

珠三角地区不同地形条件下绝缘子污秽积累规律的研究

张本皇¹, 李恒真¹, 刘刚¹, 李立涅¹, 刘毅刚²

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广东电网公司广州供电局输电部, 广州 510310)

摘要: 笔者选取中国珠江三角洲地区220 kV输电线路上的4个试验点, 结合珠三角地区的年降水分布与城市热岛效应等因素, 通过分析试验点上绝缘子的盐密(ESDD)和灰密(NSDD)变化来研究珠三角地区不同地形下绝缘子表面积污积累规律。研究表明: 绝缘子的ESDD受降雨影响较大而NSDD较小; 影响绝缘子积污的主要因素是降雨量和污染源; 绝缘子的最大污秽度出现在雨季第1场降雨之前; 不同地形下绝缘子表面积污积累规律不同; 热岛效应在污秽积累过程中起了重要作用。

关键词: 绝缘子; 污秽积累; 地形; 盐密; 灰密

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)04-0001-06

Study on the Rule of Insulator Contamination Accumulation of Various Landforms in the Pearl River Delta

ZHANG Ben-huang¹, LI Heng-zhen¹, LIU Gang¹, LI Li-cheng¹, LIU Yi-gang²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510310, China)

Abstract: This article selects four test sites in the Pearl River Delta in China on the electric transmission line of 220 kV, in order to study the rules of insulator contamination accumulation of various landforms in the Pearl River Delta, the change of ESDD and NSDD are analyzed combining the distribution of precipitation and the urban heat island effect. According to the study: ESDD of the insulator is much easier to be affected by the rainfall than NSDD; both the rainfall and pollution source are the key factors of the insulator contamination accumulation; the highest insulator contamination will be appeared before the first rainfall of the rainy season; there are many differences of the insulator contamination accumulation rules in various landforms, the heat island effect make a great influence.

Key words: insulator; contamination accumulation; landform; ESDD; NSDD

0 引言

绝缘子积污特性的研究是电力系统外绝缘研究的一项基础工作, 对电力系统的正常运行和国民经济的发展均有重要意义^[1-3]。据统计, 污闪事故发生的总次数虽仅次于雷害事故, 但是污闪事故造成的损失却是雷害事故的10倍, 可见现有污闪规律研究成果不能满足实际输电线路运行和维护的需要^[5-7]。一般来说, 输电线路发生污秽闪络的必要条

件之一是绝缘子外表面污秽的积累, 污秽积累越严重, 则发生污秽闪络的概率越大^[6-15]。绝缘子表面污秽积累规律跟其所处的地形有关, 中国珠江三角洲地区经济发达, 人为因素和自然因素作用下导致各个地形下的环境差异较大。为此, 笔者在珠三角地区选取沿海农田、公路农田、公路工业区、工业区城区4个试验点, 结合降水和城市热岛效应等因素, 通过分析试验绝缘子表面积污规律、污秽化学成分来研究珠三角地区不同地形下绝缘子表面污秽积累规律。

收稿日期: 2011-11-28; **修回日期:** 2011-12-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2009CB724507); 广东电网公司重点科技项目(JA2006035)。

Project Supported by National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program)(2009CB724507), Important Science and Technology Program of Guangdong Power Grid Corporation(JA2006035).

1 试验设计

1.1 积污试验点的分析与选取

为方便研究不同地形下绝缘子表面积污积累规律,在试验点选取时,采用了 GOOGLE EARTH 可视化地理信息平台观测和实地考察相结合的方法,在珠三角地区选取了 4 处(沿海农田、工业区城区、公路农田、公路工业区)作为污秽积累的试验点。同时,为了减小试验点测量效果的随机性,在每个试验点选取该点范围内的三基杆塔作为试验杆塔,三基杆塔的绝缘子污秽平均值即为该点的绝缘子污秽值。

沿海农田见图 1,此试验点位于南海沿岸的农田上,附近没有其他地形,可认为此处绝缘子表面污秽主要来源于农田和海洋。工业区城区见图 2,此处为城区和工业区混合区,认为此处绝缘子表面污秽主要来源于城区和工业区。公路农田见图 3,试验杆塔位于公路附近,周围又是农田,认为此处绝缘子表面污秽主要来源于公路和农田。公路工业区见图 4,试验杆塔位于公路附近,周围又是工业区,认为此处绝缘子表面污秽主要来源于公路和工业区。



