

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.012

绝缘子表面自然污秽物性与污染源关系研究

周志成¹, 温涛源², 高 嵩¹, 黄亚继², 杨林军²

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211102;

2. 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 不同污染源影响绝缘子积污量,对污秽的理化性质也有较大影响。文中选取江苏盐城各县市不同污染源附近的6个绝缘子悬挂点,通过取样分析悬挂点绝缘子的等值附盐密度(*ESDD*)和等值附灰密度(*NSDD*)及其污秽可溶物、不溶物中阴阳离子体积分数和上、下表面污秽颗粒粒径的变化,研究分析了不同污染源附近绝缘子自然积污规律。结果表明:连续积污两年后,各污染源附近绝缘子下表面的盐密和灰密高于上表面;水泥厂、热电厂、镍厂和工业园区附近绝缘子的污秽度要大于农田公路区和化肥厂,平均灰盐比以水泥厂附近绝缘子3.28为最高,化工园区1.75为最低;不同污染源绝缘子表面污秽物的理化性质存在很大差异。建议外绝缘设计及线路运行维护中充分考虑上述积污特点。

关键词: 绝缘子; 污染源; 自然积污成分; 盐密; 灰密

Study on the Relationship Between Natural Contamination Property on Insulators and Pollutant Sources

ZHOU Zhicheng¹, WEN Taoyuan², GAO Song¹, HUANG Yaji², YANG Linjun²

(1. State Grid Jiangsu Electrical Power Research Institute, Nanjing 211102, China; 2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to study the contamination accumulation rules of insulators around different pollutant sources, the author selects six test sites near different pollutant sources in Yancheng city, Jiangsu province, the variation of *ESDD* and *NSDD*, and the ionic content and particle size distribution are analyzed. The results are as follows: after a 2-year pollution period, the upper-surface *ESDD* and *NSDD* of insulators around different pollutant sources are higher than those on under-surface; The filth of insulators at cement plant, coal-fired plant, nickel plant and industrial park is higher than that at fertilizer plant and highway-farmland area. The average ratio of *ESDD* to *NSDD* of cement plant insulators is up to 3.28, which of chemical industrial park is lowest to 1.75; The physical and chemical properties of dust on insulators have big difference between diverse pollutant sources. It is recommended that these features of pollution deposit should be adequately considered in outdoor insulation designing and operation maintenance.

Key words: insulator; pollutant source; natural pollution component; *ESDD*; *NSDD*

0 引言

绝缘子自然积污特性是电力系统外绝缘研究的一项基础工作,随着环境污染日益严重,尤其是大气环境污染使绝缘子绝缘性能下降,甚至发生输

变电线路的污闪事故,给电力设备的运行带来很大的安全隐患。一般来说,输电线路发生污闪的一个必要条件就是污秽的沉积,沉积污秽越严重,发生污闪的概率就越大^[1-4]。绝缘子污秽累积到一定程度后,在雾、露、毛毛雨、溶雪等潮湿天气下,污秽绝缘子就有可能发生闪络,威胁电力系统安全。由污秽

收稿日期:2016-07-15; 修回日期:2016-09-19

基金项目:国家电网公司科技指南项目。

Project Supported by Science and Technology Guide Project of State Grid.

引起的污闪事故仅次于雷电事故,但污闪事故造成的损失却是雷电事故的10倍^[5-8]。

大气污染物种类繁多,不同行业排放的污染物特性不尽相同,对绝缘子性能造成的影响程度也不同^[5,9-12]。文[13]将东莞分为山区、农业区、工业区、靠海区、居民区和高速公路6个区域,分析了这些区域绝缘子自然积污的盐密和灰密,表明工业区和高速公路区域的绝缘子积污高于其他区域。文[14]对公路区与公路农田区绝缘子自然积污成分进行了对比分析,发现公路农田区的污秽物中灰的体积分数比公路区的大。但关于不同污染源排放的污染物特性和绝缘子自然积污关系的研究相对较少。文中选取6种典型环境地区(水泥厂、公路农田区、热电厂、化肥厂、镍厂、工业园区)的悬挂绝缘子表面污秽特性开展了较为详细的研究,从盐灰密、污秽可溶性盐成分、污秽不溶性成分及粒径分布几个方面对不同典型环境地区的绝缘子进行了分析,从而揭示不同污染源环境下绝缘子积污特性,对线路外绝缘设计及运行维护具有十分重要的意义。

