

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.021

复合绝缘子导线上缠绕绝缘护套对鸟粪闪络的防护效果分析

陈剑光

(广东电网有限责任公司, 广州 510000)

摘要: 鸟害故障已成为威胁输电线路安全稳定运行的重要因素之一,其危害程度仅次于雷击和外力破坏,而鸟粪闪络是所有鸟害故障中最典型的故障类型,所占比例最高。笔者提出了一种在复合绝缘子高压侧导线上缠绕绝缘护套用以防范鸟粪闪络的方法,试验给出导线上缠绕绝缘护套后均压环电位降低,有效避免了鸟粪跟均压环之间的放电,使得鸟粪闪络危险区域范围大幅减小,该措施对于防范鸟粪闪络是有效的。此外,以模拟试验平台为研究对象,建立三维仿真模型,计算了绝缘护套不同介电常数、厚度以及不同金具长度等情况下对复合绝缘子的影响,计算结果表明,缠绕绝缘护套使得均压环电位降低,降低了鸟粪闪络的可能性,此外,复合绝缘子沿面电位电场分布得到改善,有利于其安全运行。

关键词: 复合绝缘子; 鸟粪闪络; 绝缘护套; 危险区域; 均压环

Research on Effect of Wrapping Insulation Sheath to Wire on Bird Streamer Flashover on 220 kV Composite Insulator

CHEN Jianguang

(Guangdong Power Grid Co., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Bird damage has become one of the most important factors endangering the safe operation of transmission lines, which degree of harm is second only to lighting and external forces, while streamer flashover is the most typical type, ranking the first of all bird damage. The paper presents a preventive measure against streamer flashover by wrapping insulation sheath to wire. Tests results show that the potential of equalizing ring decreases after wrapping insulation sheath, which effectively avoid the occurrence of discharge between streamer channel and equalizing ring, as a result, scope of risk area decreases. Besides, the paper also establishes three-dimensional simulation model, calculating the effect of insulation sheath on composite insulator under different value of dielectric constant, thickness of insulation sheath and length of fittings. Results show that wrapping insulation sheath decreases the potential of equalizing ring and decrease the possibility of streamer flashover, besides, the electric field distribution along the surface of the composite insulator is improved, enabling its safe operation.

Key words: composite insulator; bird streamer flashover; insulation sheath; risk area; equalizing ring

0 引言

近年来的统计数据表明,鸟类活动已经成为威胁输电线路安全运行的一重要因素,由其引起的故障次数仅次于雷击以及外力破坏^[1-3]。输电线路上的鸟害故障按形成原因上可以分为撞击、捕食、筑巢、啄食以及鸟粪闪络等,其中鸟粪闪络是最典型的类

型,占鸟害故障总数比例近 97%^[4-6]。鸟粪闪络常表现出两种形式,一种是鸟粪沿绝缘子旁空气间隙下落造成空气间隙击穿,这种闪络叫做鸟粪空间闪络;另一种是鸟粪沿绝缘子积累或下淌。在潮湿的空气下,绝缘子发生沿面闪络,这种情况一般只发生在玻璃或瓷绝缘子上,复合绝缘子由于优异的耐污特性及憎水性,难以积污。此外,复合绝缘子独特的大小伞结构使得鸟粪很难在复合绝缘子上积累形成放电通道^[2-7]。

在防治鸟粪闪络措施研究方面,文[8]中提出了一种收集由鸟类发出的红外辐射并触发驱鸟声音的红外防鸟报警系统,在输电线路试用并取得了较好的效果;文[9]中提出了防鸟刺在不同电压等级线路上应用的尺寸要求,安装后发现防鸟刺能有效防止鸟粪闪络的发生;文[10]中通过试验和仿真进行了防闪络绝缘护套对鸟粪闪络防治效果的分析,说明了只要护套厚度足够,可以有效的防治鸟粪闪络的发生。

文中在 220 kV 试验平台上进行了导线缠绕绝缘护套前后间隙鸟粪放电特性试验研究,并给出了相应的容易发生鸟粪闪络的危险区域,通过对比,证明了导线缠绕绝缘护套能有效防治鸟粪闪络。此外,通过仿真分析给出缠绕绝缘护套对复合绝缘子带来的影响和防治鸟粪闪络的原因。

1 理论研究

复合绝缘子导线上缠绕绝缘护套的方式见图 1,护套以导线为中心两侧对称缠绕,由于护套电阻值很大,因此金具与导线之间可以等效为一个电容 C_s ,将金具近似等效为一个空心圆柱体, C_s 的大小可按图 2 所示模型计算得到。