图 1 沿海农田

Fig. 1 Coastal farmlands



图 2 工业区城区

Fig. 2 Industrial city

1.2 试验绝缘子的选取

试验选用 LXHY4-100 型绝缘子作为试验绝缘子,这是珠三角地区最广泛应用的绝缘子型号之一,因此试验绝缘子表面污秽测量值可以很好地反映珠三角地区绝缘子的真实污秽值。



图 3 公路农田

Fig. 3 Highway farmlands



图 4 公路工业区

Fig. 4 Highway industrial area

试验时,将这个型号的绝缘子串悬挂在 220 kV 输电线路杆塔上,属于不带电积污,每基杆塔悬挂 4 串,每串有 14 片绝缘子。由于绝缘子顶部和端部的特殊性,在对其污秽采样时不考虑这 2 片绝缘子,只有中间的 12 片为有效绝缘子片。绝缘子串的悬挂日期是 2008 年 1 月 20 日,至今已经 700 多天的积污数据。

1.3 污秽采样与测量

采样时,使用采样巾(主要材料为脱脂棉,含水量为 6 mL),在杆塔上轻擦绝缘子外表面污秽,并将取样布封装送到实验室进行污秽度测量。

1.3.1 盐密的测量

先测量含有污秽的水的温度和电导率,再应用式(1)进行电导率的修正

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (1)$$

式(1)中: θ 为溶液温度,℃; σ_{θ} 为在温度 θ 下的体积电导率,S/m; σ_{20} 为 20℃下的体积电导率,S/m; b 为取决于 θ 的修正系数。

绝缘子表面的盐密再用式(2)、(3)即可得出

$$S_a = (5.7\sigma_{20})^{1.03} \quad (2)$$

$$ESDD = S_a \cdot V/A \quad (3)$$

式(2)、(3)中:ESDD 为等值盐密,mg/cm²;V 为蒸馏水的体积,cm³;A 为绝缘子表面面积,cm²。

测量盐密时,只能先测得上表面的盐密值 ESDD_上和下表面的盐密值 ESDD_下,再用式(4)求出整

片的盐密值。

$$ESDD = (ESDD_t \times A_t + ESDD_b \times A_b) / A \quad (4)$$

式(4)中: A_t 和 A_b 分别为绝缘子上下表面积, A 为整片绝缘子的外表面积。

1.3.2 灰密的测量

将已测量 $ESDD$ 的污秽液用漏斗和已干燥的滤纸(干燥滤纸重为 W_0)过滤, 再将含有污秽的滤纸烘干、称重, 质量为 W_t , 则

$$NSDD = 1000(W_t - W_0) / A \quad (5)$$

式(5)中: $NSDD$ 为等值灰密, mg/cm^2 ; A 为绝缘子表面积, cm^2 。

测量灰密时只能先测得上表面的灰密值 $NSDD_t$ 和下表面的灰密值 $NSDD_b$, 再用式(6)求出整片的盐密值。

$$NSDD_{\text{平均}} = (NSDD_t \times A_t + NSDD_b \times A_b) / A \quad (6)$$

式(6)中: A_t 和 A_b 分别为绝缘子上下表面积; A 为整片绝缘子的外表面积。

2 绝缘子表面积污积累规律分析

珠三角地区属于东亚季风区, 降水期相当集中, 具有降水量充沛、干湿季分明的特点, 雨季(4-9月)降水量占全年的 80%, 旱季(10月-次年3月)占 20%。考虑到降雨对于绝缘子污秽的积累有很大的影响, 所以笔者将结合珠三角地区的降雨规律(图 5)来分析绝缘子表面积污积累规律。

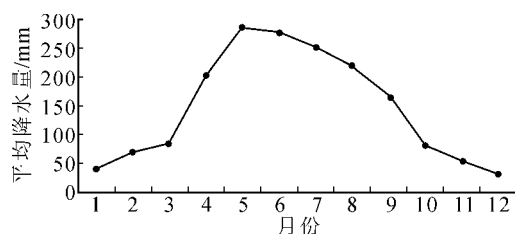


图 5 珠三角地区月平均降雨量分布

Fig. 5 Monthly average rainfall distribution in the Pearl River Delta

2.1 绝缘子的盐密变化规律

绝缘子在冬季(2008年1月初)投入试验, 此时珠三角地区已进入旱季, 4个地形下绝缘子的 $ESDD$ 均升高。进入了雨季后, 绝缘子的 $ESDD$ 均维持在一个较低的水平。到了 2008 年底旱季开始, 公路农田和沿海农田的 $ESDD$ 上升很快, 不过次年 2 月份强大的冷空气随冷锋频频南下, 珠三角地区处于低温阴雨阶段, 降水量缓慢增加, 所以 2009 年 2 月份 2 处的 $ESDD$ 达到旱季最低值。到了 3 月份, 冷空气逐渐离去, 2 处污秽积累继续进行并在 3 月份达到全年最高值。2009 年 4 月份, 珠三角地区进入了雨季,

