

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.04.020

330 kV 输电线路复合绝缘子鸟粪闪络特性研究

刘世涛¹, 吴波¹, 吴旭涛¹, 陈泓², 李秀广¹, 常彬¹,
贾志东³, 徐笑然³, 欧阳小刚³, 李阳林⁴

(1. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 银川 750002; 2. 国网宁夏电力公司, 银川 750001; 3. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055; 4. 国网江西省电力公司电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要: 2011年以来,宁夏地区330 kV线路多次发生鸟害故障跳闸,严重威胁了宁夏电网的安全稳定运行。目前国内外对于引起330 kV线路的鸟粪闪络机理及其影响因素仍缺乏研究。文中首先研究了低温环境下染污硅橡胶的憎水特性,然后基于鸟粪下落过程中最大连续长度与鸟粪参数的关系,试验研究了鸟粪下落方式、下落通道、电导率、粘度、体积、下落位置和相对湿度等对330 kV复合绝缘子闪络特性的影响。试验结果表明,330 kV复合绝缘子的鸟粪闪络概率随距离的减小、鸟粪长度的增加而增加;鸟粪脱离横担比未脱离横担下落时发生闪络的概率更低;带均压环比不带均压环时绝缘子更易发生闪络;当鸟粪体积、鸟粪电导率、空气相对湿度越大时,发生鸟粪闪络的概率越大。

关键词: 330 kV复合绝缘子; 鸟粪闪络; 下落方式; 电导率; 粘度; 相对湿度

Study on Guano Flashover Characteristics of Composite Insulators for 330 kV Transmission Line

LIU Shitao¹, WU Bo¹, WU Xutao¹, CHEN Hong², LI Xiuguang¹, CHANG Bin¹,
JIA Zhidong³, XU Xiaoran³, OUYANG Xiaogang³, LI Yanglin⁴

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750002, China; 2. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China; 3. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330096, China)

Abstract: Since 2011, 330 kV line in Ningxia has repeatedly occurred bird fault tripping, a serious threat to the safe and stable operation of Ningxia power grid. There is still a lack of research about the guano flashover mechanism of 330 kV line and its factors at home and abroad. This paper firstly studied the hydrophobic property of contaminated silicone rubber in low temperature environment pollution. Then based on the relationship between the maximum continuous length and guano parameters during the drop of guano, this paper studied the influence of drop way, drop channel, conductivity, viscosity, volume, drop position and relative humidity on the flashover characteristic of 330 kV composite insulators in contaminated laboratory. The test results showed that the flashover probability of 330 kV composite insulator increases with the decrease of distance and the increase of guano. The flashover probability of guano escaped from cross arm is lower than not escaped, and the insulators have higher flashover probability when with corona ring than that without corona ring. When the guano volume, conductivity, and the air relative humidity are large, the probability of occurrence of flashover is greater.

Key words: 330 kV composite insulator; guano flashover; drop way; conductivity; viscosity; relative humidity

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2018-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477085, 51477086)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51477085, 51477086).

0 引言

鸟害闪络是影响输电线路安全稳定运行的主要故障类型,根据国家电网相关统计数据,中国电网由于鸟害闪络引起输电线路故障的概率(13.0%)仅次于雷击闪络(55.8%)和不明原因闪络(14.7%)^[1]。根据以往的运行经验,鸟害闪络多发生于110 kV和220 kV线路^[2-6],目前对于鸟粪导致复合绝缘子闪络事故的研究认为电压等级220 kV以上的高电压等级线路由于绝缘距离充足,较难发生鸟粪闪络,因此仍然缺乏330 kV输电线路鸟粪闪络机理的研究。

然而2011年以来,宁夏地区330 kV线路先后多次发生鸟害故障跳闸,严重威胁了宁夏电网的安全稳定运行。经调研,2011年以来宁夏地区330 kV线路鸟害闪络事故具有以下特征:

1)330 kV线路发生闪络次数为23次,占鸟害故障跳闸总数的26.7%。其中I型串19次,占比73.1%,V型串4次26.9%。

2)闪络事故多集中于春季4月,时间集中于凌晨1:00到6:00,期间昼夜温差较大,相对湿度在50%RH以上,多有雾或凝露现象发生。

3)闪络多发生于2级污秽区,闪络地点附近多存在河流、农田等鸟类活动高发地点。

4)发生闪络后重合闸概率较高,为96.7%。

5)对闪络后的复合绝缘子憎水性进行测量,故障复合绝缘子高压端与接地端憎水性较差,只有HC6,中间伞裙的憎水性较好;故障绝缘子灰密并不高,大约为0.62 mg/cm²,故障绝缘子全部伞裙的平均盐密约为0.12 mg/cm²。

复合绝缘子由于其优异的憎水性、憎水迁移性以及等效直径小的特点,具备优异的耐污性能,在重度盐密下的污闪电压很高。然而在实际运行中复合绝缘子闪络却时有发生,特别是一些闪络发生在凌晨,且发生闪络的复合绝缘子有轻度污秽。

针对这种现象,一些专家认为是轻度污秽和湿度导致闪络。这种观点的主要依据是,复合绝缘子鸟害跳闸闪络大多都发生在凌晨湿度较大、温度较低的环境中^[7-10]。此时温度低,且湿度大,这些因素对硅橡胶材料憎水性有影响,其憎水性甚至可能完全消失,复合绝缘子表面污秽可能饱和受潮,绝缘表面电阻急剧下降而发生闪络。

有一些单位进行试验,让复合绝缘子受潮半小时或几小时,再进行耐受试验,但复合绝缘子都没有发生闪络。南非电力公司一些专家也曾持有类

似的看法,并进行了相关试验^[11],但这些研究都未取得突破性进展^[12]。此前,清华大学、武汉大学使用铁丝模拟鸟粪,对湿污环境下鸟粪闪络进行了模拟^[13-14]。重庆大学等制备了鸟粪模拟液进行闪络试验^[15]。一方面,铁丝作为固体导电介质其物理性能和空中下落特性与实际相差过大;另一方面对于引起330 kV线路的鸟粪闪络机理和影响闪络概率的主要因素仍缺乏相关研究。

目前的研究认为,鸟粪下落导致复合绝缘子闪络事故的方式主要有以下几种^[16-20]:

1)鸟粪落在复合绝缘子表面上,然后沿绝缘子伞群边沿下滑,靠近高压端后,引发空气击穿并导致闪络。

2)鸟粪未脱离横担:鸟粪一端粘在处于地电位的杆塔横担上,然后向下拉伸,并导致闪络。

3)鸟粪脱离横担:鸟粪从空中落下,没有碰到杆塔和绝缘子的任何部位,导致空气击穿并发生闪络。

文中将针对以上后2种鸟粪闪络方式,模拟宁夏地区闪络故障地点低温高湿环境,以330 kV污秽复合绝缘子为研究对象,进行高湿度环境下的鸟粪闪络模拟实验,对比清洁复合绝缘子实验,改变鸟粪模拟液的电导率、粘度,下落方式、位置、速度以及环境湿度研究复合绝缘子鸟粪闪络过程及其影响因素。

1 低温环境下染污硅橡胶的憎水性能

由于复合绝缘子具备良好的憎水恢复性能,因此对闪络发生后的绝缘子进行的憎水特性检查往往不具备代表性。为了模拟鸟害闪络故障发生时复合绝缘子的憎水性能,设计了低温环境下染污硅橡胶憎水特性检测实验。

实验制备了100 mm×100 mm×2.5 mm的高温硫化硅橡胶(HTV)试片。选取了高岭土和硅藻土2种人工污秽分别涂刷到硅橡胶试片上,灰密控制为1.2 mg/cm²。采取静态接触角法(CA法)测试污秽表面的憎水性。

在染污硅橡胶试片憎水角达到稳定后将其放入恒温恒湿箱中,根据春季宁夏地区凌晨时的温度,将温度控制为0℃和25℃,湿度控制为50%,每隔6~8 h记录一次憎水角随时间的变化。硅橡胶试片在置入低温环境后,憎水性快速下降,并在24 h左右达到最低点,随后憎水性缓慢恢复并趋于稳定,见图1。由图1可看出,染污硅橡胶表面憎水性随着环境温度的降低而下降,且憎水性能的恢复需要较长时间。