1 试验设计

1.1 绝缘子试验点选择及取样

为了研究不同污染源环境下绝缘子表面积污特点,文中选取江苏省盐城地区各县市不同污染源附近的架空线路绝缘子作为研究对象,采集自然积污两年的绝缘子污秽样品,进行污秽物性分析。

采样点1是110 kV华围i825线045塔,东边是几个水泥厂,周围是荒地,主要污染源是附近的水泥厂,属于水泥厂区;采样点2是110 kV华隆828线030号塔,南边挨着一条公路,北边是大片农田,属于公路农田区;采样点3是110 kV陈森1951线004号塔,附近主要污染源是一个热电厂,属于热电厂区;采样点4为翔阜线28号,附近主要污染源是一个化肥厂,属于化肥厂区;采样点5为110 kV恒银线36号塔,其东面是江苏德龙镍厂,主要污染源为镍厂;采样点6为110 kV隆热983线路051号塔,该悬挂点在滨海工业园区内,四周都是化工厂,属于工业园区。绝缘子造型图见图1,绝缘子参数见表1。

1.2 污秽采样与测试

1.2.1 等值附盐密度(ESDD,简称盐密)的测量

1)取样。分别使用医用脱脂棉擦拭绝缘子的上、下表面,每片绝缘子2~3次,将擦拭后的脱脂棉用密封袋装好并作标记。

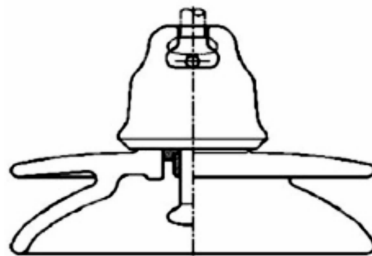


图1 绝缘子造型图

Fig. 1 Structure of insulator

表1 绝缘子参数

Table 1 Parameter of insulator

绝缘子型号	上表面面积/cm ²	下表面面积/cm ²	泄漏距离/mm
XWP-7	1 210	803	410

2)溶解(蒸馏水量:1 200 cm²以下按300 mL量取,1 200 cm²以上按400 mL量取)。根据所取样绝缘子上、下表面积大小量取蒸馏水,将取样脱脂棉和污秽进行清洗。

3)测电导率。用玻璃棒搅拌均匀,并测量污水的温度。用直读式盐量表测量清洗液的电导,读数已直接标成100 mL中的等值盐量,只需将读数乘以水量系数即可得到总盐量。

4)计算等值盐密

$$S_a = (5.7\sigma_{20})^{1.03}; \quad (1)$$

$$ESDD = S_a V / (100A). \quad (2)$$

式(1)、(2)中:ESDD为等值盐密,mg/cm²;V为污液体积,cm³;A为绝缘子表面积,cm²;S_a为污水的盐度,mg/100 mL,其中 $S_a = (5.7\sigma_{20})^{1.03}$ (500 mg/100 mL以下按此式计算)适用电导率范围为0.004~0.4 S/m。

整片绝缘子平均盐密计算式为

$$P_{ESDD} = (\rho_{ESDD上} S_{上} + \rho_{ESDD下} S_{下}) / S. \quad (3)$$

式(3)中:S_上为绝缘子上表面面积,为1 210 cm²;S_下为绝缘子下表面面积,为803 cm²;S为绝缘子表面积,为2 013 cm²。

1.2.2 等值附灰密度(NSDD,简称灰密)的测量

1)过滤、称重。取一片滤纸,烘干、称重并记录重量值为G₁。将已测量盐密后的污水进行过滤,过滤后的滤纸烘干、称重并记录重量值为G₂。

2)灰密计算式

$$NSDD = 1\,000(G_2 - G_1) / A. \quad (4)$$

整片绝缘子平均灰密计算式为

$$P_{NSDD} = (\rho_{NSDD上} S_{上} + \rho_{NSDD下} S_{下}) / S. \quad (5)$$

式(5)中:S_上为绝缘子上表面面积,为1 210 cm²;S_下为绝缘子下表面面积,为803 cm²;S为绝缘子表面积,为2 013 cm²。

1.2.3 阴、阳离子分析

可溶性物质分析:将绝缘子污液进行过滤得到上清液,阴离子采用戴安公司的离子色谱仪(ICS-2100)进行精确分析,阳离子采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行精确分析。