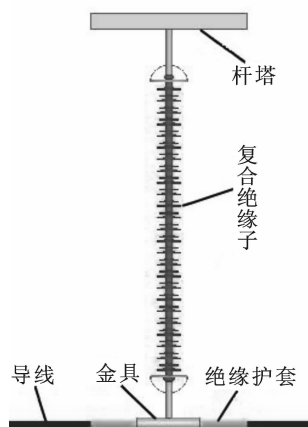


图 1 导线缠绕绝缘护套示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wire wrapped with insulation sheath

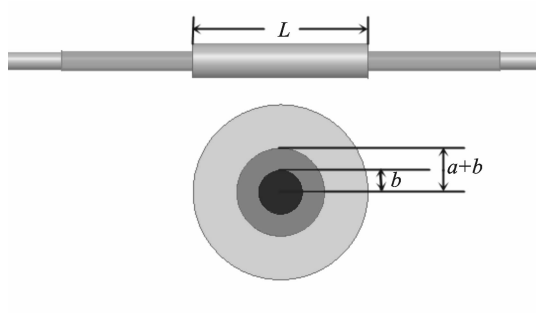


图 2 护套电容简化模型

Fig. 2 A simplified model of sheath capacitance

图 2 中导线半径为 b ,护套厚度为 a ,护套介电常数为 ε ,金具长度为 L ,文[11]中给出该模型等效电容为

$$C_s = L \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(1+a/b)} \quad (1)$$

当导线缠绕绝缘护套时,其等效电路可以近似为复合绝缘子等效电容 C_1 和护套等效电容 C_s 串联,见图 3。

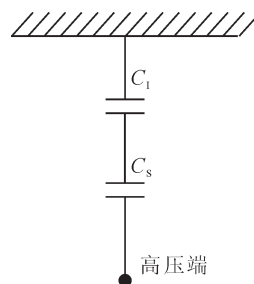


图 3 导线缠绕绝缘护套后等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit when the wire is wrapped with insulation sheath

设输电线路运行电压为 U_L ,则复合绝缘子承担的电压

$$U_1 = U_L \frac{C_s}{C_s + C_1} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,导线缠绕绝缘护套后,复合绝缘子上承担的电压 U_1 小于线路的运行电压 U_L ,减少的部分由绝缘护套承担。由式(1)知 C_s 受导线半径为 b ,护套厚度为 a ,护套介电常数为 ε ,以及金具长度为 L 的影响。由于导线半径 b 在输电线路架设时就已经固定了,无法更改,可以通过改变其他几个变量来改变 C_s 大小,进而改变 U_1 ,也即金具的电位值。

2 试验研究

2.1 鸟粪模拟液

以往的研究中采用鸡蛋、108 胶、硅藻土和 NaCl,将它们按一定比例混合为鸟粪模拟液来代替鸟粪进行试验,硅藻土用以模拟鸟粪中固体成分,鸡蛋、108 胶用以增加鸟粪模拟液粘稠度,NaCl 用于改变鸟粪模拟液电导率^[12-14]。自然界中鸟粪电导率一般为 4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,国外文献给出一些鸟类粪便电导率可达 8 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ^[15]。文中的鸟粪模拟液电导率取 8 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$,粘度 20 s 左右。

2.2 试验系统

图 4 中试验变压器额定输出电压 550 kV,额定电流 1 A,输入电压范围为 0~400 V,输出电压 0~550 kV,可调。

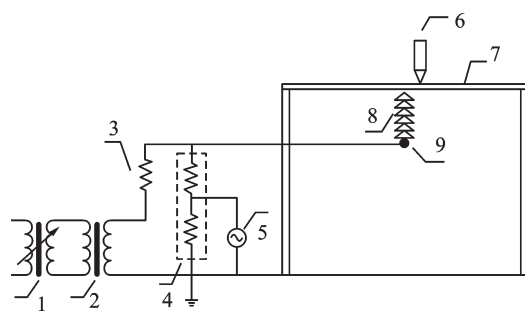


图4 鸟粪闪络试验布置图

Fig. 4 Experiment arrangement diagram of flashover caused by bird streamer

试验原理布置见图4,其中1、2分别为调压器和试验变压器,3是保护电阻,4、5分别为分压器和示波器,7、8、9分别为模拟横担、绝缘子以及模拟导线,6是鸟粪推进装置。模拟横担上每隔5 cm有一个孔,可以将鸟粪推进装置固定在不同的孔中,鸟粪推进装置下端为喷嘴,调节鸟粪推进装置所安装的孔的位置,可以改变鸟粪下落的位置。