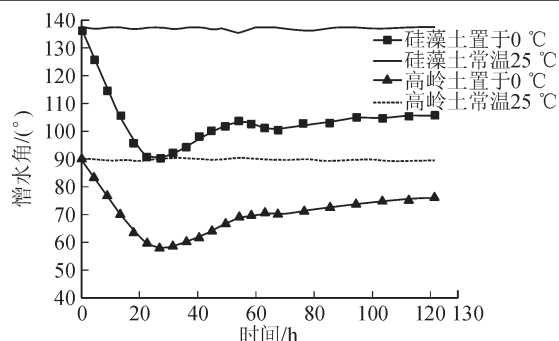


图1 不同温度下硅橡胶表面污秽憎水性

Fig. 1 Hydrophobicity of contaminated silicone rubber at different temperatures

2 鸟粪下落过程中最大连续长度与鸟粪参数的对应关系

鸟粪下落时最大连续长度是研究中极为关键的变量,它决定了闪络过程中空气击穿的长度,通常情况下,鸟粪的最大连续长度越长,闪络越容易发生。因此,为了确定鸟粪粘度、体积、下落方式与下落过程中鸟粪长度的对应关系。文中选取了不同参数的鸟粪模拟液,采取控制变量法,得到了鸟粪最大连续长度与各参数的对应关系曲线,见图2。从而在后续的实验可以通过测试鸟粪参数直接确定鸟粪长度。

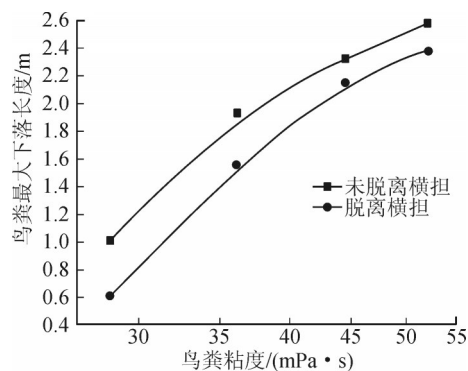


图2 20 mL 鸟粪最大连续下落长度与粘度的对应曲线

Fig. 2 Relationship between the guano maximum continuous length and viscosity when volume is 20 mL

实验采用中国电科院研制的鸟粪推进装置,推进装置原理是使用气泵加3个大气压将一定量的鸟粪模拟液压出容器。实验选取了鸟粪脱离横担和未脱离横担2种下落方式,脱离横担下落即鸟粪通过推进装置直接下落,在下落时获得一定的初速度。未脱离横担情况下鸟粪从横担边缘滴落,初速度可近似认为是零。

实验制备了28.4、36.2、44.5、52.1 mPa·s 4种粘度的鸟粪模拟液。分别选取每种粘度的模拟液20 mL采取2种下落方式下落,使用高速摄影机拍摄下落过程的照片,根据照片中鸟粪与绝缘子的比例计算

鸟粪长度。通过图2可以发现:

1)鸟粪长度与粘度呈现正比关系,但由于鸟粪体积有限,随着粘度的增大,鸟粪长度的增长幅度逐渐降低。

2)同等粘度的鸟粪在未脱离横担情况下鸟粪的最大长度高于脱离横担下落的鸟粪,这是由于鸟粪在加速下落时具有一定的初速度,容易造成鸟粪团聚在端部,导致鸟粪不易形成较长的连续液体。

对于鸟粪体积与最大连续下落长度的对应关系,实验选取了15、20、25、30 mL不同粘度的鸟粪模拟液,采取未脱离横担方式下落。实验结果见图3。从图3可以发现:

1)鸟粪最大连贯长度随鸟粪体积增大而增大,但由于鸟粪粘度的限制,鸟粪长度的增大幅度逐渐降低,最终趋向于某个极限长度。

2)不同体积的鸟粪模拟液在粘度较低时最大连续长度差异较小,随着粘度增大差异逐渐增大,并最终趋向于不同的极限长度。

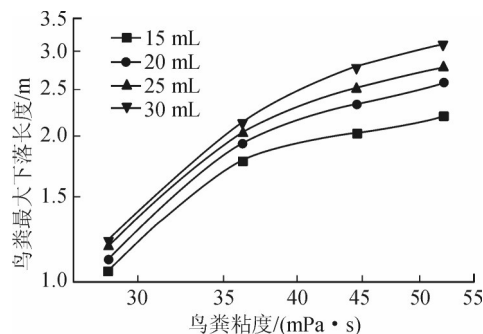


图3 鸟粪最大连续下落长度与体积的对应关系(未脱离横担)

Fig. 3 Relationship between the guano maximum continuous length and volume (not escaped from cross arm)

3 330 kV 湿污复合绝缘子鸟粪闪络试验影响因素研究

3.1 试验设计

闪络试验在江西电科院250 kV污秽实验室进行。所用绝缘子为宁夏地区的330 kV复合绝缘子,见图4。试验过程中,对绝缘子施加190 kV恒定电压(实际运行相电压),每种试验条件下进行10次鸟粪下落,观察并记录鸟粪导致的绝缘子闪络次数。

文中主要研究鸟粪下落方式、下落通道、体积电导率、体积和相对湿度对鸟粪闪络概率的影响。选择了一种典型的污秽度,即绝缘子表面的附盐密度为 $ESDD=0.1 \text{ mg/cm}^2$,附灰密度为 $NSDD=1.2 \text{ mg/cm}^2$,绝缘子表面憎水性等级为 $HC=6$ 。

根据鸟粪下落的位置情况,分为鸟粪与导线异面垂直情况、鸟粪与导线共面垂直情况,分别见图5、6。

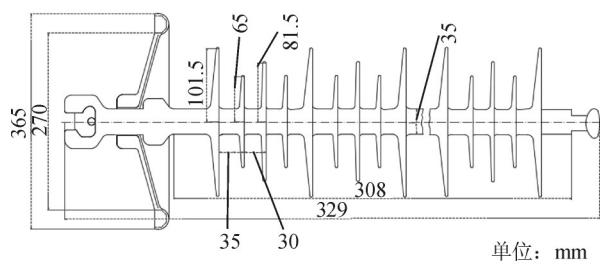


图4 330 kV复合绝缘子尺寸

Fig. 4 Demension of 330 kV composite insulator

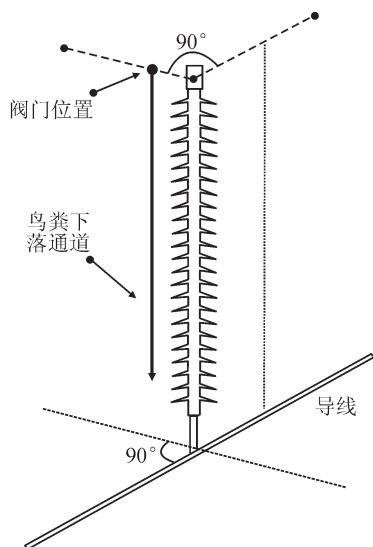


图5 鸟粪与导线异面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of non-coplanar of guano and wurd

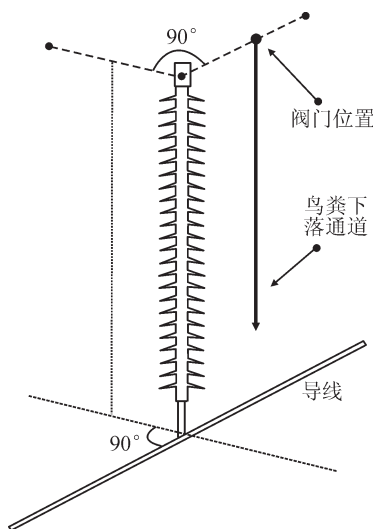


图6 鸟粪与导线共面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of coplane of guano and wurd

