缘引流线截面结构

Fig.2 Structure of insulated drainage line

1.2 试验平台搭建

本文试验装置主要采用HRYDJW型变压器,最大输出电压为200 kV,最大输出电流为250 mA;分压器采用NHRC交直流分压器,额定电压为200

表1 引流线结构参数

Tab.1 Parameters of drainage line structure

样品种类	长度 L/mm	导体直径 d_2/mm	绝缘层厚度 d_1/mm
A	5 000	20	2.5
B	5 000	20	2.9
C	5 000	20	3.4
D	5 000	24	4.5
E	5 000	27	4.5
F	5 000	20	0

kV, 变比为 1 000:1, 精度为 0.1。绝缘引流线通过模拟导线与高压端相连, 中部通过 110 kV 悬式绝缘子固定。试验采用铜棒(管径为 8 mm)模拟现实中鸟粪通道^[17], 现场试验装置接线如图 3 所示。

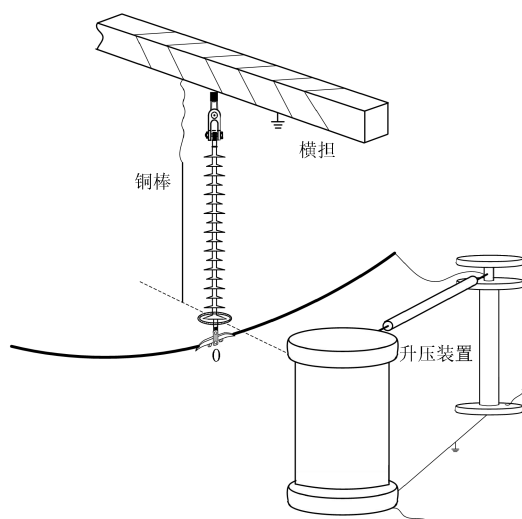


图3 试验装置接线图

Fig. 3 Wiring diagram of test device

2 试验原理、方法及结果分析

2.1 闪络试验原理及方法

引流线在挂网运行中, 与其相关的鸟粪闪络故障可分为鸟粪直接滴落在线体表面引发的沿面闪络故障和因鸟粪滴落在线体附近引发的闪络击穿故障, 其中鸟粪在线体附近的下落可分为沿绝缘引流线正上方、侧方滴落两类。为获得各参数对绝缘引流线闪络特性的影响, 须分别对以上不同的鸟粪闪络故障类型进行模拟试验。

文中所有闪络试验均采用平均闪络电压法进行^[18], 在相同条件下, 对样品进行连续多次闪络试验, 每次闪络试验间隔约 5 min, 记录其多次闪络电压, 取其算术平均值 U_{av} 作为该样品的平均闪络电压, 升压方式均采用均压升压法^[19], U_{av} 的计算公式如式(1)~(2)所示。

$$U_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \quad (1)$$

$$\sigma_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_i - U_{av})^2}{N - 1}} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)~(2)中: U_i 为第 i 次闪络击穿电压; N 为闪络击穿试验总次数, 本文闪络试验均取 $N=5$; σ_{av} 为平均闪络电压法所得的标准偏差。

(1) 闪络击穿试验

采取铜棒模拟鸟粪, 将铜棒分别置于绝缘引流线正上方 $H=10\text{ cm}$ 、侧方 $D=10\text{ cm}$ 处进行闪络击穿试验, 分别模拟正上方和侧方滴落的鸟粪闪络故障, 图 4 为闪络击穿试验示意图。

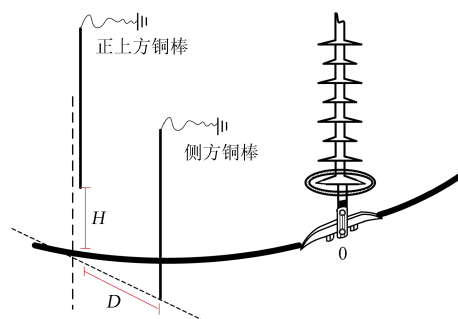


图4 闪络击穿试验示意图

Fig. 4 Flash breakdown diagram

(2) 沿面闪络试验

沿面闪络试验通过自制接地电极(以下简称地电极)模拟现实中滴落在绝缘引流线表面的鸟粪, 地电极置于绝缘引流线表面, 至高压端的沿面相对距离为 d , 试验中 d 分别取 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 cm, 图 5 为沿面闪络试验示意图。