图4中鸟粪推进装置单次排出鸟粪量约80 mL,鸟粪排出后初速度约为1~5 m/s,与文[16]中鸟粪数据相符。

2.3 试验结果与分析

施加电压为220 kV输电线路最大运行相电压,即 $220 \times 1.15 / 1.732 = 146$ kV。调整模拟横担与模拟导线位置,使鸟粪正好滴落在模拟导线上,多次重复试验均发生击穿,因此导线正上方均为危险区域,需加以防范。从放电过程来看,当鸟粪通道与绝缘子轴心距离在50 cm以内时,每次放电都是从均压环附近开始起弧,然后电弧迅速蔓延至横担,完成闪络过程,当距离大于50 cm后,起弧是在鸟粪通道前端正对的导线那一点上,典型的鸟粪放电过程见图5。

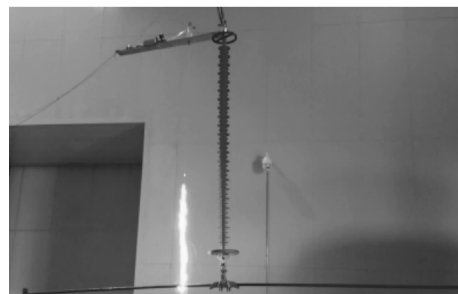
保持其他条件不变,仅降低模拟导线上施加的电压,分别测试不同电压下鸟粪放电过程。不同电压下放电过程见图6。

随着电压升高,鸟粪放电程度呈逐渐变剧烈的趋势。电压较低时,放电仅发生在鸟粪通道最前端与高压端之间的一小段空气间隙上,无法形成贯穿性电弧通道。当施加电压提高至100 kV时,约一半空气间隙击穿。

为确定导致220 kV复合绝缘子间隙完全击穿时导线上施加的电压,采用类似50%击穿电压的定义方法,具体做法是:起始施加电压为104 kV,在该电压等级下试验10次,如果贯穿性闪络发生次数小于5,则将电压升高2 kV,继续试验10次,反之



(a)均压环附近起弧



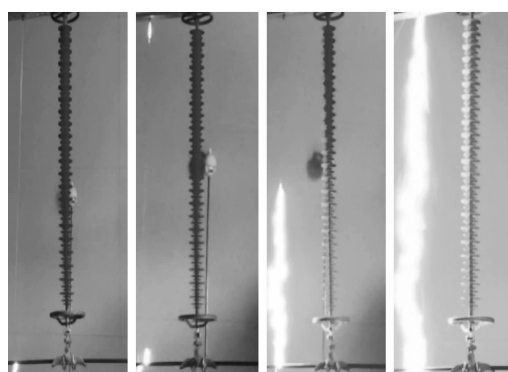
(b)电弧向低压端蔓延



(c)电弧连通两极,间隙击穿

图5 鸟粪正对于导线下落时间隙击穿过程

Fig. 5 The process of flashover when streamer drops from above the wire



(a)35 kV (b)63 kV (c)100 kV (d)146 kV

图6 不同电压下鸟粪下落时间隙放电过程

Fig. 6 The process of discharge when streamer drops onto the wire under different applied voltage

则将电压降低2 kV,每个电压值下均测试10次,直到找到贯穿性闪络发生概率为50%的那个电压值时则停止试验。表1中所记录的闪络均是指贯穿性闪络故障。

从表1中数据可以看出,220 kV线路发生贯穿性间隙击穿的概率为50%时,导线上施加的电压值

表 1 不同电压下鸟粪闪络概率

Table 1 Bird streamer flashover possibility of under different applied voltage

参数	100 kV	102 kV	104 kV	106 kV	108 kV
闪络次数	0	1	2	2	5
闪络概率/%	0	10	20	20	50

为 108 kV, 施加电压小于 108 kV 时, 所发生的放电只是局部电弧燃烧过程。

为了获得鸟粪闪络危险区域, 首先调整模拟导线与模拟横担的相对位置, 使两者垂直, 将鸟粪推进装置安置在不同的孔内进行试验。多次试验发现, 当鸟粪通道与绝缘子轴心距离 50 cm 以内时, 闪络概率为 100%, 当距离达到 55 cm 时, 无闪络现象发生, 因此可以认为距离绝缘子悬挂点 50 cm 范围内为容易发生鸟粪闪络的危险区域, 需加以防范。

试验中选用的绝缘护套长度为 1.9 m, 缠绕在导线上厚度为 1 mm 左右, 单层耐压值 24 kV, 为防止护套击穿, 在导线上对称缠绕两根护套, 其耐压值可达 216 kV。缠绕绝缘护套后, 进行鸟粪放电特性试验, 典型的放电过程见图 7。