在充沛的雨水作用下, 公路农田和沿海农田的 $ESDD$ 明显下降。

公路工业区和工业区城区在 2008 年底旱季开始, 2 处绝缘子的 $ESDD$ 均有上升, 但是上升幅度远不及公路农田和沿海农田, 这很大程度上是因为城郊气候差异大。城区在 9 月到次年 1 月热岛效应持续偏强, 其他月份均较弱^[16]。城市热岛效应产生的上升气流, 使城市中的有毒有害气体及灰尘微粒等空气中的杂质上升^[17]。上升气流遇到上层冷空气容易形成降雨冲刷绝缘子, 导致 2 处绝缘子在旱季其 $ESDD$ 污秽值仍处于较低水平。不同地形下绝缘子 $ESDD$ 随时间的变化规律见图 6。

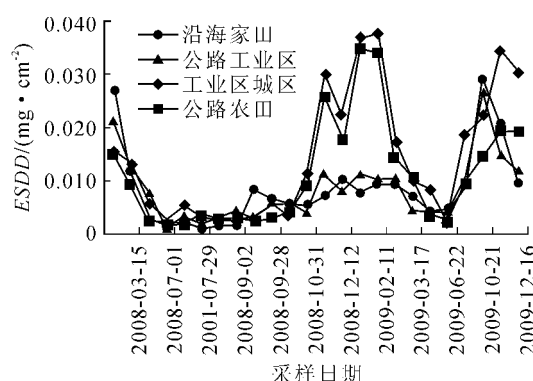


图 6 不同地形下绝缘子 $ESDD$ 随时间的变化规律

Fig. 6 Insulator $ESDD$ in different terrain changing with time

从以上分析可以看出: $ESDD$ 污秽值受降雨影响很大。公路农田和沿海农田的 $ESDD$ 变化跟气候的变化联系密切; 公路工业区和工业区城区因为受热岛效应的影响, 在旱季其 $ESDD$ 值比公路农田和沿海农田要低。

2.2 绝缘子的灰密变化规律

绝缘子投入试验时处于旱季后期, 4 个试验点绝缘子的 $NSDD$ 均升高, 2008 年 4 月进入雨季后 $NSDD$ 均处于较低水平。而到了 2008 年底旱季开始, 4 处绝缘子的 $NSDD$ 总体是升高, 但各个地形下 $NSDD$ 的变化规律和 $ESDD$ 的变化规律有较大不同^[18-19]。

公路农田的 $NSDD$ 在 2009 年 2 月份率先达到最大值, 这是由于此时正值珠三角地区春耕, 大量尘土飞扬污染绝缘子。沿海农田此时虽然也处于春耕, 但冬季海陆温差大, 容易形成海陆风冲刷绝缘子, 所以沿海农田绝缘子的 $NSDD$ 在入春后才达到 1 个峰值。公路工业区和工业区城区的 $NSDD$ 变化规律相似, 在旱季污秽值均上升。在 2009 年 6 月, 沿海农田绝缘子的 $NSDD$ 达到最大值; 在 2009 年 8 月, 公路工业区和工业区城区绝缘子的 $NSDD$ 亦达

到最大值。6月和8月珠三角地区仍处于雨季,是全年降雨最丰富的月份,但是有3处绝缘子的NSDD均达到最大值,可见降雨对NSDD的冲刷效果不明显。不同地形下绝缘子NSDD随时间的变化规律见图7。

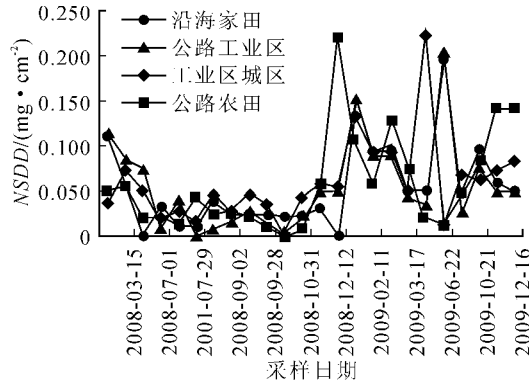


图7 不同地形下绝缘子NSDD随时间的变化规律

Fig. 7 Insulator NSDD in different terrain changing with time

从以上分析可以看出,NSDD受降雨的影响较小。在试验第1个雨季,各个地形下绝缘子NSDD较低,在第2年的雨季却有些反常,有3处绝缘子在此时达到NSDD全年最大值。在旱季,各个地形下绝缘子的NSDD均上升,但是由于各个地形下的具体环境条件不同,其上升规律也不同。