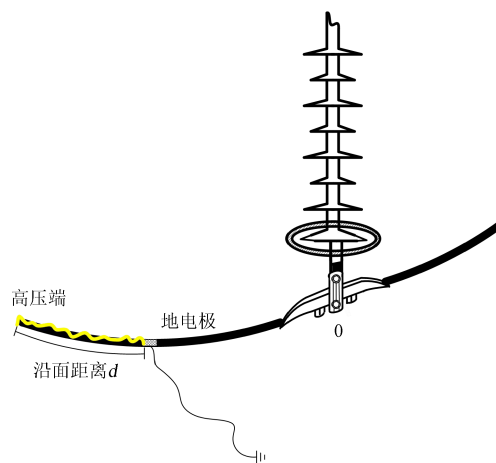


图5 沿面闪络试验示意图

Fig. 5 Surface flashover test schematic

2.2 闪络试验结果及分析

(1) 闪络击穿试验结果

图 6 为绝缘引流线闪络击穿试验结果。从图 6 可知, 铜棒置于引流线上方 10 cm 情况下的 U_{av} 略低

于铜棒置于引流线侧方 10 cm 情况下的 U_{av} , 其可能的原因为当铜棒置于引流线正上方时, 其端部正对引流线上表面, 竖直向下的电场较为集中, 加之铜棒端部的电场畸变又最为严重, 所以同样的间隙距离条件下, 正上方情况下的 U_{av} 略低, 也在一定程度上说明相较于侧方下落, 鸟粪在引流线正上方下落时, 更容易发生闪络击穿。

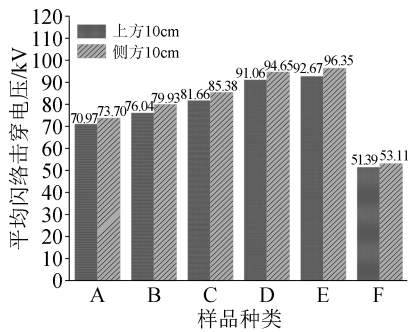


图6 绝缘引流线闪络击穿试验结果

Fig.6 Flashover and breakdown test results of insulated drain wire

注: 本次试验环境温度变化范围为 15.7~16.2℃, 相对湿度变化范围为 79.8%~83.2%。

虽然两种情况下的 U_{av} 不同, 但各参数对 U_{av} 的影响规律较为类似。以侧方 10 cm 举例, 相较于 F 裸导线在 53.11 kV 发生闪络击穿, 5 种绝缘引流线的 U_{av} 均得到一定程度的提高, 其中 D 与 E 绝缘层较厚, 其二者的 U_{av} 上升最为明显, U_{av} 分别为 94.65 kV、96.35 kV, 提升比例分别为 78.2%、81.4%。D、E 的 U_{av} 相差不大, 由于两者绝缘层厚度相同, 而 D 的管径小于 E 的管径, 在一定程度上表明绝缘引流线导体直径大小对绝缘引流线闪络击穿电压的影响不大。

同样以侧方 10 cm 为例, 从 A、B、C 3 种样品的 U_{av} 可以看出, 相较于 F 裸导线, 3 种样品的闪络电压分别提高了 38.8%、50.5%、60.7%, 结合前文 D、E 的 U_{av} , 表明在一定范围内绝缘引流线绝缘层厚度越大, 其闪络击穿电压越高。从闪络电压上升幅度来看, 相较于导体直径, 绝缘层厚度对绝缘引流线闪络击穿电压的影响更大, 这也正是 D、E 样品的 U_{av} 远大其他样品的原因。