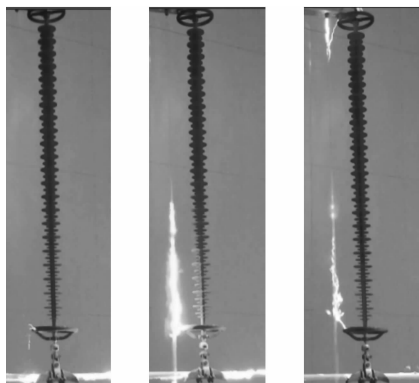


图 7 缠绕护套后鸟粪下落时间隙放电过程

Fig. 7 The process of bird streamer discharge when wrapping sheath to wire

鸟粪下落时, 绝缘护套沿面产生剧烈的电晕放电, 均压环跟鸟粪通道之间间隙形成电弧, 电弧然后向低压端蔓延。当鸟粪通道与绝缘子轴心距离在 20 cm 以内时, 形成的电弧最大长度可以桥接绝缘子旁空气间隙 80% 左右, 此时虽未完全击穿造成闪络, 但与间隙闪络状态比较接近, 从严考虑, 认为 20 cm 范围内为危险区域。不缠绕护套时, 该区域为绝缘子悬挂点 50 cm 范围以内, 由此可见, 缠绕护套使得鸟粪闪络危险区域大幅度减小, 鸟粪闪络概率降低。

鸟粪通道与绝缘子轴心距离 40 cm 时, 放电过程见图 8, 均压环与鸟粪通道之间形成局部电弧, 间隙不击穿。



图 8 缠绕护套后鸟粪下落时形成局部电弧

Fig. 8 Partly arc discharge when wrapping sheath to wire

从复合绝缘子缠绕绝缘护套物理模型以及等效电路上可以看出, 由于绝缘护套本体电容承担了一部分电压, 使得均压环电位比导线上电压低, 降低了鸟粪通道跟均压环之间的放电的可能性, 因此, 在导线上缠绕绝缘护套可以有效的防治鸟粪闪络。

3 仿真研究

3.1 三维仿真模型建立

仿真模型主要包括铁塔、复合绝缘子、连接金具, 绝缘护套、模拟导线, 其中对杆塔和连接金具进行简化处理。所采用的 220 kV FXBW4-220/110 复合绝缘子参数见表 2。

表 2 绝缘子参数

Table 2 Parameters of insulators

参数	数值
伞裙数	25 大 24 小
伞径/mm	150/115
结构高度/mm	2 150
绝缘距离/mm	1 965
爬电距离/mm	6 340

仿真软件为 Maxwell Ansoft16.0, 杆塔用 4 m×1 m×0.1 m 的长方体模拟, 考虑到杆塔良好导电性, 将其材料设置为铝; 复合绝缘子按照实际尺寸和形状建立模型; 导线用长度为 6 m、直径 33.6 mm 的铝制实心圆柱棒进行模拟。为减少计算量, 减小求解区域, 将求解空间取为半径 5 m, 高度 3.5 m 的圆柱体, 模拟导线上施加电压为 146 kV。三维仿真模型见图 9。

安装绝缘护套后, 金具以及高压端均压环电位未知, 不能直接求解, 有限元计算中处理该问题最常用的方法是虚拟大介电常数法, 即将处于悬浮电位的金属的材料定义为相对介电常数很大的介质,

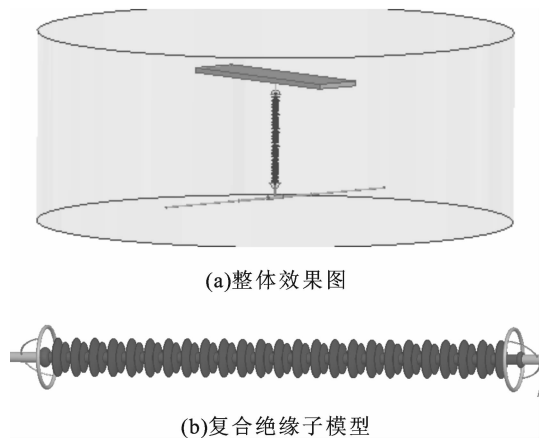


图9 三维仿真模型

Fig. 9 The three-dimensional simulation model

计算时取 $9\,500^{[17-20]}$ 。

3.2 计算结果与分析

3.2.1 绝缘护套介电常数对计算结果的影响

绝缘护套相对介电常数依次取 1、3、10、30、100, 金具长度取 40 cm, 护套长度 2 m, 厚度 2.4 mm, 结果见图 10-12 及表 3。 L_p 为距护套一端的距离, $L_p=3$ m 为护套正中间位置, 考察路径为绝缘护套边缘, 其总长度为 6 m; L_q 为距绝缘子高压端的距离, 下同。