2.3 绝缘子的盐密与灰密变化规律综合分析

综合图5-7分析可以发现:在雨季,由于雨水的冲刷作用,4个地形下绝缘子的盐密值和灰密值均较低,到了旱季,污秽变化较为复杂,但总的趋势是污秽值升高。总的来说,绝缘子表面积污值雨季低旱季高,其污秽最高值一般出现旱季结束雨季开始之前,但要考虑到在农业活动频繁时农田地形下的绝缘子污秽值会升高,在海洋活动频繁时沿海地带的绝缘子污秽值会发生较大变化,城区/工业区要考虑热岛效应。

3 绝缘子污秽化学成分分析及污染源的探讨

3.1 绝缘子污秽可溶物分析

为了准确地研究污秽条件,可对污秽物进行定

量化学分析。这种分析对鉴别可溶盐的化学成分是有有效的。可溶盐的化学分析可以使用ESDD测量后的溶液,用离子交换色谱法(IC)、感应耦合等离子体——光学发射分析光谱测定法(ICP)等方法进行。分析结果可以显示出正离子如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} (见表1)以及负离子如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等的量。

表1 试验绝缘子污秽阳离子分析

Tab. 1 The analysis of the tested insulators cation mol/L

试验点	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
沿海农田	2.36×10^{-5}	5.97×10^{-5}	4.48×10^{-4}	2.00×10^{-5}
公路农田	1.81×10^{-5}	5.74×10^{-5}	1.07×10^{-4}	9.67×10^{-6}
公路工业区	3.06×10^{-5}	5.78×10^{-5}	1.24×10^{-4}	8.42×10^{-5}
工业区域区	1.86×10^{-5}	2.66×10^{-5}	1.35×10^{-4}	1.54×10^{-5}

对于可溶物中可能存在的阴离子 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 采用离子液相色谱法进行测试,结果见表2。

表2 试验绝缘子污秽阴离子分析

Tab. 2 The analysis of the tested insulators anion $\mu\text{g/mL}$

试验点	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
沿海农田	1.06×10^{-4}	4.10×10^{-5}	5.71×10^{-5}	5.19×10^{-4}
公路农田	6.29×10^{-5}	7.22×10^{-5}	3.18×10^{-5}	6.24×10^{-5}
公路工业区	7.14×10^{-5}	5.91×10^{-5}	3.67×10^{-5}	6.89×10^{-5}
工业区域区	3.66×10^{-5}	3.90×10^{-5}	4.39×10^{-5}	1.71×10^{-4}

分析表1、2,可以发现:沿海农田不溶物污秽以 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主;公路农田以 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 为主;公路工业区以 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 为主;工业区域以 F^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主。

3.2 绝缘子污秽不溶物分析

对难溶于水的污秽物进行成分分析,首先将离心分离得到的下层沉淀物(准确称量其质量)用少量的王水(浓硝酸和浓盐酸按一定比例配置)溶解,加热,将多余的酸除去。然后加入少量氢氟酸继续溶解样品,将溶液适当加热,除去多余的氢氟酸。然后用电导水(电导率小于 $1.0 \mu\text{S/cm}$)将样品定容到一定的体积,将残余物过滤除掉。通过电感耦合等离子体原子发射光谱仪对难溶物中的成分进行定量分析。不溶物分析见表3。

从表3可以看出:沿海农田污秽中的不溶物以 Al_2O_3 、 CaSO_4 为主;公路农田以 SiO_2 、 CuO 、 CaO 为

表3 不溶物分析

Tab. 3 The analysis of insoluble substance

试验点	SiO_2	Fe_2O_3	CuO	Al_2O_3	Pb	CaSO_4	CaO
沿海农田	5.42×10^{-5}	3.39×10^{-4}	7.20×10^{-5}	9.60×10^{-4}	3.75×10^{-5}	1.06×10^{-4}	6.53×10^{-5}
公路农田	7.65×10^{-5}	4.48×10^{-4}	5.33×10^{-5}	5.57×10^{-4}	4.39×10^{-5}	8.52×10^{-5}	1.20×10^{-4}
公路工业区	9.32×10^{-5}	4.10×10^{-4}	1.47×10^{-5}	9.83×10^{-4}	3.27×10^{-5}	1.73×10^{-4}	8.42×10^{-5}
工业区域区	7.27×10^{-5}	4.62×10^{-4}	8.09×10^{-5}	1.08×10^{-5}	5.65×10^{-5}	1.14×10^{-4}	5.98×10^{-5}