(2)沿面闪络试验结果

图 7 为绝缘引流线在不同沿面距离下的平均闪络电压 U_{av} 测试结果。从图 7 可以看出, 在一定范围内, 随着沿面距离 d 的增加, A、B、C、D、E 5 种绝缘引流线的 U_{av} 均呈先增加, 后续趋于平缓而接近于某峰值的趋势。其中 D、E 的闪络电压峰值较为接近,

峰值基本稳定在 75 kV 左右, 进一步说明导体直径大小对于绝缘引流线沿面闪络电压的影响不大。

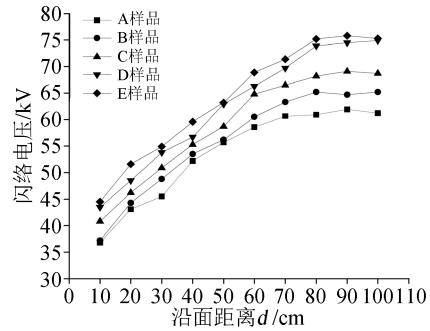


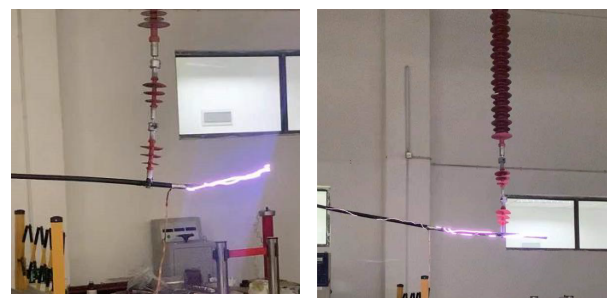
图7 沿面闪络电压与距离之间的关系

Fig.7 The detailed results of surface flashover test

注: 本次试验环境温度变化范围为 15.7~16.2℃, 相对湿度变化范围为 79.8%~83.2%。

对于 A、B、C 3 种绝缘引流线, 其 U_{av} 峰值基本分别稳定在 61、65、68 kV 左右, 说明在同等条件下, 绝缘引流线绝缘层厚度越大, 其 U_{av} 越高。D、E 绝缘层厚度大于 A、B、C 3 种样品, 故其 U_{av} 明显高于 A、B、C 3 种样品, 也间接说明在相同条件下, 相较于导体直径, 绝缘层厚度对于绝缘引流线沿面闪络电压的影响更大。

图 8 为沿面闪络现场试验现象。从图 8 可以看出, 当 d 较小时, 绝缘引流线放电现象基本均为单边闪络, 因为距离较短, 较低的电压即可击穿高低压端之间的空气间隙, 形成闪络通道, 即电弧直接贯穿高压端与地电极。随着 d 的增加, 放电现象变为地电极周边两侧出现局部电弧, 且随着电压的升高, 电弧逐渐增长, 直至跳闸, 且两侧基本呈现出一定对称性。



(a)d=30 cm (b)d=80 cm

图8 沿面闪络现场试验现象

Fig.8 The surface flashover field test phenomenon

可能原因是, 随着施加电压的逐步升高, 地电极周边电场愈渐增强, 使电极周边的部分沿面空气击穿形成放电通道^[20], 此通道正好短接来自绝缘引流线两侧高压端的表面泄漏电流, 只要当电压达到

一定值,空气间隙就会被击穿短接泄漏电流产生局部电弧,且两侧的电弧长度、强度均类似,所以后续随着 d 的增加,闪络电压大致保持不变,维持在某峰值附近。放电参考原理图如图 9 所示。

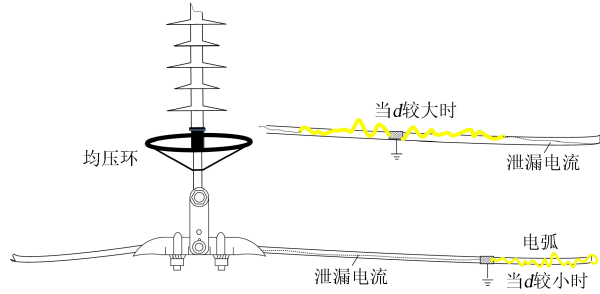


图 9 放电原理图

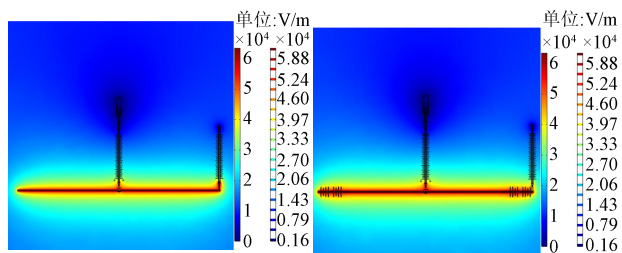
Fig.9 The diagram of discharge principle