不溶性物质分析:将过滤后滤纸上的不溶物先用少量王水溶解,然后将多余的酸蒸发,再用氢氟酸将其溶解,将多余的氢氟酸蒸发,最后溶于定量的超纯水中,阴、阳离子分别用离子色谱仪(ICS-2100)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行检测。

1.2.4 污秽颗粒粒径分析

为了研究绝缘子表面沉积颗粒物的物性与周围污染源排放的污染物特性的关系,分别取不同污染源附近绝缘子上、下表面的沉积颗粒物,用丹东百特 BT-9300ST 激光粒度分析仪分别对上、下表面沉积的颗粒物进行粒径分析。

2 绝缘子污秽分析

2.1 绝缘子表面盐密、灰密与污源的关系

绝缘子表面的污秽度主要通过盐密和灰密来表示,为了对比各污染源绝缘子污秽度之间的差异,将各污染源附近输电线路悬挂绝缘子的盐密、灰密以及其灰盐比(盐密与灰密之比)测量结果分别绘制成柱状图,见图 2-4,其中灰盐比用 $K_{NSDD/ESDD}$ 表示。

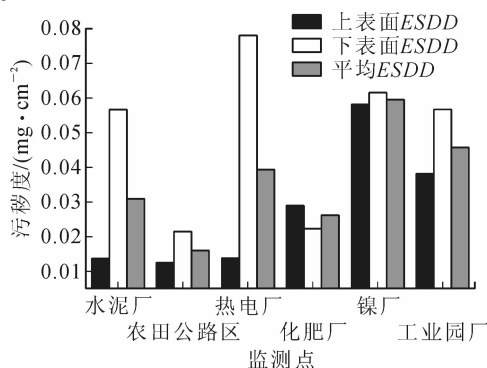


图2 盐密测试结果

Fig. 2 Measuring results of ESDD

由图 2-3 可看出,在积污两年时间后,各污染源绝缘子上表面的盐密和灰密要比下表面低,主要是两方面的原因。一方面是空气动力学的影响,当含尘气流吹向绝缘子时,气流在下表面的棱槽形成漩涡和湍流,使尘埃与下表面充分接触而沉积,而上表面由于比较光滑,尘埃较难吸附在上面,沉积在绝缘子上表面的颗粒物在风力作用下也容易被吹脱;另一方面是机械冲刷的影响,由于绝缘子采

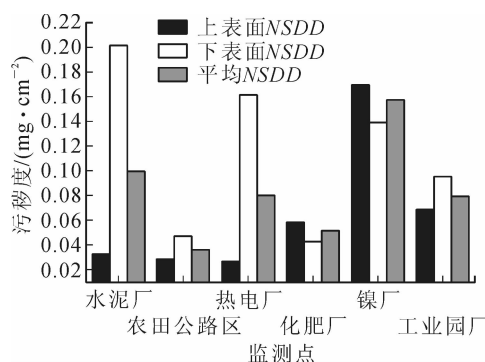


图3 灰密测试结果

Fig. 3 Measuring results of NSDD

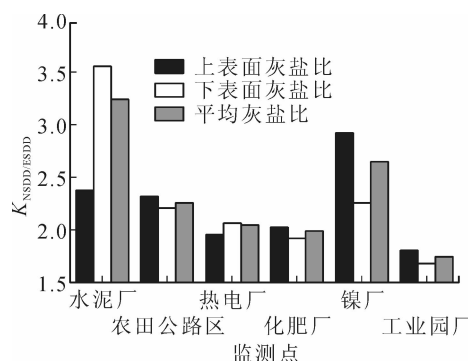


图4 灰盐比结果

Fig. 4 Results of ratio of ESDD to NSDD

用垂直悬挂方式,当降雨冲刷绝缘子时,主要是冲洗上表面,下表面主要受滴溅雨滴的冲洗作用,雨水冲洗作用对下表面的影响相对较弱,因此对下表面的清洁效果有限。随着积污时间的增长,上表面一直维持在较低污秽水平,下表面污秽则有增加趋势,导致下表面更容易沉积污秽。