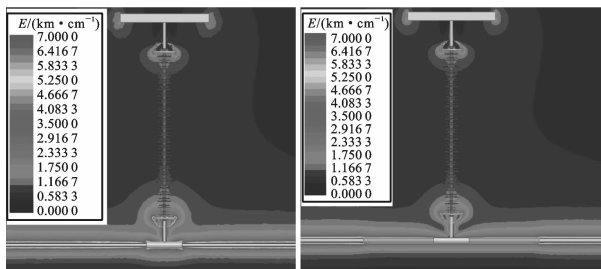


图10 缠绕护套前后电场分布云图对比

Fig. 10 The contrast of electric field distribution before and after wrapping with sheath

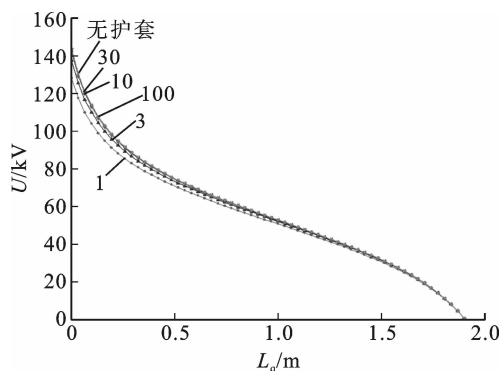


图11 复合绝缘子沿面电位分布

Fig. 11 Potential distribution along the insulator surface of different dielectric constant of sheath

从图 11、12 可以看出, 缠绕绝缘护套后, 复合

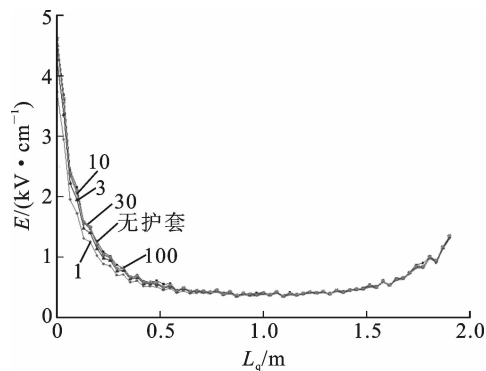


图12 复合绝缘子沿面电场分布

Fig. 12 Electric field distribution along the insulator surface of different dielectric constant of sheath

表3 绝缘护套相对介电常数影响的计算结果

Table 3 Simulation results of different dielectric constant of sheath

护套相对介电常数	金具电位/kV	护套承担电压/kV	绝缘子最大场强/(kV·cm ⁻¹)	护套沿面最大场强/(kV·cm ⁻¹)
无护套	—	—	4.65	—
1	129.19	16.81	3.74	9.47
3	138.78	7.22	4.27	9.22
10	143.28	2.72	4.53	9.31
30	144.62	1.38	4.60	9.59
100	145.13	0.87	4.64	9.36

绝缘子电场及电位分布得到了一定程度的改善, 表 3 中数据给出复合绝缘子高压端附近最大场强在缠绕护套后得到了有效的削弱。从总的趋势来看, 绝缘护套相对介电常数越小, 金具电位越低, 发生鸟粪闪络可能性越低。

3.2.2 金具长度对计算结果的影响

护套长度 2 m, 厚度 2.4 mm, 相对介电常数取 1, 金具长度依次取 20、40、80、120 cm, 仿真模型及计算结果见图 13-15 及表 4。

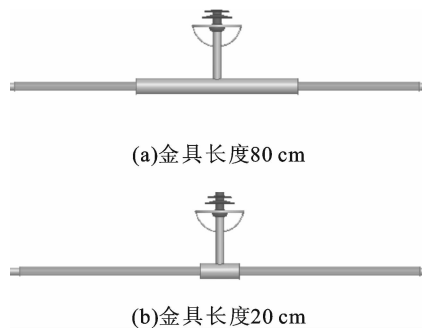


图13 不同长度金具三维仿真模型

Fig. 13 The three-dimensional simulation model under different length of fitting

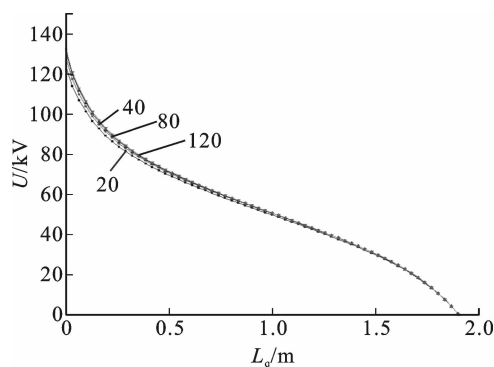


图 14 复合绝缘子沿面电位分布

Fig. 14 Potential distribution along the insulator surface of different length of fitting