3.2 下落通道、下落方式对闪络的影响

3.2.1 鸟粪与横担未脱离情况

在鸟粪与导线异面垂直情况下,控制污秽实验室的温度为 20 ℃,湿度为 65%。在试验中控制鸟粪下落通道与复合绝缘子伞裙边缘之间的距离,在距

离分别为 $D=5、12、20、30$ cm 4 种情况下进行试验。复合绝缘子的伞裙直径 12 cm,均压环的内径和外径分别为 27 cm 和 33 cm,因此这 4 种情况下鸟粪分别落在均压环内和均压环外。使用高速摄影机拍摄鸟粪闪络过程。

试验中使用 20 mL 粘度为 28.4、36.2、44.5、52.1 mPa·s,对应的最大下落长度为 $L=101、193、232、258$ cm,电导率为 6 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的鸟粪模拟液,每种情况进行 10 次下落实验。清洁绝缘子带均压环和不带均压环情况下均未发生闪络。湿污绝缘子的闪络次数见表 1、2。湿污绝缘子闪络过程见图 7。

表1 湿污绝缘子带均压环

Table 1 Wet contaminated insulator with corona ring

D/cm	$L=101$ cm	$L=193$ cm	$L=232$ cm	$L=258$ cm
5	0/10	5/10	8/10	10/10
12	0/10	1/10	2/10	5/10
20	0/10	0/10	1/10	1/10
30	0/10	0/10	0/10	0/10

表2 湿污绝缘子不带均压环

Table 2 Wet contaminated insulator without corona ring

D/cm	$L=101$ cm	$L=193$ cm	$L=232$ cm	$L=258$ cm
5	0/10	2/10	5/10	5/10
12	0/10	0/10	0/10	2/10
20	0/10	0/10	0/10	0/10
30	0/10	0/10	0/10	0/10

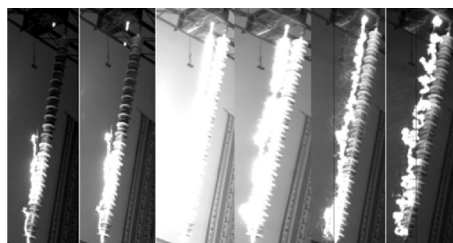


图7 湿污复合绝缘子闪络过程

Fig. 7 Flashover process of wet and polluted composite insulator

由实验结果可知,绝缘子表面污秽程度对闪络概率有较大影响。当绝缘子表面清洁时,即使鸟粪靠近绝缘子表面且具有较长的下落长度也无法造成闪络。当绝缘子表面污秽程度较高时,表面污秽的存在会增加发生沿面闪络的概率,增加发生鸟粪闪络的概率。

与相同条件下不带均压环的情况相比,带均压环绝缘子更易发生闪络,主要是由于均压环进一步缩短了绝缘距离,同时改变了电场分布。当 $D=5、12$ cm 时,鸟粪下落通道处于均压环内部,发生闪络的概率有明显的提升。

3.2.2 鸟粪与横担脱离情况

在鸟粪与导线异面垂直情况下,鸟粪采取与横担脱离的下落方式。清洁绝缘子带均压环和不带均压环情况下均未发生闪络。湿污绝缘子闪络实验结果见表3、4。

表3 湿污绝缘子带均压环

Table 3 Wet contaminated insulator with corona ring

D/cm	L=61/cm	L=155/cm	L=215/cm	L=238/cm
5	0/10	0/10	0/10	0/10
12	2/10	2/10	2/10	2/10
20	5/10	5/10	5/10	5/10
30	8/10	8/10	8/10	8/10

表4 湿污绝缘子不带均压环

Table 4 Wet contaminated insulator without corona ring

D/cm	L=61 cm	L=155 cm	L=215 cm	L=238 cm
5	0/10	0/10	5/10	5/10
12	0/10	0/10	5/10	5/10
20	0/10	0/10	0/10	1/10
30	0/10	0/10	0/10	0/10

由实验结果可知,相比于未脱离横担的下落方式,鸟粪脱离横担下落发生闪络的概率较低,一方面是由于鸟粪具有初速度造成鸟粪团聚在下落端部,导致鸟粪不易拉长,影响鸟粪长度;另一方面,鸟粪具备下落初速度会导致鸟粪经过绝缘子的时间缩短,进一步降低闪络概率。