化肥厂、镍厂和工业园区中绝缘子上表面盐密要明显大于水泥厂、农田公路区和热电厂;水泥厂、热电厂、镍厂、工业园区绝缘子下表面盐密比农田公路区和化肥厂高。水泥厂、热电厂、镍厂上表面灰密要明显大于农田公路区和工业园区;镍厂、化肥厂和工业园区下表面灰密要稍高于水泥厂、农田公路区和热电厂。整片绝缘子平均污秽度和下表面污秽度变化趋势一致。此外,水泥厂和镍厂的上下表面灰盐比差别很大,水泥厂下表面灰盐比为上表面的 1.5 倍,镍厂上表面灰盐比为下表面的 1.3 倍;农田公路区、热电厂、化肥厂和工业园区上、下表面灰盐比差别不大,都在 2 上下波动。

水泥厂和热电厂排出的一次颗粒物和形成的二次颗粒物粒径均较小,镍厂在冶炼过程中产生大量细颗粒工业粉尘,这些颗粒都较容易吸附在绝缘子表面;工业园区中有各种类型化工企业,生产工艺复杂,排放污染物繁多,尤其是气态污染物如

VOCs等容易在大气中形成二次颗粒物而沉积在绝缘子表面。农田公路区污秽主要是农田翻垦扬尘和公路扬尘沉积,扬尘颗粒较大,不容易沉积在绝缘子表面;化肥厂污染物主要是二氧化硫、氟化物和少量的颗粒物,经过尾气处理后,排出的污染物极少,因此其对周围的绝缘子污秽影响较小。

综上所述,水泥厂、热电厂、镍厂和工业园区附近绝缘子的污秽度要大于农田公路区和化肥厂,各

污染源绝缘子沉积污秽主要以灰为主,最低的是工业园区,灰量是盐量的1.75倍,其他污染源基本都在2倍以上,最高是水泥厂,灰量是盐量的3.28倍。

2.2 绝缘子表面积污成分与污源的关系

绝缘子表面的污秽成分,特别是常见的阴、阳离子体积分数对绝缘子污闪电压有一定的影响。为了进一步研究不同污染源绝缘子的积污差异,对可溶性成分中的阴、阳离子进行分析,结果见表2。

表2 不同污染源污秽可溶物阴、阳离子质量分数均值

污染源及平均值	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
水泥厂	2.818	27.590	37.632	100.580	109.240	21.183	17.790	3.869
农田公路区	6.190	65.670	37.050	208.400	28.273	39.212	16.439	5.213
热电厂	4.440	45.450	29.580	175.830	154.360	38.520	21.440	4.530
化肥厂	9.390	79.710	127.600	165.160	77.060	70.410	37.290	4.850
镍厂	3.930	81.900	37.800	95.180	43.810	11.690	10.530	13.450
工业园区	3.070	110.030	52.820	172.080	47.510	43.830	19.240	3.320
平均值	4.973	68.391	53.747	152.872	76.709	37.474	20.455	5.872

将绝缘子表面不溶物经1.2.3中所述方法处理后,对难溶物中的成分进行定量分析,结果见表3(由于不溶物经过王水和氢氟酸处理,对其中的F⁻、Cl⁻、NO₃⁻结果影响较大,故这3种离子检测结果未在表3中显示)。