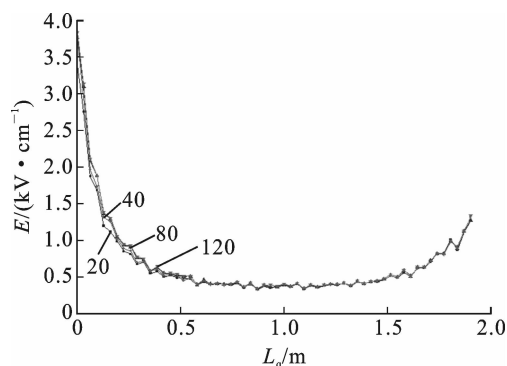


图 15 复合绝缘子沿面电场分布

Fig. 15 Electric field distribution along the insulator surface of different length of fitting

表 4 金具长度影响的计算结果

Table 4 Simulation results of different length of fitting

金具长度 /cm	金具电位/kV	护套承担 电压/kV	绝缘子最大场强 /(kV·cm ⁻¹)
20	127.35	19.65	3.38
40	129.21	16.79	3.74
80	132.16	13.84	3.77
120	133.25	12.75	3.83

金具长度变化时,复合绝缘子沿面电场、电位以及最大场强数值均发生变化。当金具长度减小时,金具电位降低,降低了鸟粪闪络的可能性。

3.2.3 绝缘护套厚度对仿真结果的影响

绝缘护套厚度依次取 0.24、0.8、1.4、2 cm 几种情况,仿真模型及计算结果见图 16~18 及表 5。

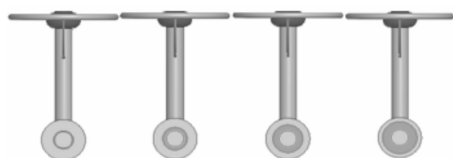


图 16 不同厚度绝缘护套的仿真模型

Fig. 16 Simulation models of sheath of different thickness

随着绝缘护套厚度增加,金具与导线之间电容减小,使得金具电位降低,对防范鸟粪闪络是

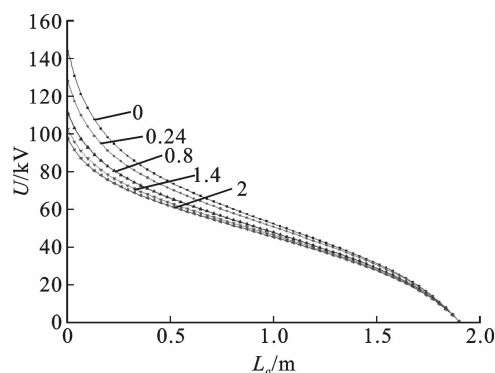


图 17 复合绝缘子沿面电位分布

Fig. 17 Potential distribution along the insulator surface of different thickness of sheath

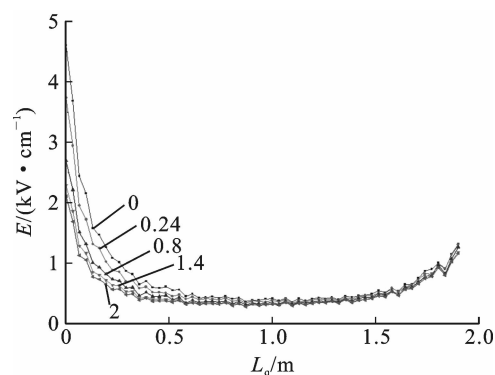


图 18 复合绝缘子沿面电场分布

Fig. 18 Electric field distribution along the insulator surface of different thickness of sheath

表 5 护套厚度影响的计算结果

Table 5 Simulation results of different thickness of sheath

护套厚度/cm	金具电位/kV	护套承担电压/kV	绝缘子最大场强/(kV·cm ⁻¹)
无护套	—	—	4.65
0.24	129.21	16.79	3.74
0.80	111.98	34.02	2.73
1.40	103.33	42.67	2.29
2.00	98.09	47.91	2.17

有利的,另一方面绝缘子高压端 0.8 m 以内的电位及电场分布得到了改善,最大场强呈逐渐下降的趋势。

4 结论

通过对导线缠绕绝缘护套的相关研究,可以得到如下结论:

1)复合绝缘子导线上缠绕绝缘护套后,可以近似等效成复合绝缘子本体电容以及护套电容相串联的物理模型。缠绕绝缘护套后,金具电位降低,复合绝缘子承担电压低于线路实际运行电压,使线路发生鸟粪闪络可能性降低,另一方面也改善