3.2.3 鸟粪与导线共面情况

在鸟粪与导线共面垂直情况下,对鸟粪下落通道与导线共面的情况进行试验。试验前调整阀门的位置,使得鸟粪下落通道与导线在同一平面,鸟粪模拟溶液能够落在导线上。鸟粪下落通道与复合绝缘子伞裙边缘距离为5、15、25、35 cm。复合绝缘子不带均压环,选取鸟粪脱离横担的下落方式。高速摄影仪拍摄到闪络过程见图8。

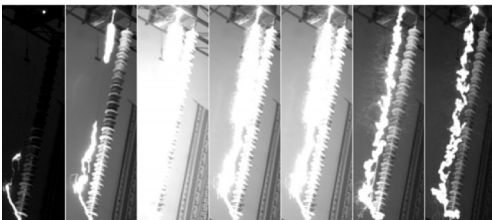


图8 湿污复合绝缘子闪络过程

Fig. 8 Flashover process of wet and polluted composite insulator

鸟粪与导线共面时,清洁绝缘子也发生了闪络。此时,在清洁绝缘子上发生的闪络属于纯粹的空气击穿,但闪络发展的速度非常快。高速摄像仪

设置的帧数是5 000 帧/s,电弧在10 帧之内就完成了贯通。

另外从图7中可以看到,虽然这种情况的鸟粪下落长度也达到1.4 m 以上,鸟粪溶液仍然能够连续的下落,这与鸟粪和导线垂直情况下的鸟粪形态是不一样的。这是因为鸟粪与复合绝缘子之间的距离增大,受到电场的影响减小,因而并没有断裂发散开来。清洁和湿污绝缘子发生鸟粪闪络的概率如表5、6。

表5 清洁绝缘子

Table 5 Clean insulator

D/cm	L=61 cm	L=155 cm	L=215 cm	L=238 cm
5	10/10	10/10	10/10	10/10
12	2/10	2/10	3/10	5/10
20	0/10	1/10	2/10	2/10
30	0/10	0/10	0/10	0/10

表6 湿污绝缘子

Table 6 Polluted insulator

D/cm	L=61 cm	L=155 cm	L=215 cm	L=238 cm
5	10/10	10/10	10/10	10/10
12	2/10	5/10	5/10	10/10
20	0/10	1/10	2/10	2/10
30	0/10	0/10	0/10	0/10

由实验结果可知,在鸟粪与导线共面的情况下,发生闪络的概率极高,特别是在鸟粪下落通道距离伞裙边缘小于5 cm 时,发生闪络的概率几乎是100%。原因是鸟粪与导线共面的情况大大缩减了空气间隙,闪络几乎完全是通过鸟粪通道完成。对比不同的绝缘子染污状态可以发现,在鸟粪距离较小时绝缘子表面污秽程度对闪络概率有一定影响。但是,当距离达到25 cm 以上时,绝缘子染污程度对闪络概率几乎无影响。

3.3 体积电导率、体积、环境湿度对闪络的影响

文中主要对体积电导率、体积、环境湿度对鸟粪闪络概率影响进行研究。并主要选择了带均压环的染污绝缘子进行研究。

改变鸟粪的体积电导率和体积,试验研究其对绝缘子鸟粪闪络的影响,选取鸟粪与横担未脱离的情况。外部温湿度分别设置为20 ℃和65%。鸟粪粘度为36.2 mPa·s,15、20、25、30 mL 鸟粪对应的最大下落长度为L=177、193、203、213 cm,下落距离为5 cm。试验结果见表7。

表7 不同电导率、体积下鸟粪闪络概率

Table 7 Guano flashover probability in different conductivity and volume

$\mu/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$L=177\text{ cm}$	$L=193\text{ cm}$	$L=203\text{ cm}$	$L=213\text{ cm}$
4 500	0/10	0/10	0/10	0/10
5 500	0/10	0/10	2/10	2/10
6 500	0/10	3/10	3/10	5/10
7 500	5/10	5/10	8/10	10/10