表3 不同污染源污秽不溶物阴、阳离子质量分数均值

污染源及平均值	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
水泥厂	23.946	43.127	15.140	11.121	2.996
农田公路区	99.060	208.135	55.683	32.864	5.666
热电厂	267.525	306.730	35.315	23.724	5.771
化肥厂	80.514	98.642	48.265	33.863	4.924
镍厂	75.669	45.478	13.530	13.088	19.833
工业园区	43.051	59.100	65.423	27.580	3.228
平均值	98.294	126.869	38.893	23.707	7.070

由表2可以看出,绝缘子可溶物阳离子的趋势大致是Ca²⁺>Na⁺>K⁺>Mg²⁺,阴离子趋势是SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻>F⁻,各污染源污秽可溶物阳离子主要为Ca²⁺,可溶物阴离子主要为SO₄²⁻。水泥厂污秽可溶物成分以Ca²⁺、Na⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻为主;农田公路区以Ca²⁺、Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻为主;热电厂以Ca²⁺、SO₄²⁻为主;化肥厂以Ca²⁺、Na⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻为主;镍厂以Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻为主;工业园区以SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻为主;农田公路区SO₄²⁻体积分数明显高于其他污染源,主要原因是公路扬尘和农田翻耕导致含硫酸根的土壤扬尘吹起

而沉积在绝缘子表面。化肥厂NO₃⁻和Na⁺的质量分数较高,主要是由于附近化肥厂排出大量的硝酸盐和钠盐物质和大气中颗粒结合沉积在绝缘子表面。镍厂绝缘子沉积物中Mg²⁺质量分数过高,主要是由于镍厂使用的矿石原料中含有较高质量分数的镁元素,经过工艺流程后随废气排出,和大气颗粒物结合沉积在绝缘子表面。工业园区Cl⁻质量分数比其他污染源都高,原因是该工业园区农药厂、化工厂较多,排放废气中挥发性有机物(VOCs)、氯化氢和氨气等吸附在大气悬浮物表面,导致周围大气颗粒物中氯质量分数过高。总的来说,各污染源可溶性污秽中SO₄²⁻质量分数较大,说明各污染源可溶性污秽中硫酸盐占了很大比重。

从不溶物阴、阳离子检测结果来看(见表3),热电厂绝缘子污秽中Ca²⁺和SO₄²⁻质量分数很高,原因是电厂排放的烟气是颗粒物、硫氧化物、氮氧化物、碳氢化合物、CO和金属蒸汽等混合物,这些物质在扩散、转移过程中,会发生复杂的光化学反应,产生二次气溶胶并吸附周围大气的二氧化硫,形成石膏。农田公路区、水泥厂、化肥厂、镍厂及工业园区绝缘子污秽的各种离子质量分数差别不大,说明这些积污绝缘子中不溶性污秽受上述污染源影响较小,不溶性污秽成分大致相同。

2.3 绝缘子表面积污颗粒粒径分布与污源的关系

绝缘子污秽粒径分布影响颗粒物在绝缘子表面的沉积,对各污染源绝缘子上、下表面取下的污秽分别用激光粒度分析仪进行粒度分布测试,结合各污

染源情况进行对比分析,结果见表4。

表4 不同污染源附近绝缘子表面污秽粒径分布测试结果

Table 4 Measuring results of size distribution of contaminated insulators under different

pollution resources		μm		
污染源	绝缘子表面	D10	D50	D90
水泥厂	上表面	2.982	15.58	43.38
	下表面	3.085	16.51	45.18
农田公路区	上表面	8.465	176.40	304.90
	下表面	2.854	15.70	41.69
热电厂	上表面	2.295	16.39	58.39
	下表面	2.691	15.44	44.44
化肥厂	上表面	3.799	17.83	45.79
	下表面	4.509	18.61	43.72
镍厂	上表面	4.498	25.75	234.10
	下表面	6.369	134.80	297.70
工业园区	上表面	3.293	16.71	49.38
	下表面	2.865	17.44	55.15