复合绝缘子整体电位及电场分布,对复合绝缘子的运行有利。

2)220 kV 复合绝缘子鸟粪闪络危险区域为绝缘子悬挂点 50 cm 范围内,缠绕护套后,该距离为 20 cm。缠绕护套使得金具电位降低,减少了鸟粪通道与金具之间的放电发生,因此降低了鸟粪闪络概率。

3)金具电位越低,越难发生鸟粪闪络。将缠绕绝缘护套应用于防范鸟粪闪络时,可以从采用较低介电常数材料的绝缘护套,增加护套厚度以及金具长度等方法来考虑。但实际应用中还应考虑安装绝缘护套的经济性,以及绝缘护套容易老化的问题等等,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] SUNDARARAJAN R, BURNHAM J, CARLTON R, et al. Preventive measures to reduce bird related power outages—Part II: Streamers and contamination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1848-1853.
- [2] 赵莹, 李燕青, 贾伯岩, 等. 架空输电线路鸟害故障分析及防范[J]. 河北电力技术, 2012, 31(5): 23-25.
ZHAO Ying, LI Yanqing, JIA Boyan, et al. Bird related power outages of overhead lines and preventive measures[J]. Hebei Electric Power, 2012, 31(5): 23-25.
- [3] 李晓斌. 江门地区架空输电线路鸟害分析及防治措施[M]. 科技视界, 2012(3): 157-158.
LI Xiaobin. Analysis and Preventive measures of bird related damage to overhead lines in Jiangmen[M]. Science and Technology View, 2012(3): 157-158.
- [4] 董岳, 杨庆, 司马文霞, 等. 鸟粪影响下的塔窗—导线间隙交流放电特性研究[C]//2012年重庆市电机工程学会学术会议论文集. 重庆: 中国电子企业联合会, 2012: 888-892.
DONG Yue, YANG Qing, SIMA Wenxia, et al. Study on the tower window-wire gap AC discharge characteristics under the influence of the guano[C]//2012 article collection of Chongqing Electrical and Mechanical engineering Society Meeting. Chongqing: China Electricity Council, 2012: 888-892.
- [5] 袁检, 张建荣, 方志, 等. 国外电网的鸟害事故与对策[J]. 电工技术, 2002(11): 5-6.
YUAN Jian, ZHANG Jianrong, FANG Zhi, et al. The strategy against the accident of birds' harm of overseas electric network[J]. Electric Engineering, 2002(11): 5-6.
- [6] 王少华, 叶自强. 架空输电线路鸟害故障及其防治技术措施[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 61-67.
WANG Shaohua, YE Ziqiang. Analysis of bird damage accidents on overhead transmission lines and prevention techniques[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 61-67.
- [7] 赵靓雯. 架空电力线路鸟害分析与预防[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(12): 57-60.
ZHAO Jingwen. Analysis and precaution of bird damage overhead power circuit[J]. Power System Technology, 2008, 24(12): 57-60.
- [8] 温渡江. 电力线路鸟害故障规律与防治对策[J]. 电力安全技术, 2004, 6(8): 22-25.
WEN Dujiang. Countermeasures of bird damage to power transmission line[J]. Electric Safety Technology, 2004, 6(8): 22-25.
- [9] 王恒. 用“防鸟刺”防止线路绝缘子鸟粪闪络事故的研究[J]. 华北电力技术, 2004(1): 28-29.
WANG Heng. Research on applying “anti-bird thorn” to prevent bird streamer flashover[J]. North China Electric Power, 2004(1): 28-29.
- [10] 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(2): 20-24.
MA Kui, WANG Hailong, MA Bo, et al. The defending effect analysis of anti-flashover insulation sheath for the bird's dropping flashover [J]. Ningxia Electric Power, 2012(2): 20-24.
- [11] 孙春峰. 用复变反三角函数变换求共焦点椭圆柱形电容器的电势及电容[J]. 大学物理, 2005, 24(2): 13-15.
SUN Chunfeng. Calculation of the electric potential and capacitance of a confocal elliptic capacitor by transform of inverse trigonometrical function of complex variable[J]. College Physics, 2005, 24(2): 13-15.
- [12] 杨庆, 董岳, 司马文霞, 等. 鸟粪导致交流输电线路塔窗—导线空气间隙放电的特性研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 55-60.
YANG Qing, DONG Yue, SIMA Wenxia, et al. Study on characteristics of AC transmission line tower-line air gap discharge caused by guano[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 55-60.
- [13] 梁曦东, 黄峻增, 王绍武, 等. 绝缘子鸟粪闪络的试验研究与不明原因闪络的分析[C]//2000年华北五省市: 区电机工程: 电力学会第十届学术交流会论文集. 北京: [s.n.], 2000: 231-236.
LIANG Xidong, HUANG Lengzeng, WANG Shaowu, et al. Experimental study on the birds' droppings flashover and analysis of the unknown flashover [C]//The Article Collection of the 10th Academic Communication of Power Society in 2000 for North Five Provinces and Cities in China. Beijing: [s.n.], 2000: 231-236.
- [14] 徐旭, 崔吉峰, 周远翔, 等. 500 kV 绝缘子鸟粪闪络实验研究[C]//2007中国电机工程学会高电压专委会学术年会论文集. 深圳: 中国电机工程学会高电压专业委员会, 2007: 147-152.
XU Xu, CUI Jifeng, ZHOU Yuanxiang, et al. Experimental research on bird streamer caused flashover in 500 kV