改变空气相对湿度,试验研究其对绝缘子鸟粪闪络的影响。选取鸟粪与横担未脱离的情况。采用带均压环的染污复合绝缘子进行试验,外部温度设置为20℃。鸟粪粘度为36.2 mPa·s,20 mL鸟粪对应的最大下落长度为193 cm,下落距离为5 cm。湿度选择为52%、65%、78%、96%。试验结果见表8。

表8 不同电导率、环境湿度下鸟粪闪络概率

Table 8 Guano flashover probability in different conductivity and humidity

$\mu/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$RH=52\%$	$RH=65\%$	$RH=78\%$	$RH=96\%$
4 500	0/10	0/10	0/10	0/10
5 500	0/10	0/10	0/10	2/10
6 500	0/10	3/10	5/10	5/10
7 500	8/10	10/10	10/10	10/10

由表7、8可以看出,试验结果呈现出一定的趋势性。鸟粪体积越大,鸟粪模拟液电导率越高,闪络越容易发生。特别是当鸟粪体积在20 mL以上时,电导率在6 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上时,发生闪络的概率在30%以上。环境湿度越高,鸟粪模拟液电导率越高,闪络越容易发生。特别是当环境达到78%以上时,鸟粪电导率在6 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上时,闪络概率高于50%。

4 结论

1)复合绝缘子鸟害闪络大多都发生在凌晨湿度较大、温度较低的环境中。染污硅橡胶表面憎水性随着环境温度的降低而下降,且憎水性能的恢复需要较长时间。

2)鸟粪长度随粘度、体积的增加而增加,随着粘度、体积的增加,鸟粪长度的增加幅度逐渐降低。

3)当鸟粪下落通道与导线异面垂直时,在额定运行电压下,330 kV清洁复合绝缘子不会发生闪络,330 kV湿污复合绝缘子的闪络概率随距离的减小、鸟粪长度的增加而增加,鸟粪脱离横担比未脱离横担下落时发生闪络的概率较低,带均压环比不带均压环时绝缘子更易发生闪络。

4)当鸟粪通道与导线共面垂直时,在额定运行

电压下,330 kV清洁和湿污复合绝缘子均会发生闪络,距离小于5 cm时必定发生闪络,距离大于25 cm时污秽程度对绝缘子闪络无影响。

5)鸟粪体积越大、电导率越高、湿度越大,330 kV复合绝缘子发生鸟粪闪络的概率越大。

参考文献:

- [1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
GUAN Zhicheng. Insulation and outdoor insulation of power transmission[M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 2006.
- [2] 巢亚锋,徐志强,岳一石,等. 湖南输电线路鸟害故障特征分析及防范措施[J]. 高电压技术,2016,42(12):3853-3860.
CHAO Yafeng, XU Zhiqiang, YUE Yishi, et al. Characteristics analysis and prevention countermeasures of bird-caused damages for overhead transmission lines in hunan power grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12):3853-3860.
- [3] 彭可,刘春翔,朱弘钊,等. 热带地区输电线路鸟粪闪络特性模拟试验研究[J]. 高电压技术,2016,42(1):248-255.
PENG Ke, LIU Chunxiang, ZHU Hongzhao, et al. Simulation experiment analysis of flashovers initiated by bird excretion on transmission lines in tropical areas in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1):248-255.
- [4] 卢明,谈发力,何正浩,等. 110 kV输电线路鸟粪闪络机理研究[J]. 电瓷避雷器,2015(6):1-7.
LU Ming, TAN Fali, HE Zhenghao, et al. Research on the mechanism of guano flashover in 110 kV transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(6):1-7.
- [5] PAUL T, REIN O, JAAN N, et al. Main bird excrement contamination type causing insulator flashovers in 110 kV overhead powerlines in Estonia[J]. Oil Shale, 2013, 30(2):211-224.
- [6] YANG Q, RAN J Q, HAN R, et al. Protection radius of bird-preventing installation design for 110 kV suspension insulators based on withstand tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6):3514-3522.
- [7] 李长看,胡扬宇,庞 锴,等. 河南省电网涉鸟故障发生的规律、类型、特征及防治对策研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2015,45(4):443-449.
LI Changkan, HU Yangyu, PANG Kai, et al. Research on the occurrence law, types, characteristics of bird-trouble failure and its prevention-control policy in Henan province electric power grid[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2015, 45(4):443-449.
- [8] 卢明,马宁,涂安琪,等. 河南省高压输电线路复合绝缘子鸟啄情况分析[J]. 电瓷避雷器,2015(5):1-5.
LU Ming, MA Ning, TU Anqi, et al. Analysis on bird damage to composite insulator of high voltage transmission lines in henan province[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015