3 加装终端头对绝缘引流线闪络特性的影响

3.1 仿真分析

为分析终端头对绝缘引流线沿面闪络的影响,本文以实际现场试验平台为模板,利用 COMSOL 有限元软件对现场各模型进行三维建模仿真,模型各参数均与实物保持一致,本文取 XLPE 的相对介电常数为 2.3^[21]。

以 D 绝缘引流线仿真结果为例,图 10 为绝缘引流线的电场云分布图。从图 10 可以看出,加装终端头后,绝缘引流线两侧及中部区域的电场强度均得到一定程度的降低,尤其是加装终端头附近的区域,相较于普通绝缘引流线,并未出现电场过度集中的现象,电场强度下降明显,且其电场分布也更加均匀,说明终端头对于绝缘引流线电场强度的降低及分布均有一定的改善作用。



(a)无终端头

(b)加装终端头

图 10 绝缘引流线电势云分布图

Fig.10 Electric field cloud distribution of insulated drainage line

图 11 为绝缘引流线的沿面电场分布情况,表 2 为仿真计算结果。从图 11 及表 2 数据可以看出,加装终端头后,绝缘引流线的沿面电场强度出现了一定的下降,其中,两侧高压端的电场强度下降最为

明显,最大场强由 1.36 kV/cm 下降为 0.76 kV/cm,伞裙所在区域的平均场强由 0.59 kV/cm 下降为 0.27 kV/cm,说明加装终端头在一定程度上不仅能使电场分布更加均匀,而且还能降低绝缘引流线端部区域的最大场强,因此加装终端头对于绝缘引流线端部的电场具有一定的改善作用。

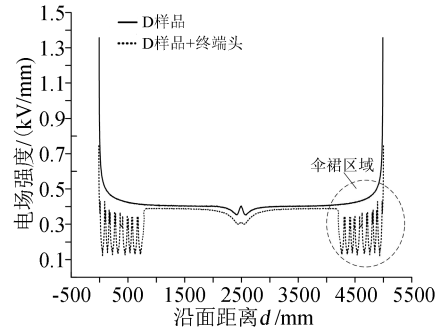


图 11 绝缘引流线沿面电场分布

Fig.11 Distribution of electric field along the insulating drainage line

表 2 绝缘引流线仿真计算结果

Tab.2 Simulation calculation results of insulated drainage line

D 样品	水平沿面距离 /mm	爬电距离 /mm	最大场强 /(kV/cm)	伞裙区域平均场强/(kV/cm)
无终端头	5 000	5 000	1.36	0.59
有终端头	5 000	7 980	0.76	0.27

3.2 绝缘引流线加装终端头

根据仿真试验结果,通过对绝缘引流线端部加装终端头试验,研究端部形状对绝缘引流线沿面闪络电压的影响。终端头伞裙布置结构为“大-小-大-大”布置结构,其中大伞裙宽 $W_1=95$ mm,小伞裙 $W_2=75$ mm,终端头本体长度为 450 mm。端头本体至高压端距离为 L_1 ,取 $L_1=15$ cm 处为起始加装处,高压端至终端头本体末端距离为 L_2 , $L_2=60$ cm,加装效果示意图如图 12 所示,加装成品图如图 13 所示。