从表4可看出,绝缘子上沉积的颗粒物的粒径大小和所处环境有很大关系,不同污染源附近绝缘子沉积颗粒物的粒径差别很大。水泥厂绝缘子上、下表面90%的污秽颗粒粒径 $<46\ \mu\text{m}$,且上、下表面污秽颗粒粒径的范围相差很小,下表面的颗粒稍大于上表面;农田公路区上表面的平均粒径D50为 $176.4\ \mu\text{m}$,下表面的平均粒径D50为 $15.7\ \mu\text{m}$,且下表面90%的颗粒粒径 $<41.44\ \mu\text{m}$,上表面的颗粒远大于下表面;热电厂;化肥厂上表面的平均粒径D50为 $17.83\ \mu\text{m}$,下表面的平均粒径D50为 $18.61\ \mu\text{m}$,下表面颗粒比上表面颗粒大,在 $0\sim 18\ \mu\text{m}$ 范围内,下表面颗粒较上表面多,而在 $18\sim 45\ \mu\text{m}$ 内,上表面颗粒较下表面多;镍厂上、下表面平均粒径D50分别为 $25.75\ \mu\text{m}$ 和 $134.8\ \mu\text{m}$,D90分别为 $234.1\ \mu\text{m}$ 和 $297.7\ \mu\text{m}$,下表面颗粒要比上表面大;工业园区绝缘子上、下表面颗粒D90分别为 $49.38\ \mu\text{m}$ 和 $55.15\ \mu\text{m}$,D50分别为 $16.71\ \mu\text{m}$ 和 $17.44\ \mu\text{m}$,相比之下,下表面颗粒稍大于上表面,但总体颗粒粒径很小。

总的来说,水泥厂、热电厂、化肥厂、工业园区绝缘子表面污秽粒径小于农田公路区和镍厂,主要是因为水泥厂、热电厂、化肥厂为燃煤污染源,排放的颗粒物、硫化物、氮氧化物、碳氢化合物以及化工园区排放的有机废气在大气环境中发生复杂的光化学反应,形成粒径较小的二次气溶胶颗粒物而沉积在绝缘子表面。农田公路区主要是土壤及道路扬尘在绝缘子表面沉积,镍厂由于鼓风炉、富氧顶吹熔炼炉、富氧侧吹熔炼炉、电炉、闪速炉、反射炉、

贫化炉、沉降电炉、转炉、回转窑、干燥窑无组织排放的较大粒径的一次颗粒物较多,相比之下,这些污染源绝缘子表面污秽颗粒较大。

3 结论

通过对各污染源绝缘子自然积污污秽度测试和成分分析结果,对盐城市各污染源附近绝缘子积污特性进行了对比分析,主要得到以下结论:

1)各污染源附近绝缘子上、下表面污秽分布极不均匀,绝缘子下表面的盐密和灰密比上表面大,整片绝缘子平均盐密和灰密随污染源变化呈现很大差异。

2)水泥厂、热电厂、镍厂和工业园区附近绝缘子的污秽度要大于农田公路区和化肥厂,自然积污绝缘子上、下表面盐灰比变化趋势存在一定差异,各污染源绝缘子平均灰盐比以水泥厂附近绝缘子最高,为3.28,化工园区绝缘子最低,为1.75。

3)不同污染源附近绝缘子沉积污秽的化学成分存在较大区别,水泥厂污秽可溶物成分主要为 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} ;农田公路区主要为 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} ;热电厂以 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 为主;化肥厂以 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} 为主;镍厂以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 为主;工业园区主要以 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} 为主。绝缘子表面污秽物中, Ca^{2+} 占全部阳离子的质量分数最高, SO_4^{2-} 占全部阴离子的质量分数最高,同一绝缘子污秽中,可溶物和不溶物的各种离子的质量分数存在一定的差异。

4)不同污染源附近绝缘子表面沉积污秽的粒径大小不同,水泥厂、热电厂、化肥厂和工业园区上、下表面的粒径基本在 $60\ \mu\text{m}$ 以下;农田公路区和镍厂绝缘子表面污秽粒径大于水泥厂、热电厂、化肥厂、工业园区。

5)建议线路外绝缘设计及运行维护中充分考虑以上积污特性;同时,不同污染源下盐密灰密差异和污秽化学成分差异可为实验室进行人工污秽试验提供参考,使污秽模拟更为逼真。

参考文献:

- [1] 宿志一,刘燕生.我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J].电网技术,2004,28(10):13-17.
SU Zhiyi,LIU Yansheng.Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces of suspension and post insulators with DC and AC stress in northern China's inland areas[J]. Power System Technology,2004,28(10):13-17.
- [2] 谭捷华,肖 勇,蔡 炜,等.直流线路绝缘子串自然污

- 秽盐密测量方法[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 52-53.
TAN Jiehua, XIAO Yong, CAI Wei, et al. Salt density measurement method for natural polluted insulator string used on DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 52-53.
- [3] 蔡 炜, 肖 勇, 吴光亚. ± 500 kV 直流线路绝缘子串自然积污规律初探[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 4.
CAI Wei, XIAO Yong, WU Guangya. Elementary analysis of pollution rules of insulators on ± 500 kV DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 4.
- [4] 张永耀. 绝缘子自然积污性能的比较[J]. 华东电力, 1989, 17(9): 7-10.
ZHANG Yongyao. Comparison of insulator pollution performance of the natural product[J]. East China Electric Power, 1989, 17(9): 7-10.
- [5] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新. 污秽绝缘子闪络特性研究现状及展望[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 35-40.
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, SUN Caixin. Present situation and prospect of research on flashover characteristics of polluted insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 35-40.
- [6] 范建斌, 黄志秋, 谢荣坤, 等. 直流输电线路 Y 型绝缘子串污闪特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 28-31.
FAN Jianbin, HUANG Zhiqiu, XIE Rongkun, et al. Research on pollution flashover performance of Y-type of insulator strings used in HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 28-31.
- [7] 苑吉河, 蒋兴良, 张志劲, 等. 高海拔现场标准悬式绝缘子的交流污闪特性[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 54-57.
YUAN Jihe, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, et al. High altitude field communication standard suspension insulator pollution flashover characteristics[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 54-57.
- [8] 殷 琼, 陈 原. 高导电性降水降雪型快速积污导致的输变电设备污闪机理与防治措施[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 1-6.
YIN Qiong, CHEN Yuan. Mechanism of pollution-flashover in power transmission and transformation equipments caused by rainfall or snowfall type high conductivity rapid contamination accumulation and its prevention measures[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 1-6.
- [9] 阎 东, 卢 明, 张亚鹏, 等. 500 kV 获仓线污闪故障分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 138-140.
YAN Dong, LU Ming, ZHANG Yapeng, et al. Analysis of pollution flashover fault on 500 kV huochang transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 138-140.
- [10] 吉开俊. 大气质量指数在防污闪工作中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
JI Kaijun. Study on the application of air quality index in anti-contamination flashover[D]. Nanjing: Nanjing University of Science, 2002.
- [11] LIN X, CHEN Z, LIU X. Natural insulator contamination test results on various shed shapes in heavy industrial contamination areas[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(3): 593-600.
- [12] 李永刚, 黄成才, 汪佛池, 等. 雾霾天气对复合绝缘子运行性能的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1792-1797.
LI Yonggang, HUANG Chengcai, WANG Fochi, et al. Influences of haze weather on operating performance of composite insulators[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1792-1797.
- [13] 宋云海, 刘 刚, 李恒真. 公路区与公路农田区绝缘子自然积污成分的对比如分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 22-25.
SONG Yunhai, LIU Gang, LI Hengzhen. Comparative analysis of natural contamination composition on insulators at highway area and highway-farmland area[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 22-25.
- [14] WANG Haiyan, LIU Gang. Study on insulator natural contamination trend under different physiognomies of local area[C]// IEEE 2008 International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 2008). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2008: 89-93.
- 周志成(1977—), 男, 博士, 高工, 主要从事防雷与接地、过电压分析、电力设备状态监测、输电线路运行管理等方面的研究。
- 温涛源(1992—), 男, 硕士, 主要从事大气污染控制。
- 高 嵩(1985—), 男, 硕士, 从事输电线路相关技术研究工作。
- 黄亚继(1975—), 男, 教授, 研究方向为大气污染控制和洁净煤技术。
- 杨林军(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 PM2.5 排放控制方面研究。