- (5):1-5.
- [9] 欧书成,王雨涵,杨威. 内蒙古电网鸟害故障分析及防范措施[J]. 内蒙古电力技术, 2007, 27(5):1-3.
OU Shucheng, WANG Yuhuan, YANG Wei, Failure analysis and its precaution measure on bird damage to inner mongolia power grid[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2007, 27(5):1-3.
- [10] LA A D, GORUR R S, CHANG J, Effect of wetting conditions on the flashover voltage of non-ceramic insulating materials[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 52(10):325-331.
- [11] BEKKER H J, BRITTEN A C, STEVENS D J, et al. Light pollution on glass disc insulators as an underlying cause of flashovers in Eskom's 275 and 400 kV networks[C]//11th High Voltage Engineering Symposium on High Voltage Engineering. London, UK:[s.n.], 1999:103-106.
- [12] 薛禹胜,李海峰. 2008 年国际大电网会议系列报道——关于电力系统运行与控制的讨论[J]. 高电压技术. 2008, 34(11):2253-2256.
XUE Yusheng, LI Haifeng, A review of CIGRE 2008 on power system operation and control[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11):2253-2256.
- [13] 贾志东,张威,方苏,等. 湿污环境中的复合绝缘子异物闪络[J]. 高电压技术, 2010, 36(8):1893-1899.
JIA Zhidong, ZHANG Wei, FANG Su, et al, Foreign body caused flashover on composite insulator in wet and contaminated condition[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 1893-1899.
- [14] 黄道春,余俊,张宇,等. 220 kV 线路悬式绝缘子串异物临近放电机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24):4161-4170.
HUANG Daochun, YU Jun, ZHANG Yu, et al, Study on discharge mechanism of suspension insulator string of 220 kV AC transmission line with external object approaching[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24):4161-4170.
- [15] 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, Discharge characteristics of tower-line air gap of AC transmission line caused by bird streamer[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1):55-60.
- [16] 黄瑞莹,黄道春,周军,等. ± 400 kV 直流输电线路杆塔涉鸟故障风险区域研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(2):68-73.
HUANG Ruiying, HUANG Daochun, ZHOU Jun, et al. Research on bird damage risk region of ± 400 kV DC transmission line[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(2):68-73.
- [17] 陈剑光. 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[J]. 高压电器, 2016, 52(7):136-142.
CHEN Jianguang. Research on effect of wrapping insulation sheath to wire on bird streamer flashover on 220 kV composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 136-142.
- [18] 林锐,李扬森. 架空输电线路鸟害防治措施研究现状及展望[J]. 能源与环境, 2015(5):18-19.
LIN Rui, LI Yangsen. Research status and prospects of bird damage prevention measures research for overhead transmission line[J]. Energy and Environment, 2015(5):18-19.
- [19] 周学明,李健,朱昌成. 鸟粪下落畸变绝缘子串附近电场引起闪络的机理与故障特性分析[J]. 湖北电力, 2015, 39(10):26-28.
ZHOU Xueming, LI Jian, ZHU Changcheng. Analysis of flashover mechanism and characteristics caused by the bird dropping distort electric field near the insulator[J]. Hubei Electric Power, 2015, 39(10):26-28.
- [20] 王峰,黄福勇,曾昊,等. 湖南省输电线路鸟害障碍分析及防治[J]. 高压电器, 2011, 47(10):97-101.
WANG Feng, HUANG Fuyong, ZENG Hao, et al. Analysis and prevention of bird hazard barriers on transmission line in hunan province[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 97-101.
- 刘世涛(1986—),男,本科,工程师,主要从事输电线路设备技术及输电线路防污闪的研究。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部