主;公路工业区以 SiO_2 、 CuO 、 CaSO_4 为主;工业区城区以 CuO 、 CaSO_4 为主。

3.3 绝缘子污染源的探讨

根据对绝缘子污秽的化学成分分析可以发现,不同地形条件下绝缘子污秽化学成分及其体积分数不同,分析原因是由于污染源不同。因此笔者对不同地形条件下绝缘子的污染源进行探讨如下。

农田污秽属于自然污秽,以尘土污染为主,还包含农药化肥、稻秆焚烧等污染,所以在农田附近的绝缘子在农业活动频繁的时候最容易受污染;沿海污秽也属于自然污秽,以盐碱污秽为主,所以沿海地区的绝缘子在海洋活动频繁的时候绝缘子外表面污秽也会发生变化;公路污秽属于工业污秽,以汽车尾气排放为主。未燃烧或燃烧不完全的 CH 、 NO_x 、 CO 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 以及微量的醛、酚、过氧化物、有机酸和含铅、磷汽油所形成的铅、磷污染等不仅直接危害人类健康,也给电力系统的安全运行带来极大的威胁;工业区污秽属于工业污秽,工厂等生产部门排放出大量的废气污染物;城区污秽也属于工业污秽,大量化石燃料的燃烧,汽车尾气的排放等都给城区带来大量的污染物。

污染源不同,绝缘子的积污规律也不同,工业区城区和公路工业区的 ESDD 在旱季仍处于较低水平的本质原因就是 2 处污染源与公路农田和沿海农田不同。

4 积污规律实际工程应用

通过对不同地形下绝缘子的污秽积累规律的分析,在实际工程应用中:

1)旱季为绝缘子污秽值较高的季节,但是主要关注的为沿海农田和公路农田或者相似的地形下的绝缘子,而工业区城区和公路工业区由于有热岛效应产生的降雨冲刷,其积污相对较轻;

2)在绝缘子选型上,沿海农田和公路农田应装备耐污等级较高的,4 个地形下的绝缘子都要能承受较大的峰值污秽。

5 结语

笔者通过对沿海农田、公路农田、公路工业区、工业区城区 4 个试验点的绝缘子自然积污情况进行了对比分析,得出它们的异同,总结了各个地形下绝缘子随季节变化的规律,并分析了它们的污秽化学成分及其来源。最后得出以下结论:

1)绝缘子表面积污受降水量的影响较大。通常,绝缘子表面积污雨季时较低,旱季时较高,年度其

最大积污量出现在雨季第 1 场降雨之前。

2)相对来说,绝缘子的 ESDD 受降雨影响很大, NSDD 受降雨影响较小。

3)从线性相关性分析:公路农田和沿海农田的 ESDD 变化规律相似,公路工业区和工业区城区的 ESDD 和 NSDD 变化规律都很相似。

4)沿海农田和公路农田的绝缘子污秽近似属于自然污秽,公路工业区和工业区城区的绝缘子污秽属于工业污秽,2 种情况下绝缘子表面积污规律差异较大。

5)根据对污秽的化学成分分析发现,污染源是影响绝缘子污秽积累的重要因素之一。沿海农田不溶物污秽以 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主;公路农田以 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 为主;公路工业区以 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 为主;工业区城区以 F^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主。沿海农田污秽中的不溶物以 Al_2O_3 、 CaSO_4 为主;公路农田以 SiO_2 、 CuO 、 CaO 为主;公路工业区以 SiO_2 、 CuO 、 CaSO_4 为主;工业区城区以 CuO 、 CaSO_4 为主。

参考文献:

- [1] 李震宇,梁曦东,王彬,等.直流电压下复合绝缘子的自然积污试验[J]. 电网技术,2007,31(14):10-14.
LI Zhen-yu, LIANG Xi-dong, WANG Bin, et al. Natural pollution deposit test of polymeric insulators operated under DC voltage[J]. Power System Technology, 2007, 31(14):10-14.
- [2] CIGRE TF 33.04.01. Polluted insulators: a review of current knowledge[R]. Paris: CIGRE Brochure 158, 2000.
- [3] 吴东. 特高压直流输电外绝缘设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 7-8.
WU Dong. Outdoor insulation design of UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 7-8.
- [4] SU Z Y, LIANG X D, YIN Y, et al. Outdoor insulation selection method of HVDC lines [C]//Proceedings of the 14th International Symposium on High Voltage Engineering. Beijing: [s.n.], 2005: 403.
- [5] GUBANSKI S M, WANKOWICZ G J. Distribution of natural pollution surface layers on silicone rubber insulators and their UV absorption[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1989, 24(4): 689-697.
- [6] 汤存燕,梁曦东. 国外直流合成绝缘子运行及自然污秽试验[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 50-53.
TANG Cun-yan, LIANG Xi-dong. A brief introduction to service performance and natural contamination test on abroad DC polymeric insulators[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 50-53.
- [7] 张开贤. 悬式绝缘子串自然污秽规律的探讨[J]. 电网技术, 1997, 21(3): 39-43.

- ZHANG Kai-xian. Rule of distribution of natural pollution deposition on suspension insulator string[J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 39-43.
- [8] 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分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 22-25.
- SONG Yun-hai, LIU Gang, LI Heng-zhen. Comparative analysis of natural contamination composition on insulators at highway area and highway-farmland area[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 22-25.
- [9] 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 Zhi-yi, LIU Yan-sheng. 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.
- [10] SHARIATI M R, MORADIAN A R, GHAEMI M R, et al. Pollution measurement based on DDG method for different type of insulator profile [C]//2004 CIGRE Session. Paris: IEEE, 2004: 401.
- [11] 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 Guang-ya. Elementary analysis of pollution rules of insulators on ± 500 kV DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 4.
- [12] 贺博, 万军, 陈邦发, 等. 人工模拟沙尘气候环境下线路绝缘子积污特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1510-1514.
- HE Bo, WAN Jun, CHEN Bang-fa, et al. Contamination depositing characteristics of suspension insulators under sandstorm circumstance simulated artificially[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12): 1510-1514.
- [13] 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 Yong-yao. Comparison of insulator pollution performance of the natural product[J]. East China Electric Power, 1989, 17(9): 7-10.
- [14] 马仪, 侯亚非, 文华, 等. 高海拔特高压直流换流站外绝缘自然积污状况研究[J]. 云南电力技术, 2007, 35(6): 26-32.
- MA Yi, HOU Ya-fei, WEN Hua, et al. Research of high-altitude HVDC converter station external insulation pollution status of the natural product[J]. Yunnan Electric Power, 2007, 35(6): 26-32.
- [15] 谭捷华, 肖勇, 蔡炜, 等. 直流线路绝缘子串自然积污盐密测量方法[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 52-53.
- TAN Jie-hua, 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.
- [16] 曾侠, 钱光明, 陈特固, 等. 广东省沿海城市热岛特征分析[J]. 气象, 2006, 32(11): 94-97.
- ZENG Xia, QIAN Guang-ming, CHEN Te-gu, et al. Characteristics of urban heat island effect in the coastal cities of Guangdong[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(11): 94-97.
- [17] 宋轩, 段金龙, 杜丽平. 城市热岛效应研究概况[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(3): 68-72.
- SONG Xuan, DUAN Jin-long, DU Li-ping. Urban heat island effect[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009, 32(3): 68-72.
- [18] 何发亮. 铁道复合绝缘子在高潮湿、高污秽长隧道中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2010(6): 21-24.
- HE Fa-liang. The application of railway composite insulators on long tunnel under heavy moisture and pollution environment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(6): 16-20.
- [19] 孙廷玺, 张振旗. 湿沉降对珠海地区输电线路外绝缘的影响[J]. 电瓷避雷器, 2010(6): 1-5.
- SUN Ting-xi, ZHANG Zhen-qi. The influence of wet precipitation to the external insulation of transmission line in Zhuhai[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(6): 1-5.
- 张本皇(1989—), 男, 本科, 从事高压输电线路防污研究。
- 李恒真(1984—), 男, 博士研究生, 从事高压输电线路防污研究。
- 刘刚(1969—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为基于物联网的高压智能电网、过电压及其防护、电力设备外绝缘。
- 李立涅(1941—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 中国南方电网公司专家委员会秘书长, 华南理工大学电力学院名誉院长, 主要研究方向为直流输电关键技术、高压输电线路在线监测与故障诊断、电力系统过电压及其防护。
- 刘毅刚(1956—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压电缆线路的运行、安装和设计工作。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!