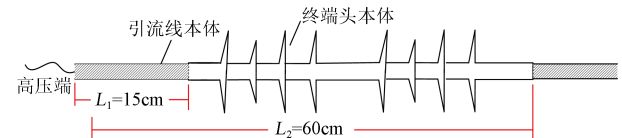


图 12 加装示意图

Fig.12 Stallation effect diagram

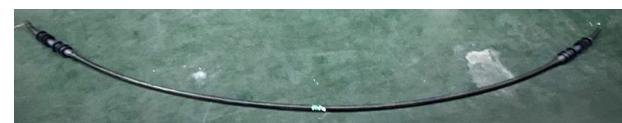


图 13 加装成品图

Fig.13 The finished product diagram after installation

3.3 试验结果及分析

图14为D绝缘引流线加装终端头的沿面闪络电压测试结果。从图14可以看出,D绝缘引流线加装终端头后, U_{av} 得到明显提升,在一定范围内 U_{av} 同样呈现出随沿面距离 d 的增加而升高的趋势,之后随着沿面距离 d 的继续增加趋于平缓而接近于某峰值,其中D绝缘引流线加装终端头后,峰值接近90 kV,相较于普通D绝缘引流线75 kV左右的峰值,沿面闪络电压提升了约20%,结果表明加装终端头对于绝缘引流线的沿面闪络电压具有明显的提高作用。

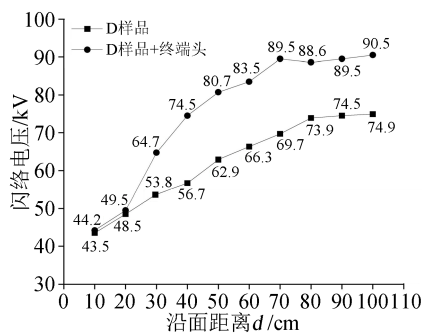


图14 闪络电压测试结果

Fig.14 Flashover voltage test results

图15为D绝缘引流线加装终端头的现场试验现象。从图15(a)可以看出,相较于未加终端头的绝缘引流线, $d=30$ cm处有明显的电弧沿伞裙爬电的现象,由于终端头独特的伞裙结构在一定程度上能有效增加绝缘引流线的沿面爬电距离^[22],在相同水平距离下,击穿加装终端头沿面的空气需要更大的场强,故闪络电压明显上升。

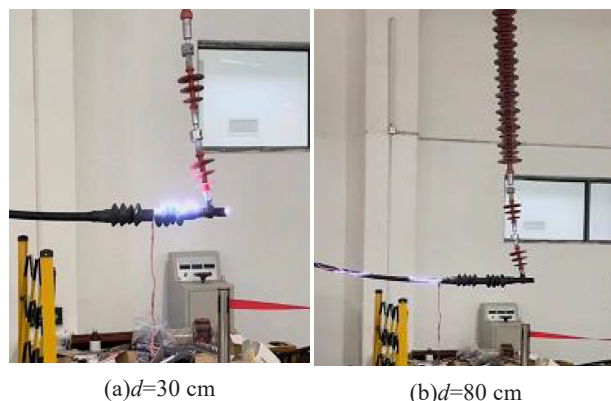


图15 沿面闪络现场试验现象

Fig.15 The surface flashover field test phenomenon

从图15(b)可以看出, $d=80$ cm时,地电极左侧未加终端头端出现了明显的电弧爬电,但右侧未见有明显爬弧现象发生,并未产生图8(b)出现的双边

局部电弧现象,这主要是由于右侧终端头独特的伞裙结构,能在一定程度上阻碍电弧的发展,故右侧未见明显的爬弧现象发生。说明终端头不仅能提高绝缘引流线的沿面闪络电压,还能阻碍局部电弧的发展,对于沿面闪络现象具有明显的改善作用。

4 结论

本文通过在模拟鸟粪条件下对不同绝缘层厚度、导体直径、端部形状的绝缘引流线进行了闪络击穿和沿面闪络等电气特性测试,得出以下结论:

(1)相较于导体直径,绝缘层厚度对绝缘引流线闪络特性的影响更加明显。在同等条件下,绝缘引流线绝缘层厚度越大,绝缘引流线的耐闪络特性越好。

(2)绝缘引流线沿面闪络电压与沿面距离的增加并非一直呈正相关关系,而是在一定范围内随沿面距离 d 的增加而升高,之后趋于平缓而接近于某峰值。

(3)加装终端头能增加绝缘引流线的沿面爬电距离,能提高绝缘引流线的闪络电压,而且还能有效阻碍局部电弧的发展,对于绝缘引流线的沿面闪络现象具有明显的改善作用。

参考文献:

- [1] 吕金虎,梁楠,李志军.宁夏银川湿地野生鸟类保护现状及对策探析[J].宁夏农林科技,2012,53(4):76-78.
- [2] 霍历炜,张鹏云.银川地区输电线路鸟害问题的探讨[J].宁夏电力,2010,4(3):17-20.
- [3] 伍弘,徐兆国,刘世涛,等.一起鸟粪闪络引起220kV引流跳线与地线短接故障分析[J].宁夏电力,2020,5(1):13-17.
- [4] 方晓明.特高压输电线路复合绝缘子防鸟害措施研究[J].电力系统装备,2021,22(3):110-112.
- [5] 李永彪,汪滔,周银松,等.架空输电线路防鸟害闪络技术分析与研究[J].电气时代,2019,3(10):45-47.
- [6] 袁俊健.输电线路鸟害故障特征分析及防护措施研究[J].现代工业经济和信息化,2021,3(5):45-47.
- [7] 李俊防.复合绝缘子防鸟害关键因素分析及防范措施[J].电气技术,2015,4(11):25-127.
- [8] 刘会斌,王延伟,李博,等.绝缘护套对间隙交流击穿特性的影响研究[J].绝缘材料,2021,54(10):84-87.
- [9] 彭永晶,蓝磊,文习山,等.输电线路导线安装绝缘护套的研究[J].电瓷避雷器,2018,6(1):196-201.
- [10] 刘世涛,伍弘,郝金鹏,等.110kV棒形悬式复合绝缘子绝缘包覆均压环设计与试验研究[J].电瓷避雷器,2021,6(1):192-200.
- [11] 梅红伟,陈金君,彭功茂,等.复合绝缘子高压端输电导线安装绝缘护套的研究[J].中国电机工程学报,2011,31(1):109-116.
- [12] 马奎,王海龙,马波,等.防闪络绝缘护套对鸟粪闪络防护效果的分析[J].宁夏电力,2012,5(2):20-24.
- [13] 张清文.包覆绝缘护套对220kV输电线路鸟粪闪络特性的影

- 响[J]. 计算机与数字工程,2020,48(7):1804-1809.
- [14] 董新胜,张东,朱章甫,等. 输电线路用绝缘护套试验研究[J]. 高压电器,2016,52(6):86-90.
- [15] 刘会斌,王延伟,李博,等. 绝缘护套对间隙交流击穿特性的影响研究[J]. 绝缘材料,2021,54(10):84-88.
- [16] 住房和城乡建设部. 架空绝缘配电线路设计标准:GB 51302—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [17] 郝金鹏,伍弘,刘世涛,等. 110kV 输电线路复合绝缘子鸟粪闪络仿真研究[J]. 绝缘材料,2021,54(10):73-78.
- [18] 毕茂强,蒋兴良,周仿荣,等. 复合绝缘子直流冰闪试验方法的比较[J]. 高电压技术,2012,38(1):95-101.
- [19] 蒋兴良,叶汉欣,张志劲,等. 自然污秽成分 NaNO_3 和 NaCl 对复合绝缘子闪络特性的影响比较[J]. 高电压技术,2015,41(9):3029-3035.
- [20] 吴田,刘凯,刘庭,等. 山火对输电线路设备及外绝缘影响分析[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(3):83-89.
- [21] 陈庆国,秦艳军,尚南强,等. 温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J]. 高电压技术,2014,40(9):2619-2626.
- [22] 李智琦,罗日成,吴东,等. 500kV 变电站绝缘子串均压环结构优化分析[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(1):171-196.

收稿日期:2022-10-12

作者简介:刁志文(1979-),男(汉族),宁夏吴忠人,高级工程师,主要从事输电线路输电运检研究工作。