(下转第 149 页)

- 器的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(7):9-11.
- ZENG Sheng, SHEN Haiping, CHENG Taotao, et al. Study of differential magnet-moving type velocity sensor[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(7):9-11.
- [21] 黄良, 吕黔苏, 杨涛, 等. 断路器状态监测系统[J]. 电器与能效管理技术, 2015(17):29-33.
- HUANG Liang, LYU Qiansu, YANG Tao, et al. Design of circuit breaker condition monitoring system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(17): 29-33.
- [22] 翟瑞聪, 谢善益, 范颖, 等. 电力设备全景智能监测信息模型研究及应用[J]. 电器与能效管理技术, 2015(18): 14-19.
- ZHAI Ruicong, XIE Shanyi, FAN Ying, et al. Research and application of power equipment panoramic intelligent monitoring information model[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(18): 14-19.
- [23] 张亚杰, 刘洪文, 周连发. 高阻抗变压器中内置式串联电抗器的仿真研究[J]. 变压器, 2014, 51(12):19-22.
- ZHANG Yajie, LIU Hongwen, ZHOU Lianfa. Simulation study on built-in series reactor in high impedance transformer[J]. Transformer, 2014, 51(12):19-22.
- [24] 豆孝华, 任孟干, 汤广福, 等. 饱和电抗器设计与运行特性仿真[J]. 变压器, 2014, 51(11):38-40.
- DOU Xiaohua, REN Menggan, TANG Guangfu, et al. Design and operating characteristic simulation of saturable reactor[J]. Transformer, 2014, 51(11):38-40.
- [25] 李小春. 传感器信号调理电路电磁兼容性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- LI Xiaochun. Sensor signal conditioning circuit of electromagnetic compatibility research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [26] 陈炜峰, 刘伟莲, 周香. 电磁兼容及其测试技术[J]. 电子测量技术, 2008, 31(1):101-104.
- CHEN Huifeng, LIU Weilian, ZHOU Xiang. Electromagnetic and its test technology[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(1):101-104.

黄帅姣(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电器状态参数的检测技术、智能电器。

赵智忠(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为真空开关状态参数检测、智能电器(通讯作者)。

(上接第 142 页)

- insulator[C]//The Article Collection of Annual Meeting for High Voltage Professional Committee Belong to Chinese Electrical and Mechanical Engineering Society. Shenzhen: High Voltage Professional Committee for Chinese Society of Electrical Engineering, 2007: 147-152.
- [15] BURNHAM J T. Bird streamer flashovers on fpl transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2):970-977.
- [16] IGOR G, EVGENY S, WALLACE V. Birds: More threat to lines or threatened by lines[J]. INMR, 2012, 20(2): 142-149.
- [17] 崔翔. 应用有限元方法计算含有电位悬浮导体的电场分布[J]. 华北电力学院学报, 1995, 22(2):1-7.
- CUI Xiang. Calculation of electric field for a system with floating electrodes by finite element technique[J]. Journal of North China Electric Power University, 1995, 22(2):1-7.
- [18] 黎卫国, 郝艳捧, 熊国锟, 等. 覆冰复合绝缘子电位分布有限元仿真[J]. 电工技术学报, 2012(12):29-35.
- LI Weiguo, HAO Yanpeng, XIONG Guokun, et al. Finite element simulation of composite insulator potential distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012(12):29-35.
- [19] ZHANG B, HE J L, CUI X, et al. Electric field calculation for HV insulators on the head of transmission Tower by coupling CSM with BEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4):543-546.
- [20] 司马文霞, 邓稼卓, 卢明, 等. 复合绝缘子导线端串联玻璃绝缘子对其电场分布的改善[J]. 高电压技术, 2010, 36(7):1630-1637.
- SIMA Wenxia, DENG Jiazhao, LU Ming, et al. Electric field distribution improvement of series connection of glass insulator to the high voltage end of composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7):1630-1637.

陈剑光(1970—), 男, 高级工程师, 从事输变电设备管理。